

---

---

УДК 621.434:536

## ВЛИЯНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ НА ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

© 2019 г. А. П. Шайкин<sup>1</sup>, \*, И. Р. Галиев<sup>1</sup>, А. В. Бобровский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

\*e-mail: sbs777@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 19.04.2019 г.

Статья посвящена изучению влияния фундаментальных характеристик распространения пламени (скорости распространения и ширины зоны химических реакций) на полноту сгорания композитного топлива (смеси водорода с природным газом) в поршневом двигателе с искровым зажиганием. Выявлено наличие связи полноты сгорания топлива со скоростью распространения пламени, шириной пламени и шириной пристеночного несгоревшего слоя топлива. При увеличении скорости распространения пламени, уменьшении ширины пламени и ширины пристеночного несгоревшего слоя топлива наблюдается рост полноты сгорания топлива. Показано, что предложенная формула для расчета полноты сгорания топлива, использующая фундаментальные характеристики распространения пламени, позволяет с требуемой точностью рассчитать полноту сгорания композитного топлива. Это говорит о целесообразности применения данной формулы на этапе проектирования и доводки малоэмиссионных и энергоэффективных камер сгорания двигателей и энергоустановок.

*Ключевые слова:* полнота сгорания, пламя, скорость, распространение, ширина, зона химических реакций, водород, *hythane*

DOI: 10.1134/S0002331019020122

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянным ростом цен на энергоресурсы и законодательным ужесточением токсичности отработанных газов (ОГ) становятся актуальными вопросы использования новых, более экологически чистых топлив и повышение полноты их сгорания в двигателях. Применение *hythane* (смеси природного газа с водородом) в транспортной энергетике рассматривается многими учеными и промышленными компаниями, как эффективный способ улучшения энергетических и экологических характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые, как известно, являются основными потребителями углеводородных топлив [1, 2]. Несмотря на достигнутые успехи в исследовании и моделировании полноты сгорания топлива [3–6], до сих пор нет понимания механизма, объясняющего комплексное влияние на нее фундаментальных характеристик распространения турбулентного пламени (ширины зоны химических реакций (ЗХР) и турбулентной скорости), формы камеры сгорания (КС), состава топливоздушная смеси (ТВС), размеров щелей в КС и температуры пламени. Таким образом, существующие в настоящее время решения по увеличению полноты сгорания композитного топлива носят интуитивный характер, а модели, прогнозирующие ее значение, имеют высокий уровень эмпиризма, низкую точность и работают в

узком диапазоне рабочих режимов двигателя, что затрудняет их использование при проектировании малоэмиссионных и энергоэффективных КС двигателей. Таким образом, выбранная тема исследований актуальна как в теоретическом, так и в практическом плане.

Цель работы: изучить влияние фундаментальных характеристик распространения турбулентного пламени (скорости распространения и ширины зоны химических реакций) на полноту сгорания композитного топлива (hythane) в камере сгорания ДВС с искровым зажиганием.

### ВЫВОД ОСНОВНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Для расчета полноты сгорания топлива, с использованием фундаментальных характеристик распространения пламени, было использовано уравнение идеального газа с учетом равенства давлений в сгоревшей и несгоревшей зонах КС:

$$P_b = P_{ub}, \quad (1)$$

$$\frac{m_b R_b T_b}{V_b} = \frac{m_{ub} R_f T_{b \min}}{V_{ub}}, \quad (2)$$

$$\frac{m_0 \chi R_b T_b}{V_{кс} - V_{ub}} = \frac{m_0 (1 - \chi) R_f T_{b \min}}{V_{ub}}, \quad (3)$$

где  $P_b$  – давление в сгоревшей зоне КС, МПа;  $P_{ub}$  – давление в несгоревшей зоне КС, МПа;  $m_b$  – масса продуктов сгорания, кг;  $m_{ub}$  – масса несгоревшего топлива, кг;  $R_b$  – газовая постоянная продуктов сгорания, Дж/(моль К);  $R_f$  – газовая постоянная ТВС, Дж/(моль К);  $T_{b \min}$  – температура погасания пламени, К;  $T_b$  – максимальная температура пламени, К;  $V_b$  – объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>;  $V_{ub}$  – объем несгоревшего топлива, м<sup>3</sup>;  $m_0$  – масса ТВС, кг;  $\chi$  – полнота сгорания топлива.

Таким образом, из уравнения (3) была найдена полнота сгорания топлива:

$$\chi = \frac{1}{\frac{R_b T_b}{R_f T_{b \min}} \frac{V_{ub}}{V_{кс} - V_{ub}} + 1}. \quad (4)$$

Поскольку ТВС сжигается во всем объеме КС, то объем несгоревшего топлива  $V_{ub}$  зависит от объема щелей в КС (где топливо не сгорает), толщины слоя несгоревшего топлива у стенок КС и от площади КС в момент окончания сгорания, формула (5):

$$V_{ub} = \delta_{ub} S_{кс} + V_{ср}, \quad (5)$$

где  $\delta_{ub}$  – толщина несгоревшего слоя топлива у стенки КС, м;  $S_{кс}$  – площадь КС в момент окончания сгорания топлива, м<sup>2</sup>;  $V_{ср}$  – объем щелей в КС, м<sup>3</sup>.

Площадь и объем КС в момент завершения сгорания зависят от размеров и формы КС, расположения свечи зажигания и продолжительности процесса сгорания, которая была найдена по методике академика Б.С. Стечкина [7], т.е. по политропе расширения. Толщина пристеночного несгоревшего слоя рассчитывалась с использованием характеристик распространения пламени по предложенной нами формуле (6), которая была получена с использованием закона В.А. Михельсона и теории пределов распространения пламени Я.Б. Зельдовича [8]:

$$\delta_{ub} = \frac{U_n \delta}{\left( \frac{S_{кс}}{S_{фп}} \right)_{\max} U}, \quad (6)$$

где  $U_n$  – нормальная скорость пламени, м/с;  $(S_{kc}/S_{фп})_{max}$  – предельно возможное отношение площади контакта фронта пламени с КС ( $S_{kc}$ ) к площади поверхности фронта пламени ( $S_{фп}$ ).

Нормальная скорость пламени рассчитывалась по известной формуле [9], с учетом экспериментальных данных, полученных в техническом университете Эйндовена [10], и поправок [11], учитывающих особенности сжигания смеси метана с водородом в ДВС, формула (7):

$$U_n = U_{n0} \left( \frac{T_u}{T_0} \right)^\gamma \left( \frac{P_u}{P_0} \right)^\beta, \quad (7)$$

где  $U_{n0}$  – нормальная скорость пламени при температуре  $T_0$  и давлении  $P_0$ , м/с.  $T_u$ ,  $P_u$  – соответственно температура и давление при сгорании;  $\gamma$ ,  $\beta$  – постоянные.

Предельно возможное отношение площади контакта фронта пламени с КС ( $S_{kc}$ ) к площади поверхности фронта пламени ( $S_{фп}$ ) определялось с использованием теории пределов распространения пламени академика Я.Б. Зельдовича [8]. В результате было выявлено, что сжигание стехиометрических смесей с добавкой водорода приводит к увеличению соотношения  $(S_{kc}/S_{фп})_{max}$ , т.е. повышается устойчивость горения. Полученный результат соответствует ранее проведенным отечественным и зарубежным исследованиям [12], зафиксировавшим увеличение устойчивости горения и расширение концентрационных пределов распространения пламени при добавках водорода.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки предлагаемой формулы (4) для расчета полноты сгорания топлива, учитывающей фундаментальные характеристики распространения пламени, были экспериментально найдены величины, входящие в формулы (1)–(7). Исследования проводились на экспериментальном стенде. Основу стенда составлял одноцилиндровый, четырехтактный ДВС с искровым зажиганием. Работа ДВС осуществлялась при частоте вращения коленчатого вала ( $n_{квд}$ ) 600 и 900 мин<sup>-1</sup>. В качестве топлива использовался *hythane* (смесь природного газа с водородом) с объемным содержанием водорода ( $r_H$ ): 29, 47 и 58%. Методика эксперимента заключалась в параллельной регистрации сигналов с ионизационных зондов, искры зажигания, датчика положения коленчатого вала, датчика расхода воздуха, датчика давления и записи осциллограмм с помощью многоканального аналого-цифрового преобразователя в компьютерную базу данных [13, 14]. В результате проведенных исследований были получены значения максимального давления в КС, максимальной температуры пламени, ширины ЗХР и скорости распространения турбулентного пламени во время работы экспериментальной установки при разных объемах добавки водорода в *hythane*, коэффициентах избытка воздуха и скоростных режимах ДВС (т.е. интенсивности турбулентности).

Зависимость скорости распространения пламени ( $U$ ) от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ), доли водорода в топливе и скоростного режима ДВС представлена на рис. 1. Экспериментально обнаружено, что с увеличением  $n_{квд}$  с 600 до 900 мин<sup>-1</sup> происходит возрастание скорости. Особенно ярко данная тенденция проявляется при сжигании ТВС с  $\alpha \in (0.9; 1.1)$ . Это объясняется тем, что при данных коэффициентах избытка воздуха горение в ДВС описывается моделью микро-ламинарного пламени. Турбулентные вихри не проникают в ЗХР пламени, а только меняют ее конфигурацию, поэтому увеличение  $n_{квд}$  приводит к увеличению площади поверхности фронта пламени и, как следствие, росту скорости распространения пламени. С обеднением ТВС прирост скорости распространения пламени за счет прироста интенсивности турбулентности снижается. Т.к. при сжигании бедных ТВС ширина ламинарного пламени увеличивается, турбулентные вихри проникают в ЗХР и влияют на кинетику химических

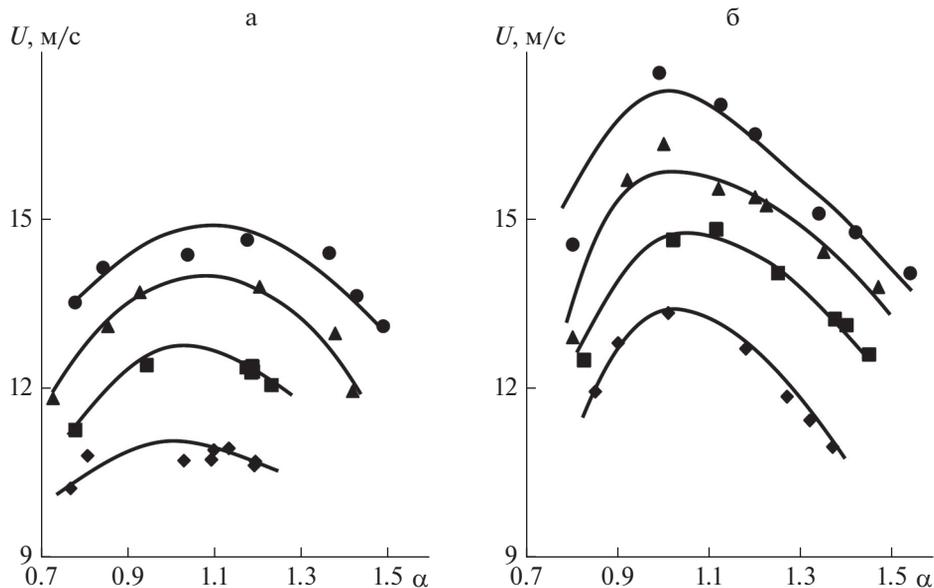


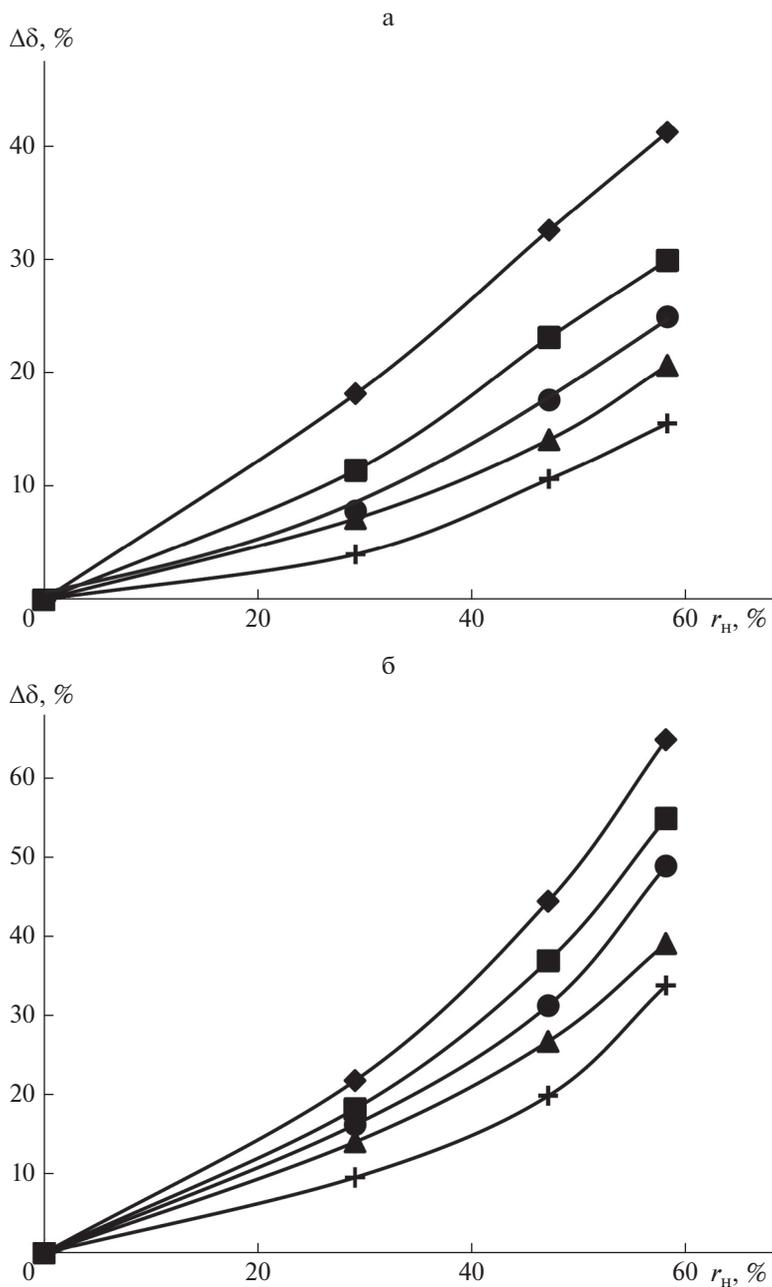
Рис. 1. Зависимость скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха и концентрации водорода: а)  $n_{\text{квд}} = 600 \text{ мин}^{-1}$ ; б)  $n_{\text{квд}} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ;  $r_{\text{H}} = 0\%$  –  $\blacklozenge$ ;  $r_{\text{H}} = 29\%$  –  $\blacksquare$ ;  $r_{\text{H}} = 47\%$  –  $\blacktriangle$ ;  $r_{\text{H}} = 58\%$  –  $\bullet$ .

реакций. Турбулентность потока приводит разрыву ЗХР и снижению скорости распространения пламени. Стоит отметить, что схожее поведение скорости распространения фронта пламени при увеличении турбулентности было зафиксировано в работе российских ученых [15], проводивших эксперименты на газопоршневом двигателе КамАЗ 740.13-240.

При добавке водорода в ТВС наблюдается увеличение скорости распространения пламени. Отмечено, что подобное поведение скорости пламени было зафиксировано при обработке экспериментальных данных российских [16, 17] и зарубежных [18–20] ученых. При этом, чем беднее ТВС и больше добавка водорода, тем интенсивнее рост скорости пламени. Это объясняется 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. Кроме этого, добавка водорода способствует формированию высокоактивных центров химических реакций, снижению энергии воспламенения и расширению пределов сгорания исходного топлива.

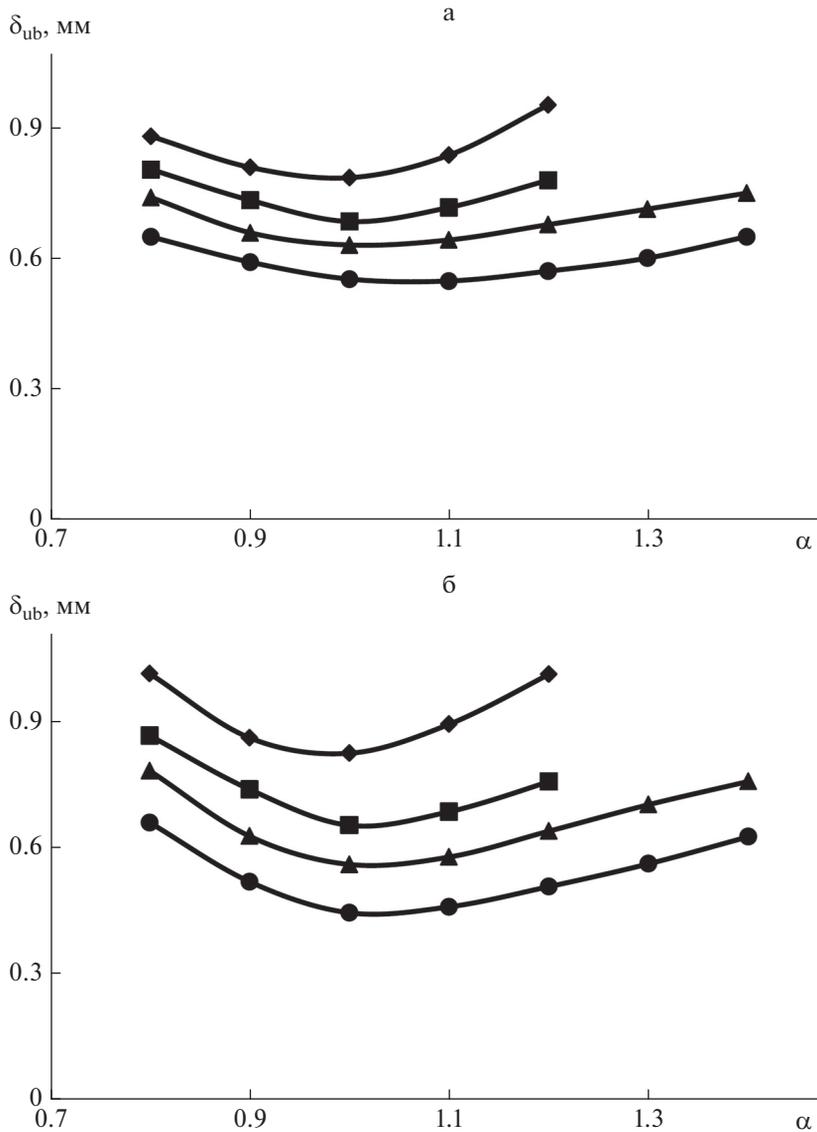
На рис. 2 представлена зависимость уменьшения ширины ЗХР от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого в топливо водорода.

Анализ полученных значений ширины ЗХР пламени показал, что чем ближе коэффициент избытка воздуха к единице, тем тоньше ширина ЗХР. Это объясняется тем, что при  $\alpha = 1$  скорость химических реакций имеет максимальное значение, в результате увеличивается нормальная скорость пламени и уменьшается ширина ЗХР. Аналогичные результаты были получены при обработке данных экспериментов, проведенных: а) российскими учеными на бензиновом ДВС [16]; б) учеными из Гентского университета на ДВС, использующем в качестве топлива этанол [21]; в) в Кембриджском университете [22]; г) в техническом университете Эйнховена при сжигании *hythane* в условиях КС постоянного объема [10]. Это говорит о достоверности и универсальности полученных закономерностей.



**Рис. 2.** Зависимость уменьшения ширины ЗХР ( $\delta$ ) от коэффициента избытка воздуха и концентрации водорода: а)  $n_{\text{КВД}} = 600 \text{ мин}^{-1}$ ; б)  $n_{\text{КВД}} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ; + -  $\alpha = 0.9$ ; ▲ -  $\alpha = 1$ ; ● -  $\alpha = 1.1$ ; ■ -  $\alpha = 1.2$ ; ◆ -  $\alpha = 1.3$ .

Добавление водорода приводит к уменьшению  $\delta$ , что объясняется возрастанием нормальной скорости пламени, которая отражает интенсивность химических реакций в ЗХР пламени. Отмечено, что уменьшение ширины ЗХР пламени усиливается с уве-



**Рис. 3.** Зависимость ширины пристеночного несгоревшего слоя от коэффициента избытка воздуха и концентрации водорода: а)  $n_{kvд} = 600 \text{ мин}^{-1}$ ; б)  $n_{kvд} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacklozenge$  –  $r_H = 0\%$ ;  $\blacksquare$  –  $r_H = 29\%$ ;  $\blacktriangle$  –  $r_H = 47\%$ ;  $\bullet$  –  $r_H = 58\%$ .

личением коэффициента избытка воздуха. Сравнение полученных результатов с исследованием российских [16] и зарубежных [10] ученых, проводивших эксперименты на ДВС иной конструкции, показало схожее поведение ширины ЗХР при добавках водорода в ТВС.

На рис. 3 представлена зависимость толщины пристеночного несгоревшего слоя от коэффициента избытка воздуха и доли водорода в топливе.

На рисунке видно, что добавление водорода приводит к уменьшению толщины пристеночного несгоревшего слоя. Так, например, при  $n_{\text{квд}} = 900 \text{ мин}^{-1}$  и  $\alpha = 1$  добавка водорода в количестве 58% приводит к сокращению ширины пристеночного несгоревшего слоя на 52%. Данный эффект объясняется промотирующим влиянием водорода на процесс сгорания, в результате сокращается ширина ЗХР пламени и увеличивается интенсивность сгорания топлива у стенки КС. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментами, проведенными в национальной лаборатории имени Лоуренса в Беркли (США) на бензиновом ДВС [23], а также французскими специалистами из концерна Peugeot–Citroen [24]. В частности, анализ работ [23, 24] показал следующее: 1) при сжигании стехиометрических смесей, ширина пристеночного несгоревшего слоя имеет меньшие значения, чем при сжигании бедных и богатых ТВС; 2) расстояние, на котором происходит гашение пламени, одного порядка с данными, полученными нами. Таким образом, сходимость с результатами зарубежных ученых, говорит о достоверности полученных результатов.

На рис. 4 представлена зависимость полноты сгорания топлива, рассчитанной по формуле (5), от коэффициента избытка воздуха и доли водорода в топливе. На рисунке видно, что при отсутствии добавок водорода максимальные значения полноты сгорания топлива наблюдаются при  $\alpha = 1$ , а при добавках водорода пик  $\chi$  смещается в область бедных ТВС. Схожие результаты были получены при обработке и анализе экспериментальных данных итальянских и бразильских ученых, посвященных изучению влияния состава ТВС на полноту сгорания бензовоздушной смеси в ДВС с непосредственным впрыском топлива [25].

Также анализ графиков на рис. 4 показал, что с увеличением доли водорода в топливе, растет полнота сгорания топлива, что объясняется ростом скорости сгорания топлива в пристеночном слое и уменьшением ширины ЗХР пламени. Подобные результаты были получены при обработке экспериментальных данных английских ученых из Бирмингемского университета [5] и ученых из корейского университета Ёнсе [6], проводивших исследования влияния добавок водорода на полноту сгорания топлива в газопоршневом ДВС с искровым зажиганием. Это говорит о достоверности полученных закономерностей и их применимости для двигателей разных конструкций. Также стоит отметить, что сравнение полноты сгорания топлива, рассчитанной по предлагаемой формуле (4), с  $\chi$ , полученной на основе анализа экспериментальной индикаторной диаграммы с применением первого закона термодинамики, уравнения состояния и двухзонной модели сгорания, показало сходимость между данными более 85%.

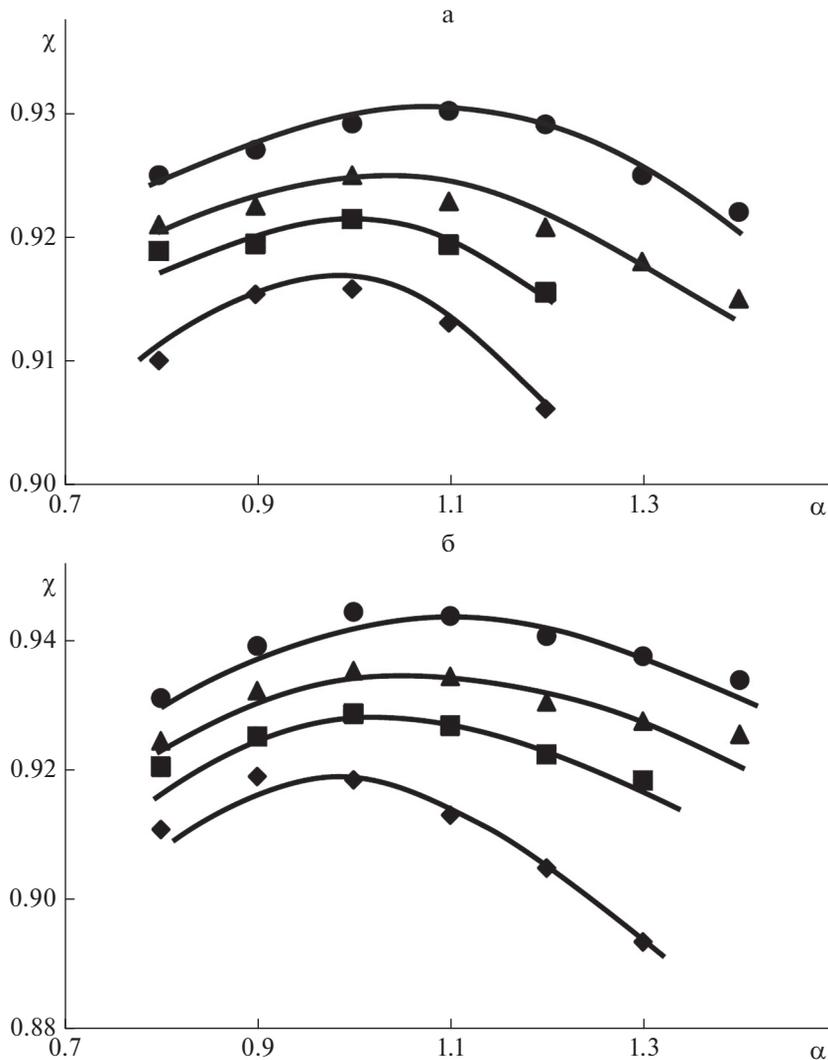
На рис. 5 приведена зависимость полноты сгорания топлива от турбулентной скорости распространения пламени для разных составов ТВС, концентраций водорода и скоростных режимов ДВС (т.е. интенсивности турбулентности).

Рост скорости пламени при постоянном составе ТВС обеспечивался добавками водорода в количестве 29, 47 и 58% по объему. Для придания иллюстрируемой на рис. 5 связи  $\chi$  с  $U$  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:

$$\chi_{\text{отн}} = \frac{\chi_{(\alpha=x)}}{\chi_{(\alpha=1)}}, \quad (8)$$

$$U_{\text{отн}} = \frac{U_{(\alpha=x)}}{U_{(\alpha=1)}}, \quad (9)$$

где  $\chi_{(\alpha=1)}$  — полнота сгорания топлива, при стехиометрическом составе ТВС;  $U_{(\alpha=1)}$  — турбулентная скорость распространения пламени, при стехиометрическом составе ТВС, м/с;  $x$  — текущее значение коэффициента избытка воздуха.



**Рис. 4.** Зависимость полноты сгорания топлива от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода: а)  $n_{\text{КВД}} = 600 \text{ мин}^{-1}$ ; б)  $n_{\text{КВД}} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacklozenge$  –  $r_{\text{H}} = 0\%$ ;  $\blacksquare$  –  $r_{\text{H}} = 29\%$ ;  $\blacktriangle$  –  $r_{\text{H}} = 47\%$ ;  $\bullet$  –  $r_{\text{H}} = 58\%$ .

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что при возрастании скорости пламени происходит повышение полноты сгорания топлива, причем это справедливо как для бедных, так и для богатых ТВС. Так, для  $\alpha = 1.3$  ( $n_{\text{КВД}} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ) увеличение скорости на 35% (при добавке  $r_{\text{H}} = 58\%$ ) сопровождалось ростом  $\chi$  на 8%. Полученный результат объясняется тем, что рост скорости пламени свидетельствует об интенсификации горения и завершении горения в меньшем объеме КС, что, в конечном итоге, приводит к уменьшению объема пристеночного несгоревшего слоя и увеличению полноты сгорания. Стоит отметить, что значение  $\chi_{\text{отн}} > 1$  достигается при добавках водорода, поскольку в этом случае полнота сгорания имеет максимальные значения при  $\alpha > 1$ .

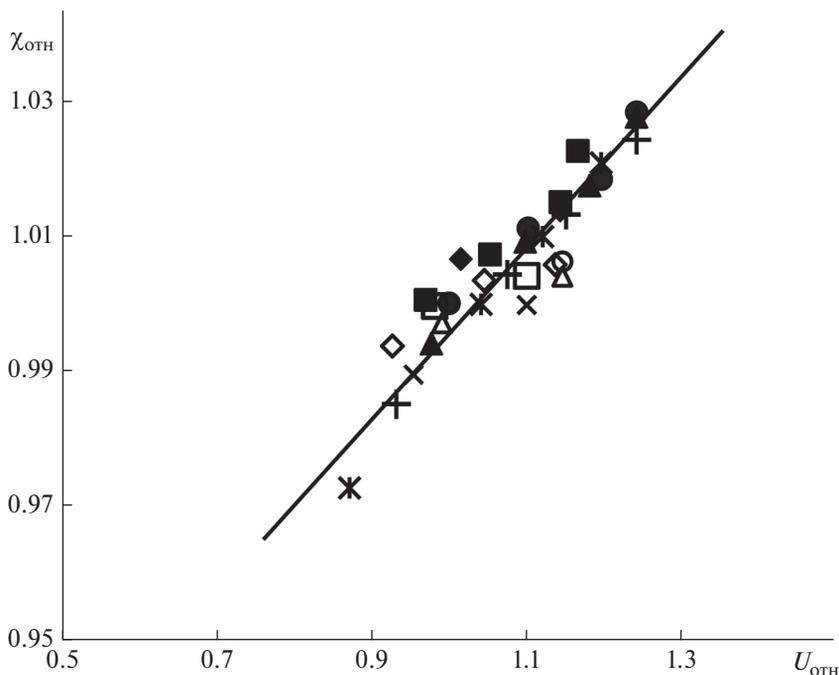


Рис. 5. Влияние скорости распространения пламени на полноту сгорания топлива:  $\diamond, \square, \circ, \triangle, \times$  –  $n_{\text{квд}} = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacklozenge, \blacksquare, \bullet, \blacktriangle, +, *$  –  $n_{\text{квд}} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacklozenge, \diamond$  –  $\alpha = 0.8$ ;  $\blacksquare, \square$  –  $\alpha = 0.9$ ;  $\bullet, \circ$  –  $\alpha = 1$ ;  $\blacktriangle, \triangle$  –  $\alpha = 1.1$ ;  $+, \times$  –  $\alpha = 1.2$ ;  $*$  –  $\alpha = 1.3$ .

На рис. 6 приведена зависимость полноты сгорания топлива от ширины ЗХР пламени для разных составов ТВС, скоростных режимов двигателя и концентраций водорода.

Изменение значений ширины ЗХР и полноты сгорания топлива при постоянном составе ТВС обеспечивалось добавками водорода (в топливо) в количестве 29, 47 и 58%. Для придания иллюстрируемой на рис. 6 связи  $\chi$  с  $\delta$  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:

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{\delta_{(\alpha=x)}}{\delta_{(\alpha=1)}}, \quad (10)$$

где  $\delta_{(\alpha=1)}$  – ширина ЗХР пламени, при стехиометрическом составе ТВС, м/с;  $x$  – текущее значение коэффициента избытка воздуха.

Экспериментально обнаружено, что, несмотря на изменение коэффициента избытка воздуха, скоростного режима ДВС и концентрации водорода, сохраняется линейная зависимость полноты сгорания топлива от ширины ЗХР пламени – при уменьшении ширины ЗХР пламени происходит увеличение полноты сгорания топлива, причем это справедливо как для бедных, так и для богатых ТВС. Так, для  $\alpha = 1$  ( $n_{\text{квд}} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ) уменьшение ширины на 39% (при добавке  $r_{\text{H}} = 58\%$ ) сопровождалось ростом  $\chi$  на 5%. Полученный результат объясняется тем, что уменьшение ширины ЗХР свидетельствует об увеличении интенсивности химических реакций в ЗХР пламени, в результате

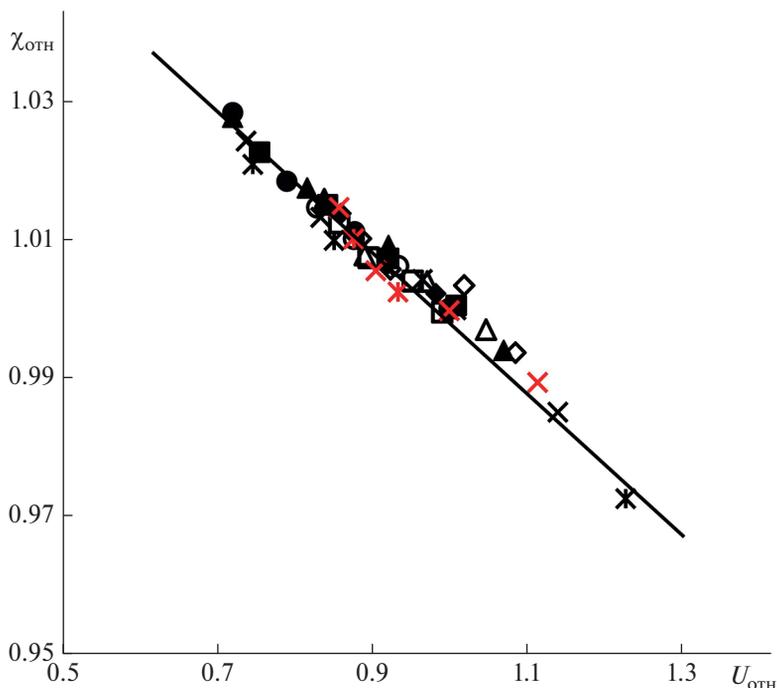


Рис. 6. Влияние ширины ЗХР пламени на полноту сгорания топлива:  $\diamond, \square, \circ, \Delta, \times, *$  –  $n_{\text{квд}} = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacklozenge, \blacksquare, \bullet, \blacktriangle, \times, *$  –  $n_{\text{квд}} = 900 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\blacklozenge, \square - \alpha = 0.8$ ;  $\blacksquare, \square - \alpha = 0.9$ ;  $\bullet, \circ - \alpha = 1$ ;  $\blacktriangle, \Delta - \alpha = 1.1$ ;  $\times, \times - \alpha = 1.2$ ;  $*, * - \alpha = 1.3$ .

уменьшается толщина пристеночного несгоревшего слоя, увеличивается скорость и полнота сгорания топлива.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально обнаружено, что добавление водорода в метановоздушную смесь приводит к росту скорости распространения пламени и полноты сгорания топлива, а также уменьшению ширины ЗХР турбулентного пламени и ширины пристеночного несгоревшего слоя. При этом отмечено, что влияние водорода усиливается с увеличением коэффициента избытка воздуха. Это подтверждает целесообразность применения *hythane* в транспортной энергетике.

2. Выявлено наличие связи полноты сгорания топлива с фундаментальными характеристиками распространения пламени (скоростью распространения и шириной ЗХР) и шириной пристеночного несгоревшего слоя топлива. При увеличении скорости распространения пламени, уменьшении ширины пламени и ширины пристеночного несгоревшего слоя топлива наблюдается рост полноты сгорания топлива. Данный факт позволяет определить значения фундаментальных характеристик распространения пламени, обеспечивающих увеличение полноты сгорания топлива в ДВС.

3. Показано, что предложенная формула, использующая фундаментальные характеристики распространения пламени, позволяет с требуемой точностью рассчитать полноту сгорания композитного топлива. Это говорит о целесообразности примене-

ния данной формулы на этапе проектирования и доводки малоэмиссионных и энергоэффективных КС двигателей и энергоустановок.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы назначения стипендии Президента РФ для молодых ученых.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смыгина А.Е., Зайченко В.М., Иванов М.Ф., Киверин А.Д.* Горение смесей на основе водорода в газопоршневом двигателе // Известия российской академии наук. Энергетика. 2015. № 2. С. 120–130.
2. *Галышев Ю.В.* Расчетный анализ ограничений и перспективных решений при создании водородных двигателей // Известия российской академии наук. Энергетика. 2006. № 5. С. 165–171.
3. *Hoon K.* Advances in Internal Combustion Engines and Fuel Technologies. InTech Europe, 2013. 310 p.
4. *Mittal M., Zhu G., Schock H.* Fast mass-fraction-burned calculation using the net pressure method for real-time applications // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2009. № 223. P. 389–394.
5. *Chang A.N.* Improved method of investigation of combustion parameters in a natural gas fuelled SI engine with EGR and H<sub>2</sub> as additives. Doctoral thesis. Birmingham, 2002. 196 p.
6. *Park J., Cha H., Song S.* A numerical study of a methane-fueled gas engine generator with addition of hydrogen using cycle simulation and DOE method // International J. Hydrogen Energy. 2011. № 8. P. 5153–5162.
7. *Стечкин Б.С.* Избранные труды: Теория тепловых двигателей. М.: Физматлит, 2001. 432 с.
8. *Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhyiladze G.M.* The Mathematical Theory of Combustion and Explosions. New York: Springer US, 1985. 597 p.
9. *Heywood J.B.* Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988. 931 p.
10. *Hermanns R.T.* Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures / R.T. Hermanns. Universal Press, Veenendaal, 2007. 144 p.
11. *Verhelst S., Woolley R., Lawes M., Sierens R.* Laminar and unstable burning velocities and Markstein lengths of hydrogen-air mixtures at engine-like conditions // Proceedings of the Combustion Institute. 2005. № 30. P. 209–216.
12. *Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б.* Водород: параметры горения и взрыва. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 288 с.
13. *Shaikin A.P., Galiev I.R.* Use of Chemi-Ionization to Calculate Temperature of Hydro-carbon Flame // Technical physics. The Russian Journal of applied physics. V. 63. № 4. 2018. P. 612–614.
14. *Shaikin A.P., Galiev I.R.* Relationship of flame propagation speed for methane-hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration // Russian Aeronautics. 2016. V. 59. P. 249–253.
15. *Леонтьев А.И., Кацарадзе П.З., Шибанов А.В., Зеленцов А.А., Сергеев С.С.* Влияние формы камеры на нестационарные процессы переноса и турбулентного сгорания в дизеле, конвертированном в газовый двигатель // Известия российской академии наук. Энергетика. 2009. № 2. С. 49–63.
16. *Дерячев А.Д.* Эмпирическая модель оценки концентрации оксидов азота при добавке водорода в ТВС двигателей с искровым зажиганием. Тольятти, 2015. 150 с.
17. *Федянов Е.А., Захаров Е.А., Левин Ю.В.* Использование водорода в роторно-поршневых двигателях Ванкеля в качестве добавки к основному углеводородному топливу // Известия ВолгГТУ. 2014. С. 39–41.
18. *Doosje E.* Limits of mixture dilution in gas engines. Doctoral thesis, 2010. 370 p.
19. *Morones A., Ravi S., Plichta D., Petersen E.* Laminar and turbulent flame speeds for natural gas/hydrogen blends // A. Morones // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. 2014. № GT2014-26742.
20. *Ravi K., Bhaske J., Porpatham E.* Effect of compression ratio and hydrogen addition on part throttle performance of a LPG fuelled lean burn spark ignition engine // Fuel. 2017. № 205. P. 71–79.
21. *Vancoillie J., Demuyne J., Gallea J., Verhelst S., Oijen J.A.* A laminar burning velocity and flame thickness correlation for ethanol-air mixtures valid at spark-ignition engine conditions // Fuel. 2012. № 102. P. 460–469.
22. *Irfan A.* Simulation of turbulent flames relevant to spark-ignition engines. University of Cambridge, 2014. 208 p.
23. *Nobuhiko I.* Studies of wall flame quenching and hydrocarbon emissions in a model spark ignition engine. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1978. 109 p.
24. *Chauvy M., Delhom B., Reveillon J.* Flame/Wall interactions: laminar study of unburnt HC formation // Flow, Turbulence and Combustion. 2010. P. 369–377.
25. *Martínez S., Irimescu A., Merola S.* Flame Front Propagation in an Optical GDI Engine under Stoichiometric and Lean Burn Conditions // Energies. 2017. № 10. P. 1314–1337.

---

**Influence of the Fundamental Characteristics of Flame Distribution on Mass Fraction Burned****A. P. Shaikin<sup>a, #</sup>, I. R. Galiev<sup>a</sup>, and A. V. Bobrovsky<sup>a</sup>**<sup>a</sup>*Tolyatti State University, Tolyatti, Russia*<sup>#</sup>*e-mail: sbs777@yandex.ru*

The article is devoted study influence fundamental characteristics of flame propagation (flame speed and width zone of chemical reactions) on the mass fraction burned of composite fuel (mixture hydrogen and natural gas) in a spark-ignited piston engine. The Detected connection between mass fraction burned and flame velocity, width flame, and the width of near-wall unburned fuel layer is revealed. With increasing flame speed, reducing the width of the flame and width of the wall unburned layer, an increase in fuel combustion is observed. It is shown that the proposed formula for calculating the completeness of combustion of fuel, using the fundamental characteristics of flame propagation, allows us to accurately calculate the completeness of combustion of composite fuel. This indicates the feasibility of applying this formula at the design stage and fine-tuning of low-emission and energy-efficient combustion chambers of engines and power machines.

*Keywords:* mass fraction burned, flame, speed, distribution, width, chemical reaction zone, hydrogen, hythane