

## ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Канд. техн. наук АССАД М., докт. физ.-мат. наук ПЕНЯЗЬКОВ О. Г.

*Барановичский государственный университет,  
Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси*

Динамика роста цен на нефть на мировом рынке, связанная с состоянием экономики, последние, крайне пессимистические прогнозы относительно добычи нефти и других невозобновляемых источников энергии, а также жесткие ограничения на количество выбросов в атмосферу привели к тому, что начались широкомасштабные исследования новых возможностей и технологий для выхода из глобального энергетического кризиса.

В двигателестроении решение возникшей эколого-энергетической проблемы путем совершенствования конструкции существующих двигателей внутреннего сгорания возможно за счет: совершенствования рабочего процесса для обеспечения максимальной полноты сгорания топлива на всех режимах работы двигателя; использования различных устройств нейтрализации и фильтрации для обезвреживания отработавших газов и т. д. Однако применение этих довольно сложных и дорогостоящих устройств недостаточно эффективно и связано со значительными затратами.

Более эффективным и относительно менее затратным представляется использование альтернативных видов топлива, одним из которых является водород.

Водород – один из наиболее энергоемких топлив, его массовая теплота сгорания почти в три раза выше, чем у углеводородных топлив, и составляет 120,1 МДж/кг. Кроме того, моторные свойства водорода (широкие концентрационные пределы воспламенения, высокая скорость сгорания, большой коэффициент диффузии по сравнению с топливом нефтяного происхождения) и его экологическая чистота позволяют предположить возможность и целесообразность его применения в качестве топлива для современных двигателей внутреннего сгорания. По мнению некоторых исследователей [1, 2], использование водорода может привести к повышению топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на частичных нагрузках за счет работы на более бедных составах рабочей смеси при качественном регулировании мощности, а также к снижению уровня токсичности отработавших газов, что особенно актуально в условиях городской эксплуатации.

Однако проблема использования водорода в качестве топлива для автомобильных двигателей комплексная. Она включает довольно обширный круг вопросов: изучение возможности перевода на водород современных двигателей внутреннего сгорания; исследование особенностей рабочего процесса этих двигателей при работе на водороде; оптимальное регулирование рабочего процесса, обеспечивающее максимальную топливную экономичность и минимальную токсичность отработавших газов; разработку систем питания и эффективных способов хранения водорода на борту ав-

томобиля, а также относительно приемлемые затраты на получение водорода, его транспортировку и хранение; разработку запорочных станций и др.

Существенным фактором является возможность применения водорода в двигателях внутреннего сгорания без их коренной перестройки [3, 4].

Исследование сгорания топлива как основы рабочего процесса в ДВС – важная задача при использовании новых видов топлива. Кинетика сгорания углеводородных топлив представляет собой комплекс сложных взаимодействующих физико-химических процессов, в основе которых лежит химическая реакция между горючим веществом и окислителем. Процесс сгорания обычно носит комбинированный цепно-тепловой характер, в основе которого лежит сочетание теории о тепловом механизме реакции горения, разработанной Аррениусом, и теории о цепном механизме химических реакций, разработанной Н. Н. Семеновым [5–8].

Авторами данной работы проводились сравнительные исследования процесса горения различных газоздушных смесей, включая водород. Эксперименты проводились в лабораторных условиях в прозрачной модельной камере сгорания с внутренним диаметром 80 мм и высотой 15 мм. Топливовоздушная смесь воспламенялась от постороннего источника – свечи зажигания.

Ниже приведен химический состав исследованных в экспериментах топливовоздушных смесей.

Смесь № 1. Пропан ( $C_3H_8 + 5O_2 + 18,8N_2$ ).

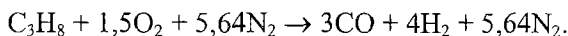
Смесь № 2. Водород + воздух ( $2H_2 + O_2 + 3,76N_2$ ).

Смесь № 3. Продукты конверсии пропана ( $CO + 1,33H_2 + 1,17O_2 + 6,3N_2$ ).

Смесь № 4. Пропан + водород ( $2C_3H_8 + H_2 + 10,5O_2 + 39,5N_2$ ).

Смесь № 5. Пропан + водород ( $C_3H_8 + 1,1H_2 + 5,6O_2 + 21N_2$ ).

Горение пропана (смесь № 1) моделировало характерные режимы работы ДВС на углеводородных топливах. В качестве альтернативы рассматривались стехиометрический состав воздуха и водорода (смесь № 2) и продуктов неполного окисления пропана (смесь № 3), полученных в ходе реакции:



Кроме того, было проанализировано влияние малых добавок водорода на характеристики горения пропановоздушной смеси в камере сгорания. В данном случае концентрация водорода находилась ниже пределов его воспламенения и составляла 2% (смесь № 4) и 4% (смесь № 5) соответственно.

На рис. 1 и 2 приведены характерные зависимости суммарного времени горения исследованных видов топлива и максимального прироста давления в камере сгорания от начального давления среды. Опыты показали, что время горения пропана было наибольшим. Причем с увеличением начального давления смеси пропана с воздухом время ее сгорания в камере начинало почти линейно возрастать от значения 38,7 мс при давлении 1 атм и достигало максимальной величины 55 мс при давлении 9,7 атм (рис. 1, кривая 2). Видно, что небольшие добавки водорода к пропановоздушной смеси существенно влияют на общее время горения в камере сгорания, ко-

торое снижается при добавлении 4 % водорода на 22–23 % по сравнению с исходным составом. При этом качественно вид зависимости времени горения от давления среды остается прежним (рис. 1, кривые 3, 4). Как в чистом пропане, так и в смесях пропана с небольшими добавках водорода максимальный прирост давления в камере сгорания почти не зависел от начальных условий при давлениях  $p_0 > 6$  атм (рис. 2).

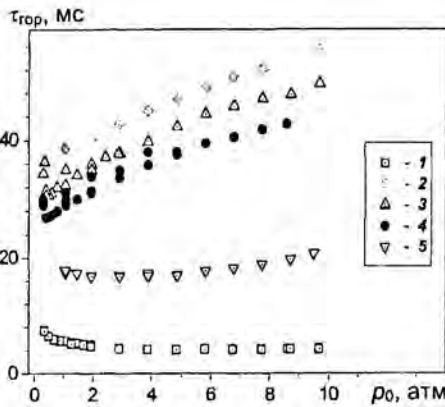


Рис. 1. Зависимость продолжительности горения исследованных видов топлива в камере сгорания от начального давления среды: 1 – смесь № 2; 2 – № 1; 3 – № 4; 4 – № 5; 5 – № 3

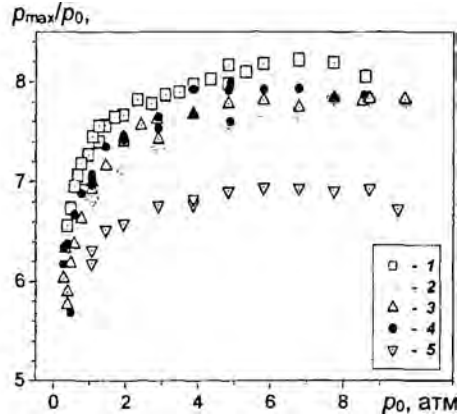


Рис. 2. Зависимость максимального прироста давления в камере сгорания от начального давления среды: 1 – № 2; 2 – № 1; 3 – № 4; 4 – № 5; 5 – № 3

Следует отметить, что продукты конверсии пропана сгорают быстрее, чем исходная пропановоздушная смесь при эквивалентных условиях (рис. 1, кривая 5). Общее время их горения в 2,2–2,7 раза меньше, чем у пропана, и почти не зависит от начального давления среды в камере сгорания. Ввиду наличия значительного количества балластного азота, оставшегося в смеси после реакции неполного окисления, максимальный прирост давления в камере при горении продуктов конверсии снижается в 1,10–1,13 раза по сравнению со стехиометрической смесью пропана и воздуха (рис. 2).

Из рис. 1 и 2 видно, что наиболее выигрышный режим горения в камере сгорания наблюдается при использовании чистого водородного топлива. Время горения водорода в камере оказывается значительно меньше, чем у пропана во всем диапазоне начальных условий. При начальном давлении среды  $p_0 > 4$  атм время горения в камере почти не зависит от начальных условий. Горение смеси водорода с воздухом характеризуется наиболее высоким значением максимального давления в камере сгорания (рис. 2, кривая 1).

Скорость волны горения в смесях пропана и продуктов его конверсии с воздухом вдоль диаметра камеры сгорания как функция от времени представлены на рис. 3. Как видно из графиков, скорость распространения пламени не является стационарной и существенно меняется со временем. Общий вид ее функциональной зависимости в обеих смесях подобен, несмотря на существенную разницу во времени горения. Пиковая скорость достигается в течение первых 5–10 мс от момента поджига, и ее численное значение почти на порядок превышает величину ламинарной скорости горения для данных смесей (рис. 3).

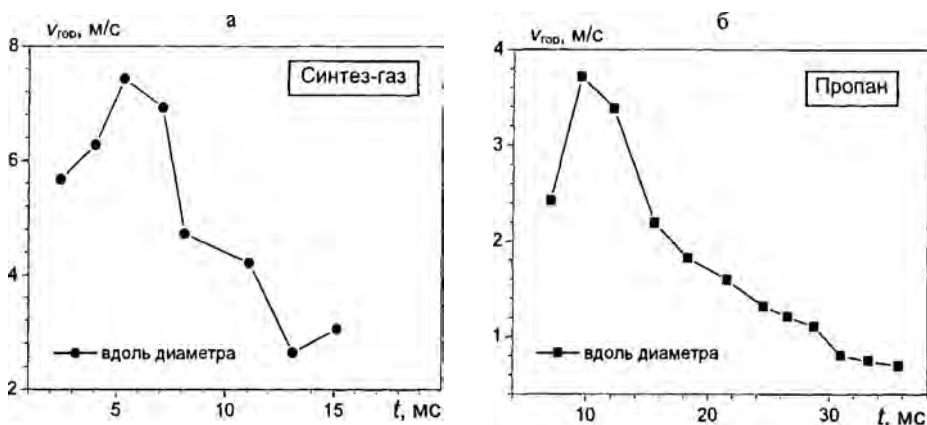


Рис. 3. Графики скорости горения исследованных топливовоздушных смесей вдоль диаметра камеры сгорания в зависимости от времени: а – продукты конверсии пропана с воздухом; б – пропан с воздухом (начальное давление смеси 5 атм)

Вероятно, столь интенсивное ускорение пламени на начальном участке можно объяснить воздействием выброса струи продуктов сгорания, которая образуется при горении фрагментов непрореагировавшей смеси за фронтом волны внутри полузамкнутого цилиндрического канала в теле свечи зажигания. При дальнейшем перемещении волна горения замедляется и вблизи противоположной стенки камеры сгорания ее скорость становится сравнимой со скоростью ламинарного горения. Наличие значительного градиента скорости вдоль камеры сгорания может существенно влиять на однородность процесса горения смеси и формировать области течения с более высокими температурами, которые могут служить источником образования избыточных молекул  $\text{NO}_x$ .

## ВЫВОДЫ

1. Скорость горения топлива в камере сгорания во многом определяется химическим составом горючей смеси.
2. Наиболее высокие параметры в камере сгорания достигаются при горении чистого водорода. Время горения водородно-воздушной смеси оказывается примерно на порядок меньше, чем у стехиометрической смеси пропана и воздуха при эквивалентных условиях. Горение водорода с воздухом характеризуется наиболее высоким уровнем конечного давления, развиваемого внутри камеры сгорания.
3. Небольшие добавки водорода (2–4 % по объему) снижают время горения углеводородного топлива в камере сгорания при некотором увеличении уровня максимального давления на 17–23 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures / S. O. Akansu, Z. Dulger, N. Kahramana, T. N. Veziroglu // Int. Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 1527–1539.
2. Andrea T. D., Henshaw P. F., Ting D. S.-K. The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine // Int. Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 1541–1552.

3. B o s e Т. К. Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications / K. Agbossou, R. Chahine, J. Hamelin et al. // Journal of Power Sources. – 2001. – Vol. 96. – P. 168–172.

4. H y d r o g e n as a future transportation fuel / G. D. Berry, A. D. Pasternak, G. D. Rambach et al. // Energy. – 1996. – Vol. 21, № 4. – P. 289–303.

5. Г е н к и н К. И., Х а з а н о в З. С. Исследование механизма сгорания в двигателе // Горение и взрыв: Материалы третьего всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. – М.: Наука, 1972. – С. 409–415.

6. В о и н о в А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.

7. С е м е н о в Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. – М.: АН СССР, 1958. – 686 с.

8. С о к о л и к А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах / АН СССР. – М.: 1960. – 428 с.

Представлена кафедрой  
физико-математических дисциплин

Поступила 9.01.2006

УДК 621.382

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Канд. техн. наук, доц. БОНДАРЕВ В. А.

*Белорусский национальный технический университет*

Предлагаемый метод разработан для расчета толщины оксида кремния  $\text{SiO}_2$  при окислении через окна в защитной маске. Полученные автором формулы позволяют рассчитать диффузию окислителя и толщину  $X_0$  оксида 1 с учетом уменьшения  $X_0$  под маской из нитрида кремния 2 (рис. 1). Так как в настоящее время методы для расчета реальных трехмерных процессов не найдены, разработка современных технологий требует многочисленных дорогостоящих экспериментов.

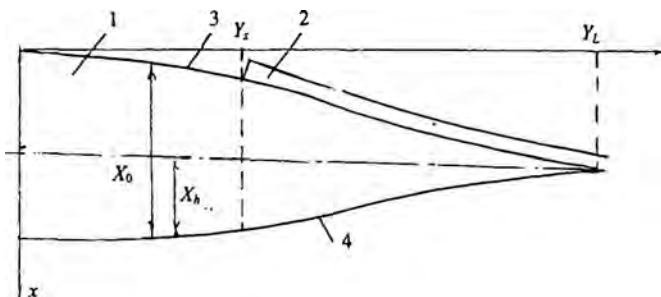


Рис. 1. Схема окисления кремния: 1 – окисел; 2 – нитридная маска; 3 – наружная поверхность оксида; 4 – окисляемая поверхность;  $X_0$  – толщина оксида;  $X_h$  – толщина окисленного слоя кремния;  $Y_s$  – край маски;  $Y_L$  – длина слоя оксида