

УДК 621.431

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ, ШИРИНЫ ЗОНЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

© 2011 И. Н. Бобровский, А. П. Шайкин, А. А. Брызгалов, С. А. Сухов

Тольяттинский государственный университет

Представлены результаты экспериментального исследования процесса сгорания топливно-воздушной смеси вблизи стенки цилиндра двигателя. Определены ширина зоны химических реакций горения и скорость распространения пламени, а также их воздействие на концентрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах.

*Зажигание, сгорание, водород, бензин, датчик, турбулентность, пламя, электрод.*

Для изучения и анализа процесса сгорания в двигателе с искровым зажиганием, протекающего в течение нескольких миллисекунд, А.С. Соколик [1] предложил разделить его по времени на три характерные фазы: первую – от момента подачи электрического напряжения на свечу зажигания до формирования устойчивого фронта распространения пламени, вторую – окончание которой часть исследователей определяет по достижению максимального давления при сгорании или по достижению максимальной температуры рабочего процесса, и третью (или фазу догорания) – в которой догорает ~10% ТВС. Такое деление позволяет более полно и глубоко исследовать процесс сгорания и влияние его особенностей на устойчивость и топливную эффективность работы двигателя, токсичность отработавших газов (ОГ). Наименее исследованной является третья фаза сгорания, процесс сгорания в которой у современных двигателей, работающих при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ , близком к единице или в обеднённой смеси, протекает вблизи стенки цилиндра, то есть в зонах, определяющих концентрацию несгоревших углеводородов [2]. Экспериментально показано [3], что концентрация несгоревших углеводородов (СН) определяется процессами, протекающими в третьей фазе, и зависит от средней скорости распространения пламени и, соответственно, от

величины ионного тока в нём.

Целью проводимого экспериментального исследования ставилось определение основных характеристик процесса сгорания в третьей фазе в зависимости от состава и добавок водорода в ТВС, скоростного режима работы двигателя и их влияния на концентрацию несгоревших СН в ОГ.

Эксперименты проводились на исследовательской установке УИТ-85, Установка - одноцилиндровый четырёхтактный карбюраторный двигатель с изменяемой степенью сжатия, диаметр цилиндра  $D=85$  мм, ход поршня  $S=115$  мм, отношение  $S/D=1,35$ , рабочий объём цилиндра  $V_h=0,625$  л. Электромотор приводит во вращение коленчатый вал, поддерживая обороты постоянными на двух скоростных режимах: 600 и 900 мин<sup>-1</sup>. В камере сгорания (КС), в наиболее удалённой зоне от свечи зажигания выполнено штатное место установки магнитоэлектрического датчика для измерения детонации, что даёт возможность замены этого датчика другими без каких-либо изменений в конструкции головки цилиндра.

Конструкция УИТ-85 позволяет достаточно точно контролировать режимные параметры работы ДВС и варьировать ими независимо друг от друга для определения влияния на процесс сгорания и токсичность ОГ отдельно того или иного параметра.

Определение характеристик сгорания вблизи стенок цилиндра осуществляется ионизационным датчиком (ИД) различных конструкций: на базе свечи зажигания [4] и пятиэлектродным [5].

Ионизационный датчик на базе свечи зажигания (рис.1, а) имеет полость, изолированную от камеры сгорания, диаметром 16,5 мм, высотой 10 мм. В полости датчика имеется изолированный от массы двигателя центральный положительный электрод диаметром 3 мм. Изолированная полость предназначена для

устранения турбулентных пульсаций, чтобы пламя распространялось по ламинарному механизму. Пятиэлектродный ионизационный датчик представлен на рис.1 б. Его конструкция содержит 5 положительных изолированных от массы установки электродов, что позволяет определять скорость распространения фронта пламени и ширину зоны сгорания вблизи стенки цилиндра. Измерение концентрации несгоревших СН осуществлялось газоанализатором EIR-2105 фирмы Yanaco (Япония).

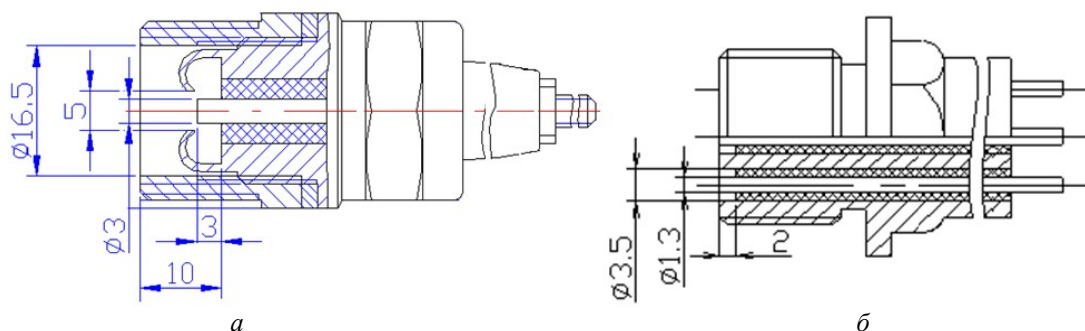


Рис.1. Ионизационные зонды:  
а - на базе свечи зажигания; б - пятиэлектродный

Использовался бензин марки АИ-92. Для расширения диапазона режимов испытаний по составу смеси в топливно-воздушную смесь добавлялся газообразный водород в количестве до 6 % от массы бензина.

Одной из особенностей исследования процесса сгорания в поршневых двигателях является необходимость проведения большого числа наблюдений для получения статистических характеристик с заданной точностью и надёжностью. Исходя из минимальности межциклового нестабильности и соображений экономии времени и горючего, принято 30 повторных осциллограмм ионного тока (циклов) на одном режиме.

После монтажа всех систем производится проверка их работоспособности. Перед замерами установка выводится на рабочий температурный режим: температура масла составляет 50–60°C; температура охлаждающей жидкости на впуске 100°C; температура воздуха перед карбюратором составляет 52°C.

ратором составляет 52°C.

Затем производится настройка уровня топлива в поплавковой камере карбюратора для получения требуемого состава смеси. При работе с добавками водорода в ТВС устанавливается требуемый уровень давления добавляемого водорода. Объём поступившего из баллона в систему водорода измеряется с помощью газового счётчика. После настройки оборудования производятся следующие замеры: времени расхода контрольного объёма бензина ( $V_f=10$  мл); времени расхода контрольного объёма водорода ( $V_H=1$  л); концентрации несгоревших углеводородов в ОГ.

Одновременно на данном режиме производилась запись осциллограмм сигнала с датчика ионизации, установленного в КС УИТ-85. Для анализа результатов измерений параметров ионного тока использовался так называемый «типовой импульс», представляющий собой результат осреднения осциллограмм ионного тока на одном режиме работы установки.

После записи необходимого числа осциллограмм перенастраивались системы подачи бензина и водорода, и на новом режиме вновь производились необходимые замеры.

С целью обеспечения необходимой точности определения состава смеси замеры времени расхода мерных объёмов бензина и водорода повторялись на каждом режиме шесть раз. Для коррекции определения коэффициента избытка воздуха и массовой доли добавляемого водорода в топливе фиксировалось атмосферное давление и температура на момент проведения испытаний.

Зарегистрированные относительно момента подачи электрического питания на свечу зажигания промежутки времени до появления и исчезновения ионного тока в цепи ионизационных датчиков позволяли определять следующие характеристики сгорания:

- ширина зоны химических реакций горения (ЗХР) в зоне установки пятиэлектродного датчика измерялась либо непосредственно (рис. 2, а), когда в один и тот же промежуток времени регистрировалось появление ионного тока (передняя граница зоны химических реакций) в цепи удалённого электрода и исчезновение ионного тока в цепи переднего электрода (задняя граница ЗХР), либо с учётом скорости перемещения задней границы ЗХР определялось её положение для момента времени достижения передней границы удалённого электрода (рис. 2, б);

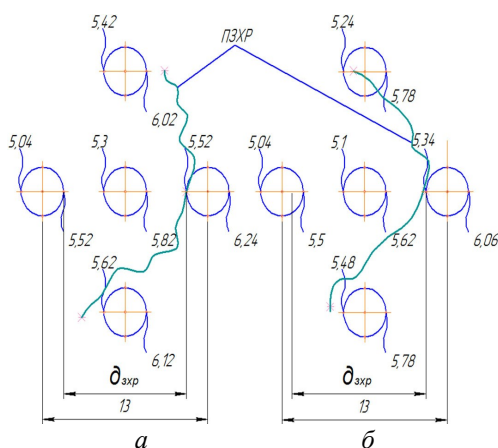


Рис. 2. Схема определения ширины зоны химических реакций горения

- средние скорости распространения фронта пламени от свечи зажигания до электрода датчика свечи или центрального электрода пятиэлектродного датчика рассчитывались как частное от деления диаметра цилиндра установки на промежутков времени до появления ионного тока в цепи соответствующего электрода;

- скорость распространения пламени в полости датчика-свечи рассчитывалась по размеру выступающего в полость центрального электрода и времени существования ионного тока;

- скорости распространения пламени между электродами пятиэлектродного датчика (на участках 6,5 мм) рассчитывались по перемещению задней границы зоны химических реакций горения.

В работе [3] представлены зависимости скорости распространения пламени в полости ИД-свечи. Особенностью протекания процесса сгорания в полости датчика является ее независимость от изменения турбулентности при увеличении оборотов с 600 до 900 1/мин. Эти данные, а также приближённая оценка порядка нормальной скорости распространения пламени по давлению и температуре в цилиндре свидетельствуют в пользу того, что в полости датчика сгорание происходит по ламинарному механизму.

Изменение качества топливно-воздушной смеси (ТВС) за счёт добавки водорода приводит к росту скорости распространения пламени в полости датчика. Добавка в ТВС  $H_2$  снижает долю углерода и увеличивает долю водорода в смеси. При добавке 3 и 5 % водорода доля  $H_2$  возрастает на 20,7 и 34,5 %, а углерода уменьшается на 3,6 и 5,6 % соответственно. На режиме 600 1/мин при этих добавках скорость распространения пламени в полости датчика при  $\alpha = 1,2$  возросла на 31 и 47,5 %, а ионный ток на 39,2 и 55 %.

Так как турбулентность смеси при небольших добавках  $H_2$  не изменяется, то возрастание скорости распространения пламени обусловлено увеличением скорости химических реакций во фронте пламени. Следовательно, произошло увели-

чение нормальной скорости распространения пламени.

Величины средних скоростей распространения фронта пламени от свечи зажигания до положительного электрода датчика свечи или центрального электрода пятиэлектродного датчика оказались практически одинаковыми. Турбулентная скорость распространения пламени на участке между передним и центральным электродом пятиэлектродного датчика представлена на рис. 3. В отличие от результатов, полученных с датчиком свечи, в данных испытаниях увеличение скоростного режима приводит к росту скорости распространения пламени как для бензовоздушной, так и для бензоводородовоздушной смесей. Скорость распространения пламени на расстоянии 6,5 мм (за промежуток времени 0,1-0,3 миллисекунд) от стенки цилиндра представляет собой значительную величину от ~ 35 м/с при  $\alpha=1,0$  до ~ 10 м/с при  $\alpha=1,2$  для бензовоздушной и от 55 до 28 м/с для бензоводородовоздушной смеси при 900 1/мин и добавке водорода 5 % по массе бензина.

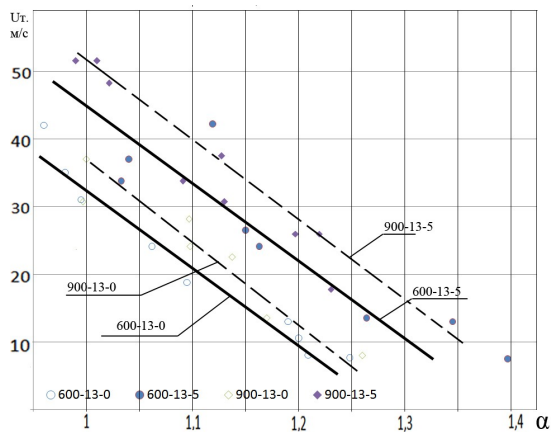


Рис. 3. Скорость распространения фронта пламени при одинаковом угле опережения зажигания

Увеличение угла опережения зажигания для скоростного режима 900 1/мин приводит к росту скорости распространения пламени, что свидетельствует о протекании процесса сгорания при меньшем объеме камеры сгорания и, как следствие, при более высокой температуре. Заметное влияние на ширину ЗХР оказывает коэффициент избытка воздуха и количество

добавляемого водорода. Увеличение  $\alpha$  от 1,0 до 1,35 приводит к росту ширины ЗХР с 8 до 13 мм для бензовоздушной смеси и с 5 до 10 мм при добавке 5 % водорода (рис. 4). Добавка водорода интенсифицирует протекание химических реакций горения, сокращая ширину ЗХР приблизительно на 3 мм для режима 600 оборотов в минуту.

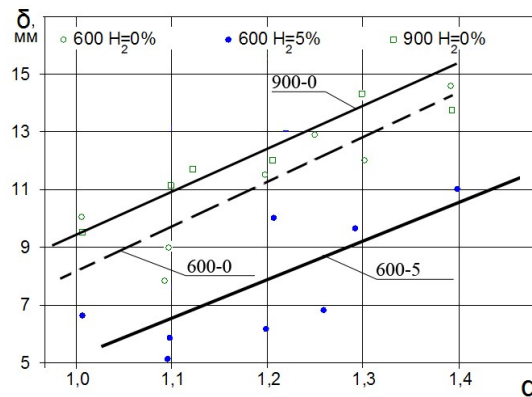


Рис. 4. Ширина зоны химических реакций горения

Экспериментальные данные, полученные по определению скоростей распространения пламени вблизи стенок цилиндра, по величине ионного тока и ширине ЗХР позволяют выполнять анализ их влияния на концентрацию несгоревших СН в ОГ (рис. 5).

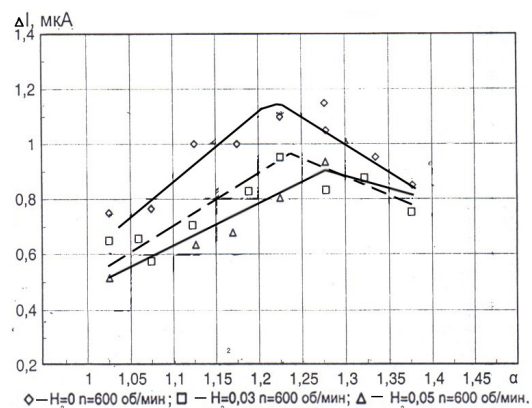


Рис. 5. Скорость изменения ионного тока в зависимости от коэффициента избытка воздуха

На рис. 6 представлена зависимость концентрации несгоревших СН в ОГ от ширины зоны химических реакций горения при различных добавках водорода в ТВС.

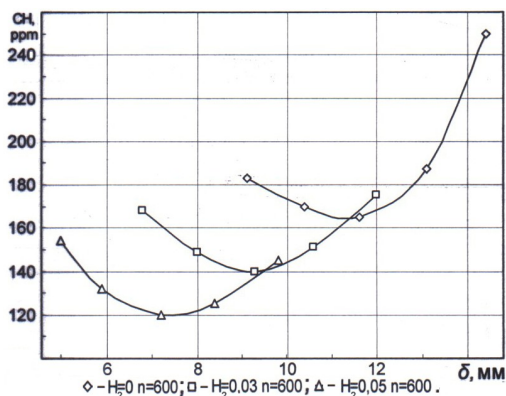


Рис. 6. Концентрация несгоревших СН в ОГ

Получены качественно похожие зависимости для различных добавок водорода в ТВС. Точки на графике соответствуют следующим коэффициентам избытка воздуха: 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4. Сначала при уменьшении ширины ЗХР происходит уменьшение несгоревших СН. На этом участке с уменьшением коэффициента избытка воздуха от  $\alpha$  1,4 до 1,2 увеличение скорости химических реакций горения происходит более быстрыми темпами, чем сокращение ЗХР. При дальнейшем снижении  $\alpha$  картина изменяется, и уменьшение ЗХР происходит быстрее, чем увеличивается скорость протекания химических реакций горения. В итоге в ОГ возрастает концентрация несгоревших СН.

Из результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. При изменении качества ТВС (добавка активирующих добавок) происходит интенсификация протекания химических реакций горения, сокращается ширина зоны химических реакций горения и, как следствие, рост нормальной и турбулентной скорости распространения пламени.

2. Характер протекания процесса сгорания вблизи стенки цилиндра двигателя, ширина зоны химических реакций, турбулентная и нормальная скорости распространения пламени определяют кон-

центрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах.

3. В области бедной ТВС ( $\alpha > 1,2$ ) сокращение зоны химических реакций, сопровождающееся ростом скорости распространения пламени, приводит к уменьшению концентрации несгоревших СН.

С обогащением ТВС ( $\alpha < 1,2$ ), несмотря на сокращение зоны химических реакций и рост скорости распространения пламени, начинается увеличение концентрации несгоревших СН.

### Библиографический список

1. Соколик, А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах [Текст] / А. С. Соколик. – М.: АН СССР, 1960. – 427 с.
2. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени [Текст]; перевод с англ. Н. Чигира. – М.: Машиностроение, 1981. – 407 с.
3. Ивашин, П. В. Электропроводность пламени, средняя скорость сгорания и концентрация несгоревших углеводородов в ОГ бензиновых двигателей [Текст] / П.В. Ивашин, С.И. Будаев, А.П. Шайкин [и др.] // Автотракторное электрооборудование. – 2004. – № 1-2. – С. 38 - 39.
4. Шайкин, А.П. Сгорание топливно-воздушной смеси вблизи стенки цилиндра двигателя с искровым зажиганием [Текст] / А.П. Шайкин [и др.] // Вектор науки ТГУ. – 2010. – №2. – С. 52-56.
5. Ивашин, П.В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока [Текст]: Автореферат диссертации канд. техн. наук / П.В. Ивашин. – Тольятти, 2004.

# RESEARCH OF FLAME DISTRIBUTION SPEED, WIDTH OF THE ZONE AND INTENSITY OF CHEMICAL REACTIONS OF COMBUSTION IN THE SPARK-IGNITION ENGINE

© 2011 I. N. Bobrovskiy, A. P. Shaykin, A. A. Brizgalov, S. A. Sukhov

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

The results of experimental investigation of the fuel-air mixture combustion process in the vicinity of the engine cylinder wall are presented. The width of the zone of combustion chemical reactions and the speed of flame distribution are specified, as well as their influence on the concentration of hydrocarbons in the exhaust gas that are not burnt away.

*Ignition, combustion, hydrogen, gasoline, gage, turbulence, flame, electrode.*

## Информация об авторах

**Бобровский Игорь Николаевич**, аспирант, Тольяттинский государственный университет, [Bobri@yandex.ru](mailto:Bobri@yandex.ru). Область научных интересов: химические реакции сгорания в двигателе, ионизация в пламени, вредные выбросы.

**Шайкин Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловые двигатели», Тольяттинский государственный университет, [apshaikin@yandex.ru](mailto:apshaikin@yandex.ru). Область научных интересов: химические реакции сгорания в двигателе, ионизация в пламени, вредные выбросы.

**Брызгалов Андрей Александрович**, магистрант, Тольяттинский государственный университет, [td@tltsu.ru](mailto:td@tltsu.ru). Область научных интересов: химические реакции сгорания в двигателе, ионизация в пламени, вредные выбросы.

**Сухов Сергей Александрович**, магистрант, Тольяттинский государственный университет, [td@tltsu.ru](mailto:td@tltsu.ru). Область научных интересов: химические реакции сгорания в двигателе, ионизация в пламени, вредные выбросы.

**Bobrovskiy Igor Nikolaevich**, post-graduate student, Federal state budgetary educational institution of higher vocational training, Togliatti State University, [Bobri@yandex.ru](mailto:Bobri@yandex.ru). Area of research: chemical reactions of combustion in the engine, ionization in flame, harmful emissions.

**Shaykin Aleksandr Petrovich**, Doctor of technical sciences, professor, head of the chair "Heat engines", Federal state budgetary educational institution of higher vocational training, Togliatti State University, [apshaikin@yandex.ru](mailto:apshaikin@yandex.ru). Area of research: chemical reactions of combustion in the engine, ionization in a flame, harmful emissions.

**Brizgalov Andrey Aleksandrovich**, undergraduate student, Federal state budgetary educational institution of higher vocational training, Togliatti State University, [td@tltsu.ru](mailto:td@tltsu.ru). Area of research: chemical reactions of combustion in the engine, ionization in flame, harmful emissions.

**Sukhov Sergey Aleksandrovich**, undergraduate student, Federal state budgetary educational institution of higher vocational training, Togliatti State University, [td@tltsu.ru](mailto:td@tltsu.ru). Area of research: chemical reactions of combustion in the engine, ionization in flame, harmful emissions.