

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО ДАТЧИКА, УСТАНОВЛЕННОГО В УДАЛЁННОЙ ОТ СВЕЧИ ЗАЖИГАНИЯ ЗОНЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДВС, ДЛЯ КОНТРОЛЯ СГОРАНИЯ

© 2010

П.В. Ивашин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели»
П.В. Коломнец, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: двигатель; камера сгорания; ионизация; зонд; ток; контроль сгорания.

Аннотация: проанализирована возможность получения адекватной информации о сгорании датчиком ионизации, установленном в наиболее удаленной от свечи зажигания зоне камеры сгорания.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, связанные с разработкой адаптивных систем управления двигателя внутреннего сгорания (ДВС), в свете повышающихся требований к топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) ДВС, безусловно, актуальны. Значительный интерес разработчиков вызывает использование в системах управления двигателем электропроводности пламени углеводородов, как основы работы ионизационных датчиков (ИД).

В ряде работ [1,2], экспериментально установлена аномально высокая ионизация пламени углеводородо-воздушных смесей, значительно превышающая равновесную при температурах, характерных для ДВС. Причем это явление характерно только для углеводородов и отсутствует, например, в пламени H_2 или CO , т.е. ионизация пламени тесно связана с химией процесса горения углеводородного топлива. Определено, что основными носителями заряда, отвечающими за протекание тока в пламени, являются свободные электроны [2]. Несмотря на это, ток, возникающий в пламени в электрическом поле, традиционно называют «ионным».

Как показывает анализ современных публикаций, для регистрации ионного тока в цилиндре ДВС в основном используется свеча зажигания (СЗ) как ИД. Для этого после искрового разряда на электроды СЗ подается напряжение и анализируется протекание ионного тока. В результате многочисленных экспериментов выявлены закономерности, связывающие величину ионного тока с такими параметрами процесса сгорания как соотношение топливо-воздух [3], фаза максимума давления на индикаторной диаграмме [4]. Использование свечи зажигания как ИД позволяет проводить в основном диагностику аномального сгорания (пропуски зажигания, детонационное сгорание [5]) и исследовать горение в узкой области возле СЗ. При этом информация о химических превращениях во фронте пламени может быть оценена только в начальный период сгорания, когда пламя охватывает электроды СЗ, после этого сигнал может содержать информацию только о состоянии продуктов сгорания, окружающих электроды СЗ. Таким образом, не может быть проанализирован процесс распространения пламени по камере сгорания (КС).

Аппаратная реализация систем регистрации ионного тока, внедренных в систему зажигания отличается достаточной сложностью. В отличие от таких систем, схемы регистрации ионного тока в удаленных от СЗ зонах, значительно проще. Мониторинг ионного тока в этих зонах, позволит получать больший объем информации о процессе сгорания. Прежде всего, это связано с возможностью оценки времени распространения пламени по объёму КС. Это может быть

использовано как при анализе процесса сгорания в реальном времени, так и для исследовательских целей, относящихся к моделированию горения в цилиндре поршневого ДВС.

Однако установка ИД в КС поршневого ДВС – достаточно сложная конструкторская задача, особенно для многоклапанных головок цилиндров. Поэтому, необходимо достаточно серьезное обоснование целесообразности установки ИД в КС. Обоснованием может служить высокая информативность сигналов ИД, установленного в удаленной от СЗ зоне КС. Критерием информативности является получение информации о важнейших параметрах, определяющих сгорание в режиме реального времени или с задержкой, значительно меньшей продолжительности переходных режимов ДВС. В связи с этим проведены экспериментальные исследования. Целью экспериментов являлся анализ информативности сигналов ИД, установленного в наиболее удаленной от СЗ зоне КС. Информативность сигналов оценивалась с помощью зависимостей ионного тока от основных факторов, определяющих процесс сгорания в ДВС, а также выявлением взаимосвязи ионного тока с некоторыми параметрами, позволяющими оценивать эффективность и токсичность рабочего процесса.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились на одноцилиндровой четырёхтактной исследовательской установке УИТ-85 с изменяемой степенью сжатия. Обороты поддерживались постоянными: 600 и 900 мин⁻¹. Угол опережения зажигания составлял 13 градусов поворота коленчатого вала (° пкв). Устройство установки позволяет точно контролировать температуру охлаждающей жидкости, степень сжатия, обороты коленчатого вала, угол опережения зажигания и варьировать ими независимо друг от друга. Для мониторинга ионного тока был изготовлен ИД.

ИД представляет собой электрод, изолированный от корпуса двигателя керамической соломкой. Фронт пламени, омывая электрод и корпус замыкает электрическую цепь, в которой возникает импульс ионного тока, обусловленный электропроводностью углеводородного пламени. Продолжительность сигнала определяется временем замыкания цепи, т.е. временем существования пламени в зоне ИД.

На рис. 1 показано место установки ИД. ИД находится на максимальном удалении от СЗ. Сигналы ИД регистрировались с помощью системы сбора данных L-card.

Для определения выделений токсичных компонентов в ОГ использовался микропроцессорный газоанализатор «Автотест-02» (0 класс точности).

Варьируемыми факторами были:



Рис. 1. Расположение ИД в КС УИТ-85: 1 – свеча зажигания; 2 – ИД; 3 – фронт пламени

- коэффициент избытка воздуха (α) от 0.8 до пределов бедного срыва пламени,
- добавка газообразного водорода в топливно-воздушную смесь (ТВС) до 5 % массы от расхода бензина;
- степень сжатия (ϵ) от 5 до 8 (т.е. начальные температура и давление заряда),
- частота вращения коленчатого вала (n) - 600 и 900 об/мин (турбулентность заряда)

Таким образом, варьировались факторы, определяющие условия сгорания. Т.е. значимые для сгорания «входные» факторы, которые конструктивно или командно могут изменяться в процессе эксплуатации двигателя.

Методика проведения эксперимента заключалась в одновременной регистрации осциллограмм ионного тока, измерении расходов топлива, воздуха и водорода, а также токсичности ОГ.

Осциллограммы ионного тока синхронизировались по моменту искрового разряда. Типовой вид осциллограммы показан на рис. 2. Параметрами оценки протекания ионного тока в данной работе были амплитуда сигнала I (мкА) и время t_{ion} от искрового разряда до возникновения сигнала (мс).

Оцениваемые параметры сигнала ИД характеризуются межцикловым рассеиванием значений. Данное явление не является погрешностью метода, а обусловлено флуктуациями пламени в поршневом ДВС. Поэтому для анализа использованы осредненные по 20–40 циклам сгорания параметры ионного тока.

Предварительно были оценены случайные ошибки определения параметров ионного тока, обусловленные стохастичностью процесса:

- по времени от искрового разряда до возникновения сигнала ионного тока - до 4° пкв это составило $1-2^\circ$ пкв.
- по амплитуде сигнала до 6 %. Увеличение точности оценки параметров ионного тока возможно при увеличении числа последовательно зарегистрированных сигналов на одном режиме. Для первичного анализа имеющийся точности достаточно.

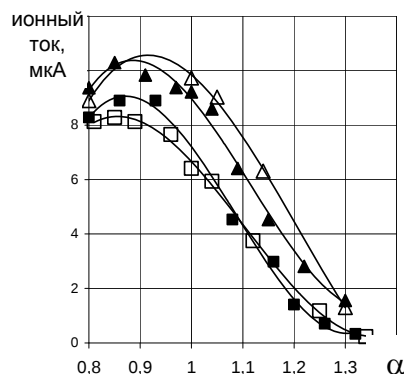


Рис. 3. Зависимость ионного тока от состава ТВС:
□ $n = 600 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 5$; $\triangle$ $n = 600 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 8$;
■ $n = 900 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 5$; $\blacktriangle$ $n = 900 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 8$

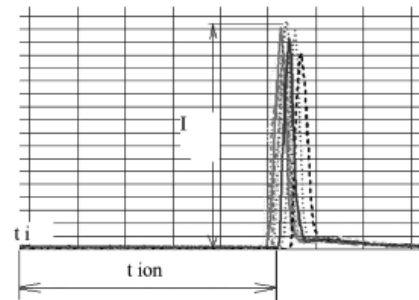


Рис. 2. Типовой вид осциллограммы: t_i – момент воспламенения

Погрешность определения количества доли добавляемого в ТВС водорода составила 5 %, коэффициента избытка воздуха - 3 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления зависимостей ионного тока от варьируемых факторов вместо времени t_{ion} в мс в качестве параметра был использован соответствующий угол пкв Φ_r , который условно называли фазой возникновения сигнала ионного тока в цикле. Это позволило сравнивать разные скоростные режимы. Таким образом, сигнал ионного тока может быть проанализирован по фазе и амплитуде.

Амплитуда сигнала отзывается на изменение варьируемых факторов (рис.3). Характерно отсутствие сигнала при пропусках зажигания. При выключенном зажигании или отсутствующей подаче топлива импульсы проводимости отсутствовали.

Зависимости амплитуды и фазы сигнала ионного тока от состава ТВС представлены на рис.3 и рис.4.

Имеется максимум амплитуды ионного тока в области обогащенных ТВС ($\alpha = 0.85-0.95$) и практически линейная зависимость в зоне бедных смесей. Аналогично, фаза сигнала имеет минимум в зоне $\alpha = 0.85-0.95$.

При увеличении ϵ (т.е. при повышении давления и температуры в конце сжатия) амплитуда ионного тока возрастает, а фаза сигнала несколько снижается.

Зависимости амплитуды и фазы сигнала ионного тока от добавки водорода в ТВС разных составов представлено на рис. 5 и 6. Показано, что добавка водорода в бедные ТВС оказывает значительное влияние на ионный ток. Так для $\alpha = 1.3$ амплитуда сигнала при добавке около 4 % водорода повысилась с 1,5 до 4,9 мкА, а фаза сигнала при этом снизилась с 40 до 24° пкв.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ экспериментальных зависимостей амплитуды и

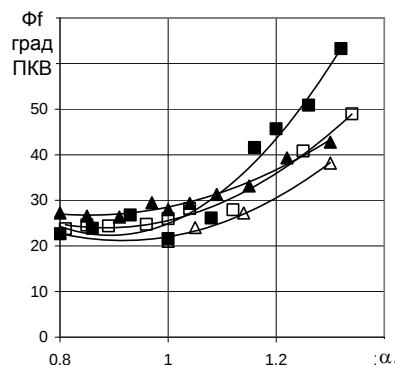


Рис. 4. Зависимость Φ_r от состава ТВС:
□ $n = 600 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 5$; $\triangle$ $n = 600 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 8$;
■ $n = 900 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 5$; $\blacktriangle$ $n = 900 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon = 8$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОНИЗИРОВАННОГО ДАТЧИКА, УСТАНОВЛЕННОГО ...

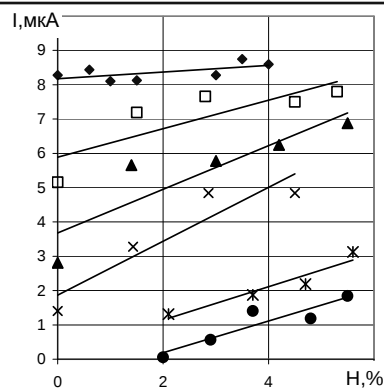


Рис. 5. Зависимость ионного тока от состава ТВС:

♦ $\alpha = 0,79-0,82$, □ $\alpha = 1,07-1,11$, ▲ $\alpha = 1,16-1,22$, × $\alpha = 1,28-1,32$,
* $\alpha = 1,4-1,42$, ● $\alpha = 1,46-1,52$

фазы сигнала ионного тока от варьируемых факторов, представленных на рис. 3-6 позволяет сделать вывод о том, что изменение варьируемых факторов может быть оценено как с помощью амплитуды, так и с помощью фазы сигнала. Причём эти параметры изменяются во взаимосвязи между собой: в случае возрастания амплитуды уменьшается фаза и, наоборот, при снижении амплитуды фаза возрастает.

Наличие экстремумов амплитуды и фазы сигнала ИД от состава ТВС в области $\alpha = 0,85-0,95$, а также линейная зависимость амплитуды в зоне $\alpha = 1,0-1,3$ могут быть использованы при управлении двигателем с обратной связью.

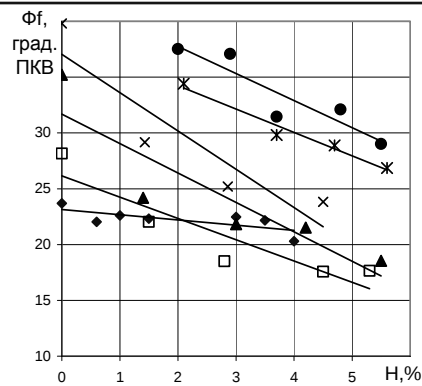
Зависимость параметров оценки сигнала от добавки водорода позволяет сказать о возможности анализа состава топливной композиции по сигналу ИД. При этом слабое влияние водорода на сигнал в области обогащённых смесей связано с действием водорода как промотора горения, а не отсутствием чувствительности ИД.

Для первичного анализа взаимосвязи ионного тока с динамикой сгорания была использована фаза максимума давления в цилиндре – Фрг (угол пкв от искрового разряда до достижения максимума давления в цикле), концентрация несгоревших углеводородов (CH) в ОГ, концентрация оксидов азота (NOx) в ОГ.

Фаза максимума давления в цилиндре в условиях данной установки была определена в работе [6] с помощью магнито-стрикционного датчика давления, позволяющего точно определить данный параметр. В условиях данного эксперимента Фрг позволяет косвенно оценивать скорость нарастания давления, т.е. массовую скорость сгорания заряда.

На рис. 7 показано сравнение фазы возникновения сигнала ионного тока Φ_f и фазы максимального давления в цилиндре Фрг. Видно, что при изменении α Φ_f и Фрг изменяются практически эквидистантно, что позволяет построить линейную зависимость фазы максимума давления от фазы сигнала ионного тока.

Таким образом, выявлена возможность косвенной оценки скорости нарастания давления в КС и определения расположения максимума давления на индикаторной диаграмме с помощью ИД. Подобный подход применяется в известных исследованиях при использовании СЗ как ИД. Например, в исследованиях [7,8] максимум ионного тока в цепи СЗ практически совпадает по фазе с максимумом давления в цикле, как в исследовательских установках, так и на полноразмерных ДВС. Однако в этих исследованиях форма сигнала в измерительном контуре является достаточно сложной и содержит 3 фазы – фазу зажигания, фазу наличия фронта пламени в зоне электродов, и постпламенную фазу [4], каждая из которых имеет свой максимум, что усложняет анализ сигналов. При использовании уда-

Рис. 6. Зависимость Φ_f от состава ТВС:

♦ $\alpha = 0,79-0,82$, □ $\alpha = 1,07-1,11$, ▲ $\alpha = 1,16-1,22$, × $\alpha = 1,28-1,32$,
* $\alpha = 1,4-1,42$, ● $\alpha = 1,46-1,52$

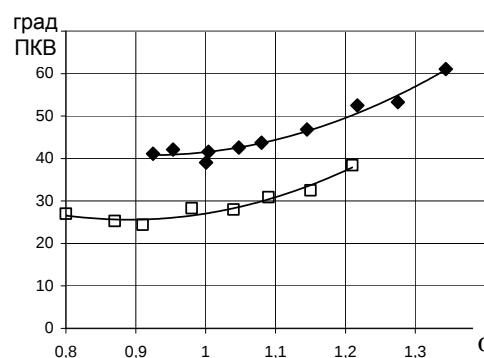
лённого от СЗ ИД возможно более простое обнаружение фазы максимума давления сгорания, чем при использовании СЗ, поскольку от системы контроля не требуется поиск максимума сигнала, а необходима только оценка наличия сигнала, что легко осуществить по контролю превышения сигналом определенного порогового уровня. Кроме того, при использовании СЗ в качестве ИД могут возникать дополнительные погрешности в анализе сигнала, связанные с поздней активацией измерительного контура [9], являющегося частью системы зажигания.

При анализе данных, изображённых на рис. 7, следует отметить качественную сходимость полученных результатов с работой [10], в которой проведена одновременная регистрация сигналов 12-ти ИД, расположенных в различных зонах КС 4-х цилиндрического ДВС, и давления в КС, определяемого с помощью пьезодатчика. В [10] момент достижения пламенем ИД, расположенного диаметрально противоположно СЗ, также как и в нашем эксперименте имеет практически одинаковую разность по фазе с моментом максимума давления в цикле. Данное сравнение подтверждает адекватность полученных в нашей работе результатов.

Таким образом, экспериментально определено наличие взаимосвязи фазы сигнала ионного тока и динамики процесса сгорания.

Не менее значимым для оценки качества процесса сгорания параметром является токсичность ОГ ДВС. В связи с этим выявлена взаимосвязь ионного тока и концентрации токсичных компонентов в ОГ. Оценивались наиболее токсичные компоненты ОГ – несгоревшие углеводороды (CH) и оксиды азота NOx.

На рис. 8 представлена экспериментальная оценка взаимосвязи концентрации NOx в ОГ и амплитуды сигнала ИД [11]. Зависимость концентрации NOx от ионного тока может быть оценена кривой 2-го порядка с максимумом. Т.е. по ионному току может быть осуществлена идентификация режима с наибольшей токсичностью по NOx.

Рис. 7. Зависимости Φ_f (□) и Фрг (♦) от состава ТВС

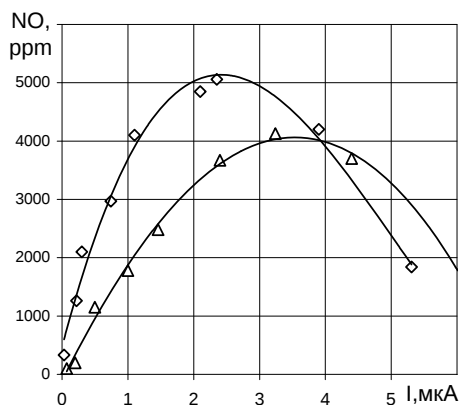


Рис.8. Зависимость концентрации NOx в ОГ от амплитуды ионного тока:

◇ $n = 600 \text{ min}^{-1}$, УОЗ-13 ° пкв; ◇ $n = 900 \text{ min}^{-1}$, УОЗ-13 ° пкв

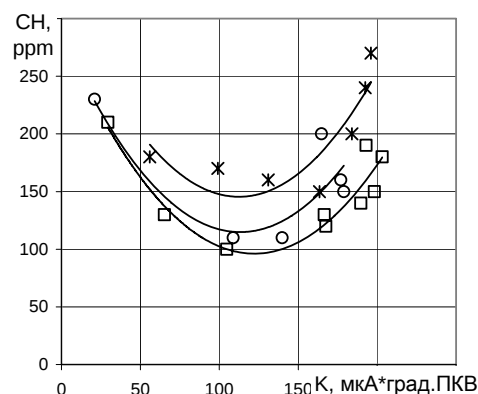


Рис.9. Зависимость концентрации СН в ОГ от комплексного параметра К:

□ - $\varepsilon = 5$, ○ - $\varepsilon = 6$, * - $\varepsilon = 7$

Для оценки взаимосвязи ионного тока и концентрации СН в ОГ использованы оба параметра оценки, т.е. фаза и амплитуда сигнала.

Произведение фазы Фf и амплитуды ионного тока обозначено как комплексный параметр К. Предполагается, что данный параметр позволяет оценить соотношение влияния на среднюю скорость сгорания факторов химического состава рабочего тела и турбулентности заряда ТВС. Обоснование этого предположения заключается в том, что Фf обратно пропорциональна средней скорости пламени, которая определяется, турбулентным сгоранием, а ионный ток пропорционален нормальной скорости распространения пламени [11]. Анализ экспериментальных данных позволил выявить зависимость концентрации СН в ОГ от комплексного параметра К (рис.9). Имеется определенное значение К, которому соответствует минимальная концентрация СН в ОГ, т.е. оптимальный для полного сгорания баланс турбулентной и ламинарной составляющих скорости горения.

ВЫВОДЫ

В результате экспериментов подтверждена высокая информативность сигналов ИД, установленного в наиболее удаленной от СЗ зоне КС. Показано, что рассматриваемые параметры оценки сигнала зависят от основных режимных факторов, определяющих сгорание (α , промотор горения, ε).

Выявлена взаимосвязь сигналов ионного тока с динамикой сгорания и токсичностью ОГ.

Сигнал ИД, установленного в удаленной от СЗ зоне КС может быть оценен как минимум по двум параметрам (амплитуде и фазе), что обуславливает наблюдать его большую информативность, чем сигнал с датчика-свечи.

Таким образом, использование удаленных от СЗ ИД в системах управления представляется более эффективным, чем использование датчика-свечи. Получено первичное обоснование возможности препарирования цилиндра ИД для разработки новых систем управления. При этом требуются дополнительные исследования возможности получения информации о сгорании в цилиндре ДВС при работе в широком диапазоне режимов и в различных типах КС.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г. (ГК №1557)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. – М.: Металлургия, 1968.
2. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. – М.: Химия, 1977.
3. E. N. Balles, E. A. VanDyne, A. M. Wahl, K. Ratton, M.C. Lai. In cylinder air/fuel ratio approximation using spark gap ionization sensing / SAE paper № 980166, 1998.
4. A. Saitzkof, R. Reinmann, F. Mauss. In cylinder pressure measurements using the spark plug as an ionization sensor / SAE paper No. 970857, 1997.
5. Felice E. Corcione, Bianca M. Vaglieco, Simona S. Merola. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion Current System and Optical Diagnostics of Radical Species / Istituto Motori – CNR Via G. Marconi, 8 – 80125 Napoli (Italy), 2008.
6. Смоленский В.В. Особенности процесса сгорания в бензиновых двигателях при добавке водорода в топливно-воздушную смесь // автореф. канд. дисс. - Тольятти, 2007.
7. Черняев Э.Х. Оптимизация цикла бензинового двигателя по току ионизации в зоне электродов свечи зажигания. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук, МАМИ, 1984.
8. M. Kramer, K. Wolf, Approaches to gasoline engine control involving the use of ion current sensory analysis. SAE tech. paper 905007.
9. Мандельштам А.А., Черняк Б.Я. Исследование распространения пламени и фаз процесса сгорания в двигателе АЗЛК-412 / Труды МАДИ, выпуск 96, Москва, 1975.
10. Ивашин П.В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока / автореферат диссертации кандидата технических наук. ТГУ, Тольятти, 2004.
11. Коломнец П.В. Влияние скорости распространения пламени на выделение оксида азота при добавке водорода в бензиновые двигатели // автореф. канд. дисс. - Тольятти, 2007.

APPLICATION OF DISTANT FROM SPARK PLUG IONIZATION SENSOR FOR COMBUSTION CONTROL IN ICE

© 2010

P.V. Ivashin, candidate of technical sciences, associated professor of the chair «Heat engines»

P.V. Kolomiets, candidate of technical sciences, associated professor of the chair «Heat engines»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: engine; chamber combustion; ionization sensor; current control combustion.

Annotation: possibility of getting of adequate information about combustion in ICE using ionization sensor was analyzed. Ionization sensor was installed in the most distant from spark plug zone of combustion chamber.