

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.4:536.46

М. С. АССАД, кандидат технических наук, Барановичский государственный университет

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГОРЕНИЯ ПРОПАНА И ВОДОРОДА КАК МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Исследован процесс горения двух моторных топлив: пропана, моделирующего традиционное углеводородное топливо, и водорода как перспективной альтернативы. Приведены преимущества водорода как моторного топлива для тепловых двигателей. Изучены особенности горения и характер изменения рабочих параметров пропана и водорода в модельной камере сгорания ДВС. Проведен анализ полученных результатов, показывающий, что в обоих случаях изменение скорости распространения пламени имеет экстремальный характер, причем водород горит почти в 10 раз быстрее, чем пропан. При этом фронт пламени, достигая максимальной скорости, находится примерно на одинаковом расстоянии от источника зажигания (радиусы дуги пламени почти равны), но затрачивает почти в 10 раз больше времени при горении пропана. Установлено, что радиус пламени водорода на протяжении всего процесса горения развивается интенсивно примерно с достаточно большой скоростью, в отличие от пропана, который в начальной стадии горит очень медленно. Сопоставление параметров процесса горения пропана и водорода показало преимущества последнего, и его применение в ДВС может существенно повысить полноту сгорания и создать благоприятные условия для организации качественного регулирования рабочего процесса.

Развитие мировой экономики в последние годы характеризуется увеличением доли потребления энергоресурсов, в том числе углеводородного сырья. По оценкам различных экспертов, разведанных запасов нефти при существующем уровне ее потребления может хватить на период от 40 до 60 лет, а газа – от 80 до 100 лет [1, 2]. В то же время ухудшение экологической обстановки в результате постоянно растущего потребления традиционных видов топлива привело к ужесточению требований к вредным выбросам в окружающую среду. Поэтому поиск новых видов моторного топлива, которые успешно заменили бы традиционные энергоносители, стал задачей глобального масштаба.

Наиболее перспективным среди альтернативных топлив является водород, преимущества которого сводятся к следующему [3–6]:

- массовая теплота сгорания водорода, составляющая 120 МДж/кг, почти в 3 раза превышает аналогичный показатель углеводородных топлив;
- энергии для его воспламенения требуется в 15 раз меньше, чем для углеводородного топлива;
- высокая скорость воспламенения, которая почти на порядок выше, чем у традиционных углеводородов;
- широкие концентрационные пределы воспламенения, позволяющие работать в широком диапазоне состава смеси;
- ресурсы водорода в природе практически неисчерпаемы;
- высокий коэффициент диффузии;
- малое расстояние гашения пламени;
- продукты сгорания водорода удовлетворяют самым жестким экологическим требованиям.

Использование водорода в качестве моторного топлива для ДВС может осуществляться как в чистом виде, так и в качестве добавки к традиционным нефтяным топливам.

С воздухом водород устойчиво воспламеняется в широком диапазоне коэффициента избытка окислителя (воздуха) от $\alpha = 0,15$ до $\alpha = 10$, что обеспечивает качественное регулирование и устойчивую работу двигателя на всех скоростных режимах в широком диапазоне изменения состава смеси [7].

Более полное и своевременное горение благодаря отмеченным выше свойствам, а также возможное качественное регулирование работы двигателя, несомненно, приведут к улучшению протекания рабочего процесса и повышению экономичности двигателя; отсутствие углерода в исходном топливе приводит к тому, что в продуктах сгорания практически отсутствуют окислы углерода (СО и СО₂) и несгоревшие углеводороды (СН), что обеспечивает радикальное снижение токсичности отработавших газов.

Очевидно, что применение водорода в качестве моторного топлива для ДВС приведет к некоторым изменениям рабочего процесса двигателя, без учета которых невозможно говорить о перспективном, конкурентоспособном заменителе традиционного углеводородного топлива. Для выявления особенностей рабочего процесса двигателя, работающего на водороде, нами проводились сравнительные исследования процесса горения водорода и пропана, моделирующего традиционное углеводородное топливо.

Эксперименты проводились в прозрачной модельной камере сгорания диаметром 80 мм и высотой 32 мм (рисунок 1). Инициирование воспламенения смеси производилось с помощью свечи зажигания 1. В ходе экспериментов исследовались две смеси стехиометрического состава: пропановоздушной и водородно-воздушной с 1 % метана при

начальном давлении в камере сгорания 0,5 МПа, при этом фиксировались два параметра: максимальное давление, развиваемое в камере при горении, и время горения топливно-воздушной смеси. Для этого использовался датчик давления 2, смонтированный в цилиндрической стенке камеры сгорания.

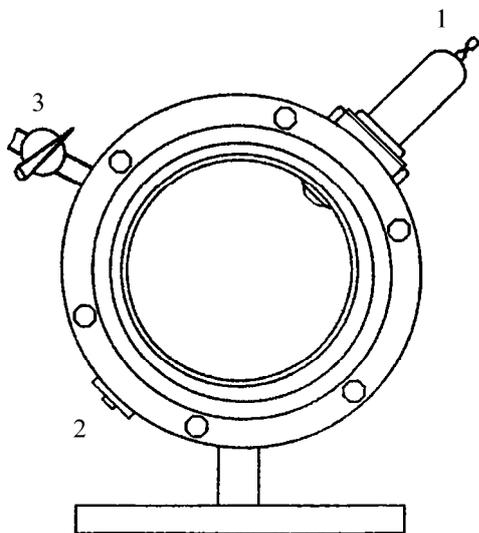


Рисунок 1 – Модельная камера сгорания:
1 – свеча зажигания; 2 – датчик давления;
3 – впускной-выпускной кран

Нами изучались различные параметры процесса горения исследованных смесей: скорость горения v как важнейшая характеристика моторных топлив, определяющая в значительной мере характер протекания рабочего процесса и динамику тепловыделения в цикле двигателя, продолжительность процесса горения (время горения) τ и путь (радиус) пламени r – расстояние, на котором находится пламя от свечи зажигания.

Анализ и сопоставление полученных данных привели к следующим результатам.

Из рисунка 2, где показаны зависимости от времени скорости горения исследованных горючих смесей, видно, что в обоих случаях изменение скорости горения имеет экстремальный характер с разными численными значениями максимума. В начальный период горения фронт пламени распространяется с большой скоростью до достижения максимума, равного 3,26 м/с для пропано-воздушной и 30,14 м/с для водородно-воздушной смеси, затем скорость горения начинает стремительно снижаться примерно по прямолинейной траектории. Далее, при горении пропано-воздушной смеси (см. рисунок 2, а) падение скорости, начиная с $\tau = 18$ мс, замедляется, и на отрезке времени 25–39 мс фронт пламени перемещается с минимальным замедлением почти прямолинейного характера, затем скорость распространения пламени снова резко снижается и далее продолжает падение до конца процесса горения. В случае водородно-воздушной смеси (см. рисунок

2, б) в точке перегиба на кривой, соответствующей $\tau = 2$ мс, падение скорости горения существенно замедляется, и на отрезке времени 2–3 мс фронт пламени распространяется примерно с прямолинейным замедлением, после чего снова резко снижается скорость по криволинейной траектории.

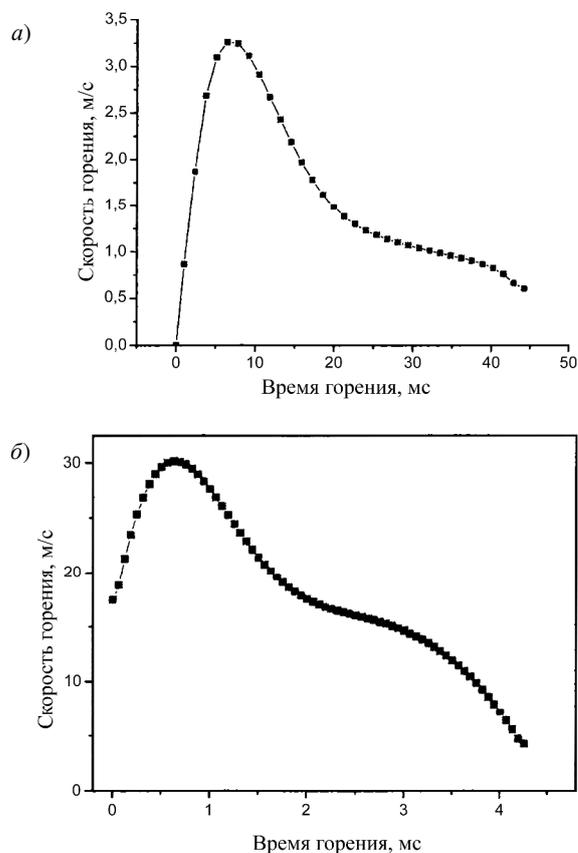


Рисунок 2 – Зависимости скорости горения пропано-воздушной (а) и водородно-воздушной (б) смесей стехиометрического состава от времени горения

На рисунке 3 показаны изменения во времени радиуса пламени (пламя имеет форму дуги с центром в свече зажигания) при горении исследованных горючих смесей. Обе зависимости имеют в целом одинаковый характер. При горении пропано-воздушной смеси (см. рисунок 3, а) в самый начальный период радиус пламени практически не растет (почти нулевая скорость горения), что связано с медленным развитием реакций в зоне искрового разряда (известно, что углеводородным топливам свойственен большой период индукции), и лишь позднее, начиная с $\tau = 2,5$ мс, появляется очаг горения, который затем развивается не вполне равномерно. В случае водородно-воздушной смеси (см. рисунок 3, б) радиус пламени на протяжении всего процесса горения возрастает быстро, но с переменной скоростью. Быстрый рост пламени в самый начальный период горения связан, в отличие от пропано-воздушной смеси, с очень быстрым развитием реакций в зоне искрового разряда между электродами свечи зажигания.

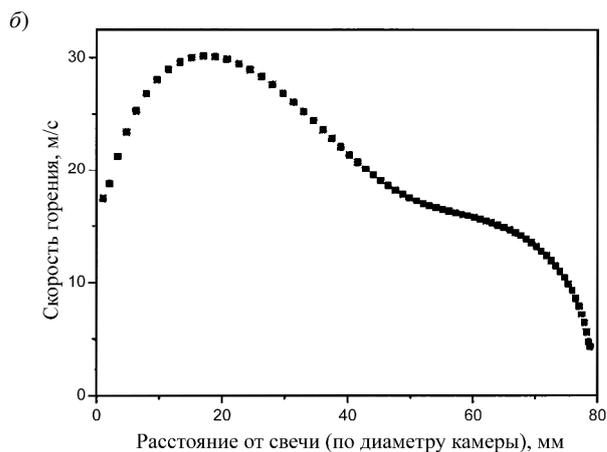
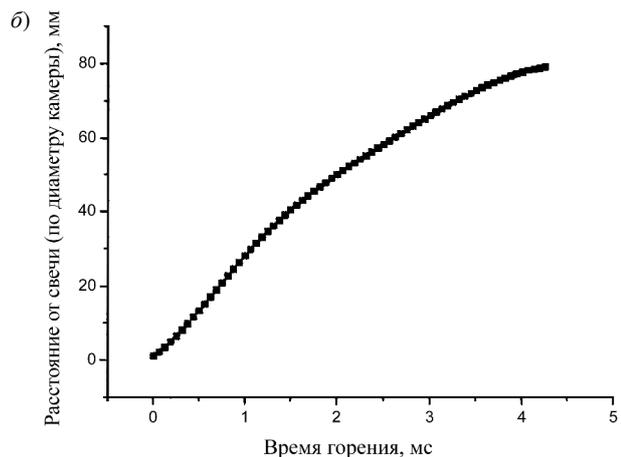
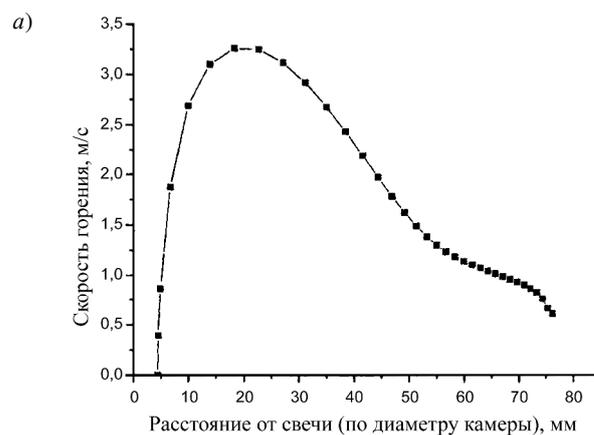
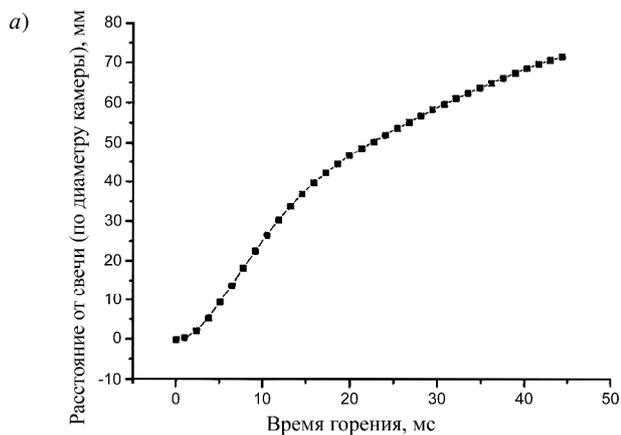


Рисунок 3 – Зависимости расстояния, пройденного фронтом пламени, от времени горения пропано-воздушной (а) и водородно-воздушной (б) смесей стехиометрического состава

На рисунке 4 показаны изменения скорости горения исследованных горючих смесей в зависимости от радиуса пламени. В обоих случаях наблюдается экстремальный характер кривых изменения скорости. В начальной стадии горения пропано-воздушной смеси скорость распространения пламени возрастает резко, достигая максимума (3,26 м/с), соответствующего радиусу пламени $r = 18,3$ мм, затем в интервале радиусов пламени $r < 52$ мм скорость распространения пламени падает быстро и почти прямолинейно. Далее замедление горения усиливается, достигая в интервале радиусов пламени 59–72 мм минимального уровня с прямолинейной траекторией, затем снова начинается быстрое снижение скорости горения. В случае водородно-воздушной смеси вначале фронт пламени развивается быстро, достигая максимальной скорости (30,14 м/с) при радиусе $r = 17$ мм, затем начинается резкое снижение скорости, а в интервале радиусов 50–65 мм скорость распространения пламени падает очень медленно и почти прямолинейно и далее снова резко падает (до достижения пламенем противоположной стенки камеры сгорания).

Сопоставление и анализ полученных результатов в совокупности показывает, что водородно-воздушная смесь сгорает почти в десять раз быстрее, чем смесь пропана с воздухом (см. ри-

Рисунок 4 – Зависимости скорости горения пропано-воздушной (а) и водородно-воздушной (б) смесей стехиометрического состава от расстояния, пройденного фронтом пламени

сунк 2). При горении пропано-воздушной смеси фронт пламени достигает максимальной скорости ($v_{\max} = 3,26$ м/с) через 6,42 мс после начала процесса горения (см. рисунок 2, а), находясь на расстоянии (радиус пламени) 18,3 мм от источника зажигания (см. рисунки 3, а и 4, а); максимальная скорость водородно-воздушной смеси наблюдается ($v_{\max} = 30,14$ м/с) спустя всего 0,63 мс от начала процесса сгорания (см. рисунок 2, б), находясь на расстоянии (радиус пламени) 17 мм от свечи зажигания (см. рисунки 3, б; 4, б). Таким образом, можно отметить, что в момент достижения максимальной скорости фронт пламени обеих смесей имеет почти один и тот же радиус дуги пламени, соответствующий примерно одной пятой части всего пути пламени – расстояния от свечи зажигания до противоположной стенки камеры сгорания, равного 80 мм. При этом, несмотря на существенную разницу во времени достижения максимальной скорости (у водорода на порядок меньше, чем у пропана), в обоих случаях указанная скорость наблюдается спустя примерно одну восьмую часть продолжительности всего процесса горения смеси.

Как отмечалось выше, применение водорода в качестве моторного топлива приводит к изменениям рабочего процесса ДВС. Уровень совершенства

любого двигателя определяется степенью соответствия реального цикла теоретическому. Для ДВС с искровым зажиганием, работающих по циклу с подводом тепла при постоянном объеме, это соответствие определяется скоростью горения, так как теоретический цикл предполагает мгновенный подвод тепла, т. е. бесконечную скорость горения. Поскольку окисление водорода в воздухе характеризуется высокой скоростью, то горение протекает практически при постоянном объеме, и реальный цикл двигателя при работе на водороде намного ближе к теоретическому, чем при работе на углеводородном топливе. Отсюда следует, что столь резкое возрастание скорости горения водорода приводит к существенному улучшению протекания рабочего процесса двигателя.

Известно, что угол опережения зажигания оказывает огромное влияние на характер протекания рабочего процесса и основные показатели ДВС. При излишне большом угле горение смеси начинается слишком рано, создается большое противодействие ходу поршня к в. м. т., скорость нарастания и максимальное давление оказываются чрезмерно большими, двигатель перегружается газовыми силами и перегревается, а его мощность и экономичность не достигают оптимальных значений; в результате возможно возникновение детонации. Слишком малый угол приводит к запаздыванию развития горения, мощность и экономичность вновь не достигают возможных значений. Поэтому для предотвращения перечисленных негативных явлений необходимо регулировать угол опережения зажигания с учетом скорости горения смеси. Следовательно, при использовании водорода в качестве моторного топлива искру следует подавать в конце такта сжатия (в в. м. т.) практически без опережения зажигания.

С другой стороны, чрезмерно высокая скорость горения топлива может привести к интенсивному нарастанию давления, а следовательно, и к повышению жесткости рабочего процесса двигателя. Поэтому изучение причин, приводящих к нарушению нормального протекания рабочего процесса, и разработка путей устранения такого рода нарушений с учетом особенностей горения водорода являются важнейшими задачами при конверсии ДВС на водород.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1 Скорость горения водорода почти в 10 раз превышает аналогичный показатель пропана, модели-

рующего традиционное углеводородное топливо. Для достижения максимальной скорости горения фронт пламени в водородно-воздушной смеси затрачивает почти в 10 раз меньше времени, чем в пропановоздушной, но при этом проходит примерно одинаковое расстояние от источника зажигания (имеет одинаковый радиус пламени), что соответствует одной пятой части всего пути пламени – расстояния от свечи зажигания до противоположной стенки камеры сгорания, равного 80 мм. В обоих случаях максимальная скорость горения наблюдается спустя примерно одну восьмую часть продолжительности всего процесса горения смеси.

2 Высокая скорость горения водорода, почти на порядок превышающая скорость горения углеводородов, позволяет допустить, что водород горит практически при постоянном объеме, поэтому реальный цикл двигателя при работе на водороде намного ближе к теоретическому, чем при работе на любом углеводородном топливе.

3 Сопоставление параметров горения пропана и водорода показывает преимущества последнего, и его применение в качестве моторного топлива приводит к существенному повышению полноты сгорания и созданию благоприятных условий для организации качественного регулирования рабочего процесса двигателя, при этом возникает необходимость уменьшения угла опережения зажигания почти до нулевого значения.

Список литературы

- 1 **Марков, В. А.** Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей / В. А. Марков, С. И. Козлов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 296 с.
- 2 **Емельянов, В. Е.** Автомобильный бензин и другие виды топлива: свойства, ассортимент, применение / В. Е. Емельянов, И. Ф. Крылов. – М. : Астрель; АСТ; Профиздат, 2005. – 207 с.
- 3 Горение модифицированных топлив в модели камеры сгорания ДВС / М. С. Ассад [и др.] // Сб. науч. тр. «Тепло- и массообмен» Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2005. – С. 100–105.
- 4 Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications / K. Agbossou [et al.] // Journal of Power Sources. – 2001. – Vol. 96, No. 1. – P. 168–172.
- 5 Hydrogen as a future transportation fuel / G. D. Berry [et al.] // Energy. – 1996. – Vol. 21, No. 4. – P. 289–303.
- 6 **Ogden, J. M.** A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development // J. M. Ogden, M. M. Steinbugler, T. G. Kreutz // Journal of Power Sources. – 1999. – Vol. 79, No. 2. – P. 143–168.
- 7 **Andrea, T. D.** The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine / T. D. Andrea, P. F. Henshaw, D. S.-K. Ting // International Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29, No. 14. – P. 1541–1552.

Получено 27.11.2007

M. S. Assad. Comparative estimation of burning of propane and hydrogen as motor fuels.

It is studied the process of burning of two motor fuels: Propane simulating traditional hydrocarbon fuel, and the hydrogen of as perspective alternative. Are led the advantages of the hydrogen of as motor fuel for heat engines. Are studied the peculiarities of burning and the nature of the modification of the operating parameters of propane and hydrogen in model combustion chamber of internal combustion engine. Is carried out the analysis of findings indicating, what in both events of the modification of propagation velocity flame possesses extremum nature, while hydrogen burns almost in 10 times faster, than propane. Whereat flame front achieving maximum speed, resides approximately on similar spacing from the source of firing (the radiuses of the arc of flame almost equal), but spends almost in 10 times more of time in propane burning. Is established, what radius of the flame of hydrogen over all process of burning develops intensely approximately with sufficiently large speed, unlike propane which in starting stage burns very slow. The comparison of the parameters of the process of burning of propane and hydrogen showed advantages last and its application in internal combustion engine can essentially raise the completeness of combustion and to create favorable conditions for the organization of qualitative understanding regulation of working process.