

УДК 621.43

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ У СВЕЧИ ЗАЖИГАНИЯ  
И В НАИБОЛЕЕ УДАЛЕННОЙ ОТ НЕЁ ЗОНЕ В ГАЗОВОМ ДВС**

© 2012

**А.П. Шайкин**, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»

**П.В. Ивашин**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления»

**И.Р. Галиев**, аспирант  
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания (ДВС); скорость; распространение пламени; зонд; ионный ток; контроль сгорания; зона; объем сгорания.

*Аннотация:* показана возможность получения адекватной информации о процессе сгорания датчиком ионизации, установленном в одном корпусе со свечой зажигания.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время существует множество методик позволяющих дать необходимую информацию о процессе горения топлива в камере сгорания (КС) ДВС. Достаточно отчетливые представления о характере химических процессов протекающих в двигателях позволяют получить методы, основанные на явлении ионизации пламени. Суть данного явления заключается в образовании заряженных частиц (ионов и электронов) в результате химической (во фронте пламени) или термической (в продуктах сгорания) ионизации [1, 2, 3, 4]. При хемо-ионизации экзотермические стадии реакции, идущие с участием молекул (атомов), находящихся в возбужденном состоянии, приводят к выделению энергии достаточной для возникновения ионизации, которая возникает в элементарном химическом акте, с образованием пары из иона и электрона. Для пламени, такой процесс идет как побочная реакция между компонентами участвующими в основной реакции горения. Также, имеются данные о непосредственном участии заряженных частиц в цепном механизме горения [5, 6].

Таким образом, процесс ионизации в зоне фронта пламени неразрывно связан как с химическими процессами горения, так и природой топлива.

Существуют различные способы регистрации параметров ионизации. Наиболее простым и удобным является метод ионизационных зондов (ИЗ). Положительным свойством метода является большой диапазон измерений (по давлению  $10^{-5} - 10^3$  Тор, по концентрации заряженных частиц  $10^7 - 10^{15}$  см<sup>-3</sup>), относительная дешевизна и простота использования. Кроме этого ионизационные датчики (ИД) позволяют определить многие параметры горения. Так амплитуда напряжения ионного тока отражает положение пика давления на индикаторной диаграмме и взаимосвязана с изменением величины средней скорости распространения фронта пламени. В зависимости от значений ионного тока и скорости пламени можно прогнозировать и определять концентрацию несгоревших углеводородов и оксидов азота в отработавших газах [7, 8]. Имеется отклик ионного тока на пропуски зажигания, изменения состава смеси

и степени сжатия [7]. Благодаря этому, метод ионизационных зондов используется для исследований сгорания в ДВС и газотурбинных двигателях, также имеются попытки применения этого метода в системах управления. То., учет относительной степени ионизации в пламени может быть целесообразным при интерпретации получаемых экспериментальных результатов и построении расчетных моделей горения.

В настоящее время, для регистрации ионного тока в цилиндре ДВС в основном применяется свеча зажигания (СЗ) [4, 9]. Использование СЗ в качестве ИД позволяет исследовать горение только в области электродов свечи, т.е. процесс распространения пламени в камере сгорания не рассматривается. Кроме этого, реализация систем регистрации ионного тока, внедренных в систему зажигания отличается достаточной сложностью. В отличие от таких систем, применение схем регистрации ионного тока в зонах удаленных от СЗ, значительно проще. Мониторинг ионного тока в этих зонах, позволит получать больший объем информации о процессе сгорания [10]. Однако установка ИД в КС поршневого ДВС – сложная конструкторская задача, требующая серьезного обоснования. Компромиссным вариантом, может стать создание ИД на базе СЗ с отдельным, удаленным от электродов свечи, зондом. Поскольку, модификация конструкции СЗ менее трудоемкий и затратный процесс, нежели изменение конструкции головки блока цилиндра ДВС. Также обоснованием использования той или иной конструкции служит информативность сигналов ИД, которая оценивается возможностью датчика определять основные параметры процесса сгорания в КС ДВС.

В связи с этим, целью данного экспериментального исследования являлся анализ информативности сигналов с ИД, установленного в свече зажигания и сравнения его с данными ИД, удаленного от СЗ в газовом ДВС.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

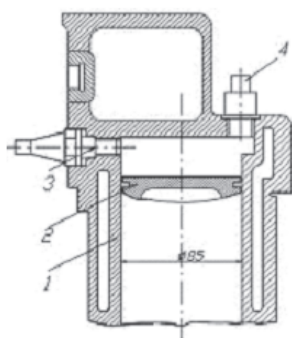
Исследования проводились на экспериментальном стенде. Основу стенда составляла установка для определения октановых чисел УИТ-85, позволяющая точно контролировать режимные параметры работы

двигателя и варьировать ими независимо друг от друга [7]. Эти особенности конструкции позволяют устанавливать влияние конкретного фактора на процесс сгорания. Таким образом, установка УИТ-85 дает возможность точно повторять режимы испытаний и может быть использована для исследования процесса сгорания.

В качестве топлива использовался сжатый природный газ с содержанием метана более 95%, в который 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, 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 которых располагается непосредственно в свече зажигания, на расстоянии 7 мм от её электрода, а другой на максимальном удалении от свечи зажигания, т.е. на расстоянии 85 мм. Таким образом, показание ИД, расположенного у свечи зажигания, будет информировать о процессах в первой фазе сгорания. А информацию о процессах в основной фазе сгорания предоставит ИД, удаленный от свечи зажигания. Поскольку известно, что первая фаза сгорания соответствует времени от начала воспламенения до развития устойчивого фронта пламени, а вторая фаза – это время от окончания 1-ой фазы до выгорания основной части ТВС, т.е. 80% объема смеси [11].



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

Методика проведения экспериментов заключалась в регистрации сигнала с ИД и записи осциллограмм с помощью АЦП. Осциллограммы импульсов записанных в отдельных циклах усреднялись по амплитуде напряжения ионного тока и промежутку времени от искрового разряда до возникновения импульса, т.е. достижения фронта пламени ИД.

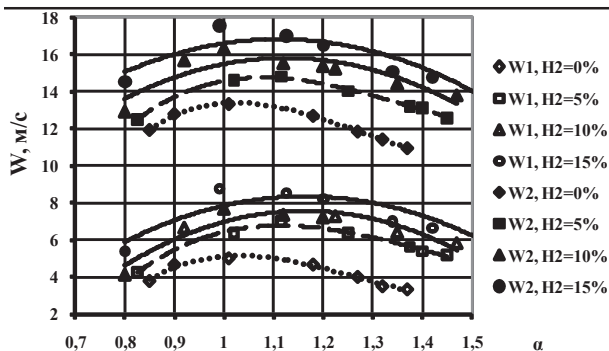
По результатам измерений промежутка времени ( $t$ ) от подачи искрового разряда до возникновения импульса напряжения ионного тока, было определено среднее значение скорости распространения фронта пламени ( $W$ ) по формуле:  $W=L/t$ , где  $L$  – расстояние от свечи зажигания до ИД.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

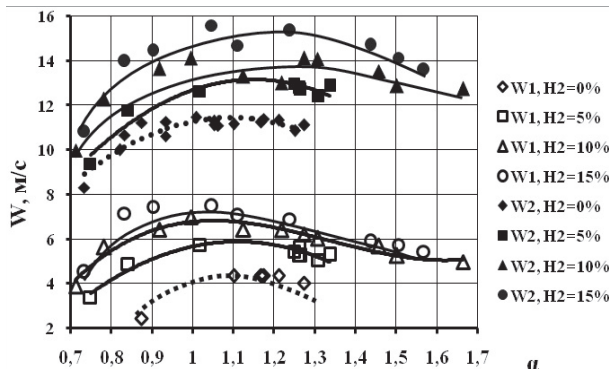
Зависимость средней скорости распространения фронта пламени от состава ТВС, доли добавляемого водорода и скоростного режима представлена на рис. 2 и 3.

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 ( $W1$ ) при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1$  составил 22%, а в основной фазе сгорания ( $W2$ ) 17%. При  $\alpha=1,3$  увеличение скорости в первой фазе сгорания составило 8%, а в основной фазе сгорания 7%. Т.е. с обеднением смеси интенсивность прироста средней скорости пламени снижается. Это объясняется тем, что прирост скорости при сильном обеднении смеси уже не компенсируется возрастанием турбулентности.



**Рис. 2.** Зависимость средней скорости распространения фронта пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода ( $n_{квд} = 900$  об/мин).



**Рис. 3.** Зависимость средней скорости распространения фронта пламени от коэффициента избытка воздуха, доли добавляемого водорода ( $n_{квд} = 600$  об/мин).

Анализ рис. 2 и 3, показывает, что для обоих скоростных режимов, наблюдается увеличение средней скорости распространения фронта пламени при 5, 10 и 15% добавке водорода в ТВС, при этом вне зависимости от концентрации водорода, сохраняется квадратичный закон зависимости скорости от коэффициента избытка воздуха. Наибольший рост скорости наблюдается при работе ДВС на бедной смеси с добавкой  $H_2=5\%$ . Так, в первой фазе сгорания при  $\alpha=1,3$  добавка  $H_2=5\%$  увеличивает в среднем скорость сгорания на 40% ( $n_{квд} = 900$  об/мин) и на 30% ( $n_{квд} = 600$  об/мин), а при  $\alpha=1$ , увеличение скорости  $W1$  составляет 23% ( $n_{квд} = 900$  об/мин) и 20% ( $n_{квд} = 600$  об/мин). В свою очередь, для основной фазы при  $\alpha=1,3$  добавка  $H_2=5\%$  повышает скорость сгорания на 20% ( $n_{квд} = 900$  об/мин) и на 15% ( $n_{квд} = 600$  об/мин), а при  $\alpha=1$ , увеличение скорости  $W2$  составляет 7% ( $n_{квд} = 900$  об/мин) и 10% ( $n_{квд} = 600$  об/мин). Причиной этому, по-видимому, является то, что увеличение доли водорода в ТВС приводит к росту содержания атомарного водорода, который наряду с другими радикалами играет основную роль в реакциях горения. Поскольку известно, что водород при высоких температурах превращается

в активный атомарный водород [12]. Следовательно, можно предположить, что добавка водорода способствует формированию высокоактивных центров химических реакций, снижению энергии воспламенения и расширению пределов сгорания исходного топлива.

Влияние скорости в первой фазе сгорания на развитие скорости в основной фазе сгорания при изменении коэффициента избытка воздуха от 0,7 до 1,65 представлено на рис. 4.

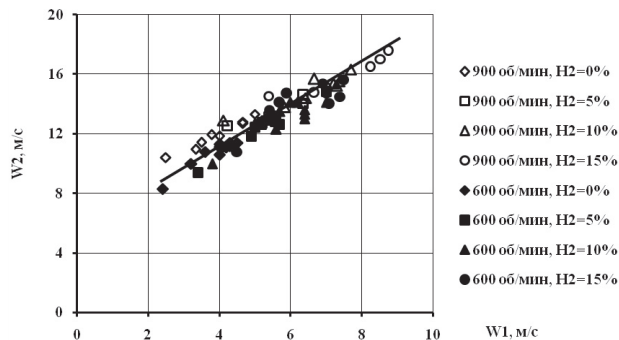


Рис. 4. Зависимость скорости распространения фронта пламени в основной фазе сгорания от скорости в первой фазе сгорания, с учетом скоростного режима ДВС и доли добавляемого водорода.

Экспериментально обнаружено, что, несмотря на изменение скоростного режима, коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода в ТВС, сохраняется линейная зависимость скорости в основной фазе сгорания, от скорости в первой фазе сгорания. При этом увеличение скорости W1 соответствует повышению скорости W2, т.е. протекание химико-физических процессов вначале сгорания топлива влияет на W2 и определяет её будущее значение. Таким образом, учет скорости распространения пламени в первой фазе сгорания позволит спрогнозировать развитие скорости в основной фазе сгорания, а, следовательно, и процессов, происходящих в ней. Следовательно, по данным ИД расположенного в СЗ, можно проводить мониторинг скорости сгорания в основной фазе сгорания, без использования дополнительного датчика.

Изменение амплитуды ионного тока от состава смеси, скоростного режима двигателя и добавок водорода в метановоздушную смесь представлено на рис. 5 и 6.

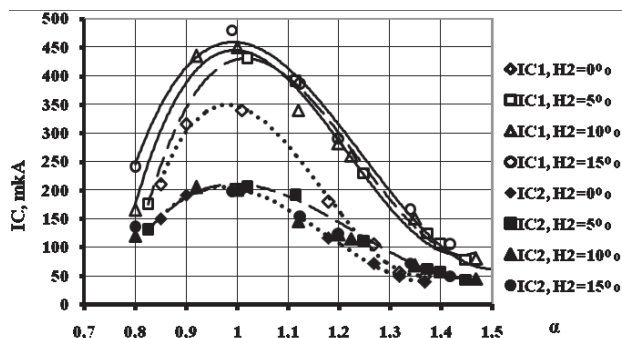


Рис. 5. Зависимость ионного тока от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в метановоздушную смесь ( $n_{квд} = 900$  об/мин).

Как видно из рисунков, зависимости величины тока от состава смеси имеют примерно одинаковую форму для всех изученных скоростных режимов и добавках водорода. Максимальные значения тока приходятся на области, близкие стехиометрическому составу смеси ( $\alpha \approx 1$ ).

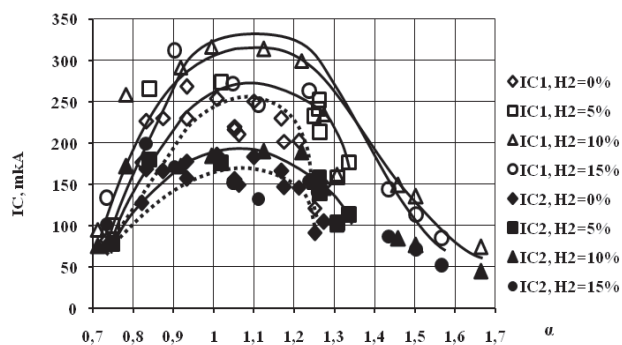


Рис. 6. Зависимость ионного тока от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в метановоздушную смесь ( $n_{квд} = 600$  об/мин).

Результаты исследований показывают, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала установки ( $n_{квд}$ ) с 600 до 900 об/мин происходит возрастание ионных токов в обеих фазах сгорания. Так, прирост тока в первой фазе сгорания (IC1) при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1$  составил 40%, а в основной фазе сгорания (IC2) 17%.

Было обнаружено, что для обоих скоростных режимов, наблюдается увеличение ионного тока только при 5% добавке водорода в ТВС, при дальнейшем увеличении концентрации водорода не наблюдается заметного роста ионного тока. Причина этого, заключается в зависимости электропроводности фронта пламени от концентрации свободного радикала  $CH^+$  [2, 6], которая, вероятно, зависит от доли углерода в ТВС и скорости распространения фронта пламени. Предположительно, 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. Соотношение этих величин определяет значение ионного тока в пламени [13].

Таким образом, характер изменения тока на датчиках ионизации в КС УИТ-85, расположенных у свечи зажигания и на максимальном удалении от неё, отражает влияние состава смеси, начальной турбулентности заряда (скоростного режима) и доли водорода в ТВС на характеристики процесса сгорания, а именно, на интенсивность протекания химических реакций горения во фронте пламени.

Влияние величины ионного тока в первой фазе сгорания на развитие ионного тока в основной фазе сгорания представлено на рис. 7.

Экспериментально обнаружено, что, несмотря на изменение скоростного режима, коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода в ТВС, сохраняется линейная зависимость IC2 от IC1. При этом увеличение значения IC1 соответствует повышению IC2, т.е. протекание химико-физических процессов вначале сгорания топлива влияет на IC2 и определяет её будущее значение.

Таким образом, учет величины ионного тока в первой фазе сгорания позволит спрогнозировать развитие ионного тока в основной фазе сгорания, а, следовательно, и процессов, происходящих в ней. Следовательно, по данным ИД расположенного в СЗ, можно проводить мониторинг ионного тока в основной фазе сгорания, без использования дополнительного датчика.



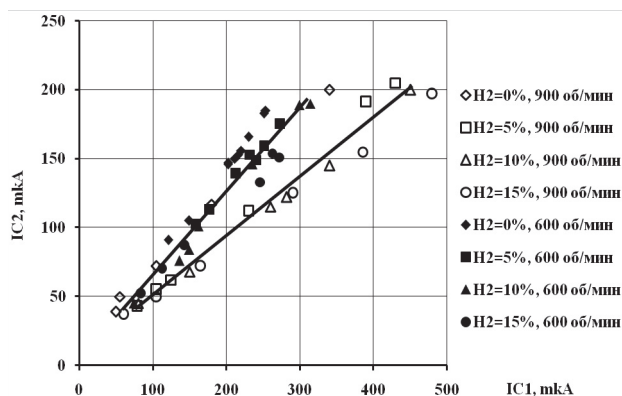


Рис. 7. Зависимость ионного тока в основной фазе сгорания от ионного тока в первой фазе сгорания при коэффициенте избытка воздуха от 1 до 1,65.

### ВЫВОДЫ

В результате экспериментов подтверждена высокая информативность сигналов ИД, установленных вблизи свечи зажигания и наиболее удаленной от свечи зажигания зоне: определена скорость распространения фронта пламени, сопровождающаяся ростом во всем диапазоне добавок водорода в метановоздушную смесь; показано, что характер изменения ионного тока отражает характеристики процесса сгорания. При этом значение ионного тока определяется соотношением массовой доли углерода и скорости распространения фронта пламени.

Определена линейная зависимость ионного тока и скорости распространения фронта пламени в основной фазе от ионного тока и скорости распространения пламени в первой фазе сгорания.

Использование ИД, установленного в свече зажигания позволит прогнозировать протекание процессов, происходящих не только непосредственно у ионизационного зонда (первая фаза сгорания), но и в областях удаленных от зонда (основная фаза сгорания).

*Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК № 14. В37. 21. 0308.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. - М.: Машиностроение, 1977.
2. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. - М.: Metallurgy, 1968.
3. Andersson I. Cylinder pressure and ionization current modeling for spark ignited engines // Doctoral Thesis, 2002.
4. Hossein A., Graffari A. Ion current simulation during the post flame period in SI engines // Iranian journal of mechanical engineering № 2, 2005.
5. Лаутон Д. Электрические аспекты горения. - М.: Энергия, 1976.
6. Проскудин В.Ф., Бережко П.Г., Беляев В.Н. Цепно-тепловой взрыв и степень ионизации водородовоздушного пламени // Водородный транспорт: безопасность, экономика № 2, 2004.
7. Ивашин П.В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока // автореф. канд. дисс. - Тольятти, 2004.
8. Коломиец П.В. Влияние скорости распространения пламени на выделение оксида азота при добавке водорода в бензиновые двигатели // автореф. канд. дисс. - Тольятти, 2007.
9. Gao Z., Wu X., Liu B. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fuelled with natural gas hydrogen blends with BSS de-noising method // International journal of hydrogen energy, 2010.
10. Ивашин П.В., Коломиец П.В. Использование ионизационного датчика, установленного в удаленной от свечи зажигания зоне камеры сгорания ДВС, для контроля сгорания // Вектор науки ТГУ. - 2010. - № 3.
11. Соколик А.С. Основы теории процесса нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием. - М.: АН СССР, 1951.
12. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. - Киев: Наукова думка, 1984.
13. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Влияние добавок водорода в метановоздушную смесь на связь электропроводности со скоростью распространения фронта пламени // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии, 2012.

## RELATIONSHIP CHARACTERISTICS OF FLAME PROPAGATION

## IN THE VOLUME OF THE COMBUSTION CHAMBER WITH THE SPARK PLUGS AND IN THE MOST REMOTE FROM IT IN THE AREA IN CNG ENGINES

© 2012

*A.P. Shaykin*, doctor of technical sciences,  
professor of the chair «Energy machines and control systems»

*P.V. Ivashin*, candidate of technical sciences,  
docent of the chair «Energy machines and control systems»

*I.R. Galiev*, postgraduate student  
*Togliatti state university, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** ICE; velocity; flame propagation; probe; ion current; control combustion; zone; volume combustion.

**Annotation:** This paper is examined to obtain information about the process of combustion ionization detector installed in the spark plug.