

03

О связи ширины зоны турбулентного горения с составом топлива, давлением, скоростью распространения и электропроводностью пламени

© А.П. Шайкин, И.Р. Галиев

Тольяттинский государственный университет,
445667 Тольятти, Россия
e-mail: sbs777@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 31 мая 2019 г.

Принято к публикации 19 января 2020 г.

Представлены результаты экспериментального изучения взаимосвязи ширины зоны турбулентного горения (ЗТГ) с составом композитного топлива (hythane), максимальным давлением в камере сгорания переменного объема, скоростью распространения и электропроводностью турбулентного пламени. Выявлено, что ширина ЗТГ имеет характерную зависимость от состава hythane. Экспериментально обнаружено, что, несмотря на изменение коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в топливе, интенсивности турбулентности и вида топлива (hythane и бензин), сохраняются неизменными зависимости ширины ЗТГ от турбулентной скорости распространения пламени и от электропроводности пламени, а также зависимость максимального давления от ширины ЗТГ. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и доводке энергоэффективных и малоэмиссионных камер сгораний.

Ключевые слова: пламя, электропроводность, ширина пламени, скорость распространения пламени.

DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49437.65-19

Введение и постановка задачи

В связи с постоянным ростом цен на топливо и законодательным ужесточением концентрации токсичных компонентов в выхлопных газах энергоустановок остаются актуальными вопросы дальнейшего улучшения их экологических и энергетических характеристик. Одним из наиболее быстрореализуемых способов решения данной проблемы является использование композитных топлив. В последнее десятилетие ученые и инженеры ведущих стран мира уделяют большое внимание новому топливу hythane — смеси природного газа с водородом [1,2]. В США, Китае, Индии и Норвегии действуют программы государственной поддержки потребителей hythane [3,4]. Это обусловлено тем, что использование hythane способствует значительному снижению токсичности выхлопа двигателя и повышению его тягово-динамических показателей [5,6]. Кроме этого, имеется возможность использовать действующие газонаполнительные компрессорные станции и газобаллонное оборудование для заправки двигателей hythane, при этом стоит отметить, что стоимость hythane сопоставима со стоимостью бензина, что делает перспективным его использование с экономической точки зрения.

Для создания новых малоэмиссионных и энергоэффективных камер сгораний (КС), использующих hythane, необходимо глубокое изучение процесса сгорания композитного топлива. Процесс сгорания композитного углеводородного топлива в поршневых энергоустановках представляет собой сложный физико-химический про-

цесс, протекающий при изменении в течение нескольких миллисекунд: давления, температуры, объема КС, масштаба и интенсивности турбулентности, ширины зоны турбулентного горения (ЗТГ), турбулентной и нормальной скоростей распространения пламени. В настоящее время остается малоизученным влияние на ширину ЗТГ химического состава композитного топлива (т.е. hythane), скорости распространения и электропроводности турбулентного пламени. Отсутствуют данные о взаимосвязи ширины ЗТГ с максимальным давлением сгорания в КС переменного объема. Исследования в данной области необходимы для создания новых энергетических установок, использующих hythane и соответствующих современным требованиям по мощности, экономичности и токсичности.

Цель работы: изучить связь ширины зоны турбулентного горения с составом композитного топлива (hythane), максимальным давлением в камере сгорания переменного объема, скоростью распространения и электропроводностью турбулентного пламени.

Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились в КС переменного объема с искровым зажиганием [7]. В качестве топлива использовался hythane. Методика эксперимента заключалась в параллельной регистрации сигналов с искры зажигания, датчика расхода воздуха, датчика давления и ионизационного датчика (ИД). Варьируемыми факторами в экспериментах являлись: частота вращения коленчатого

вала двигателя ($n = 600$ и 900 min^{-1}), коэффициент избытка воздуха (α) и концентрация водорода в *hythane*, составляющая $r_H = 29, 47$ и 58% (по объему). Ширина ЗТГ определялась по формуле (1):

$$\delta = U_{av} \cdot t - D \quad (1)$$

$$U_{av} = \frac{L}{t}, \quad (2)$$

где U_{av} — средняя скорость распространения пламени [m/s]; t_s — продолжительность сигнала ионного тока [s]; D — диаметр электрода ИД [m]; L — расстояние от свечи зажигания до электрода ИД [m], t — промежуток времени от начала зажигания до появления ионного тока в ИД [s].

Для придания исследуемой связи большей универсальности, т.е. независимости от формы КС и газодинамических характеристик, все значения представлены в относительных величинах — отношения анализируемых параметров к параметрам при стехиометрическом составе смеси, как это представлено для ширины ЗТГ:

$$\delta_{rel} = \frac{\delta_{\alpha=x}}{\delta_{\alpha=1}}, \quad (3)$$

где δ — ширина ЗТГ при стехиометрическом составе топливоздушная смеси (ТВС), м; α — коэффициент избытка воздуха; x — текущее значение коэффициента избытка воздуха.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследование ширины ЗТГ показало, что при коэффициентах избытка воздуха от 0.9 до 1.1 увеличение интенсивности турбулентности в 1.5 раза (достигаемое за счет роста частоты вращения коленчатого вала двигателя с 600 до 900 min^{-1}) не приводит к заметному изменению ширины ЗТГ. Так, изменение δ_{rel} при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ составило всего 2%.

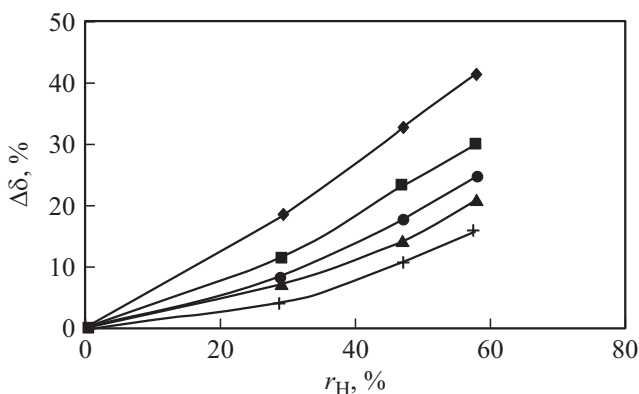


Рис. 1. Зависимость уменьшения ширины ЗТГ от коэффициента избытка воздуха и концентрации водорода, α : + — 0.9; ▲ — 1; ● — 1.1; ■ — 1.2; ◆ — 1.3.

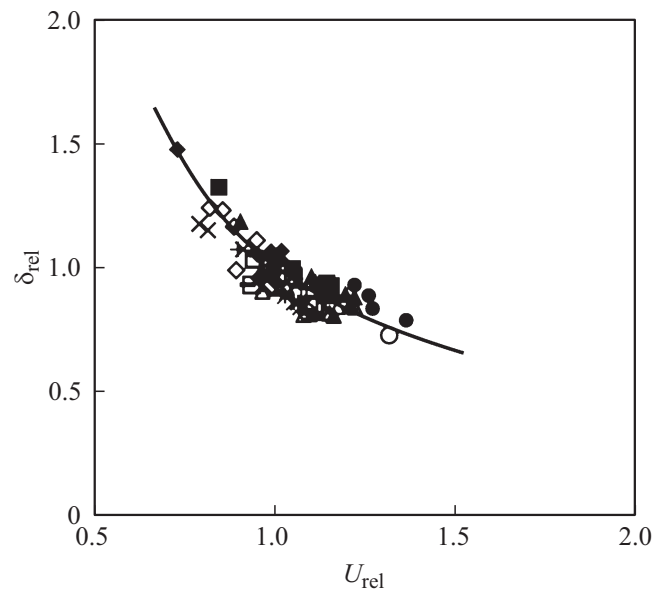


Рис. 2. Связь ширины ЗТГ со скоростью распространения пламени: ◇, □, △, ○, ◆, ■, ▲, ● — *hythane*; -, *, ×, + — бензин + H_2 ; ◇, □, ○, -, *, × — $n = 600 \text{ min}^{-1}$; ◆, ■, ▲, ●, + — $n = 900 \text{ min}^{-1}$; ◆, ◇, ×, + — $r_H = 0\%$; * — $r_H = 19\%$; -, ■, □ — $r_H = 29\%$; ▲, △ — $r_H = 47\%$; ●, ○ — $r_H = 58\%$.

Это обусловлено тем, что при α от 0.9 до 1.1 горение описывается моделью микроламинарного пламени. Турбулентные вихри не проникают в ЗТГ, а только меняют ее конфигурацию, поэтому увеличение n приводит к увеличению площади поверхности фронта пламени и скорости распространения пламени, но ширина ЗТГ остается неизменной. При $\alpha = 1.2$ рост интенсивности турбулентности привел к увеличению ширины ЗТГ на 8%, а при $\alpha = 0.8$ ширина пламени увеличилась на 7%. Это объясняется тем, что при сжигании бедных и богатых смесей ширина ламинарного пламени увеличивается, турбулентные вихри проникают в ЗТГ и влияют на кинетику химических реакций. Турбулентность потока приводит к разрыву и растяжению ЗТГ, поэтому δ_{rel} увеличивается. Отметим, что обработка экспериментальных данных, полученных на бензопоршневой моторной установке [8] выявила схожее поведение ширины ЗТГ при увеличении частоты вращения коленчатого вала с 600 до 900 min^{-1} . В частности, при $\alpha = 1$ ширина ЗТГ увеличилась на 4%, а при $\alpha = 1.2$ прирост δ_{rel} составил 9%, при этом добавка водорода в ТВС практически не влияет на выявленную закономерность.

Анализ экспериментальных значений ширины ЗТГ также выявил, что чем ближе коэффициент избытка воздуха к единице, тем тоньше ширина ЗТГ. Это объясняется тем, что при стехиометрическом составе ТВС ($\alpha = 1$) скорость химических реакций имеет максимальное значение, в результате увеличивается нормальная скорость пламени и уменьшается ширина ЗТГ. Обнаружено, что добавление водорода приводит к уменьшению ширины ЗТГ (рис. 1). Данный эффект объясняется возрастанием

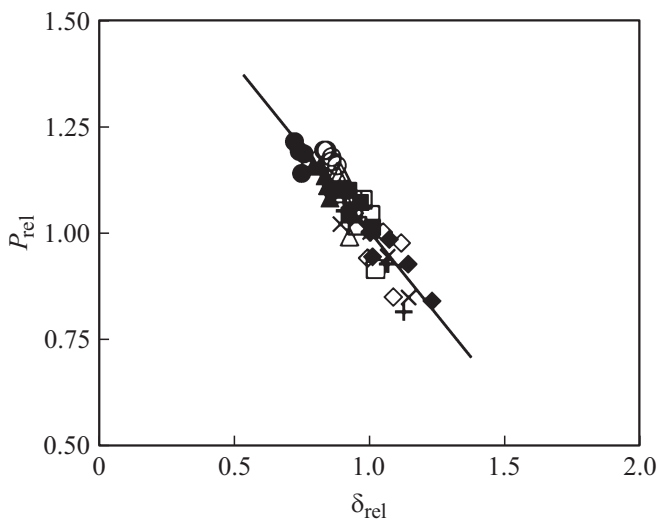


Рис. 3. Связь максимального давления (P_{rel}) в КС с шириной ЗТГ: $\diamond, \square, \triangle, \circ, \blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \bullet$ — hythane; $\times, +$ — бензин + H_2 [8]; $\diamond, \square, \triangle, \circ, \times$ — $n = 600 \text{ min}^{-1}$; $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \bullet, +$ — $n = 900 \text{ min}^{-1}$; $\blacklozenge, \diamond, \times, +$ — $r_H = 0\%$; \blacksquare, \square — $r_H = 29\%$; $\blacktriangle, \triangle$ — $r_H = 47\%$; \bullet, \circ — $r_H = 58\%$.

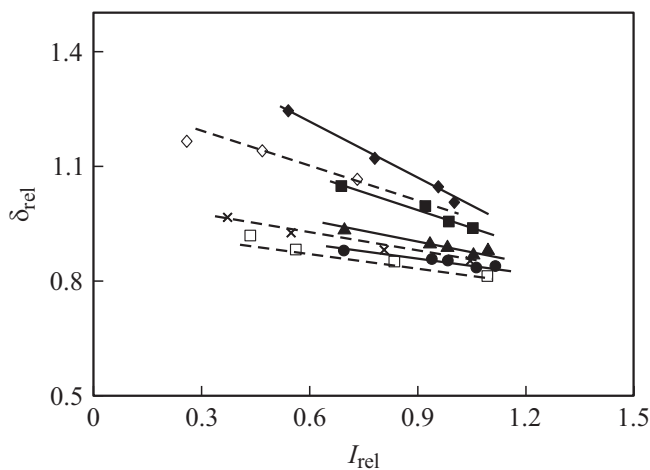


Рис. 4. Связь ширины ЗТГ пламени с электропроводностью пламени: $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \bullet$ — hythane; $\diamond, \times, \square$ — бензин + H_2 [7]; \blacklozenge, \diamond — $r_H = 0\%$; \times — $r_H = 19\%$; \blacksquare, \square — $r_H = 29\%$; $\blacktriangle, \triangle$ — $r_H = 47\%$; \bullet, \circ — $r_H = 58\%$.

нормальной скорости пламени, которая отражает интенсивность химических реакций в ЗТГ. Чем выше нормальная скорость распространения пламени, тем быстрее сгорает топливо и сильнее сокращается ЗТГ. Отмечено, что уменьшение ширины ЗТГ усиливается с увеличением коэффициента избытка воздуха (рис. 1). Это связано с тем, что в бедных ТВС количество основного углеводородного топлива меньше, чем в богатых ТВС, поэтому при $\alpha > 1$ влияние добавок водорода на процесс сгорания становится более заметным. Так, например, при $\alpha = 1$ добавка 58% водорода привела к сокращению ЗТГ на 20%, а для $\alpha = 1.2$ уменьшение ширины ЗТГ составило 29%. Сравнение полученных результатов с

исследованиями российских [8] и зарубежных [9] ученых показало схожее поведение ширины ЗТГ при добавках водорода в ТВС. Например, в работе [8] при изучении влияния микродобавок водорода на ширину ЗТГ было обнаружено, что при $\alpha = 0.8$ добавка $r_H = 19\%$ приводит к 7% уменьшению ширины ЗТГ, а при $\alpha = 1.3$ такая же добавка водорода уменьшила ширину ЗТГ уже на 21%.

На рис. 2 представлена связь ширины ЗТГ со скоростью распространения пламени. Экспериментально обнаружено, что, несмотря на изменение коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в ТВС, интенсивности турбулентности и вида топлива (hythane и бензин), сохраняется степенная зависимость ширины ЗТГ от турбулентной скорости распространения пламени. При этом уменьшение δ_{rel} соответствует увеличению U_{rel} . Схожее поведение δ_{rel} при изменении U_{rel} выявлено при анализе исследований, проведенных российскими учеными на бензопоршневом двигателе [8], а также работ шведских ученых из технического университета Чалмерса [10]. Также на рис. 2 видно, что при снижении скорости пламени ширина ЗТГ стремится к максимуму, т.е. когда режим горения приобретает черты реактора идеального перемешивания, отсутствуют четкие границы между зонами сгоревшей и несгоревшей ТВС и весь процесс сгорания представляет собой одну сплошную ЗТГ. С другой стороны, анализ графика показывает, что, как бы ни была высока скорость распространения пламени, ширина ЗТГ никогда не будет равна нулю. Полученные результаты соответствуют и подтверждают современные представления теории турбулентного горения в условиях двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием [11].

На рис. 3 представлена связь максимального давления в КС с шириной ЗТГ при изменении коэффициента избытка топлива, концентрации водорода в топливе (hythane и бензин) и интенсивности турбулентности. Обнаружено, что, несмотря на изменение варьируемых в эксперименте факторов, сохраняется линейная зависимость максимального давления в КС от ширины ЗТГ. При этом сокращение δ_{rel} соответствует увеличению P_{rel} . Это объясняется тем, что чем меньше δ_{rel} , тем выше скорость распространения пламени и интенсивность сгорания топлива в ЗТГ. В результате при сгорании выделяется больше тепла, а само топливо сгорает в меньшем объеме, что приводит к росту P_{rel} .

На рис. 4 представлена связь ширины ЗТГ пламени с электропроводностью пламени (оцениваемой амплитудой ионного тока). Выявлено, что, несмотря на изменение коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в ТВС и вида топлива (hythane и бензин), сохраняется линейная зависимость ширины ЗТГ от амплитуды ионного тока (I_{rel}). При этом увеличение I_{rel} соответствует уменьшению δ_{rel} , т.е. чем выше электропроводность пламени, тем меньше ширина ЗТГ. Так, например, для $r_H = 0\%$ увеличение I_{rel} с 0.55 до 1 соответствует уменьшению ширины ЗТГ δ_{rel} с 1.25

до 1; для бензовоздушной смеси при тех же условиях увеличение I_{rel} с 0.3 до 1 соответствует уменьшению ширины ЗТГ δ_{rel} с 1.2 до 1. Это объясняется тем, что значение ионного тока характеризует интенсивность химических реакций в ЗТГ — чем выше ток, тем выше скорость химических реакций и, значит, меньше ширина ЗТГ. Также на рис. 4 видно, что чем больше добавка водорода, тем слабее корреляция между ионным током и шириной ЗТГ. Это связано с тем, что при добавке водорода в интервале от 29 до 58% ионный ток практически не меняется (так как увеличение I_{rel} за счет роста скорости химических реакций, обусловленного добавкой водорода, компенсируется снижением I_{rel} из-за уменьшения концентрации углерода [7]), в отличие от ширины ЗТГ пламени.

Заключение

1. Выявлено, что ширина ЗТГ имеет характерную зависимость от состава *hythane* — чем ближе коэффициент избытка воздуха к единице и больше концентрация водорода в топливе, тем меньше ширина ЗТГ.

2. Экспериментально обнаружено, что, несмотря на изменение коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в топливе, интенсивности турбулентности и вида топлива (*hythane* и бензин), сохраняются неизменными следующие зависимости: а) степенная зависимость ширины ЗТГ от турбулентной скорости распространения пламени — чем выше скорость пламени, тем меньше ширина ЗТГ; б) линейная зависимость ширины ЗТГ от электропроводности пламени — чем больше электропроводность пламени, тем меньше ширина ЗТГ; в) линейная зависимость максимального давления от ширины ЗТГ — чем меньше ширина ЗТГ, тем выше давление.

3. Обработка результатов зарубежных и отечественных ученых показала справедливость полученных нами закономерностей для камер сгораний разных конструкций, использующих разное углеводородное топливо.

Финансирование работы

Работа публикуется при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы назначения стипендии президента РФ для молодых ученых СП-3204.2018.1.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Sandalci T., Galata S., Karagoz Y.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. N 5. P. 3208–3220.
- [2] *Tangoz S., Kahraman N.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. N 5. P. 25766–25780.
- [3] *Mariani A.* Review of Hydrogen-Natural Gas Blend Fuels in Internal Combustion Engines. In Tech. Europe, 2012. 325 p.
- [4] *Ma F.* Hydrogen-Enriched Compressed Natural Gas as a Fuel for Engines. Natural Gas, 2010. 606 p.
- [5] *Verma G., Prasad R.K., Agarwal R.A.* // Fuel. 2016. N 178. P. 209–217.
- [6] *Shaikin A.P., Galiev I.R.* // Russ. Aeronautics. 2016. Vol. 59. P. 249–253.
- [7] *Шайкин А.П., Галиев И.Р.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 8. С. 87–89. [*Shaikin A.P., Galiev I.R.* // Tech. Phys. 2016. N 8. P. 1206–1208.]
- [8] *Дерячев А.Д.* Эмпирическая модель оценки концентрации оксидов азота при добавке водорода в ТВС двигателей с искровым зажиганием. Тольятти, 2015. 150 с.
- [9] *Hermanns R.T.* Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures. Universal Press, 2007. 144 p.
- [10] *Lipatnikov A.N., Chomiak J.* // Prog. Energy Combust. Sci. 2002. N 28. P. 1–74.
- [11] *Peters N.* Combustion Theory. Princeton, 2010. 285 p.