

03

К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме

© И.С. Ясников, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин

Тольяттинский государственный университет,
445667 Тольятти, Россия
e-mail: kart2001@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2013 г.)

Экспериментально исследованы закономерности взаимного изменения скорости распространения и электропроводности пламени при турбулентном горении в замкнутом объеме. При анализе полученных экспериментальных данных была предложена оценка, которая аналитически описывает зависимость скорости распространения пламени от амплитуды сигнала на ионизационных зондах. Выявленная особенность на оценочной кривой зависимости скорости распространения пламени от амплитуды сигнала на ионизационных зондах, с точки зрения авторов, отвечает за конкуренцию рождения и гибели заряженных частиц в пламени и соответствует условиям квазистационарных концентраций. Предлагаемая методика и выявленные экспериментальные факты могут быть использованы для разработки способов диагностики локальной интенсивности горения в камерах сгорания.

Введение

Для усовершенствования рабочих процессов энергетических установок, повышения их эффективности и снижения токсичности продуктов сгорания необходимо знание локальных условий горения в камерах сгорания. Получение визуальной информации о локальных условиях с помощью оптических методов требует наличия прозрачных стенок камеры сгорания и не всегда технологически и экономически целесообразно, а результаты оптической диагностики не всегда могут быть адекватно интерпретированы.

Один из перспективных методов исследования горения, удовлетворяющих вышеописанным требованиям, основан на явлении электропроводности пламени углеводородов. Явление неравновесной ионизации в пламени углеводородов достаточно давно активно используется для углубления понимания механизма горения и анализа структуры пламени в различных условиях [1–4]. Анализ известных исследований ионизации пламени позволил предположить, что электропроводность пламени углеводородов содержит информацию о скорости реакций горения. Для технической реализации методик, позволяющих получить значительный объем информации о физико-химических процессах в пламени с помощью анализа его электропроводности, необходимо экспериментальное подтверждение высказанных предположений.

В работе [1] показано, что концентрация ионов в пламени пропано-воздушной и ацетилено-воздушной смесей связана со скоростью распространения ламинарного пламени более тесно, нежели чем с температурой пламени при изменении соотношения топливо-воздух. В работах [5–7] представлен анализ ионизации в различных стадиях цепного окисления метана и ацетилена. Показано, что с помощью анализа ионизации может быть дополнен кинетический механизм горения углеводородов. Однако

в практике зачастую важно знать интегральный параметр скорости реакций горения. Этим параметром является нормальная скорость распространения пламени [8]. Прямая пропорциональность между электропроводностью и нормальной скоростью распространения пламени пропано-воздушной смеси была выявлена в условиях ламинарного горения при разбавлении горючей смеси инертным разбавителем [9]. Знание о характере подобной взаимосвязи в турбулентных условиях горения может быть полезным для практического применения.

Целью настоящей работы является выявление характера взаимосвязи между электропроводностью пламени и интенсивностью реакций при турбулентном горении в замкнутом объеме. При этом интенсивность химических реакций горения предложено оценивать с помощью экспериментально определяемых значений скорости распространения пламени.

Экспериментальная методика

Эксперимент проведен в четырехтактном одноцилиндровом исследовательском двигателе внутреннего сгорания (ДВС). ДВС был выбран как объект экспериментального исследования из-за возможности достаточно просто измерять скорость и электропроводность движущегося фронта пламени, а также из-за возможности в короткий промежуток времени набирать большую выборку результатов циклов горения при постоянных начальных условиях. 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 объема камеры сгорания (КС). КС цилиндрической формы диаметром 85 mm и искровым зажиганием с

боковой стороны. В КС установлены 2 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 течет 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 постоянного объема и в ДВС [2], а также исследованиями горения в ДВС с помощью быстродействующих газоотборных клапанов [10], когда положение зоны реакции определялось с помощью быстрого отбора и анализа проб газов из камеры сгорания. Кроме того, в нашем эксперименте в КС был установлен быстродействующий датчик давления, позволяющий оценивать скорость выгорания смеси по нарастанию давления.

Ионизационный зонд № 1 был установлен на расстоянии $L_1 = 7 \text{ mm}$ от свечи зажигания, в то время как ионизационный зонд № 2 был установлен на расстоянии $L_2 = 80 \text{ mm}$ от свечи зажигания (рис. 1). Таким образом, в эксперименте с помощью регистрации ионного тока в цепи зонда № 1 оценивалась локальная (около свечи зажигания) скорость распространения пламени, а при регистрации тока в цепи зонда № 2 оценивалась средняя скорость распространения пламени. Пример регистрации осциллограмм при горении показан на рис. 2. Параметры оценки сигнала ионного тока определяются по переднему фронту нарастания сигнала и его максимальному значению.

Для поддержания постоянного режима работы двигателя контролировались следующие параметры: температура воздуха на впуске (52°C), температура охлаждающей жидкости (100°C), частота вращения коленчатого вала (900 min^{-1}), массовый расход воздуха и топлива, положение коленчатого вала. Момент зажигания на

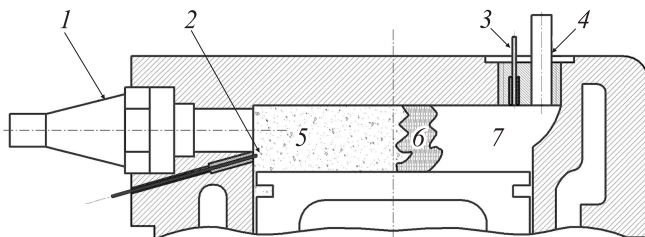


Рис. 1. Схема экспериментальной камеры сгорания: 1 — свеча зажигания, 2 — ионизационный зонд № 1, 3 — ионизационный зонд № 2, 4 — датчик давления, 5 — продукты сгорания, 6 — фронт пламени, 7 — топливно-воздушная смесь.

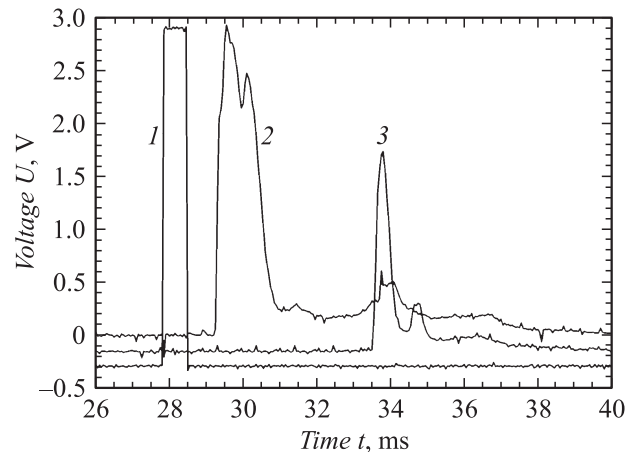


Рис. 2. Осциллограммы при горении: 1 — сигнал отметчика искрового разряда, 2 — сигнал ионизационного зонда № 1, 3 — сигнал ионизационного зонда № 2.

всех режимах был постоянным, чем обеспечивалось постоянство начальных условий горения.

В качестве варьируемого параметра эксперимента было выбрано соотношение расходов воздуха и окислителя, которое оценивалось коэффициентом избытка воздуха α , который рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{G_{\text{air}}}{G_{\text{fuel}}}, \quad (1)$$

где G_{air} — массовый расход воздуха, G_{fuel} — массовый расход топлива, $l_0 = 14.96$ — стехиометрический коэффициент для бензина. В рамках проведенных экспериментов коэффициент избытка воздуха изменялся от 0.7 до 1.4.

Локальная скорость распространения пламени V_{loc} около свечи оценивалась по формуле

$$V_{\text{loc}} = \frac{L_1}{\tau_1}, \quad (2)$$

где L_1 — расстояние от центрального электрода свечи зажигания до ионизационного зонда № 1, τ_1 — время от искрового разряда до возникновения сигнала на ионизационном зонде № 1.

Средняя скорость распространения пламени V_{aver} 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

$$V_{\text{aver}} = \frac{L_2}{\tau_2}, \quad (3)$$

где L_2 — расстояние от центрального электрода свечи зажигания до ионизационного зонда № 2, τ_2 — время от искрового разряда до возникновения сигнала на ионизационном зонде № 2.

Методика эксперимента заключалась в регистрации осциллограмм ионного тока на каждом режиме в количестве от 100 до 200 циклов горения подряд. Обработка

осциллограмм заключалась в определении усредненных параметров оценки сигнала по всему ансамблю циклов 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 описывалась кривой нормального распределения. Нестабильные режимы с количеством пропусков зажигания более 5% не обрабатывались.

Погрешность оцениваемых параметров ионного тока складывается из систематической погрешности измерительной цепи, составляющей не более 1%, и межциклового рассеяния, связанного с неидентичностью циклов горения и флуктуациями пламени. Исходя из обработки массива данных, на каждом режиме получены значения относительной погрешности определения средних значений ионного тока (для зонда № 1 — 24%, для зонда № 2 — 27%) и скорости пламени (для локальной скорости — 27%, для средней — 14%).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате измерений ионного тока на каждом режиме получены зависимости ионного тока от состава смеси (рис. 3). Характерно наличие максимума ионного тока при горении обогащенной смеси ($\alpha = 0.87$). При обеднении смеси до предела, соответствующего появлению пропусков зажигания, ионный ток значительно падает и в циклах с отсутствующим горением не регистрируется.

Практически аналогичный характер зависимости от состава смеси наблюдается для локальной и средней скоростей распространения пламени (рис. 4).

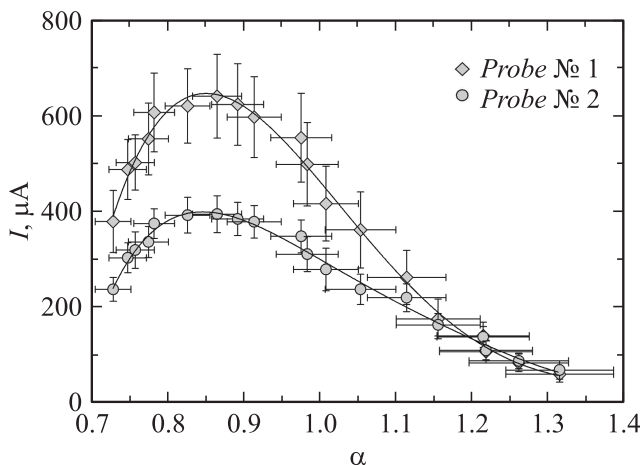


Рис. 3. Зависимости амплитуды сигнала на ионизационных зондах от состава смеси (коэффициента избытка воздуха).

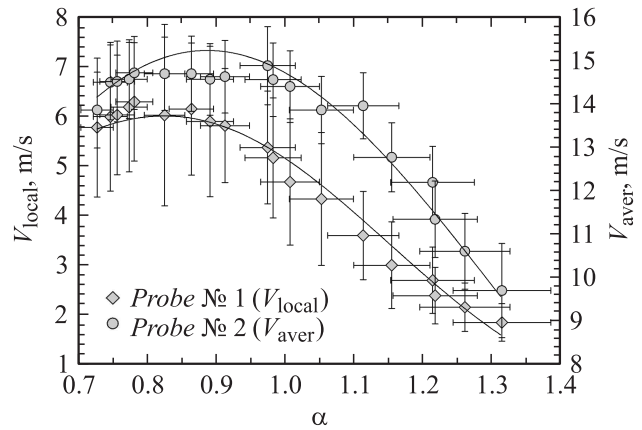


Рис. 4. Зависимости локальной и средней скоростей распространения пламени от состава смеси (коэффициента избытка воздуха).

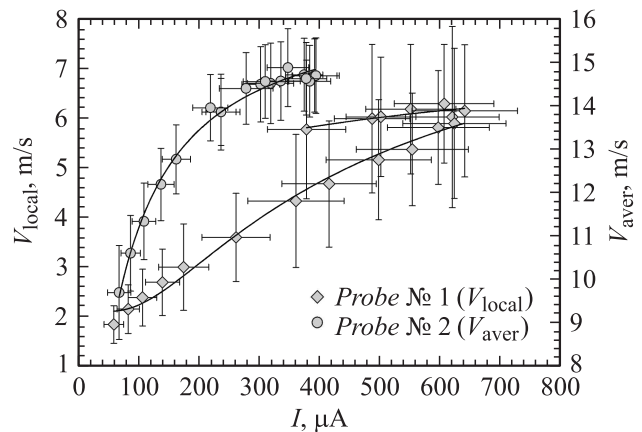


Рис. 5. Зависимости локальной и средней скоростей распространения пламени от амплитуды сигнала на ионизационных зондах.

Далее, используя результаты, представленные на рис. 3 и 4 и исключая параметр α (коэффициент избытка воздуха), мы сопоставили значения ионного тока и скорости распространения пламени при работе с различными соотношениями расходов топлива и воздуха. На рис. 5 показаны выявленные закономерности.

Попробуем из общефизических соображений оценить вид функциональной зависимости ионного тока I , детектируемого на зонде от скорости распространения пламени V . Очевидно, что ионный ток I в данном эксперименте прямо пропорционален электропроводности пламени, т.е. концентрации заряженных частиц n в пламени. Без ограничения общности можно считать, что концентрация заряженных частиц в пламени будет обратно пропорциональна энергии активации процесса химионизации ΔE_a [5–7]. Таким образом,

$$I \propto n \propto \frac{1}{\Delta E_a}. \quad (4)$$

С другой стороны, скорость образования заряженных частиц в пламени при химионизации обусловлена

химическими процессами [1] и связана со скоростью химических реакций горения [9].

Скорость распространения пламени V также пропорциональна скорости химических реакций горения w , а она, в свою очередь, определяется фактором Аррениуса:

$$V \propto w \propto \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_b T}\right). \quad (5)$$

Совместный анализ условий (4) и (5) приводит к следующей функциональной зависимости скорости распространения пламени V от регистрируемого ионного тока I в виде

$$V \propto \exp\left(-\frac{B}{I}\right), \quad (6)$$

где B — некоторая константа.

Без ограничения общности можно считать, что данная зависимость имеет вид

$$V = A \exp\left(-\frac{B}{I}\right) + C, \quad (7)$$

где A , B и C — некоторые константы.

Наилучшее совпадение функциональной зависимости (7) с экспериментальными данными было получено при значениях параметров $A_1 \approx 7.097$, $B_1 \approx 400.4$, $C_1 \approx 2.103$ для зонда № 1 и при значениях параметров $A_2 \approx 11.61$, $B_2 \approx 62.48$, $C_2 \approx 4.934$ для зонда № 2. Соответствующие зависимости (7) для каждого из зондов представлены линиями на рис. 5.

Стоит отметить, что предложенная функциональная зависимость (7) является возрастающей функцией и меняет знак второй производной в точке с абсциссой $x_0 = B/2$. В случае зонда № 2 данный перегиб должен происходить при значении ионного тока $I_{02} \approx 30 \mu\text{A}$, что лежит ниже области регистрируемых токов, а в случае зонда № 1 — при значении $I_{01} \approx 200 \mu\text{A}$, что лежит в интервале регистрируемых токов.

Наличие перегиба зависимости $V(I)$ при изменении коэффициента избытка воздуха α может свидетельствовать, на наш взгляд, о регистрации точки, в которой изменяется кинетика ионизации при горении. Фактически в окрестности этой точки имеет место конкуренция рождения и гибели заряженных частиц в пламени, а сама точка соответствует условию квазистационарных концентраций. Для того чтобы подтвердить наличие такого перегиба требуются более прецизионные измерения зависимости $V(I)$ в области малых токов. Работа в данном направлении продолжается в настоящее время.

Отметим также, что взаимосвязь ионного тока в цепи зонда № 1 и локальной скорости пламени обладает „гистерезисом“ (рис. 5) при горении богатых смесей с коэффициентом избытка воздуха $\alpha < 0.85$. Данный эффект был проверен несколько раз при других начальных условиях горения, показано, что эффект действительно имеет место, а не является следствием погрешности измерений. Видимо, причиной этого является снижение

скоростей реакций горения, связанных с образованием заряженных частиц, что и обуславливает падение электропроводности турбулентного пламени при незначительном падении его скорости. Однако тепловыделение в процессе горения обогащенных смесей остается близким к максимальному и поэтому температура в зоне горения остается близкой к температуре, соответствующей максимуму скорости пламени. При этом в искривленных фронтах турбулентного пламени происходит локальное обогащение смеси кислородом из-за разницы коэффициентов диффузии кислорода и бензина [11]. Таким образом, локальные значения коэффициента избытка воздуха и высокая температура обеспечивают поддержание скорости пламени. Кроме того, наличие „гистерезиса“ говорит о том, что механизм ионизации пламени в условиях нашего эксперимента нельзя напрямую связывать с термоэмиссией электронов с поверхности сажевых частиц, образовавшихся в богатом углеводородном пламени. Подобный механизм предложен в [3]. В нашем эксперименте появление сажи (оценивалось визуально по внешнему виду свечи зажигания и поверхности камеры сгорания) не вызывает роста ионного тока, как следовало бы ожидать вследствие сажевыделения, а, наоборот, вызывает резкое его снижение.

Заключение

Результаты эксперимента показывают наличие взаимосвязи между электропроводностью и скоростью пламени в камере сгорания. Данная закономерность говорит о наличии зависимости электропроводности пламени от скорости химических реакций при турбулентном горении в замкнутом объеме. Этот факт требует углубленного анализа. При должной методической проработке на основе выявленной закономерности может быть разработан инструмент для 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 расчетных моделей.

Список литературы

- [1] Калькот Г. // Вопросы ракетной техники. 1958. № 4. С. 78–94.
- [2] Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 427 с.
- [3] Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Металлургия, 1968. 311 с.
- [4] Резник В.Е., Токарев В.В., Шайкин А.П. // Известия вузов. Сер. Авиационная техника. 1977. № 3. С. 93–97.
- [5] Аравин Г.С., Власов П.А., Карасевич Ю.К., Маколкин Е.В., Нейгауз М.Г. // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18. № 1. С. 49–57.

- [6] Карасевич Ю.К. // Кинетика и катализ. 2009. Т. 50. № 1. С. 80–89.
- [7] Карасевич Ю.К. // Кинетика и катализ. 2009. Т. 50. № 5. С. 643–652.
- [8] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович И.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 479 с.
- [9] Иноземцев Н.Н. // Известия АН СССР. Энергетика и автоматика. 1960. № 2. С. 59–66.
- [10] Иноземцев Н.В., Кошкин В.К. Процессы сгорания в двигателях. М.: Машгиз, 1949. 344 с.
- [11] Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986. 288 с.