

УДК 621.434

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛАМЕНИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В УСЛОВИЯХ ДВС С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ**

©2011 П. В. Ивашин

Тольяттинский государственный университет

Экспериментально исследована возможность получения данных о протекании процесса сгорания в ДВС, показана корреляционная связь между ионным током и скоростью распространения пламени в двигателе с искровым зажиганием. Получена расчетная зависимость нормальной скорости распространения пламени от величины ионного тока.

*ДВС, горение, пламя, электропроводность, скорость распространения турбулентная, нормальная скорость распространения пламени, ионный ток.*

Динамика тепловыделения в рабочем цикле ДВС является основным параметром, определяющим его эффективность. Для глубокого анализа динамики тепловыделения необходима информация о протекании процесса сгорания в пространстве камеры сгорания (КС). Академик Б.С. Стечкин теоретически связывает энергетический баланс рабочего цикла со скоростью распространения пламени и приходит к выводу, что для исследования рабочего процесса ДВС недостаточно информации, полученной только из индикаторной диаграммы [1]. Особенно важно понимание локальных физических и химических свойств заряда для анализа внутреннего теплового баланса и процессов образования токсичных компонентов продуктов сгорания. В настоящее время при моделировании процесса сгорания в ДВС используются два основных механизма распространения пламени. Первый связан с распространением по камере сгорания зоны турбулентного горения значительной ширины [2, 3]. Второй механизм использует модель распространения турбулентного пламени Дамкелера [4], согласно которой в КС движется искривленный и разорванный фронт пламени с весьма развитой поверхностью. Причем продукты сгорания отделены от несгоревшей смеси фронтом пламени, толщиной которого пренебрегают. На каждом элементарном участке поверхности горения фронт пламени движется в сторону свежей смеси с нормальной (фундаментальной) скоростью распространения пламени. Нормальная скорость распространения пла-

мени  $U_n$  является важной характеристикой горючей смеси, определяемой в ламинарных условиях, и зависит от её химических свойств и внешних условий [5]. Представления о горении в ДВС уточнены с помощью современных оптических методов (например, ЛИФ-спектроскопии [5]). Показано, что в ДВС в зависимости от конструктивных параметров и режимов могут реализовываться оба механизма горения. Причем в большинстве режимов работы ДВС тонкий искривленный (иногда разорванный) фронт пламени существует при достаточно высоких уровнях турбулентности в КС [4]. Известные исследования [5,6] турбулентного горения показывают, что нормальная скорость распространения пламени оказывает влияние на скорость турбулентного горения как при незначительных масштабах турбулентности, так и при весьма высоком уровне турбулентности потока. В связи с этим для расчета скоростей распространения турбулентного пламени важно знание  $U_n$  в данных условиях (локальных концентрациях реагентов и значениях температуры и давления). Известно, что нормальная скорость распространения пламени значительно зависит от данных факторов, а также от газодинамических условий через изменения диффузии реагентов под воздействием мелкомасштабной турбулентности. Поэтому точное определение значений  $U_n$  в конкретной зоне КС в данный момент – актуальная для двигателестроения, но весьма сложная исследовательская задача.

Среди известных способов экспериментального исследования горения в ДВС выделяется метод, основанный на аномально вы-

сокой электропроводности пламени углеводородов [7,8], характеризующийся достаточно высокой информативностью и относительно недорогой аппаратной реализацией. В исследованиях ионизации пламени углеводородов [7] с помощью ионизационных (электростатических) зондов показано, что концентрация заряженных частиц во фронте пламени значительно превышает равновесную для температуры горения и определяется химическими механизмами реакций горения углеводородов. Поэтому метод ионизационных зондов эпизодически используется для исследовательских целей [9,10], а также известны попытки его использования в системах адаптивного управления ДВС [11,12].

Анализ исследований, посвященных физике ионизации пламени углеводородов, позволил высказать гипотезу: *электропроводность пламени в камере сгорания ДВС зависит от скорости реакций горения*. Практически это означает, что измеренные значения величины ионного тока должны иметь корреляцию со значениями нормальной скорости распространения пламени, так как нормальная скорость пламени характеризует интегральную скорость химических реакций при горении. Таким образом, подтверждение или опровержение данной гипотезы позволит обосновать возможность использования ионизационных зондов в КС ДВС не только как сенсоров наличия пламени, но и как более тонкого исследовательского инструмента, позволяющего оценивать интенсивность реакций горения в ло-

кальных зонах КС. Поэтому целью работы является экспериментальная проверка состоятельности данной гипотезы.

Для решения поставленной задачи собрана экспериментальная установка на базе одноцилиндровой испытательной установки УИТ-85. Данная установка оснащена системами топливоподачи, зажигания, измерений и регистрации. В конструкции отсутствует дроссельная заслонка, коленчатый вал приводится в действие электродвигателем. Возможны два скоростных режима: 600 и 900 мин<sup>-1</sup>. Для проведения эксперимента установка была оснащена системой возбуждения и регистрации ионного тока, а также системой сбора данных, в которой регистрировалась и сохранялась информация о режимных параметрах и протекании ионного тока. Ионизационный зонд устанавливался в наиболее удаленную от свечи зажигания зону КС (рис. 1). Конструкция ионизационного зонда предусматривает наличие «заширмленной» зоны, где влияние крупномасштабной турбулентности незначительно [13].

Методика эксперимента заключалась в записи осциллограмм ионного тока при изменении варьируемого фактора. Варьируемым фактором был состав ТВС, поскольку это основной фактор, влияющий на нормальную скорость распространения пламени в данных условиях. Влияние данного фактора было оценено на двух скоростных режимах, т.е. при различных скоростях потока и степени турбулентности, и на трех степенях сжатия (различных давлениях и температурах в КС в начале сгорания). Угол опережения зажигания

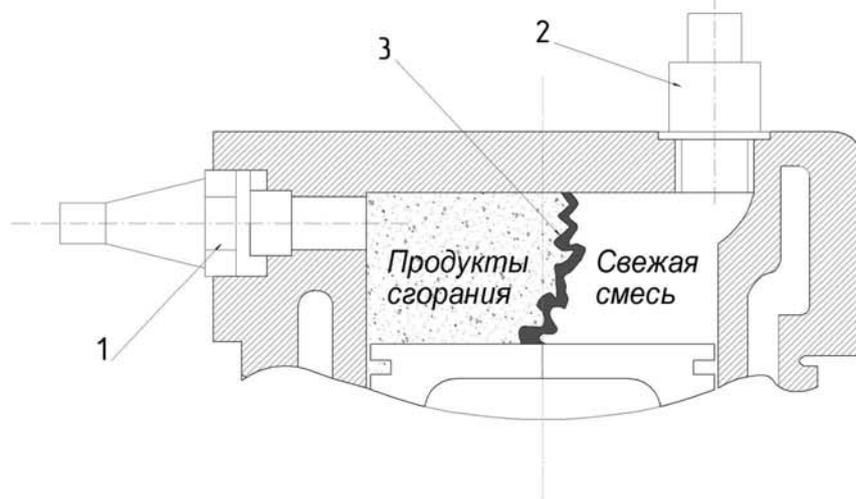


Рис. 1. Схема камеры сгорания экспериментальной установки:  
1 – свеча зажигания, 2 – ионизационный зонд, 3 – фронт пламени

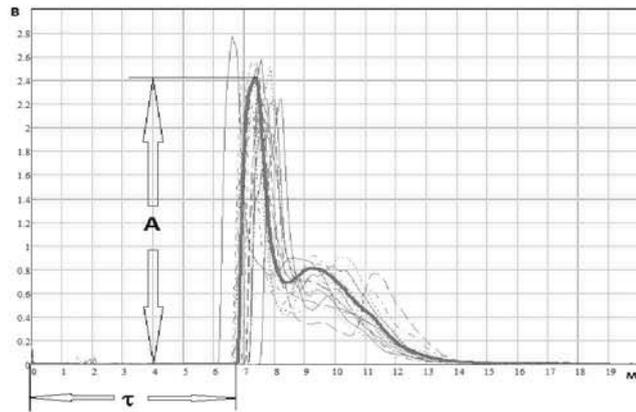


Рис.2. Осциллограмма импульса ионного тока и параметры оценки

поддерживался постоянным. При анализе осциллограмм ионного тока (рис. 2), записанных на различных режимах, определялись следующие параметры протекания ионного тока:

- время  $\tau$  от искрового разряда до возникновения импульса ионного тока (т.е. до момента подхода фронта пламени к ионизационному зонду),
- амплитуда  $A$  импульса ионного тока.

Затем по полученным значениям  $\tau$  оценивалась средняя (в период от искрового разряда до достижения пламенем ионизационного зонда) скорость распространения пламени в движущемся потоке:

$$W = \frac{Sf}{\tau} - Vk, \quad (1)$$

где  $Sf$  – характерный путь распространения пламени по КС,  $Vk$  – конвективная (переносная) скорость потока смеси в КС.  $Vk$  принималась постоянной для данного скоростного режима (2 м/с для 600 мин<sup>-1</sup> и 4.3 м/с для 900 мин<sup>-1</sup>), оценивалась косвенно с помощью совместного анализа индикаторной диаграммы и осциллограммы ионного тока.

Величина ионного тока определялась по закону Ома:

$$I = A/R, \quad (2)$$

где  $R$  – характерная для измерительной цепи постоянная.

В результате анализа осциллограмм получены зависимости средней турбулентной скорости пламени и величины ионного тока от состава смеси (рис. 3,4).

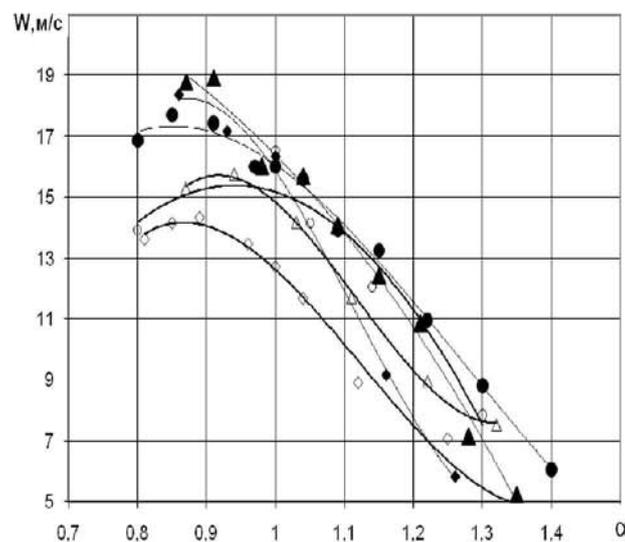


Рис. 3. Зависимость средней скорости распространения турбулентного пламени от состава смеси  
 Скоростной режим: 600 мин<sup>-1</sup> –  $\diamond$ ,  $\triangle$ ,  $\circ$ ; 900 мин<sup>-1</sup> –  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$   
 Степень сжатия: 5 –  $\diamond$ ,  $\blacklozenge$ ; 7 –  $\triangle$ ,  $\blacktriangle$ ; 8 –  $\circ$ ,  $\bullet$

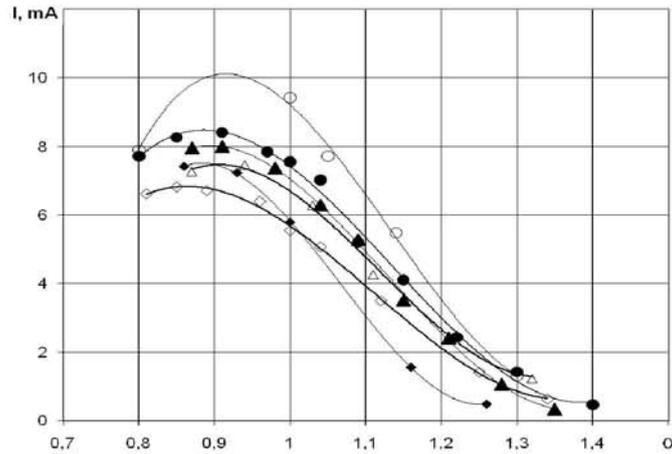


Рис. 4. Зависимость величины ионного тока от состава смеси (обозначения режимов аналогичны рис. 3)

Данные зависимости характеризуются наличием максимальных значений скорости в районе  $\alpha = 0.9$ , т.е. мощностного состава, и быстрым убыванием при обеднении смеси. Следует отметить, что ввиду отсутствия дроссельной заслонки можно считать изменения скорости пламени на данном режиме обусловленными только составом смеси, а не газодинамическими условиями в КС.

На основании экспериментально определенных значений средней турбулентной скорости пламени были оценены значения нормальной скорости распространения пламени в данных условиях. Значение нормальной скорости распространения пламени в условиях ДВС может быть получено только расчетом с использованием измеренных значений скорости турбулентного пламени. Для такой оценки  $U_n$  использовано эмпирическое уравнение А.В. Талантова [6]:

$$\frac{U_T}{U_H} = 1 + \frac{W'}{U_H} + (\theta - 1) \sqrt{1 - \left(\frac{U_T}{U_H}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $U_T$  – скорость турбулентного пламени,  $W'$  – пульсационная скорость (принималась равной половине средней скорости поршня),  $\theta$  – отношение температур до и после горения.

Модель Талантова выбрана исходя из высокого соответствия экспериментальным данным, в т.ч. полученным при сжигании бензиновоздушных смесей.

Используя вместо  $U_T$  экспериментально найденные значения средней скорости распространения пламени  $W$ , уравнение (3) решено относительно  $U_n$ . То есть для каждой экспериментальной точки, исходя из измеренных значений средней скорости турбулентного пламени, найдены значения нормальной скорости распространения пламени. Найденные значения  $U_n$  являются средними за время  $\tau$ . В результате построена зависимость средних значений нормальной скорости распространения пламени в данных условиях от состава смеси (рис. 5).

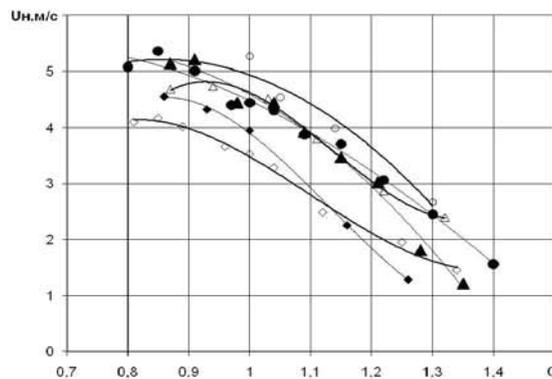


Рис. 5. Зависимость расчетных значений нормальной скорости распространения пламени от состава смеси  
 Скоростной режим:  $600 \text{ мин}^{-1}$  –  $\diamond$ ,  $\triangle$ ,  $\circ$ ;  $900 \text{ мин}^{-1}$  –  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$   
 Степень сжатия: 5 –  $\diamond$ ,  $\blacklozenge$ ; 7 –  $\triangle$ ,  $\blacktriangle$ ; 8 –  $\circ$ ,  $\bullet$

Данная зависимость имеет характерный максимум в районе  $\alpha = 0.9$ , по форме и значениям близка к имеющимся экспериментальным данным для бензиновоздушных смесей при данных температурах и давлениях.

Непосредственная проверка взаимосвязи экспериментальных значений величины ионного тока и средних за время  $\tau$  значений нормальной скорости распространения пламени, определенных с помощью уравнения (3), показала, что имеет место практически линейная зависимость  $U_n$  от  $I$ . Для анализа данной взаимосвязи при изменении состава смеси в разных начальных условиях (при разных степенях сжатия и оборотах) были введены относительные единицы величины ионного тока  $I_o$  и нормальной скорости распространения пламени  $U_o$ :

$$I_o = I_i / I_{(\alpha=1)_i}, \quad U_o = U_{n_i} / U_{n_{(\alpha=1)_i}}, \quad (4)$$

где  $I_i, U_{n_i}$  – значения при данном  $\alpha$  на  $i$ -м режиме;

$I_{(\alpha=1)_i}, U_{n_{(\alpha=1)_i}}$  – значения при  $\alpha = 1$  на  $i$ -м режиме.

Полученная взаимосвязь  $I_o$  и  $U_o$  может быть аппроксимирована линейной функцией (рис. 6), что говорит о достаточно сильной корреляции ионного тока и нормальной скорости распространения пламени. Причина данной корреляции, видимо, заключается в общности факторов, определяющих значения. Т.е. повышение содержания концентрации заряженных частиц во фронте пламени (увеличение ионного тока) и увеличение нормальной скорости распространения пламени обусловлены повышением интегральной скорости химических реакций во фронте пламени.

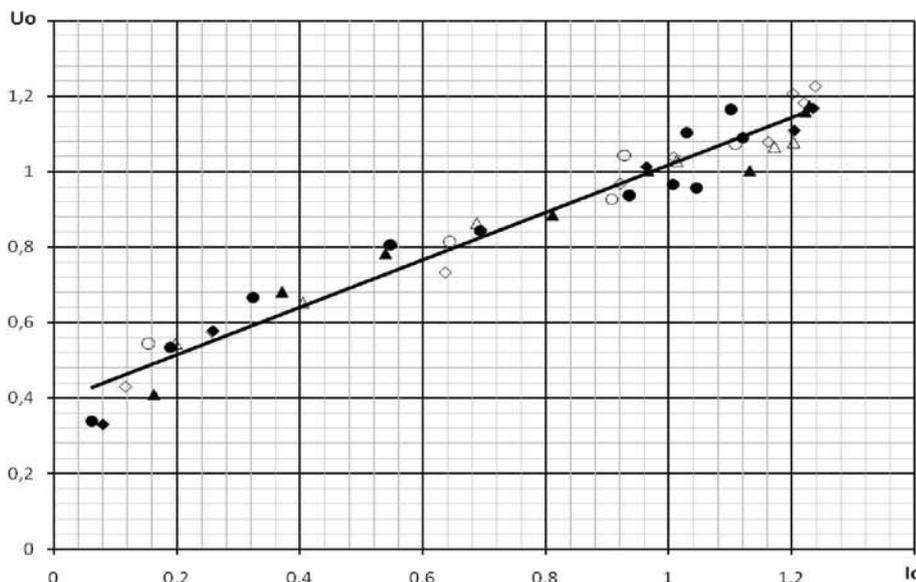


Рис.6. Взаимосвязь относительных значений величины ионного тока и нормальной скорости распространения пламени (обозначения режимов аналогичны использованным выше)

### Выводы

- подтверждена гипотеза взаимосвязи ионного тока и интенсивности химических реакций горения в КС ДВС;

- сложное для анализа в условиях ДВС значение  $U_n$  может быть оценено с помощью непосредственного измерения ионного тока;

- ионизационные зонды в КС должны использоваться не только как датчики наличия пламени, но и как источники информации об интенсивности химических преобразований во фронте пламени;

- практическое применение полученных результатов возможно при проектировании и доводке новых КС, а также при модернизации существующих (замена топлива, введение присадок, изменение степени рециркуляции отработавших газов и т.д.);

- необходимо дальнейшее развитие исследований и подтверждение данной гипотезы на различных видах топлива и других типах КС.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.2/10310.

**Библиографический список**

1. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Текст] / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский [и др.] - М.: Изд-во АН СССР, 1960.
2. Иноземцев, Н.В. Процессы сгорания в двигателях [Текст] / Н.В. Иноземцев, В.К. Кошкин; под общ. ред. Иноземцева Н.В. - Л.: Машгиз, 1949.
3. Соколик, А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах [Текст] / А.С. Соколик. - М.: АН СССР, 1960.
4. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals/ J.B. Heywood, McGraw-Hill, N.Y., 1988.
5. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ: [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; под ред. Власова; пер. с англ.; - М.: Физматлит, 2006.
6. Талантов, А.В. Основы теории горения [Текст] / А.В. Талантов - Казань: Изд-во КАИ им. А.Н.Туполева, 1975.
7. Степанов, Е.М. Ионизация в пламени и электрическое поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков. - М.: Металлургия, 1968.
8. Мальцев, В.М. Основные характеристики горения [Текст] / В.М. Мальцев, М.И. Мальцев, Л.Я. Кашпоров. - М.: Химия, 1977.
9. Мандельштам, А.А. Исследование распространения пламени и фаз процесса сгорания в двигателе АЗЛК-412 [Текст] / А.А. Мандельштам, Б.Я. Черняк // Тр. МАДИ. М., 1975. Вып. 96.
10. Corcione, F.E. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion Current System and Optical Diagnostics of Radical Species / F.E. Corcione, M.V. Bianca, S.S. Merola // Istituto Motori - CNR Via G. Marconi, 8 - 80125 Napoli (Italy), 2008.
11. Kramer, M. Approaches to gasoline engine control involving the use of ion current sensory analysis / M. Kramer, K. Wolf. / SAE tech. paper 905007, 1990.
12. In cylinder air/fuel ratio approximation using spark gap ionization sensing / E.N. Balles, E.A. VanDyne, A.M. Wahl [et al] // SAE paper № 980166, 1998.
13. Ивашин, П.В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока [Текст]: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / П.В. Ивашин. - Тольятти: ТГУ, 2004.

## APPLICATION OF FLAME ELECTRO CONDUCTIVITY FOR COMBUSTION ANALYSIS IN SPARK IGNITION ICE

©2011 P. V. Ivashin

Togliatti state university

The additional possibility of ICE combustion data accessing was experimental investigated. Correlation between ion current and flame propagation speed in spark ignition engine for some different engine condition displayed. Calculated laminar flame propagation speed dependence on ion current was received.

*ICE, flame, electroconductivity, turbulent flame speed, laminar flame propagation speed, ion current.*

### Информация об авторах

**Ивашин Павел Валентинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели» Тольяттинского государственного университета. Тел.: 8(8482) 546458, 539265, 8-927-770-72-21. факс 539479. E-mail: [ivashinpv@rambler.ru](mailto:ivashinpv@rambler.ru). Область научных интересов: процессы горения, рабочие процессы тепловых машин.

**Ivashin Pavel Valentinovich**, Candidate of Technical Sciences, docent of Heat engine department Togliatti state university. Phone: 8(8482) 546458, 539265, 8-927-770-72-21. E-mail: [ivashinpv@rambler.ru](mailto:ivashinpv@rambler.ru). Area of research: combustion processes, heat machines working processes.