

Определены дополнительные погрешности при измерении концентрации оксида углерода термохимическими сенсорами. Получен ряд аналитических выражений по расчету данных погрешностей, а также поправок на отклонения внешних факторов от допустимых.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П а в л е н к о, В. А. Газоанализаторы / В. А. Павленко.– М.; Л.: Машиностроение, 1965. – 296 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 7.07.2006

УДК 621.4: 536.46

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ ПРИ ИХ ГОРЕНИИ**

**Канд. техн. наук АССАД М. С.**

*Барановичский государственный университет*

Обострение энергоэкологических проблем привело к интенсивному поиску новых, более эффективных видов топлива в рамках потенциальных энергосырьевых ресурсов. Одним из таких видов топлива для двигателей внутреннего сгорания является водород.

Механизм сгорания водорода при низких давлениях ( $p < 0,2$  МПа) достаточно подробно исследован и верифицирован на большом количестве экспериментальных данных, где быстрые цепные реакции с участием радикалов Н, ОН и О [1–5] являются доминирующими в процессе протекания химических реакций.

Область высоких давлений, характеризующаяся сменой механизмов высокотемпературного окисления водорода, недостаточно исследована. С ростом начального давления смеси ( $p > 0,2$  МПа) возрастает роль реакции разветвления цепей с участием молекулы  $\text{HO}_2$ , которая образуется в ходе тримолекулярной реакции  $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}$  и способствует отводу активных атомов водорода из реакций быстрого цикла, определяющих воспламенение при пониженных давлениях. Кроме того, существующие кинетические схемы горения водорода при высоких давлениях не подтверждены детальными экспериментальными данными. Вместе с тем перспективы использования водорода в двигателях внутреннего сгорания требуют более глубокого понимания особенностей горения водорода с воздухом при относительно высоких давлениях, соответствующих давлениям в завершающей стадии такта сжатия двигателя.

Одним из основных свойств водорода является высокая скорость высокотемпературного окисления, поэтому изучение данной характеристики

является важнейшей задачей при его использовании в качестве моторного топлива в двигателях внутреннего сгорания.

С этой целью эксперименты проводились в прозрачной модельной камере сгорания внутренним диаметром 80 мм и высотой 32 мм (рис. 1).

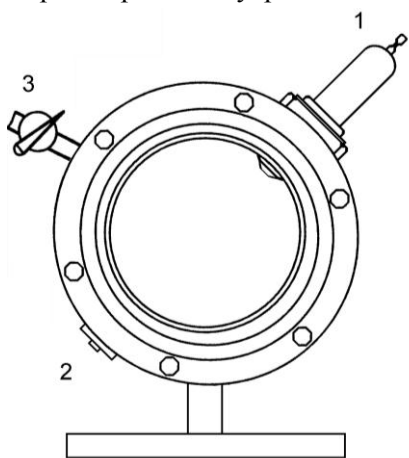


Рис. 1. Модельная камера сгорания: 1 – свеча зажигания; 2 – пьезоэлектрический датчик давления; 3 – впускной кран

Инициирование воспламенения смеси производилось с помощью свечи зажигания, установленной в цилиндрической стенке модельной камеры сгорания. В ходе экспериментов фиксировались два параметра: максимальное давление, развиваемое в камере в процессе сгорания, и продолжительность сгорания смеси от момента зажигания до момента достижения максимального давления. Для регистрации значений времени и давления был смонтирован датчик давления в цилиндрической стенке модельной камеры (напротив свечи зажигания).

Состав стехиометрических смесей, исследованных в ходе экспериментов, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Топливовоздушные смеси, использованные в экспериментах

| Топливовоздушная смесь                         | Коэффициент избытка окислителя (воздуха) | Химический состав смеси                           | Начальное давление, МПа |
|--|--|---|-------------------------|
| Пропан + воздух (смесь 1)                      | 1  | $C_3H_8 + 5O_2 + 18,81N_2$                        | 0,1–1                   |
| Пропан + 2 % водорода + воздух (смесь 2)       | 1  | $C_3H_8 + 0,51H_2 + 5,26O_2 + 19,76N_2$           | 0,03–1                  |
| Пропан + 4 % водорода + воздух (смесь 3)       | 1  | $C_3H_8 + 1,1H_2 + 5,54O_2 + 20,85N_2$            | 0,024–0,9               |
| Продукты конверсии пропана + воздух (смесь 4)  | 1  | $CO + 1,33H_2 + 1,17O_2 + 6,27N_2$                | 0,1–1                   |
| Водород + воздух (смесь 5)                     | 1  | $H_2 + 0,5O_2 + 1,88N_2$                          | 0,02–1                  |
| Пропан + воздух (смесь 1а)                     | 1,25                                     | $0,8C_3H_8 + 5O_2 + 18,81N_2$                     | 0,06–0,8                |
| Пропан + 2 % водорода + воздух (смесь 2а)      | 1,25                                     | $0,8C_3H_8 + 0,51H_2 + 5,26O_2 + 19,76N_2$        | 0,04–1                  |
| Пропан + 4 % водорода + воздух (смесь 3а)      | 1,25                                     | $0,8C_3H_8 + 1,1H_2 + 5,54O_2 + 20,85N_2$         | 0,03–0,9                |
| Продукты конверсии пропана + воздух (смесь 4а) | 1,25                                     | $0,8(CO + 1,33H_2 + 1,88N_2) + 1,17O_2 + 6,27N_2$ | 0,024–1                 |

Визуализация процесса сгорания топливовоздушных смесей в модельной камере сгорания и регистрация основных характеристик процесса сгорания осуществлялись методами скоростного фотографирования.

На рис. 2 показана зависимость продолжительности сгорания исследованных топливовоздушных смесей стехиометрического состава от начального давления. Эти значения были получены из осциллограмм сигнала, регистрируемого с датчика давления 2, установленного в цилиндрической стенке камеры сгорания (рис. 1).

Поскольку путь, проходимый в камере сгорания волной пламени топливовоздушной смеси, является постоянной величиной, скорость распространения пламени находится в строгой обратной зависимости от продолжительности сгорания этой смеси.

Из рис. 1 видно, что стехиометрические топливовоздушные смеси 2 (пропан + 2 % водорода + воздух), 3 (пропан + 4 % водорода + воздух), 4 (продукты конверсии пропана + воздух) и 5 (водород + воздух) сгорают значительно быстрее смеси 1 (пропан + воздух), моделирующей традиционное углеводородное топливо. При этом динамика изменения продолжительности сгорания обратно пропорциональна содержанию водорода в смеси. Так, при начальном давлении 0,9 МПа продолжительность сгорания пропановоздушной смеси с 2%-й добавкой водорода уменьшается в 1,16 раза, с 4%-й добавкой – в 1,3 раза, а продуктов конверсии пропана – почти в 3 раза. Минимальную продолжительность сгорания и, следовательно, максимальную скорость горения имеет водородно-воздушная смесь, которая горит в 8–10 раз быстрее, чем пропановоздушная смесь.

В области высоких давлений изменение продолжительности сгорания исследуемых топливовоздушных смесей имеет одинаковый характер, линейно зависящий от начального давления в камере сгорания. При этом с увеличением содержания водорода в смеси продолжительность сгорания, а следовательно, скорость распространения пламени имеет меньшую зависимость от начального давления в камере сгорания независимо от коэффициента избытка окислителя (воздуха) смеси (рис. 2, 3).

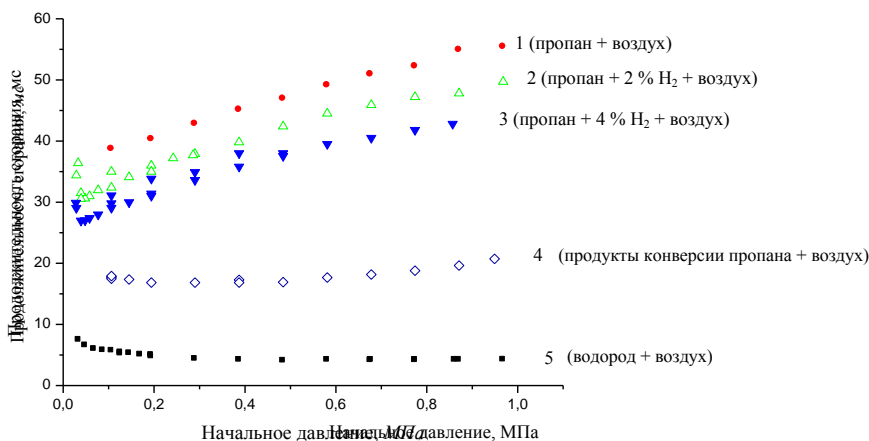


Рис. 2. Зависимость продолжительности сгорания различных топливовоздушных смесей стехиометрического состава от начального давления

В области малых значений начального давления (до 0,2 МПа) изменение скорости горения смесей 2 и 3 (с добавками 2 и 4 % водорода) имеет экстремальный характер с минимумом в точке, соответствующей давлению

0,04 МПа. А в случае продуктов конверсии пропана и чистого водорода после некоторого ускорения процесса сгорания в этой области (малых давлений) скорость горения практически не зависит от величины начального давления в камере сгорания и имеет стабильную прямую, параллельную оси абсцисс.

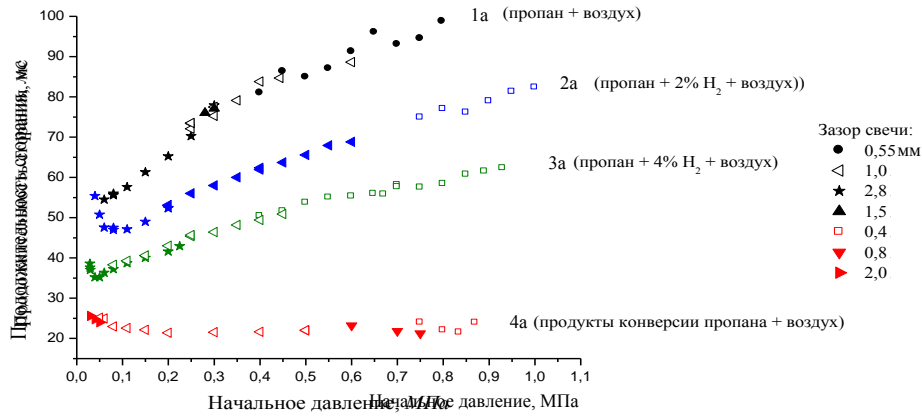


Рис. 3. Зависимость продолжительности сгорания бедных ( $\alpha = 1,25$ ) топливовоздушных смесей от начального давления в модельной камере сгорания

При переходе от стехиометрических смесей к бедным продолжительность сгорания, сохраняя обратную зависимость от содержания водорода в смеси, имеет тенденцию возрастания (рис. 3). Так, с увеличением коэффициента избытка воздуха до  $\alpha = 1,25$  и при начальном давлении 0,1 МПа продолжительность сгорания пропановоздушной смеси (смесь 1а) увеличивается почти на 50 %, пропановоздушной смеси с 2%-й добавкой водорода (смесь 2а) – на 44 %, пропановоздушной смеси с 4%-й добавкой водорода (смесь 3а) – на 40 %, а продуктов конверсии пропана (смесь 4а) – только на 35 %; при начальном давлении 1 МПа продолжительность сгорания соответственно увеличивается для пропановоздушной смеси (смесь 1а) на 81 %, для пропановоздушной смеси с добавками 2 %-го водорода (смесь 2а) – на 66 %, для пропановоздушной смеси с добавками 4 %-го водорода (смесь 3а) – на 42 %, а для продуктов конверсии пропана (смесь 4а) – только на 20 %. Однако в сравнении с пропановоздушной смесью, моделирующей традиционное углеводородное топливо, при  $\alpha = 1,25$  и начальном давлении в камере 0,8 МПа продолжительность сгорания пропановоздушной смеси с 2%-й добавкой водорода уменьшается в 1,24 раза, с 4%-й добавкой водорода – в 1,78 раза, а продуктов конверсии пропана – почти в 4 раза.

Таким образом, обеднение топливовоздушных смесей (при  $\alpha > 1$ ) приводит к увеличению продолжительности сгорания и, следовательно, к падению скорости горения, при этом увеличение доли водорода в смеси вызывает ослабление этой зависимости, причем более значительное при повышенных давлениях. В связи с этим можно сделать вывод о том, что существенное увеличение коэффициента избытка окислителя (воздуха) водородно-воздушных смесей не приводит к значительному снижению скорости сгорания смеси. Это является весьма важным свойством водорода как моторного топлива при работе двигателя внутреннего сгорания на бедных смесях в условиях городской эксплуатации.

С учетом заметного влияния на процесс сгорания пропана, моделирующего традиционное углеводородное топливо, даже малых добавок водорода, можно полагать, что поведение смесей на основе продуктов конверсии пропана (где доля водорода на треть превышает долю углекислого газа в смеси с воздухом и составляет почти 14 % при стехиометрическом составе) во многом будет походить на поведение водородно-воздушных смесей. Это подтверждается сопоставлением соответствующих зависимостей на рис. 2 и 3. Поэтому продукты конверсии также представляют практический интерес для применения в двигателях внутреннего сгорания.

## ВЫВОДЫ

1. Относительная доля водорода в топливовоздушных смесях (как стехиометрических, так и бедных) приводит к существенному повышению скорости горения, которая для смеси чистого водорода с воздухом равна восьми-, десятикратному значению скорости пропановоздушной смеси, моделирующей традиционное углеводородное топливо.

2. Скорость горения исследуемых топливовоздушных смесей (как стехиометрических, так и бедных) падает с повышением начального давления в камере сгорания, однако этот эффект ослабевает с увеличением содержания водорода в смеси, а в случае чистого водорода с воздухом скорость горения является почти постоянной независимо от начального давления.

3. Относительно высокая скорость горения бедных водородно-воздушных смесей позволяет повысить топливную экономичность двигателей внутреннего сгорания на частичных режимах при качественном регулировании мощности, а также снизить уровень токсичных выбросов в окружающую среду, что подтверждается другими исследованиями [6, 7].

4. Добавка водорода в углеводородные моторные топлива, по-видимому, должно способствовать некоторому увеличению детонационной стойкости за счет увеличения октанового числа (у водорода октановое число 90 по моторному методу) и снижению токсичности выбросов двигателей благодаря более качественному сгоранию, кроме того, продуктами окисления водорода воздухом являются вода и окислы азота. При этом целесообразно осуществлять обогащение топлива водородом не постоянно, а при частичных нагрузках работы (на бедных смесях), в частности в условиях городской эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И в а н о в а, А. Н. Применение общего подхода к получению пределов воспламенения в реакции окисления водорода / А. Н. Иванова, З. С. Андрианова, В. В. Азатян // Химическая физика. – 1998. – Т. 17, № 8. – С. 91–100.
2. К о н д р а т ь е в, В. Н. Химические процессы в газах / В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. – М.: Наука, 1981.
3. С е м е н о в, Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н. Н. Семенов. – М.: Изд-во АН СССР, 1958.
4. Щ е т и н к о в, Е. С. Физика горения газов / Е. С. Щетинков. – М.: Наука. 1965. – 740 с.
5. L e w i s, D. Combustion, Flames and Explosions in Gases / D. Lewis, von Elbe G. // N.Y.: Academic Press, 1961.
6. I n t e r n a l combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures / S. O. Akansu [et al.]. // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 1527–1539.
7. A n d r e a, T. D. The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine / T. D. Andrea, P. F. Henshaw, D. S.-K. Ting // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 1541–1552.

Представлена кафедрой  
физико-математических дисциплин

Поступила 19.09.2006