

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ВОДОРОДА К ПРИРОДНОМУ ГАЗУ НА СВОЙСТВА СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

**Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.Н. Кабанов, ассистент, к.т.н.,
Г.В. Майстренко, аспирант, ХНАДУ**

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы влияния добавки водорода к природному газу на свойства смеси топлива. Приведены данные расчетов, показывающие влияние на процентное содержание водорода в смеси с природным газом на скорость сгорания в двигателе внутреннего сгорания.*

***Ключевые слова:** водород, природный газ, скорость сгорания.*

Введение

В настоящее время для улучшения экологических показателей транспортных средств реализуются масштабные программы по конвертации транспортных средств с ДВС на сжатый природный газ (СПГ). Однако газовый двигатель, несмотря на достаточно низкий уровень токсичности отработавших газов, имеет резервы для дальнейшего снижения токсичности.

Одним из наиболее перспективных путей снижения токсичности газового ДВС является использование смеси топлива, представляющего собой смесь СПГ и водорода в разных пропорциях.

Водород как моторное топливо имеет ряд свойств, которые позволяют повысить эффективность рабочего процесса двигателей с искровым зажиганием, значительно повысить экономичность и радикально уменьшить токсичность отработавших газов [1].

Одним из основных сдерживающих факторов широкого применения водорода в ДВС является его высокая цена. Поэтому сегодня экономически нет возможности перевести автомобильный транспорт на водород. Однако есть возможность улучшить свойства топлива за счет добавки водорода [2]. Данная работа посвящена изучению свойств смеси топлива при добавке водорода к сжатому природному газу.

Анализ публикаций

Первые попытки использования водорода в качестве моторного топлива были предприняты в СССР в 1941 году [3], а в семидесятые годы в нескольких научно-исследовательских организациях СССР начали интенсивно проводиться работы по использованию водорода в качестве добавки к бензину. Наиболее известны такие центры как НАМИ, ИПМаш АН УССР и СМНС АН СССР [2, 4-6].

В ИПМаш АН УССР под руководством профессора И.Л. Варшавского созданы автомобили и автопогрузчики работающие на бензоводородных топливных композициях с металлгидридными системами хранения водорода на борту [6]. В НАМИ под руководством Е.В. Шатрова проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию бензоводородного микроавтобуса РАФ 22034. Выполнена разработка бензоводородной системы питания, которая прошла полный комплекс стендовых и лабораторно-дорожных испытаний [7].

Использование водорода в качестве топлива в чистом виде показало падение мощности двигателей по сравнению с бензиновым аналогом [5]. Очень «жесткий» процесс сгорания водородно-воздушных смесей в области стехиометрического состава приводит к детонации на режимах высоких нагрузок. Эта особенность водородного топлива требует внесения существенных изменений конструкции ДВС [6]. В связи с этим наиболее

целесообразно и эффективно применение водорода в качестве добавки, причем топливоподачу необходимо организовать таким образом, чтобы на режимах холостого хода и частичных нагрузок двигатель работал на топливных смесях с высоким содержанием водорода [2, 5]. По мере возрастания нагрузок концентрация водорода должна снижаться, и на режиме полного дросселя подачу водорода необходимо прекратить. Это позволяет сохранить мощностные характеристики двигателя на прежнем уровне [5].

Кроме того, применение водорода в качестве добавки к бензину позволяет повысить эффективный КПД двигателя в сравнении с работой на чистом бензине на 30 %, в зависимости от процентного содержания водорода в смесевом топливе и режима работы ДВС [2]. Не менее важным показателем работы автомобильного ДВС на частичных режимах является токсичность отработавших газов. По мере обеднения бензоводородной смеси концентрация монооксида углерода (СО) в отработавших газах снижается практически до нуля. При увеличении концентрации водорода в смеси существенно уменьшаются выбросы углеводородов (C_nH_m). За счет обеднения топливовоздушной смеси свыше $\alpha=2$ концентрация NO_x также может снижаться практически до нулевого уровня [2, 5].

Свойства топлив и их смесей

Из всех моторных топлив водород является наиболее энергоёмким. Его низшая теплота сгорания в три раза превышает этот показатель углеводородных топлив (табл. 1). Однако при использовании топлив в двигателях внутреннего сгорания определяющим фактором является теплота сгорания топливовоздушной смеси. Из-за малой плотности водорода его объемная часть в стехиометрической смеси с воздухом составляет 29,6 %, бензина – 1,7% и природного газа – 9%. Поэтому теплота сгорания стехиометрической смеси водорода с воздухом на 6% меньше теплоты сгорания смеси природного газа и на 14% меньше теплоты сгорания смеси бензина [12]. Этим объясняется снижение мощности двигателя при переводе его на питание водородом.

Эффективность рабочего процесса двигателя в значительной мере зависит от качества смеси образования, в частности – от гомогенно-

сти топливо-воздушной смеси. Этот показатель определяется температурой кипения топлива и его диффузионной способностью. Температура кипения водорода равна 20К, это при использовании его как топлива в ДВС исключает жидкую фазу в топливовоздушной смеси. Коэффициент диффузии водорода почти на порядок выше углеводородных топлив, а это обеспечивает быстрое и качественное смесеобразование, даже если водород подается в конце такта сжатия [12]. Таким образом, рассмотренные свойства водорода обеспечивают формирование высокоомогенной смеси и уменьшение неравномерности циклов. Кроме этого, эти свойства обеспечивают легкий пуск двигателя при низких температурах.

Использование искрового зажигания в газовых двигателях имеет специфические особенности. Из табл. 2 видно, что смесь природного газа с воздухом имеет большую температуру и энергию воспламенения. В комплексе с низкой теплопроводностью и низкой нормальной скоростью распространения пламени возникает проблема с воспламеняемостью газозвушной смеси. С обеднением этой смеси требуемая энергия воспламенения смеси возрастает.

По этой причине в газовых двигателях необходима высокоэнергетическая система зажигания, которая позволяет осуществлять надежный запуск холодного двигателя и стабильную работу на обедненных смесях. Как видно из табл. 2, увеличить теплопроводность и уменьшить энергию воспламенения смеси природного газа с воздухом можно за счет небольших добавок водорода к этой смеси, что позволит использовать обычную систему зажигания в газовом двигателе, работающем на обедненных смесях.

Пределы воспламенения смесевоего топлива. Большое влияние на организацию рабочего процесса двигателя и его эффективность оказывают пределы воспламенения топливовоздушной смеси. Пределы воспламенения смесевоего топлива определяется по правилу Ле Шателье [9]

$$l = \frac{100}{a_1/l_1 + a_2/l_2 + \dots + a_n/l_n}, \quad (1)$$

где l – верхний или нижний предел воспламенения газовой смеси, содержащей n горю-

Таблица 1 Теплота сгорания топлив и их стехиометрических смесей с воздухом [12]

	Водород	Природный газ	Бензин
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	120,0	52,8	44,0
Плотность при нормальных условиях, кг/м ³	0,0899	0,72	740
Объемная доля топлива в стехиометрической смеси с воздухом, %	29,6	9	1,7
Теплота сгорания стехиометрической топливовоздушной смеси, МДж/м ³	3,19	3,43	3,71

Таблица 2 Физические свойства стехиометрических смесей топлив и воздуха [12]

	Водород	Природный газ	Бензин
Минимальная энергия воспламенения, мДж	2	23	20
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,169	0,03	-
Нормальная скорость сгорания, м/с	1,8	0,34	0,42
Температура воспламенения, °С	510...590	540...650	230...370

чих компонентов, %; a_1, a_2, \dots, a_n – содержание горючих компонентов в газовой смеси, %; l_1, l_2, \dots, l_n – верхний и нижний пределы воспламенения отдельных компонентов смеси, %.

Расчетные значения пределов воспламенения различных газов и их смесей приведены в табл. 3. Из этой таблицы видно, что увеличение содержания водорода в природном газе расширяет пределы воспламенения смеси топлива.

Таблица 3 Пределы воспламенения различных газовых топлив [9] и их расчетных значений смесей

	Нижний предел l_H		Верхний предел l_B	
	%	α	%	α
Водород (H ₂)	4,10	9,80	74,2	0,15
Метан	5,30	1,80	14,0	0,65
Этан	3,20	1,90	12,5	0,42
Пропан	2,40	1,70	9,50	0,40
Бутан	1,90	1,70	8,40	0,40
Пентан	1,40	1,60	7,80	0,38
Природный газ (ПГ)	4,75	1,98	14,73	0,57
ПГ(90%)+H ₂ (10%)	4,66	2,19	16,01	0,56
ПГ(80%)+H ₂ (20%)	4,58	2,43	17,54	0,55
ПГ(70%)+H ₂ (30%)	4,49	2,72	19,4	0,53

Для расчетов пределов воспламенения смесей сжатого природного газа и водорода состав СПГ в объемных долях принят: метан (CH₄) – 94,4%; этан (C₂H₆) – 3,9%; пропан

(C₃H₈) – 1%; бутан (C₄H₁₀) – 0,41%; пентан (C₅H₁₂) – 0,24%; водород (H₂) – 0,05% [9].

Теплота сгорания топлива. Низшая теплота сгорания природного газа вычисляется по формуле Д.И. Менделеева [2]

$$\begin{aligned}
 Q_H = & 12,8 \cdot CO + 10,8 \cdot H_2 + 35,8 \cdot CH_4 + \\
 & + 56,0 \cdot C_2H_2 + 63,4 \cdot C_2H_6 + 91 \cdot C_3H_8 + \\
 & + 120 \cdot C_4H_{10} + 144 \cdot C_5H_{12} = (10,8Ч \\
 & Ч0,0005 + 35,8 \cdot 0,944 + 63,4 \cdot 0,039 \\
 & + 91 \cdot 0,01 + 120 \cdot 0,0041 + 144 \cdot 0,0024)Ч \\
 & Ч1000 = 38020,8 \text{ кДж/м}^3.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Для смеси природного газа, водорода и воздуха, также использовалась формула Д.И. Менделеева [2]

$$Q_{H_{см}} = \frac{Q_H}{\mu_{см}}, \quad (3)$$

где $\mu_{см} = 1 + \alpha L_0$.

В табл. 4 приведены значения низших теплот сгорания газозвушных смесей.

Таблица 4 Низшая теплота сгорания газозвушной смеси

Газ	Q_H , МДж/м ³		
	l_H	$\alpha=1,0$	l_B
Водород (H ₂)	0,44	3,19	7,97
Природный газ (ПГ)	1,91	3,43	5,03
ПГ(90%)+H ₂ (10%)	1,68	3,42	5,59
ПГ(80%)+H ₂ (20%)	1,49	3,41	5,71
ПГ(70%)+H ₂ (30%)	1,34	3,40	5,82

Нормальная скорость распространения пламени. Под нормальной скоростью распространения пламени понимается скорость распространения фронта пламени по нормали к поверхности за счет молекулярной теплопроводности и диффузии активных центров в несгоревшую смесь. В работе [9] предложено, используя признак аддитивности, нормальную скорость распространения пламени при горении смесей газов с воздухом

$$U_H = \frac{C_1 u_1 + C_2 u_2 + C_3 u_3 + \dots}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots}, \quad (4)$$

где C_1, C_2, C_3 – процентные содержания простых смесей в сложной смеси; u_1, u_2, u_3 – максимальные скорости распространения пламени в простых смесях (метан – 0,338 м/с; этан – 0,401 м/с; пропан – 390 м/с; бутан – 0,379 м/с; пентан – 0,333 м/с; водород – 310 м/с).

Однако, как показало сопоставление экспериментальных и расчетных данных по зависимости (4), приведенное на рис. 1 [10], для смесей, содержащих CH_4 и H_2 , использованные зависимости (4) приводят к большим погрешностям. Например, при $C_{\text{H}_2} = 60\%$ расчетная скорость распространения пламени более чем в 3 раза превышает экспериментальную [10]. Поэтому для расчета U_H на основании экспериментальных данных была получена эмпирическая зависимость

$$U_H = 0,33 + 0,0189 \cdot C_{\text{H}_2} - 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot C_{\text{H}_2}^2 + 6,834 \cdot 10^{-6} \cdot C_{\text{H}_2}^3. \quad (5)$$

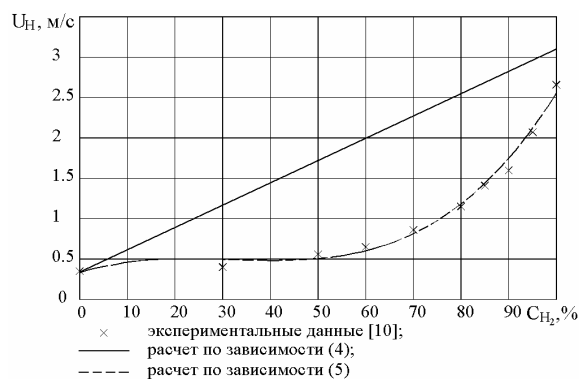


Рис. 1. Зависимости нормальной скорости распространения пламени сгорания смеси ($\alpha=1$) от концентрации водорода

Как видно из рис. 1, зависимость (5) показывает хорошее сходство с опытными данными.

В цилиндре двигателя внутреннего сгорания, где температуры и давления отличаются от нормальных условий, в работе [9] предложены зависимости, учитывающие влияние температуры и давления на нормальную скорость распространения пламени. Повышение температуры смеси ведет к увеличению нормальной скорости распространения пламени

$$U_H = U_{H0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (6)$$

где U_{H0} – скорость распространения пламени при нормальных условиях; $n = 1,7 \dots 1,8$ – показатель степени.

Влияние давления в цилиндре на нормальную скорость распространения пламени выражается зависимостью

$$U_H = U_{H0} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-m}, \quad (7)$$

где $m = 0,2 \dots 0,25$ – показатель степени.

Анализ экспериментальных данных, полученных в работе [11], позволяет рекомендовать для условий в цилиндре ДВС эмпирическую зависимость, полученную путем обработки этих экспериментальных данных

$$U_H = U_{H0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-m}, \quad (8)$$

где $n=1,9$; $m=0,33$.

Результаты расчетов с использованием зависимости (8) показали удовлетворительное совпадение с результатами эксперимента.

Выводы

1. Добавка водорода к природному газу позволяет снизить энергию воспламенения смеси и использовать обычную систему зажигания вместо высокоэнергетической, а также улучшить экономические и экологические показатели работы газового ДВС.

2. Предложена эмпирическая зависимость нормальной скорости распространения пламени в стехиометрической газозвдушной смеси от концентрации водорода при нормальных условиях.

3. На основе анализа результатов экспериментальных исследований предложена зависимость нормальной скорости распространения пламени в газозвдушной смеси от температуры и давления.

Литература

1. Канило П.М., Костенко К.В. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта. // Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2008. – Вып. 23. – С. 107 – 113.
2. Талда Г.Б. Повышение топливной экономичности и снижение токсичности бензиновых двигателей добавкой водорода к бензину // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Харьков, 1984. – 213 с.
3. Гусев А.Л., Дядюченко Ю.П. Применение водорода в автомобильных двигателях внутреннего сгорания в блокадном Ленинграде. // Сб. тез. докладов II Межд. Симп. «Безопасность и экономика водородного транспорта», г. Саров, 2003. – С. 11 – 13.
4. Шатров Е.В., Раменский А.Ю., Кузнецов В.М. Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензино-водородных смесях. // Автомобильная промышленность, 1979.
5. Раменский А.Ю. Исследование рабочих процессов автомобильного двигателя на бензино-водородных топливных компо-

зициях: Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Москва, 1982.

6. Мищенко А.И., Белогуб А.В., Савицкий В.Д. и др. Применение водорода для двигателей автомобильного транспорта // Атомно-водородная энергетика и технологии: Сб. статей, вып. 8. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. А.с. 918483 СССР. Система питания карбюраторного двигателя внутреннего сгорания жидким и газообразным топливом / А.С. Озерский, В.М. Кузнецов, А.Ю. Раменский и др. // Открытия. Изобретения, 1981.
8. Раменский А.Ю., Щелищ П.Б., Нефедкин С.И. Применение водорода в качестве моторного топлива для автомобильных двигателей внутреннего сгорания. История, настоящее и перспективы. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – №11(43). – 2006. – С. 63 – 70.
9. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. Справочное пособие. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Недра. 1987. – 336 с.
10. Генкин К.И. Газовые двигатели. – М.: Машиностроение, 1977. – 196 с.
11. Bromberg L. In-Cylinder Laminar Flame Propagation Speed: Effect on Hydrogen and Rich Gas Addition. MIT Plasma Science and Fusion Center, August 26, 2005.
12. Быков Г.А. Детонационные ограничения при использовании альтернативных топлив в двигателях с искровым зажиганием. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1995. – №3. – С. 3 – 9.

Рецензент: А.Н. Пойда, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 26 мая 2009 г.