

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ШИРИНЫ ЗОНЫ ГОРЕНИЯ СО СКОРОСТЬЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ И ИОННЫМ ТОКОМ В УСЛОВИЯХ ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ**

© 2014

*А.П. Шайкин*, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»*А.Д. Дерячев*, младший научный сотрудник НИГ-17*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

*Ключевые слова:* процесс сгорания; рабочий процесс; скорость пламени; токсичность; отработавшие газы; турбулентность; ширина зоны горения; ионный ток; электропроводность пламени; датчик ионизации; ионизация; двигатель внутреннего сгорания.

*Аннотация:* В представленной статье рассматриваются эмпирические вопросы, связанные с определением характеристик процесса сгорания с использованием явления электропроводности пламени в камере сгорания двигателя с искровым зажиганием. С использованием литературных источников проведен анализ современных моделей сгорания, а также ширины зоны турбулентного горения. В статье ставится задача исследовать влияние различных параметров на протяженность зоны горения. Экспериментально исследованы зависимости ширины зоны турбулентного горения со скоростью распространения пламени и пиком ионного тока с использованием датчика ионизации, расположенного в наиболее удаленной зоне камеры сгорания поршневого двигателя с искровым зажиганием. В первой части статьи проведен анализ теоретических и экспериментальных работ в области процесса сгорания в поршневых двигателях, описаны основные характеристики, размеры, формы и особенности турбулентного пламени, характерного двигателям внутреннего сгорания. Приводится сравнительный анализ полученных результатов экспериментов, проведенных в Тольяттинском государственном университете, и данных экспериментов Н.В. Иноземцева. Приведена качественная и количественная оценка значений ширины зоны турбулентного горения. Во второй части статьи описана методика определения ширины зоны горения по характеристикам сгорания топливно-воздушной смеси, найденным по ионному току, проходящему через два электрода датчика, расположенного в удаленной зоне камеры сгорания поршневого двигателя. Также приводятся графики зависимостей ширины зоны турбулентного горения от состава смеси, количества добавляемого водорода, скоростного режима работы двигателя, скорости распространения пламени и ионного тока. Представлен подробный анализ влияния параметров и характеристик сгорания на ширину зоны горения. Выявлена закономерность влияния относительного значения пика ионного на протяженность зоны турбулентного горения.

Основные характеристики сгорания топливно-воздушной смеси (ТВС) – турбулентная и нормальная скорость распространения пламени и ширина зоны турбулентного горения (ЗТГ) – в значительной мере определяют токсичность отработавших газов [1; 2] и эффективность работы двигателя с искровым зажиганием [3].

И если скорости распространения пламени в потоке исследованы и теоретически, и экспериментально достаточно подробно, то в условиях двигателя внутреннего сгорания (ДВС) эти параметры всё еще являются предметом дискуссий. Кроме того, ширина зоны горения в камере сгорания ДВС исследована недостаточно. Еще академик Б.С. Стечкин в 50–60 гг. прошлого века отмечал высокую значимость этого параметра горения для рабочего процесса [4]. В этом направлении известны работы А.В. Талантова при горении в потоке [5] и Н.В. Иноземцева при горении в поршневом двигателе с искровым зажиганием [6]. Стоит отметить, что последняя работа, выполненная в 40-х годах прошлого века, отличается высокой методической обоснованностью и тщательностью экспериментального анализа, доступного в технике того времени. В настоящее время экспериментальными и расчетными исследованиями ширины зоны горения в ДВС занимаются ведущие исследовательские организации. Для эксперимента обычно используются лазерные методы. Результаты последних исследований [7; 8] показывают, что в современных ДВС с искровым зажиганием сгорание может быть описано моделью микроламинарных пламен [9]. То есть определенная часть камеры сгорания заполнена сильно искривленными и разорванными фронтами пламени (thin reaction zones). Эта зона фронтов пламени

изменяет свои размеры и перемещается по камере сгорания до завершения процесса при достижении пламенем стенок. Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования структуры зоны турбулентного горения однородной топливно-воздушной смеси (ТВС) представлено в монографии Т. Пойнсо и Д. Вейнанта [10]. Авторами, в соответствии с диаграммой моделирования турбулентного горения [7], рассматриваются три вида структуры зоны турбулентного горения, предложенные Р. Борги и В. Дестраем [11], а именно: тонкое искривленное пламя, «уплотненное искривленное пламя» и «плотное» пламя. Общий подход при рассмотрении предложенных структур зоны турбулентного горения заключается в определении ширины зоны горения размером между линиями, огибающими кривую постоянной начальной температуры свежей ТВС перед зоной горения и кривую температуры горения в этой зоне. Для тонкого искривленного пламени зона подогрева рассматривается как для ламинарного пламени, для «уплотненного» пламени выделяются осредненные зоны подогрева и химических реакций горения. Границей между этими двумя осредненными зонами является линия, огибающая кривую местоположения температуры горения со стороны зоны подогрева.

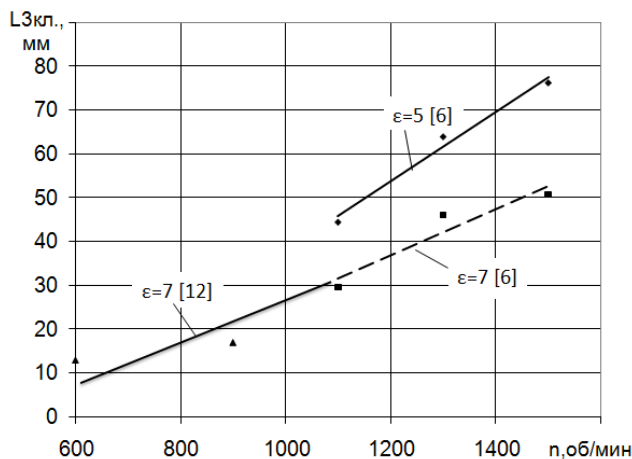
Собственно, размеры этой зоны и динамика ее изменения по ходу циклового процесса сгорания в ДВС и представляют самостоятельный интерес для исследования аналогично ширине зоны турбулентного горения в потоке.

Исследования, проводимые в Тольяттинском государственном университете (ТГУ) [12], показали наличие связи между шириной ЗТГ и изменением интенсив-

ности их протекания на концентрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах.

Анализ экспериментальных данных Н.В. Иноземцева по определению ширины зоны горения при уточнении величины скоростей распространения пламени в зонах установки газоотборных зондов и пересчет уточненных значений с привлечением результатов исследований И.И. Вибе [13] и А.В. Талантова [5] со степени сжатия 5 на степень сжатия 7, при которой проводились наши эксперименты, позволил провести сравнение величин протяженности зоны горения, полученных различными способами [14].

На рисунке 1 представлены результаты определения ширины ЗТГ по данным Н.В. Иноземцева [6] и ширины ЗТГ, определенных по измерению ионных токов в пламени по ионизационным датчикам, установленным на расстояниях 79,85 и 91 мм от свечи зажигания, что соответствует условиям расположения 3-го газоотборного клапана в экспериментах Н.В. Иноземцева [6].



**Рис. 1.** Зависимость ширины ЗТГ экспериментов [6] с шириной ЗТГ экспериментов [12] от частоты вращения коленчатого вала при  $\alpha=0,93$ :  $L_{3кл.}$  – ширина ЗТГ у третьего клапана [6]

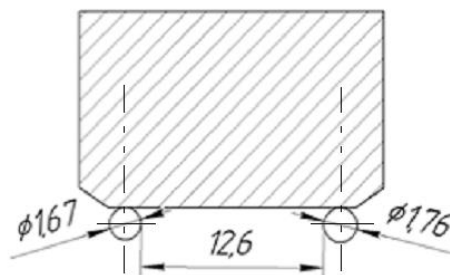
Получено качественное и количественное совпадение величины протяженности зоны горения, вычисленное различными способами.

Эти исследования проводились при использовании 5-электродного ионизационного датчика [6], показания с которого снимались не в один момент времени, а поочередно – от первого до пятого электрода. Применение подобной методики проведения испытаний вносило дополнительные погрешности при регистрации времени появления и исчезновения ионного тока по 5 электродам ионизационного датчика из-за неидентичности протекания рабочих циклов во времени.

К настоящему времени в ТГУ разработана регистрирующая аппаратура, позволяющая одновременно регистрировать параметры ионного тока и давления по 5 датчикам: давления, ионизационным, датчика искры и частоты вращения коленчатого вала.

Эксперименты проведены на универсальной исследовательской установке УИТ-85, описание которой представлены в литературном источнике [12].

В экспериментах использовался 2-электродный датчик, схема которого изображена на рисунке 2.

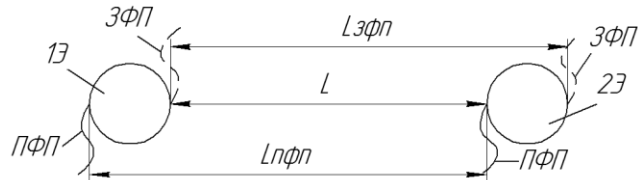


**Рис. 2.** Экспериментальный ионизационный датчик

Диаметры переднего и заднего электродов датчика равны 1,67 мм и 1,76 мм соответственно.

Направление распространения фронта пламени определялось постановкой датчика в 2 положения: первое – электроды располагались в одной плоскости со свечей зажигания, второе – перпендикулярно первому положению. Эксперименты показали отсутствие закрутки ТВС при горении в горизонтальной плоскости.

Ширина ЗТГ определялась по переднему и заднему фронту прохождения пламени через чувствительные элементы датчика. Схема размеров и границ датчика представлена на рисунке 3.



**Рис. 3.** Схема размеров и границ датчика для расчета:

- ПФП – передний фронт пламени;
- ЗФП – задний фронт пламени;
- 1Э – ближний электрод;
- 2Э – удаленный электрод;
- $L_{3фп}$  – расстояние между задними фронтами пламени;
- $L$  – расстояние между электродами;
- $L_{пфп}$  – расстояние между передними фронтами пламени

Ширину ЗТГ можно рассчитать по следующим формулам и зависимостям.

Находятся турбулентные скорости распространения переднего и заднего фронтов пламени по формулам

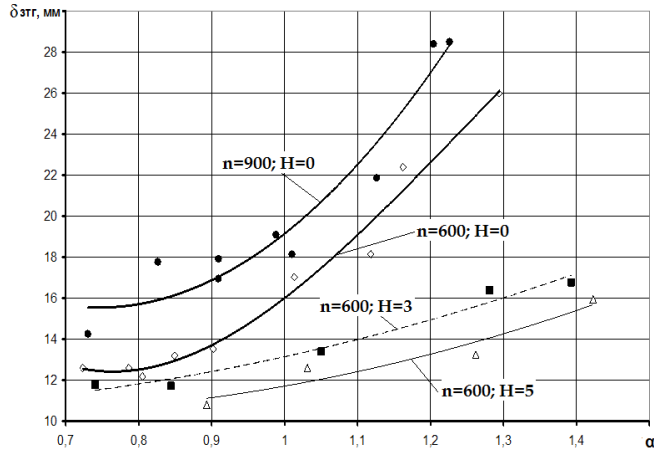
$$U_{ПП} = \frac{L_{ПФП}}{\tau_{ПФП}}; \quad U_{ТЗ} = \frac{L_{ЗФП}}{\tau_{ЗФП}}.$$

Вычисляется ширина зоны химической реакции по формуле

$$\delta_{ЗТГ} = L + U_{ТЗ} \cdot (\tau_{1ЗФП} - \tau_{2ПФП}),$$

где  $\tau_{13ФП}$  – момент времени прохождения заднего фронта пламени у первого электрода;  
 $\tau_{2ФП}$  – момент времени прохождения переднего фронта пламени у третьего электрода.

Результаты обработки экспериментов показаны на рисунках 4 и 5.



**Рис. 4.** Зависимость ширины зоны турбулентного горения от коэффициента избытка воздуха:  
*n* – частота вращения коленчатого вала, об/мин;  
*H* – количество добавки водорода в % от расхода топлива

С увеличением добавки водорода ширина ЗТГ сокращается. Для  $\alpha = 1$  и  $\alpha = 1,3$  добавка 3 % водорода приводит к сокращению ширины зоны турбулентного горения на 19 и 35 % соответственно. Увеличение добавки водорода до 5 % ведет к сокращению ширины ЗТГ на этих режимах на 27 и 45 %. Увеличение частоты вращения коленчатого вала с 600 до 900 об/мин привело к значительному увеличению протяженности горения: на 19 % при  $\alpha=1$  и на 15% при  $\alpha=1,2$ .

С ростом коэффициента избытка воздуха влияние добавки водорода на ширину зоны горения заметно увеличивается.

Измерения ионного тока, регистрация промежутков времени появления ионного тока, достижения максимума его амплитуды и исчезновения ионного тока позволяют определять положение передней (ПФ) и задней (ЗФ) границы ЗТГ относительно пика ионного тока в зоне горения и отношение величины ионного тока при добавке водорода к ионному току без добавки водорода ( $I_{hx}/I_{h0}$ ) в зависимости от коэффициента избытка воздуха и количества добавляемого водорода. Полученные зависимости представлены на рисунке 5.

С ростом коэффициента избытка воздуха влияние добавки водорода на ширину зоны горения и рост ионного тока заметно возрастает.

Приведенные данные показывают, что расположение передней границы зоны горения относительно положения пика ионного тока слабо зависит как от скоростного режима, так и от величины добавки водорода, максимальное изменение составляет около 12 %. Следовательно, ширина ЗТГ изменяется в основном за счет задней границы зоны горения. С увеличением

скоростного режима и коэффициента избытка воздуха ширина ЗТГ возрастает в связи с изменением положения задней границы зоны горения.

Добавка водорода уменьшает ширину ЗТГ из-за сокращения части зоны горения, расположенной после положения пика ионного тока. При сокращении зоны горения за счет добавки водорода происходит увеличение максимального значения ионного тока. Рассматриваемое явление представлено на рисунке 5. Так, при  $\alpha=1,3$  добавка 3 % газообразного водорода приводит к сокращению ширины зоны горения, расположенной за пиком ионного тока, в 2 раза и увеличению значения пика ионного тока в 2 раза по сравнению с аналогичными параметрами без добавки водорода.

В диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха 1,0–1,4 наблюдается практически линейная зависимость сокращения ЗТГ от увеличения величины ионного тока.

Характер полученных зависимостей может быть объяснен увеличением скорости распространения пламени [1; 2], турбулентной и нормальной, обусловленной добавками водорода в ТВС. Причем рост турбулентной скорости распространения пламени при добавке водорода обусловлен увеличением нормальной скорости распространения пламени.

На рисунке 6 представлена зависимость ширины ЗТГ от видимой турбулентной скорости распространения переднего фронта пламени между электродами ионизационного датчика (на длине 14,27 мм).

В представленных координатах ширина ЗТГ не зависит от добавки водорода. Подобное протекание зависимости объясняется увеличением скорости распространения пламени за счет добавки водорода в ТВС. Следовательно, при проведении экспериментальных исследований ширину зоны турбулентного горения можно оценивать по видимой скорости распространения пламени.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

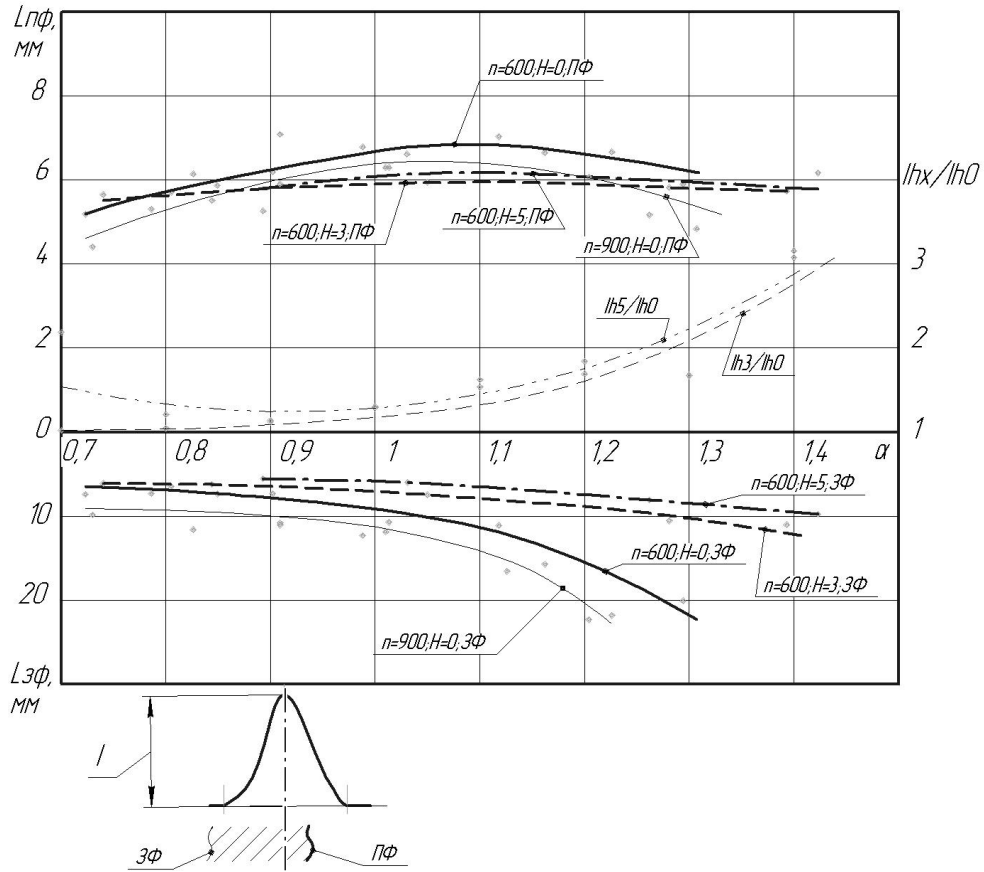
1. Ширина зоны турбулентного горения определяется составом смеси, добавками химических регуляторов горения, скоростным режимом работы двигателя – рост коэффициента избытка воздуха и оборотов двигателя ведет к увеличению ширины зоны горения, добавки химических активаторов горения – к уменьшению.

2. Ширина ЗТГ может оцениваться по местной скорости распространения пламени в зоне установки ионизационных датчиков, что упрощает проведение экспериментальных исследований.

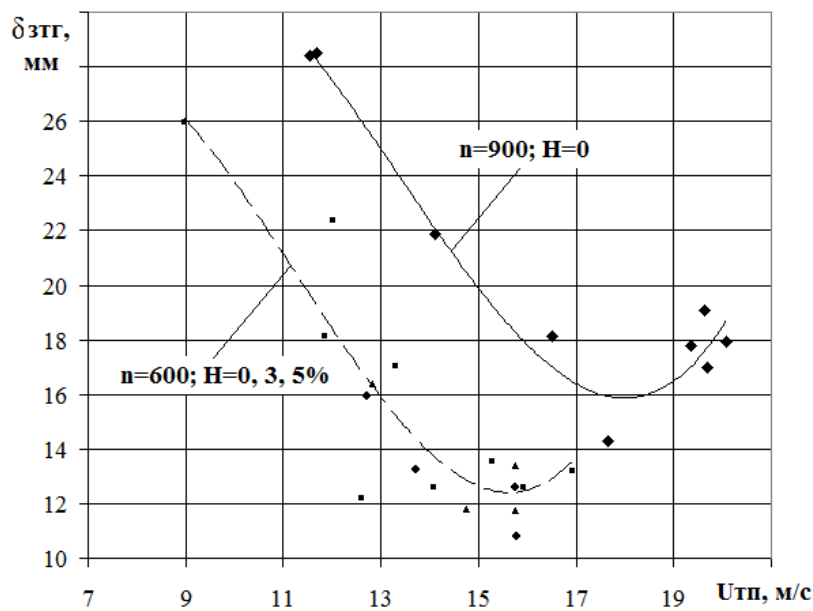
3. Относительно положения пика ионного тока передняя граница зоны горения незначительно изменяет свое положение при изменении параметров, указанных в п. 1, подавляющая часть изменений ширины ЗТГ происходит между местоположением пика тока и задней границей горения.

4. Изменение ширины ЗТГ определяется интенсивностью протекания химических реакций горения, оцениваемых по величине ионного тока. Причем получена линейная зависимость изменения ширины зоны горения от ионного тока.

Данная работа выполнена в рамках Государственного задания, проект № 394.



**Рис. 5.** Границы ЗТГ относительно пика ионного тока в этой зоне: ось абсцисс – положение пика ионного тока относительно передней и задней границы ЗТГ;  $L_{пф}$  и  $L_{зф}$  – протяженность передней и задней границы зоны горения от положения пика ионного тока соответственно;  $n$  – частота вращения коленчатого вала;  $H$  – количество добавки водорода в %; ПФ и ЗФ – передний и задний фронт пламени;  $I_{пх}/I_{п0}$  – отношение величины ионного тока с добавкой водорода к ионному току без добавки водорода;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха



**Рис. 6.** Зависимость ширины зоны турбулентного горения от скорости распространения переднего фронта пламени:  $H$ , %:  $\blacklozenge$  – 0;  $\blacktriangle$  – 3;  $\blacksquare$  – 5

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Коломиец П.В., Смоленский В.В., Шайкина Н.А. Взаимосвязь скорости распространения и электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов бензиновых двигателей // XIV Симпозиум по горению и взрыву : тезисы докладов. Черноголовка, 2008. 191 с.
2. Шайкин А.П., Бобровский И.Н., Брызгалов А.А., Сухов С.А. Исследование скорости распространения пламени, ширины зоны и интенсивности химических реакций горения в двигателе с искровым зажиганием // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 5 (29). С. 49–53.
3. Смоленский В.В., Шайкин А.П. Основные направления и перспективы создания энергоэффективных двигателей для транспортных средств // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 1-9. С. 2261–2265.
4. Стечкин Б.С. О методе совместного исследования распространения пламени и изменения давления в двигателе с искровым зажиганием // Избранные труды: научные и библиографические материалы. М., 2005. С. 201–209.
5. Талантов А.В. Горение в потоке. М., 1978. 160 с.
6. Иноземцев Н.В., Кошкин В.К. Процессы сгорания в двигателях. М., 1949. 173 с.
7. Peters N. Turbulent Combustion. England, 2000. 322 p.
8. Keck J. C. Turbulent Flame Structure and Speed in Spark-Ignition Engines // XIX Symposium (International) on Combustion. USA, 1982. P. 1451–1466.
9. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М., 2006. 352 с.
10. Poinso T., Veynante D. Theoretical and Numerical Combustion. Philadelphia, 2001. 540 p.
11. Borghi R., Destriau M., Combustion and flames: chemical and physical principles. France, 1998. 392 p.
12. Шайкин А.П., Бобровский И.Н., Ивашин П.В., Дурманова Н.А., Понизов М.А. Сгорание топливно-воздушной смеси вблизи стенки цилиндра двигателя с искровым зажиганием // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 2. С. 52–56.
13. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. М., 1962. 271 с.
14. Павлов Д.А., Бортников Л.Н. Исследование влияния добавок водорода на показатели ДВС при гетерогенном способе формирования ТВС // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4. С. 183–187.

## THE RELATION OF COMBUSTION AREA WIDTH WITH FLAME PROPAGATION VELOCITY AND IONIC CURRENT WITHIN THE SPARK-IGNITION ENGINE

© 2014

*A.P. Shaikin*, Doctor of Engineering, Professor of the Department «Energy Machines and Control Systems»  
*A.D. Deryachev*, junior research scientist of RST-17  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* burning; width; flame; velocity; propagation; ionic current; peak; ionization detector; flame front; combustion; turbulence; combustion chamber; reciprocating engines.

*Annotation:* The article covers the empirical issues related to the definition of the combustion process features using the phenomenon of flame electric conductivity within the combustion chamber of the spark-ignition engine. Using the sources of literature, the authors carried out the analysis of modern models of combustion and the turbulent combustion area width. The article sets the task to study the impact of various parameters on the combustion area spread. The relations of the turbulent combustion area width with flame propagation velocity and ionic current peak were experimentally studied using the ionization detector located in the outermost area of the combustion chamber of the reciprocating spark ignition engine. In the first part of the article the authors carried out the analysis of theoretical and experimental work in the sphere of combustion process within the reciprocating engines, described the main characteristics, dimensions, shape and the peculiarities of turbulent flame typical for internal combustion engines. The authors give comparative analysis of the results of experiments carried out in TSU and the experimental data received by N.V. Inozemtsev. The work presents the qualitative and quantitative assessment of values of the turbulent combustion area width. In the second part of the article the authors describe the procedure of determining the combustion area width by the characteristics of combustion of fuel-air mixture found by the ionic current passing through the two detector electrodes which is located in the outermost area of the combustion chamber of the reciprocating engine. The authors also provide the diagrams of dependency of the turbulent combustion area width on the mixture composition, the amount of hydrogen added, the speed-range of engine operation, the flame propagation velocity and the ionic current. The detailed analysis of impact of combustion parameters and characteristics on the combustion area width is presented in the article. The authors determined the regularity of impact of the ionic peak relative value on the turbulent combustion area spread.