

УДК 621.432

О ВЗАИМОСВЯЗИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛАМЕНИ В ДВС

© 2013 П. В. Ивашин, М. П. Рамазанов, А. Я. Твердохлебов,
А. П. Шайкин, И. С. Ясников

Тольяттинский государственный университет

Экспериментально исследованы закономерности взаимного изменения локальной скорости распространения и электропроводности пламени при изменении состава смеси в бензиновом ДВС. В условиях проведённого эксперимента электропроводность и скорость распространения пламени около свечи зажигания изменяются при практически постоянной средней по камере сгорания температуре. При изменении коэффициента избытка воздуха выявлена взаимосвязь между электропроводностью и скоростью распространения пламени, которая может быть описана степенной зависимостью. Показано, что имеет место зависимость электропроводности пламени от скорости химических реакций при турбулентном горении в замкнутом объёме. Данный факт может быть использован для разработки способов диагностики локальной интенсивности горения в камерах сгорания.

ДВС, камера сгорания, турбулентное пламя, скорость, электропроводность, взаимосвязь, интенсивность горения.

Постановка задачи

Для усовершенствования рабочих процессов энергетических установок, сжигающих углеводороды, повышения их эффективности и снижения токсичности продуктов сгорания необходимо знание локальных условий горения в камерах сгорания (КС). Получение визуальной информации о локальных условиях с помощью оптических методов требует наличия прозрачных стенок КС. В ходе проектирования и доводки горелочных устройств, при наличии базовых или переходных вариантов конструкции, выполненных для натуральных испытаний, создание образцов, годных для оптических исследований, вряд ли экономически целесообразно. Однако определение путей доводки рабочего процесса и конструкции остаётся необходимым. При этом расчётные методы анализа горения всегда требуют экспериментальной верификации математических моделей, поскольку численные исследования реагирующих течений в КС не могут быть достаточно точными без экспериментального подтверждения, так как химия горения углеводородов недостаточно изучена. Поэтому актуальным является поиск эффективных,

неоптических и недорогих методов экспериментального исследования локальных характеристик горения в КС промышленных и транспортных энергетических установок.

Один из перспективных методов исследования горения, удовлетворяющих вышеописанным требованиям, основан на явлении электропроводности пламени углеводородов. Зона горения в пламени углеводородных топлив обладает аномально высокой неравновесной концентрацией заряженных частиц, обусловленной особенностями цепного механизма химических реакций горения этих топлив. Это явление, называемое хемионизацией [1, 2, 3], является причиной того, что электропроводность зоны реакций в пламени на несколько порядков выше электропроводности продуктов сгорания при той же температуре. То есть зона химических реакций в пламени может быть обнаружена достаточно просто с помощью измерения его электропроводности. Концентрация заряженных частиц при хемионизации на несколько порядков превышает равновесную концентрацию, вычисленную по уравнению Саха, описывающему равно-

весную термическую ионизацию при той же температуре.

Явление неравновесной ионизации в пламени углеводородов активно использовалось в 1930-60 годах для анализа структуры турбулентного и ламинарного пламени в различных условиях [4, 5], включая как горелку Бунзена [6], так и КС поршневых [7, 8] и газотурбинных [9] двигателей, топки металлургических печей [10], а также горение в ударных волнах [11]. Для этого использовались ионизационные датчики наподобие плазменного зонда Лэнгмюра. Применение ионизационных зондов для доводочных работ по улучшению рабочего процесса и быстрой диагностики горения является сложной технической задачей. Во-первых, несмотря на кажущуюся простоту метода, получение информации о структуре пламени и кинетике реакций горения с помощью зонда Лэнгмюра значительно осложнено ограничениями, накладываемыми теорией зонда [10], во-вторых, при использовании метода в условиях КС необходимо быстро обрабатывать большой объем информации. При развитии вычислительной и экспериментальной техники методы диагностики горения, основанные на электропроводности пламени, также активно развиваются [12–14]. То есть, несмотря на сложности, преимущества метода обуславливают его развитие. В настоящее время известны варианты использования ионизационных зондов, совмещённых со свечей зажигания, в системах управления ДВС [15]. Однако в подобных системах с помощью анализа ионного тока в основном диагностируются пропуски зажигания и аномальные режимы горения. Для практического развития метода необходимо более глубокое понимание его возможностей в части диагностики горения. В связи с этим проведены экспериментальные исследования распространения пламени в КС поршневого бензинового одноцилиндрового ДВС.

Цель эксперимента – выявление взаимосвязи между электропроводностью пламени и интенсивностью реакций горе-

ния при турбулентном горении в замкнутом объёме.

При этом интенсивность химических реакций горения предложено оценивать с помощью экспериментально определяемых значений скорости распространения пламени. Причём скорость и электропроводность пламени должны быть измерены локально таким образом, чтобы исходные условия при начале процесса горения были всегда постоянными, а изменения скоростей реакций должны быть обеспечены изменением важнейшего химического фактора, значимого для горения – соотношения расходов топлива и окислителя.

Эксперимент

Эксперимент проведен в четырёхтактном одноцилиндровом исследовательском ДВС УИТ-85. ДВС был выбран как объект экспериментального исследования из-за возможности достаточно просто измерять скорость и электропроводность движущегося фронта пламени, а также из-за возможности сравнения полученных результатов с известными исследованиями, использующими другие подходы и методы. Экспериментальный двигатель отличается тем, что частота вращения коленчатого вала поддерживается постоянной с помощью электропривода, а также отсутствует дроссельная заслонка, чем обеспечивается постоянство наполнения цилиндра и постоянство скорости движения поршня, т.е. закона изменения объёма КС. КС выполнена в виде диска диаметром 85 мм и искровым зажиганием с боковой стороны. В КС установлены два ионизационных зонда. Ионизационный зонд представляет собой проводник, изолированный от двигателя. Между центральным электродом зонда и двигателем приложена постоянная разность потенциалов 585 В. Заранее установлена характеристика протекания ионного тока в зависимости от входного напряжения. Используемое в эксперименте входное напряжение на ионизационном зонде не находится в зоне насыщения, поэтому изменения тока в цепи зонда обусловлены

именно изменениями проводимости пламени. Если зонд находится в зоне химических реакций, то в цепи зонда течёт ток, обусловленный электропроводностью пламени. Появление импульса тока на ионизационном зонде соответствует появлению пламени в зоне установки зонда. Это подтверждено оптическими исследованиями пламени в условиях КС (бомбы) постоянного объёма и в ДВС [7], а также исследованиями горения в ДВС с помощью быстродействующих газоотборных клапанов [8], когда положение зоны реакции определялось с помощью быстрого отбора и анализа проб газов из КС. Кроме того, в нашем эксперименте в КС был установлен быстродействующий датчик давления, позволяющий оценивать скорость выгорания смеси по нарастанию давления.

Ионизационные зонды установлены на расстояниях $L_1 = 7$ мм и $L_2 = 80$ мм от

свечи зажигания (рис. 1). Таким образом, в эксперименте с помощью регистрации ионного тока в цепи зонда №1 оценивалась локальная скорость распространения пламени около свечи зажигания, а при регистрации тока в цепи зонда №2 оценивалась средняя скорость распространения пламени. Пример регистрации осциллограмм ионного тока и давления в КС показан на рис. 2. Параметры оценки сигнала ионного тока приведены на рис. 3. Значения сигналов на ионизационных зондах (см. рис. 2) падают практически до нуля после достижения максимального давления, несмотря на высокую температуру продуктов сгорания в данный момент цикла, как в экспериментах [3, 5]. Этот факт свидетельствует о том, что в эксперименте регистрировалась и оценивалась ионизация, обусловленная именно химическими особенностями горения углеводородов.

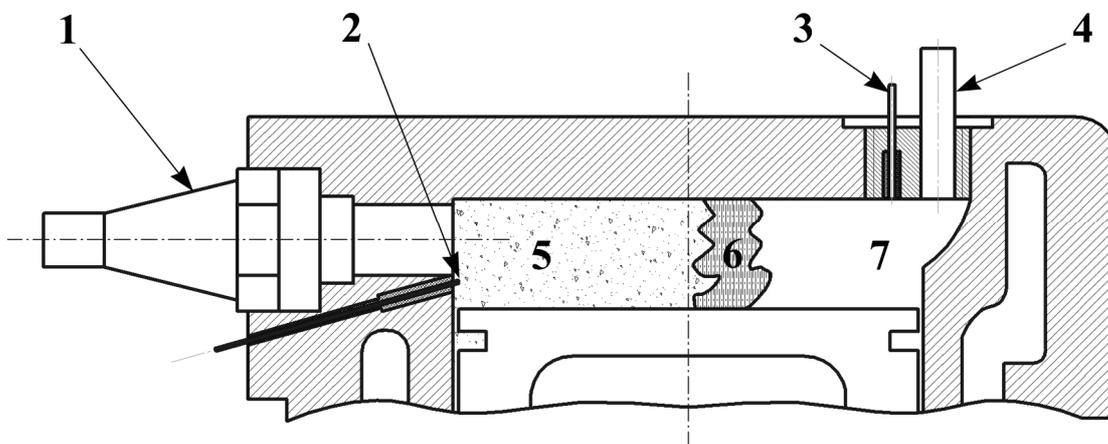


Рис. 1. Схема камеры сгорания:

1 – свеча зажигания; 2 – ионизационный зонд №1; 3 – ионизационный зонд №2;
4 – датчик давления; 5 – продукты сгорания; 6 – фронт пламени; 7 – топливовоздушная смесь

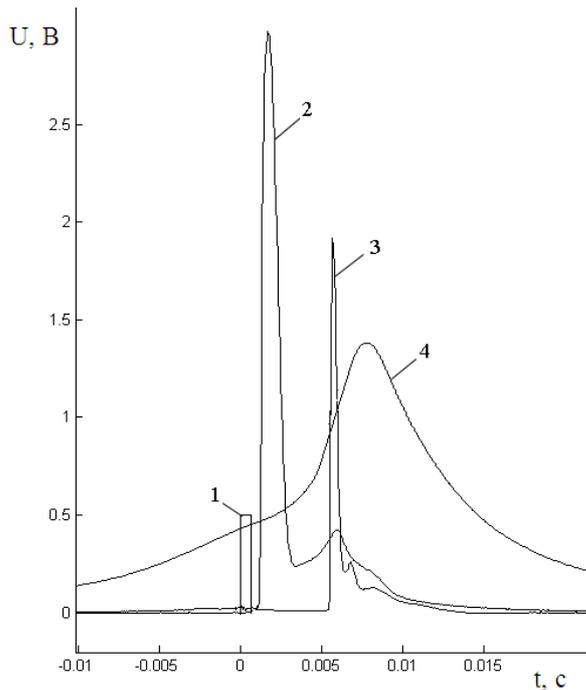


Рис. 2. Осциллограммы ионного тока и давления при горении:

- 1 – сигнал отметчика искрового разряда;
- 2 – сигнал первого ионизационного зонда;
- 3 – сигнал второго зонда;
- 4 – сигнал датчика давления

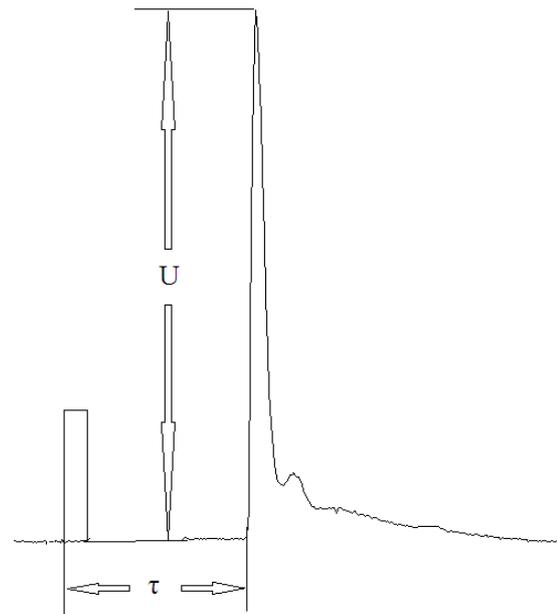


Рис. 3. Параметры оценки сигнала ионизационного зонда:

- τ – время от искрового разряда до начала сигнала;
- U – амплитуда сигнала

Экспериментальная установка была оснащена системами регистрации параметрических данных о расходе воздуха (термоанемометрический датчик Bosch), массовом расходе бензина (лабораторные весы В-512), положении коленчатого вала (оптический датчик) и моменте искрового разряда.

Данные регистрировались с помощью системы сбора данных L-Card на базе 12-битного АЦП с дискретизацией 20000 т/с на каждый канал.

Режимы работы двигателя поддерживались постоянными. Для этого контролировались следующие параметры:

- температура воздуха на впуске 52°C;
- температура охлаждающей жидкости 100 °С;
- частота вращения коленчатого вала (600 мин.⁻¹);
- массовый расход воздуха;
- массовый расход топлива;

- положение коленчатого вала (точность 1,5 град. поворота);
- момент искрового разряда (14-15 град. ПКВ до ВМТ).

Варьируемый фактор: соотношение воздух-топливо (коэффициент избытка воздуха изменялся от 0,7 до 1,4).

Методика эксперимента заключалась в регистрации осциллограмм ионного тока на каждом режиме в количестве не менее 50 циклов горения подряд. Обработка осциллограмм заключалась в определении усредненных параметров оценки сигнала по всему ансамблю циклов. Усреднение по циклам проводилось для снижения ошибки, связанной с межцикловой нестабильностью процесса горения в ДВС. При этом на каждом режиме оценивалось распределение значений ионного тока и времени его появления. Гистограмма распределения параметров оценки ионного тока, полученных при осреднении последовательно зарегистрированных циклов горения, достаточно хорошо опи-

сывается кривой нормального распределения. Погрешность оцениваемых параметров ионного тока складывается из систематической погрешности измерительной цепи, составляющей не более 1%, и межциклового рассеяния, связанного с неидентичностью циклов горения. Из обработки массива данных на каждом режиме получены относительные значения среднеквадратичного отклонения, не превышающие 17%.

Локальная скорость распространения пламени U_{lcl} около свечи оценивалась по формуле

$$U_{lcl} = \frac{L_1}{t_1},$$

где t_1 – время от искрового разряда до возникновения сигнала на ионизационном зонде №1.

Средняя скорость распространения пламени U_{avr} за период от искрового разряда до возникновения сигнала на ионизационном зонде №2, т.е. за период достижения его передней границей зоны горения, оценивалась по формуле

$$U_{avr} = \frac{L_2}{t_2},$$

где t_2 – время от искрового разряда до возникновения сигнала на ионизационном зонде №2.

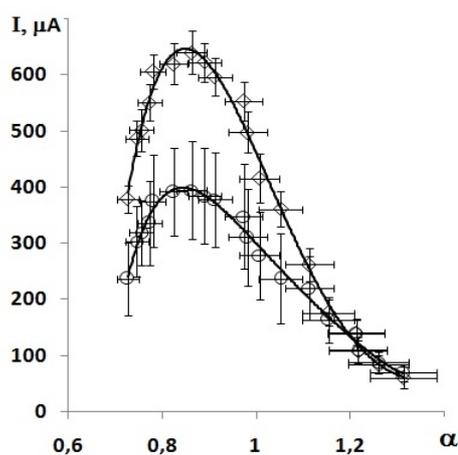


Рис.4. Зависимость ионного тока от состава смеси:

- \triangle – ионный ток в цепи ИЗ №1;
- \circ – ионный ток в цепи ИЗ №2

Кроме того, косвенно средняя скорость горения U_b оценивалась по времени достижения максимального давления в цикле

$$U_b = \frac{L_3}{t_3},$$

где $L_3=87$ мм, расстояние от свечи зажигания до наиболее удаленной точки КС; t_3 – время от искрового разряда до регистрации максимального давления в камере сгорания.

Результаты эксперимента и их анализ

В результате измерений ионного тока на каждом режиме получены зависимости ионного тока от состава смеси (рис. 4). Характерно наличие максимума ионного тока при составах смеси, соответствующих максимальной мощности двигателя. При обеднении смеси до предела, соответствующего появлению пропусков зажигания, ионный ток значительно падает и в циклах с отсутствующим горением не регистрируется. Нестабильные режимы с количеством пропусков горения более 5% не обрабатывались.

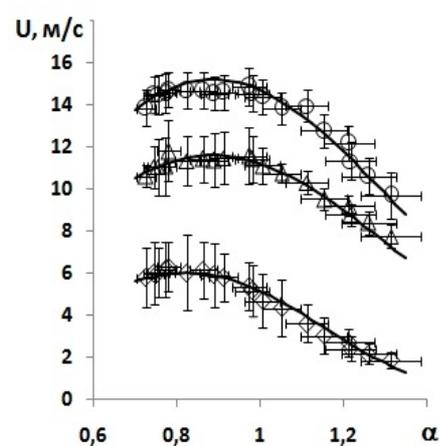


Рис. 5. Зависимость скоростей распространения пламени и горения от состава смеси:

- \diamond – U_{lcl} ; \circ – U_{avr} ; \triangle – U_b

Из рис. 5 видно, что зависимость скорости горения U_b , оцененная по времени достижения максимума давления, имеет такой же характер и практически эквидистантна зависимостям, полученным с помощью ионизационных зондов. Разница в абсолютных значениях средних скоростей U_b и U_{avr} обусловлена тем, что при турбулентном горении имеет место определённая ширина зоны горения, а скорость U_{avr} определена по передней границе фронта горения. Это, в совокупности с результатами известных исследований, позволяет утверждать, что в эксперименте

оценивались именно скорости распространения передней границы фронта горения.

Постоянные значения угла опережения зажигания на каждом режиме обеспечивают постоянство исходных условий при зажигании смеси любого состава. Для дальнейшего анализа оценены условия в момент появления сигнала на ионизационных зондах на каждом режиме. На рис. 6 показаны изменения давления в КС и её объёма в момент сигналов на ионизационных зондах (ИЗ).

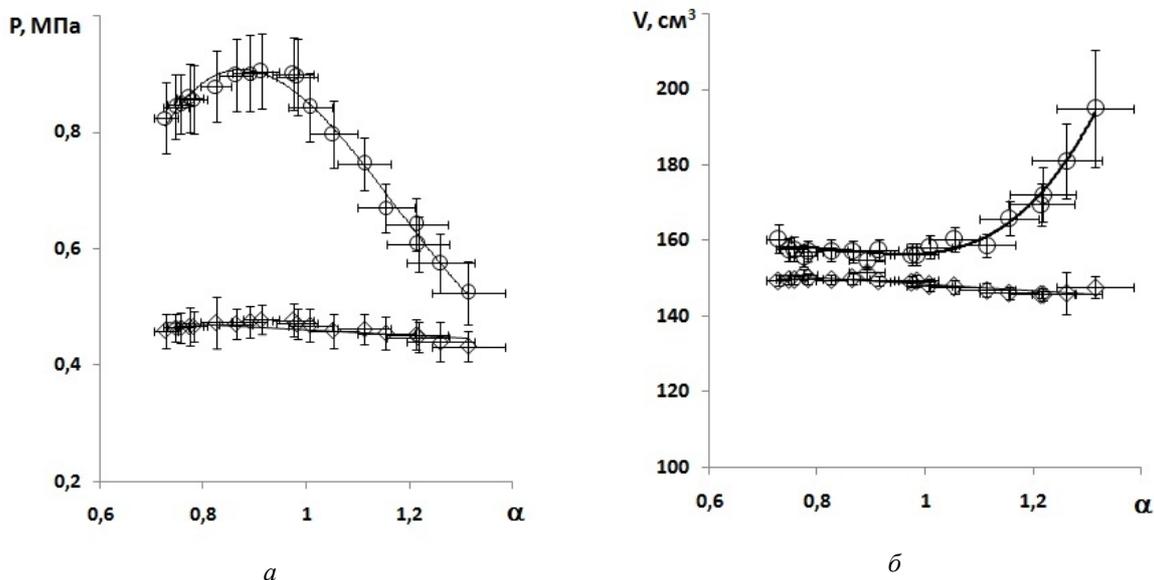


Рис. 6. Зависимости давления (а) в КС и её объёма (б) в момент сигналов на ионизационных зондах от состава смеси:

◇ – сигнал на ИЗ №1; ○ – сигнал на ИЗ №2

Анализ рис. 6 показывает, что в момент регистрации сигналов на ИЗ №1 среднее давление в КС и её объём практически постоянны во всем диапазоне режимов. Это позволяет сделать вывод о постоянстве средней температуры в КС, поскольку изменением массы и свойств рабочего тела из-за изменения коэффициента избытка воздуха можно пренебречь при имеющейся точности измерений. Для моментов возникновения сигнала на ИЗ №2, наоборот, наблюдается достаточно значительное изменение давления в КС и её объёма при изменении соотношения топ-

ливо/воздух. Таким образом, можно утверждать, что сигналы ИЗ №1 зарегистрированы в одинаковых тепловых условиях и изменения электропроводности и скорости распространения пламени обусловлены влиянием только одного фактора – состава смеси.

Анализ результатов эксперимента заключается в сопоставлении значений ионного тока и скорости распространения пламени при работе с различными соотношениями расходов топлива и воздуха. На рис. 7 показаны выявленные закономерности. Взаимосвязь ионного тока в це-

пи зонда №1 и локальной скорости пламени может быть описана степенной зависимостью. Характер взаимосвязи ионного тока на зонде №2 и средней скорости пламени U_{avr} несколько отличается. Данная взаимосвязь может быть описана ло-

гарифмической зависимостью. Отличие, видимо, обусловлено, кроме непостоянности исходных условий горения (см. рис. б), изменяющимися по ходу процесса горения параметрами турбулентности.

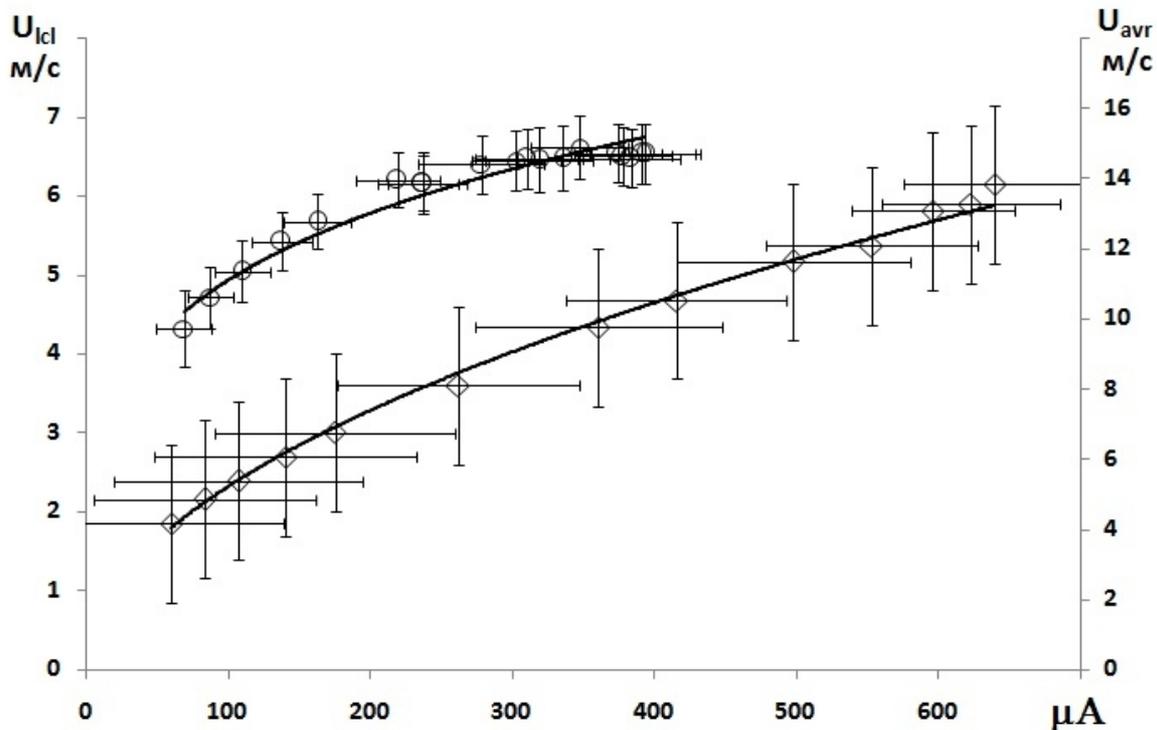


Рис. 7. Взаимосвязи локальной скорости распространения пламени U_{lcl} и ионного тока на ИЗ №1; средней скорости распространения пламени U_{avr} и ионного тока на ИЗ №2:

◇ — U_{lcl} ; ○ — U_{avr}

Ионный ток в данном эксперименте прямо пропорционален электропроводности пламени, т.е. концентрации заряженных частиц в пламени. Скорость образования заряженных частиц в пламени при химионизации обусловлена химическими процессами [1] и может быть связана со скоростью химических реакций горения [2, 6]. Локальная скорость пламени U_l также зависит от скорости реакций, поскольку параметры турбулентности не изменяются. Скорость реакций горения изменяется, в свою очередь, только благодаря изменению концентраций реагентов, поскольку температура постоянна. Нелинейный характер взаимосвязи электропроводности и скорости распространения

пламени свидетельствует о более значительном влиянии состава смеси, т.е. химического фактора, на электропроводность пламени, чем на скорость турбулентного пламени. При этом скорость распространения пламени в данном эксперименте, кроме химических факторов, зависит от параметров турбулентности, что, вероятнее всего, и обуславливает характер взаимосвязи электропроводности и скорости распространения пламени.

Выводы

Результаты эксперимента показывают наличие взаимосвязи между электропроводностью и скоростью пламени, вы-

явленные при постоянном значении средней температуры в камере сгорания. Данная закономерность подтверждает зависимость электропроводности пламени от скорости химических реакций при турбулентном горении в замкнутом объеме. Этот факт требует углублённого анализа и при должной методической проработке позволит создать инструмент анализа интенсивности химических реакций в КС при невозможности использования других экспериментальных методов диагностики горения. Этот инструмент будет полезен и при доводочных работах на горелочных устройствах, и при верификации расчётных моделей.

Библиографический список

1. Калькот, Г. Процессы образования ионов в пламени [Текст] / Г. Калькот // Вопросы ракетной техники. – 1958. – №4. – С. 78-94.
2. Соколик, А. С. О природе хемиионизации пламен [Текст] / А. С. Соколик, С. Е. Семенов // Журнал физической химии. – 1964. – №7. – С. 1784-1789.
3. Лоутон, Дж. Электрические аспекты горения [Текст] / Дж. Лоутон, Ф. Вайнберг. – М.: Энергия, 1976. – 194 с.
4. Малиновский, А. Э. Влияние переменного электрического поля высокой частоты на скорость горения газа [Текст] / А. Э. Малиновский, В. С. Россыхин, В. П. Тимковский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1934 – Т.4, Вып.2. – С. 182-188.
5. Малиновский, А.Э. Перенос ионов взрывной волной [Текст] / А.Э. Малиновский, К.Г. Ткаченко // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1934. –Т.4, Вып.2. – С. 198-202.
6. Иноземцев, Н. Н. Ионизация в ламинарных пламенах [Текст] / Н. Н. Иноземцев // Известия АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика. – 1960. – №2. – С. 59-66.
7. Соколик, А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах [Текст] / А. С. Соколик – М.: АН СССР, 1960. – 427 с.
8. Иноземцев, Н.В. Процессы сгорания в двигателях [Текст] / Н.В. Иноземцев, В.К. Кошкин; под ред. Н.В. Иноземцева. –М.: Машгиз, 1949. – 344 с.
9. Резник, В.Е. Электропроводность факела пламени неоднородной смеси при впрыске жидкого топлива в зону циркуляции за плохообтекаемым телом [Текст] / В.Е. Резник, В.В.Токарев, А.П. Шайкин // Известия высших учебных заведений, серия Авиационная техника. – 1977. – №3. – С. 93-97.
10. Степанов, Е.М. Ионизация в пламени и электрическое поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков. – М.: Металлургия, 1968. – 311 с.
11. Исследование механизма химической ионизации при высокотемпературном окислении метана в ударных волнах [Текст] / Г. С. Аравин, П. А. Власов, Ю. К. Карасевич [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1982. – Т.18. – №1. – С. 49-57.
12. Corcione, F.E. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion-current System and Optical Diagnostics of Radical Species [Text] / F. E. Corcione, B. M. Vaglicco, S. S. Merola // Proceeding on 6th COMODIA Symposium. – 2004. – №6. – P. 487-495
13. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends with BSS de-noising method [Text] / G. Zhongquan, W. Xiaomin, G. Hui [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. –2010. – №35 – P. 2918-12929.
14. Influence of Intake Tumble Ratio on General Combustion Performance, Flame speed and Propagation at a Formula One Type High-Speed Research Engine [Text] / T. Pfeffer, P. Buhler, D. Meier [et al.] // SAE tech. Paper # 2002-01-0244. – 2002. – P. 103-116.
15. Malaczynski, G. W. Ion-Sense-Based Real-Time Combustion Sensing for Closed Loop Engine Control [Text] / G. W. Malaczynski, G. Roth, D. Johnson // SAE Int. J. Engines 6(1):2013, doi:10.4271/2013-01-0354.

INTERCONNECTION OF PROPAGATION VELOCITY AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF FLAME IN ICES

© 2013 P. V. Ivashin, M. P. Ramazanov, A. Y. Tverdokhlebov,
A. P. Shaikin, I. S. Yasnikov

Togliatti State University

Investigation of regularities of interrelation between the local propagation velocity and electrical conductivity of flame with varying composition of the mixture in a spark-ignition engine was conducted. The electrical conductivity and the velocity of flame propagation near the spark plug with the average temperature in the combustion chamber being practically constant vary in the conditions of the experiment carried out. The power dependence between electrical conductivity and propagation velocity of flame is revealed in case the air-fuel ratio changes. This can be described by power dependence. The electrical conductivity of flame is shown to depend on the speed of chemical reactions in confined turbulent combustion. The results of the research can be used to develop methods of diagnosing local intensity of burning in combustion chambers.

ICE, combustion chamber, turbulent flame, speed, electrical conductivity, interconnection, intensity of burning.

Информация об авторах

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Тольяттинский государственный университет. E-mail: ivashinpv@rambler.ru. Область научных интересов: рабочие процессы ДВС, процессы горения в энергетических установках, в т.ч. с использованием альтернативных топлив.

Рамазанов Михаил Петрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Тольяттинский государственный университет. E-mail: mikeram@mail.ru. Область научных интересов: аэродинамика, газовая динамика процессов горения.

Твердохлебов Андрей Яковлевич, аспирант кафедры «Высшая математика и математическое моделирование», Тольяттинский государственный университет. E-mail: sarc@bk.ru. Область научных интересов: системы интеллектуального управления энергетических машин, системы сбора данных для аэрофизических и теплофизических экспериментов, математическая обработка сигналов.

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет. E-mail: td@tltsu.ru. Область научных интересов: рабочие процессы ДВС, процессы горения в энергетических установках (ДВС, ГТД, ГТУ), в т.ч. с использованием альтернативных топлив.

Ясников Игорь Станиславович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Тольяттинский государственный университет. E-mail: pol1971@mail.ru. Область научных интересов: кинетика неравновесных процессов в различных приложениях.

Ivashin Pavel Valentinovitch, candidate of technical science, senior researcher, Togliatti State University. E-mail: ivashinpv@rambler.ru. Area of research: work processes in IC-
Es, combustion processes in power installations including those using alternative fuels.

Ramazanov Mikhail Petrovitch, candidate of physics and mathematics, senior researcher, Togliatti State University. E-mail: mikeram@mail.ru. Area of research: aerodynamics, gas dynamics of combustion processes.

Tverdokhlebov Andrey Yakovlevitch, postgraduate student, junior research fellow of the department of higher mathematics and mathematical modeling, Togliatti State University. E-mail: sarc@bk.ru. Area of research: systems of intelligent control of energy-converting machinery, systems of data collection for experiments in aerophysics and thermal physics, mathematical signal processing.

Shaikin Alexander Petrovitch, 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: work processes in ICEs, processes of combustion in power installations including those using alternative fuels.

Yasnikov Igor Stanislavovitch, doctor of physics and mathematics, senior researcher, Togliatti State University. E-mail: pol1971@mail.ru. Area of research: kinetics of non-equilibrium processes in various applications.