

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОАРОМАТИЗИРОВАННЫХ НЕФТЯНЫХ ТОПЛИВ

**П.М. Канило, профессор, д.т.н., К.В. Костенко, научн. сотр.,
М.В. Сарапина, аспирант, ХНАДУ**

***Аннотация.** Рассмотрены основные аспекты современной топливно-экологической проблемы автомобильного транспорта. Приведены результаты экоисследований по Европейскому городскому ездовому циклу ряда легковых автомобилей с поршневыми двигателями внутреннего сгорания при использовании различных, в том числе высокоароматизированных нефтяных топлив. Дан комплексный анализ эколого-химических показателей автомобилей с учетом суммарной канцерогенности отработавших газов. Показано, что одним из эффективных путей повышения канцерогенной безопасности легковых автомобилей, работающих на высокоароматизированных топливах, при одновременном снижении их потребления, является использование природного газа или водорода в качестве дополнительного энергоносителя.*

***Ключевые слова:** высокоароматизированные нефтяные моторные топлива, ароматические углеводороды (АУ), природный газ, водород, отработавшие газы (ОГ), оксиды азота (NO_x), канцерогенные углеводороды (КУ), бенз(а)пирен (БП), твердые частицы (ТЧ), эколого-химические показатели.*

Введение

В мире насчитывается более 800 млн. автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Через десять лет их число возрастет до одного миллиарда. Человечество не сможет решить топливно-экологическую проблему такого количества автомобилей, если потребление нефтяных топлив автотранспортом будет и дальше составлять 98 %. Именно исчерпание природных ресурсов, в первую очередь нефтяных, при условиях их резкого подорожания и неэффективного использования, а также ухудшение качества окружающей среды (резкое повышение канцерогенно-мутагенного загрязнения атмосферы крупных городов, особенно при использовании на автотранспорте в последние годы высокоароматизированных нефтяных топлив, а также рост концентрации парниковых газов) являются важнейшими составляющими углубляющегося топливно-экологического кризиса [1 – 7].

Анализ топливно-ресурсной проблемы

Автомобильный транспорт является основным потребителем нефтяных топлив, на получение которых расходуется примерно 80 % добываемой нефти. Мировые ресурсы нефти ограничены (см. табл.1), например, для Европы и стран СНГ, включая Российскую Федерацию, двумя десятками лет при постоянном снижении уровней ее добычи и существенном повышении стоимости. Поэтому в ближайшие годы практически всеми странами мира планируется снижение потребления нефтяных моторных топлив на 20 – 30 %.

Из известных ныне путей снижения потребления нефтяных топлив реальное практическое значение имеют два, а именно: существенное повышение экономичности автомобилей, в том числе применением более совершенных энергоустановок с высокой топливной экономичностью и параметрической надежностью, а также замещение нефтяных топлив (частичное или полное) альтернативными энергоносителями [1, 3, 4, 8].

Таблица 1 Ресурсы нефти*

Регионы	Ресурсы, млрд.т	Добыча, млн.т/год	Потребление, млн.т/год	Запас, годы
Северная Америка	7,8	642,5	1132,6	11,9
Латинская Америка	14,8	350,6	223,3	40,7
Европа и страны СНГ	19,2	845	963,3	22
Средний и Ближний Восток	101,2	1208,1	271,3	81
Африка	15,5	467,1	129,3	31,8
Индокитай и страны Тихого океана	5,4	381,7	1116,9	13,8
Украина	-	5	21	-
Мир	163,6	3895	3836,8	40,6

* – BP Statistical Review of World Energy 2007.

К альтернативным энергоносителям для автомобильных ДВС необходимо отнести:

- природный газ как наиболее эффективный энергоноситель на переходный период;
- электроэнергию (электромобили);
- синтетические моторные топлива (СМТ), в том числе спиртовые;
- в перспективе водород, который может использоваться как высокоэффективная добавка к горючим смесям, так и в качестве необходимого компонента при производстве СМТ [4].

Ресурсных запасов природного газа в Европе и странах СНГ, включая Российскую Федерацию, при современном уровне его потребления, предполагается достаточным примерно на 60 лет и более. К тому же природный газ характеризуется самой низкой энергетической стоимостью (6 - 9 долл./ГДж), что в 3 – 4 раза ниже стоимости бензинов, а водород, производимый по современным технологиям, уже приближается к энергетической стоимости бензинов (см. табл. 2).

Водород как дополнительное топливо имеет ряд преимуществ: высокая удельная теплота сгорания и антидетонационная стойкость, хорошая воспламеняемость углеводородно-водородовоздушных смесей в широком диа-

Таблица 2 Данные по топливам

Вид топлива (т)	$H^P_{Н}$, МДж/кг	Цена, долл./ГДж	C_T , кг/ГДж	$\frac{G_{CO_2(i)}}{G_{CO_2(B)}}$, %
Бензин (Б)	44,0	30	19,3	100
Дизельное топливо (ДТ)	42,4	25	20,4	106
Пропан-бутан	45,7	15 – 20	17,9	93
Природный газ	49,8	6 – 9	15,1	79
Уголь	17 – 28	3 – 4	30,0	160
Метанол	19,7	20–30	19,0	96
Этанол	26,8	30	19,9	99
Водород	120,2	8*–60	0	0

Примечания. C_T – удельное содержание углерода в энергетически сравнимой доле топлива; * – водород, производимый электролизом на угольных ТЭС для собственных нужд.

пазоне температур и составов, что позволяет организовать качественное регулирование рабочего процесса ДВС, увеличив тем самым термический КПД двигателя на режимах частичных нагрузок, характерных для работы автомобилей в условиях города. Например, добавки водорода (в диапазоне до 10 % мас.) в цилиндры ДВС с традиционным искровым воспламенением обедненных бензоводородовоздушных смесей обеспечивают экономию бензина до 40 % [4]. При этом стоимость бензоводородного топлива снижается на 15 % (ΔZ_{B+H_2}) при замещении 30 % бензина (Б) водородом и его относительной энергетической стоимости (\bar{C}), превышающей стоимость бензина в 2,2 раза (см. рис. 1).

Важным является также то, что при сжигании обедненных бензоводородовоздушных смесей ингибируются процессы образования КУ и АЧ, а также снижаются уровни образования NO_x при повышенной полноте выгорания топлива [4]. Модернизация бензиновых двигателей при использовании водорода или природного газа в качестве дополнительного энергоносителя минимальна и касается в основном систем питания и регулирования. Водород при этом можно транспортировать на автомобиле: в газообразном (современные облегченные стеклопластиковые баллоны), в сжиженном (криогенные баки), в связанном твердофазном (гидриды металлов) и жидком (химические соединения – метанол, этанол и т.д.) состояниях.

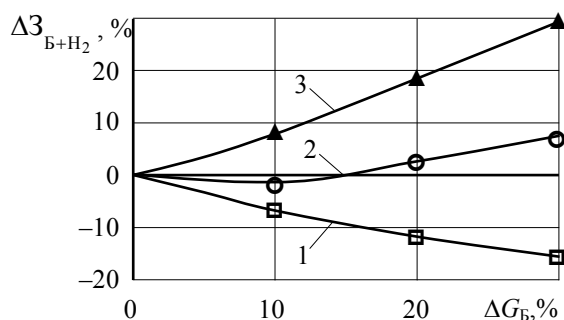


Рис. 1. Влияние частичного замещения бензина ($\Delta G_{\text{Б}}$) водородом на изменение удельных эксплуатационных затрат по топливной составляющей, где: $\bar{\Pi} = \Pi_{\text{ТУ.Т.}(H_2)} / \Pi_{\text{ТУ.Т.}(Б)}$; ТУ.Т – тонна условного топлива; 1 – $\bar{\Pi} = 2,2$; 2 – $\bar{\Pi} = 2,9$; 3 – $\bar{\Pi} = 3,7$

Внедрение на городском автотранспорте газовых двигателей или модернизированных двигателей, работающих на композитных топливах, с использованием природного газа или водорода в качестве дополнительных энергоносителей, обеспечит существенный вклад в проблему ресурсо- и энергосбережения за счет снижения потребления дефицитных нефтяных моторных топлив.

Анализ экологической проблемы

Автотранспорт является не только энергоемким потребителем материальных ресурсов, в том числе нефтяных топлив, но и определяющим в экологическом (термическом, химическом, физическом, акустическом и т.д.) загрязнении окружающей среды, особенно атмосферы крупных городов. При этом интегральные токсические показатели автомобильных двигателей в значительной степени определяются их эксплуатационной топливной экономичностью, параметрической надежностью и качеством используемых топлив, в том числе их энергетическими показателями и уровнями содержания: углерода, водорода, ароматических углеводородов, серы.

Анализ загрязненности атмосферы городов с интенсивным автомобильным движением показал, что наиболее опасными по степени воздействия на организм человека являются NO_x и КУ. Их доля при оценке экологической опасности автомобильных двигателей составляет 95 % и более [1, 3 – 7]. Особенно

опасны их производные – нитроканцерогенные вещества, обладающие, как следствие явления синергизма, мутагенными свойствами. Именно БП, среди выделенной учеными приоритетной группы КУ, обладает наибольшим индексом канцерогенной агрессивности (ИКА) и для него установлена средне-суточная предельно допустимая концентрация в атмосфере городов $[\text{ПДК}_{\text{БП}}]_{\text{СС}} = 10^{-6} \text{ мг/м}^3$.

Моторные топлива, производимые из нефти по новым технологиям, характеризуются повышенным содержанием АУ, что приводит при их использовании к существенному росту уровней выбросов NO_x и БП, а также ТЧ, особенно с ОГ автомобилей с дизелями [1, 3 – 7], т.е. к повышению канцерогенной агрессивности ОГ и интегральной экологической опасности автомобилей. На рис. 2 приведены данные по уровням выбросов NO_x и БП с ОГ двигателя легкового автомобиля типа ГАЗ, работающего на бензинах с различным содержанием АУ и пропанбутане, при его испытании по Европейскому ездовому циклу.

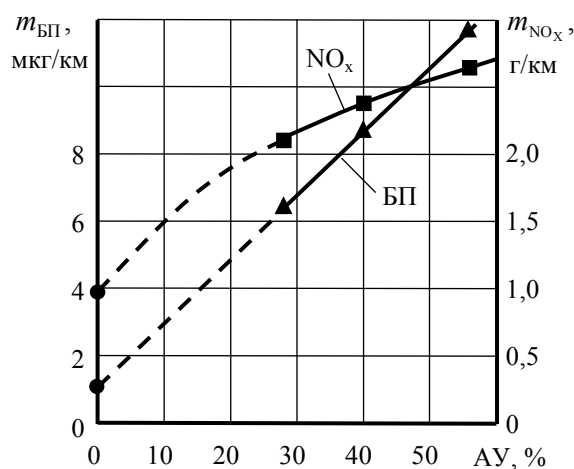


Рис. 2. Влияние содержания АУ в моторных топливах на уровни выбросов NO_x и БП с ОГ легковых автомобилей: ● – пропанбутан; бензины: А-76 (АУ-28%), АИ-93 (АУ-40%), АИ-95 (АУ-56%)

Ниже, в табл. 3 и на рис. 3 [6] приведены усредненные данные по уровням выбросов АЧ и БП с ОГ легковых автомобилей с дизелями при их испытании по Европейскому городскому ездовому циклу в зависимости от уровня содержания АУ в дизельных топливах. Представленные выше данные указывают, что использование бензинов и дизельных

топлив с повышенным содержанием АУ приводит к существенному росту уровней выбросов АЧ и БП, а также NO_x с ОГ автомобилей, т.е. – к повышению канцерогенно-мутагенной агрессивности ОГ автомобилей и их интегральной эколого-химической опасности.

Таблица 3 Экспериментальные данные

Легковые дизельные автомобили	Параметры топлив: АУ, % / ЦЧ			
	21,2	32,4	45,6	56,6
	ВВ: АЧ, г/км / БП, мкг/км			
	0,23	0,24	0,34	1,53
1. Oldsmobile Delta 88 diesel	0,30	0,34	0,34	16,8
2. Peugeot 505 D	0,18	0,20	0,32	0,94
	0,29	0,32	0,32	24,2

Примечание. ЦЧ – цетановое число топлив.

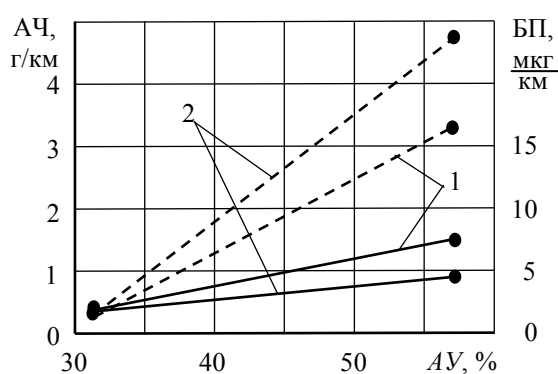


Рис. 3. Зависимость роста уровней выбросов АЧ (—) и БП (---) от уровня содержания АУ в дизельном топливе (см. табл. 3)

Таблица 4 Экспериментальные данные

№ п/п	Моторные топлива	Н/С, %	$m_{\text{CO}}, m_{\text{CH}}, m_{\text{NO}_x}, m_{\text{БП}} \cdot 10^6$			
			г/км			
1	Бензин АИ-93	16,3	6,7	2,3	2,4	8,9
2	Бензин А-76	16,8	4,9	2,4	2,2	6,3
3	Пропан-бутан	19,0	1,7	2,1	1,0	1,2
4	Бензин А-76 + 30 % метанола	21,9	5,0	1,8	0,9	0,8
5	Природный газ	33,3	1,3	1,0	0,8	0,6
6	Бензин АИ-93 + 10 % водорода	26,0	1,2	0,4	0,5	0,8
7	Метанол	35,0	0,8	1,1	0,8	0,6
8	Водород	100	–	–	0,2	–

Примечание. Доля $\text{NO}_2/\text{NO}_x \approx 0,1$.

В табл. 4 приведены экспериментальные данные по результатам экоисследований ряда легковых автомобилей с ДВС типа ЗМЗ по

Европейскому городскому ездовому циклу при использовании различных топлив.

Из приведенных данных следует, что использование энергоносителей с повышенным содержанием водорода (природный газ, бензоводородные смеси и др.) приводит к снижению уровней выбросов АЧ, БП, NO_x , а также CO_2 (см. табл. 2) с ОГ автомобилей.

На основании результатов проведенных экоисследований легковых автомобилей, не оборудованных системами нейтрализации ОГ, можно сделать следующие выводы и рекомендации. При использовании в ДВС легковых автомобилей нефтяных топлив с наиболее вредными ингредиентами, выбрасываемыми с ОГ двигателей, являются NO_x и КУ (доля которых в эколого-химической опасности автомобилей составляет не менее 95 %), которые в условиях городской среды синтезируют предельно опасные для человека нитроканцерогенные вещества, обладающие мутагенными свойствами. При этом мелкодисперсные ТЧ (максимальное количество которых содержится в ОГ дизелей) существенно усиливают их агрессивность. Повышенное содержание АУ, характерное для отечественных нефтяных моторных топлив, резко усиливает эту закономерность, особенно существенно повышаются уровни выбросов КУ с ОГ автомобилей (см. рис. 2 и 3). Поэтому проблема канцерогенно-мутагенного загрязнения ОС при дизелизации легковых автомобилей может усугубляться.

Ранее отмечалось, что характерной особенностью современных жидких моторных топлив, получаемых из нефти, а также широкофракционных синтетических топлив, получаемых из углей и сланцев, является повышенное содержание ароматических углеводородов (АУ) при сниженных водородных показателях (g_{H_2} , Н/С). Установлено, что процессы пиролиза указанных топлив (особенно топлив с содержанием АУ более 30 %), а также процессы окисления предшественников образования ТЧ и КУ в камерах сгорания тепловых двигателей обусловлены высокой чувствительностью указанных процессов к изменению содержания АУ и водорода в исходном топливе [9 – 12]. Следует особо отметить, что процессы образования КУ (по сравнению образованием ТЧ) более чувствительны к содержанию АУ и водорода в топливе [6, 7]. Так при увеличении содер-

жания АУ в дизельном топливе с 32 % до 57 % (при соответствующем сниженном водородном показателе) уровни выбросов АЧ с ОГ автомобиля увеличиваются в 3 – 4 раза, а уровни БП как индикатора наличия КУ – в 5 – 8 раз (см. рис. 3). Причем, при низких уровнях содержания АУ в жидких топливах ($g_{AY} \leq 30\%$), уровни выбросов как ТЧ, так и КУ с ОГ автомобилей относительно низкие. При этом показатель содержания водорода в топливе при $g_{AY} = 30\%$ может быть принят за базово-эффективный $[g_{HT}]_{эф}$. Предлагается критерий (1), характеризующий изменение уровней эффективного содержания водорода в жидком ароматизированном топливе с учетом чувствительности процессов образования КУ от содержания АУ при сжигании топлив с $g_{AY} > 30\%$

$$g_{HT(эф)} = [g_{HT} - (g_{AY} - 30)^n], \quad (1)$$

где g_i – соответствующие доли водорода и АУ в %, $n = 0,4 \pm 0,02$.

Одним из путей минимизации уровней выбросов КУ, а также ТЧ с продуктами сжигания жидких моторных топлив с повышенным содержанием АУ ($g_{AY} > 30\%$) является использование водорода (или природного газа) в качестве дополнительного энергоносителя [1, 3 – 8]. При этом, например, минимально необходимая массовая доля добавки водорода ($g_{H_2}^3$) по отношению к исходному ароматизированному моторному топливу может быть оценена по уравнению

$$g_{H_2}^3 = \Delta g_{HT} = \{[g_{HT}]_{эф} - g_{HT(эф)}\} / 100, \quad (2)$$

где $g_{H_2}^3$, Δg_{HT} – в массовых долях.

Отношение атомов водорода к атомам углерода в композитном (углеводородно-водородном) топливе определяется по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} \left(\frac{H}{C}\right)_{\Sigma} &= \left(\frac{A_C}{A_H}\right) \cdot \left[\frac{g_{HT} + \Delta g_{HT}}{g_C}\right] = \\ &= \left(\frac{H}{C}\right)_T \cdot \left(1 + \frac{\Delta g_{HT}}{g_{HT}}\right), \quad (3) \end{aligned}$$

где g_i – массовые доли компонентов.

Пример №1. При использовании широкофракционного жидкого моторного топлива с содержанием АУ ($g_{AY} = 50\%$) и соответственно водорода ($g_{HT} = 12\%$) уровень эффективного содержания водорода (при выбранном базово-эффективном содержании водорода $[g_{HT}]_{эф} = 13,5\%$) определяется по (1) как $g_{HT(эф)} = [12 - (50 - 30)^{0,4}] = 8,7\%$, или $g_{HT(эф)} = 0,087$ (в массовых долях). Тогда $g_{H_2}^3 = 13,5 - 8,7 = 4,8\%$ или $g_{H_2}^3 = 0,048$ (в массовых долях).

При этом отношение атомов водорода к атомам углерода в исходном углеводородном топливе соответствует

$$\begin{aligned} (H/C)_T &= (A_C / A_H) \cdot (g_{HT} / g_C) = \\ &= 12 \cdot 12 / 88 = 1,64, \quad (4) \end{aligned}$$

а указанное отношение для композитного топлива будет определяться по зависимости:

$$(H/C)_{\Sigma} = 1,64 \cdot [1 + (0,048 / 0,12)] = 2,3. \quad (5)$$

На рис. 4 приведена расчетная номограмма взаимосвязей между водородными показателями (g_{HT}) исходных широкофракционных топлив с $g_{AY} \geq 30\%$ и необходимыми добавками водорода ($g_{H_2}^3$) до базово-эффективных уровней водорода $[g_{HT}]_{эф}$ в композитных углеводородно-водородных топливах с целью минимизации уровней выбросов КУ и ТЧ с продуктами их сжигания.

Экспериментальные данные, подтверждающие экономическую и экологическую эффективность использования добавок водорода для снижения уровней выбросов БП (КУ) с ОГ автомобилей при использовании нефтяных моторных топлив с $g_{AY} > 30\%$, представлены на рис. 1 и в табл. 5.

Если использовать метан в качестве добавки к широкофракционным моторным топливам с $g_{AY} > 30\%$, то

$$g_{CH_4}^3 = \Delta g_{CH_4} = 4 \cdot \{[g_{HT}]_{эф} - g_{HT(эф)}\} / 100. \quad (6)$$

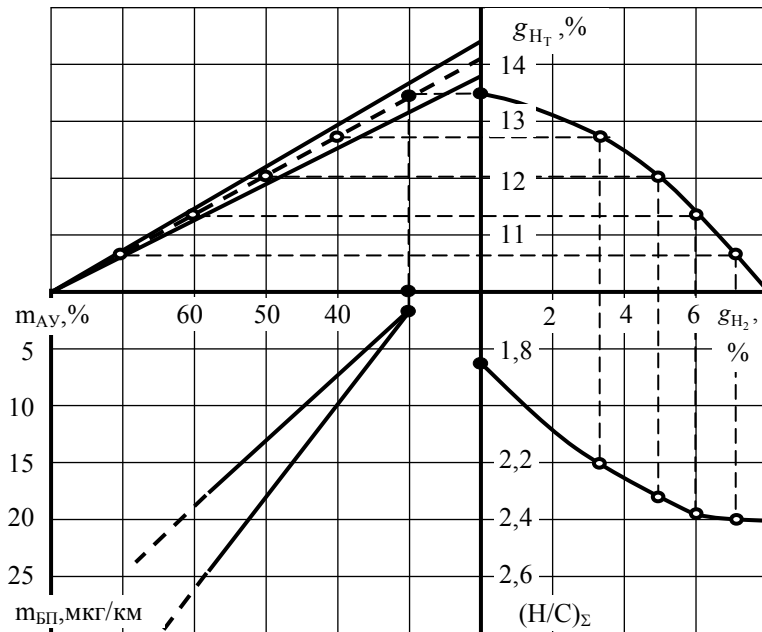


Рис. 4. Изменение водородных показателей в композитных топливах от содержания АУ в исходных топливах и уровней добавки водорода

Таблица 5 Эколого-химические показатели легкового автомобиля типа ГАЗ при использовании бензоводородных топлив

Бензин (АИ-93) + водород	m_{CO}	m_{CH}	m_{NOx}	$m_{BP} \cdot 10^6$
	г/км			
$g_T = 0$	6,7	2,3	2,4	8,9
$g_T = 0,1$	3,2	1,0	1,5	2,0
$g_T = 0,2$	2,0	0,7	0,9	1,2
$g_T = 0,3$	1,2	0,4	0,5	0,8

Примечание. g_T – доля замещения бензина водородом.

Отношение атомов водорода к атомам углерода в композитном топливе (при добавке природного газа) определяется по следующей зависимости:

$$\left(\frac{H}{C}\right)_\Sigma = \left(\frac{A_C}{A_H}\right) \cdot \left[\frac{g_{H_T} + 0,25 \cdot g_{CH_4}^3}{g_{C_T} + 0,75 \cdot g_{CH_4}^3} \right], \quad (7)$$

где g_i – массовые доли компонентов.

Пример № 2. В соответствии с (6) и данными примера № 1, минимально необходимая массовая доля добавки природного газа составит

$$g_{CH_4}^3 = 4 \cdot g_{H_2}^3 = 4 \cdot 0,048 = 0,192, \text{ мас. доли.}$$

При этом отношение атомов водорода к атомам углерода в композитном топливе, в соответствии с (7), будет равно

$$(H/C)_\Sigma = 12 \cdot (0,168/1,024) = 1,97.$$

Таким образом, при использовании природного газа в качестве дополнительного энергоносителя к высокоароматизированному нефтяному топливу с $g_{AU} > 30\%$, показатель (H/C) композитного топлива растет менее существенно, чем при соответствующих добавках водорода.

Особо следует отметить, что при использовании водорода или природного газа в качестве дополнительного энергоносителя с уменьшением выбросов КУ снижаются уровни выбросов также NO_x , ТЧ и CO_2 , что обеспечивает существенное повышение интегральной экобезопасности легковых автомобилей при одновременном снижении эксплуатационных расходов по топливным составляющим.

Заключение

При использовании в ДВС легковых автомобилей нефтяных топлив наиболее вредными ингредиентами, выбрасываемыми с ОГ двигателей, являются NO_x и КУ, доля которых в эколого-химической опасности автомобилей составляет не менее 95 % и которые в условиях городской среды синтезируют предельно опасные для человека нитроканцерогенные вещества, обладающие мутагенными

свойствами. При этом мелкодисперсные ТЧ (максимальное количество которых содержится в ОГ дизелей) существенно усиливают их агрессивность. Повышенное содержание АУ, характерное для отечественных нефтяных моторных топлив, резко усиливает эту закономерность, особенно по уровням выбросов КУ. Поэтому назрела необходимость ограничения содержания АУ в нефтяных моторных топливах на уровне не более 30%. Предложен критерий, характеризующий изменение эффективного содержания водорода в жидком высокоароматизированном топливе от уровня АУ (с учетом чувствительности процессов образования КУ при сжигании топлив с $g_{\text{АУ}} > 30\%$) и методика определения целесообразных уровней замещения указанных нефтяных топлив добавками природного газа или водорода. Использование природного газа или водорода в качестве дополнительных энергоносителей обеспечивает существенное снижение уровней выбросов NO_x , КУ и ТЧ, а также CO_2 и является экономически выгодным.

Выполнение международных норм «Евро-2» и «Евро-3» легковыми автомобилями возможно при использовании: природного газа, спиртовых топлив, а также водорода в качестве как основного, так и дополнительного энергоносителя. При необходимости выполнения более жестких экологических норм («Евро-4» и «Евро-5») дополнительно можно использовать на автомобилях современные нейтрализаторы ОГ, например накопительного типа [1] или плазменные [13], а также комплексные системы улавливания АЧ для автомобилей, оборудованных дизелями.

Литература

1. Канило П.М., Бей И.С., Ровенский А.И. Автомобиль и окружающая среда. – Харьков: Прапор. – 2000. – 304 с.
2. Мэлор Стуруа, Чайка Ф., Лесков С. Жизнь после нефти: альтернативные источники энергии. – www.inauka.ru. – Известия науки. – 22.03.2007. С. 1 – 4.
3. Канило П.М., Костенко К.В., Сарапина М.В. Эколого-экономический анализ эффективности использования газообразных энергоносителей на автомобильном транспорте // Автомоб. транспорт. –

Харьков: ХНАДУ. – 2007. – Вып. 21. – С. 98 – 107.

4. Канило П.М., Шадрин М.В. Анализ эффективности и перспектив применения водорода в автомобильном транспорте // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т.9. – № 2. – С. 79 – 85.
5. Канило П.М., Шадрин М.В. Эколого-химическая опасность легковых автомобилей с различными ДВС // Автомоб. транспорт. – 2005. – Вып. 17. – С. 35 – 39.
6. Звонов В.А., Козлов А.В., Симонова Е.А. Оценка и контроль выбросов дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей. – М.: Изд-во «Прима-Пресс-М». – 2005. – 132 с.
7. Канило П.М., Шадрин М.В. Эколого-химические показатели автомобильных ДВС с учетом канцерогенности отработавших газов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 2. – С. 154 – 159.
8. Абрамчук Ф.И., Кобанов А.Н. Расчетная оценка эколого-химических показателей газового двигателя с высокоэнергетической системой искрового зажигания // Автомоб. транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2007. – Вып. 20. – С. 63 – 67.
9. Блазовский. Зависимость сажеобразования от характеристик смеси топлив и условий горения // Энергет. машины. – 1990. – Т.102. – № 2. – С. 150 – 158.
10. Нэджели Д.У., Додж Л.Д., Мозек К.А. Исследование в модельной камере сгорания тенденции к сажеобразованию топлив, содержащих полициклические ароматические углеводороды // Аэрокосм. техника. – 1993. – Т.1. – № 10. – С. 153 – 162.
11. Naegeli D.M., Moses C.A. Effects of fuel properties on soot formation in turbine combustion // Ibid. – 1991. – № 781026. – P. 3 – 9.
12. Кларк Д.А. Влияние характеристик топлива на интенсивность излучения в камере сгорания газотурбинного двигателя // Ракет. техника и космонавтика. – 1992. – Т.20. – № 3. – С. 135 – 144.
13. Плазмотрон-нейтрализатор // За рулем. – 2001. – № 3. – С. 56 – 57.

Рецензент: Н.Я. Говорущенко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2007 г.