

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

УДК 669.85/86+502.7

БУДУЩЕЕ АВТОТРАНСПОРТА – АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТОПЛИВА И КАНЦЕРОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

П.М. Канило, профессор, д.т.н., М.В. Сарапина, ассистент, к.т.н., ХНАДУ

***Аннотация.** Проанализированы перспективы применения синтетических углеводородных моторных топлив и водорода в качестве как основных, так и дополнительных энергоносителей. Показано, что использование альтернативных топлив не только эффективно замещает нефтяные топлива, но и обеспечивает существенное снижение загрязнения окружающей среды супертоксиантами – канцерогенно-мутагенными ингредиентами.*

***Ключевые слова:** окружающая среда, автотранспорт, синтетические топлива, природный газ, водород, ароматические и полиароматические углеводороды, отработанные газы, канцерогенные углеводороды, бенз(а)пирен, оксиды азота, твердые частицы, экокканцерогенная опасность.*

МАЙБУТНЄ АВТОТРАНСПОРТУ – АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВА І КАНЦЕРОГЕННА БЕЗПЕКА

П.М. Канило, профессор, д.т.н., М.В. Сарапина, ассистент, к.т.н., ХНАДУ

***Анотація.** Проаналізовано перспективи застосування синтетичних вуглеводневих моторних палив і водню в якості як основних, так і додаткових енергоносіїв. Показано, що використання альтернативних палив не тільки ефективно заміщає нафтові палива, але й забезпечує істотне зниження забруднення навколишнього середовища супертоксиантами – канцерогенно-мутагенними інгредієнтами.*

***Ключові слова:** навколишнє середовище, автотранспорт, синтетичні палива, природний газ, водень, ароматичні і поліароматичні вуглеводні, відпрацьовані газы, канцерогенні вуглеводні, бенз(а)пірен, оксиди азоту, тверді частки, екокканцерогенна небезпека.*

THE FUTURE OF MOTOR TRANSPORT – ALTERNATIVE FUEL AND CANCEROGENIC SAFETY

**P. Kanilo, Professor, Doctor of Technical Science,
M. Sarapina, assistant, Candidate of Technical Science, KhNAHU**

***Abstract.** Prospects of application of synthetic hydrocarbonic motor fuels and hydrogen as the basic and additional energy carriers are analysed. It is shown that the use of alternative fuels does not only effectively replaces oil fuel, but also provides essential decrease of environmental contamination by supertoxic substances, namely cancerogenic and mutagen.*

***Key words:** environment, motor transport, synthetic fuel, natural gas, hydrogen, aromatic and poliaromatic hydrocarbons, exhaust gases, cancerogenic hydrocarbons, benzo(a)pyrene, nitric oxides, particulate pollutant, ecological and carcinogenic danger.*

Введение

В мире эксплуатируется около 1 млрд транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и их количество непрерывно растет. Человечество не сможет решить топливно-экологическую проблему такого количества автомобилей, если потребление нефтяных топлив автотранспортом будет и дальше составлять 95 %. Именно исчерпание природных ресурсов, в первую очередь нефтяных, при условиях их резкого подорожания и неэффективного использования, а также ухудшение качества окружающей среды (ОС) являются важнейшими составляющими углубляющегося топливно-экологического кризиса. 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.

Анализ публикаций

Будущее автотранспорта – это альтернативные, в том числе синтетические, топлива с минимизацией экоканцерогенной опасности (ЭКО) автомобилей. В мире начинается широкомасштабное производство синтетических энергоносителей, включая биотоплива. Наиболее вероятным сырьем для такого производства синтетических углеводородных топлив в ближайшей перспективе является уголь. В мировых запасах ископаемых энергоресурсов на уголь приходится более 80 % суммарного энергосодержания, и при современных уровнях добычи его запасов хватит примерно на 300 лет. В 2006 г. создан альянс ASFF, который объединяет производителей и потребителей синтетических топлив (Shell, Chevron-SASOL, Daimler, Renault и Volkswagen) [1]. Цель этого альянса – создание высокоэкономичных и экологически более безопасных автомобилей, работающих на синтетических и комбинированных топливах. На первом этапе синтетические топлива используются совместно с традиционными моторными топливами, что обеспечивает не только снижение уровней потребления нефтяных топлив, но и существенно повышает экологические показатели транспортных средств, так как в синтетических топливах

практически отсутствуют ароматические углеводороды (АУ). Последнее очень важно с точки зрения снижения загрязнения среды канцерогенно-мутагенными ингредиентами (КМИ), выбрасываемыми с отработанными газами (ОГ) транспортных средств.

Проблема канцерогенного загрязнения ОС, в первую очередь атмосферы крупных городов, представляется одной из наиболее острых и наименее решенных среди всех экологических проблем [2, 3]. Считается, что примерно 90 % содержащихся в ОС канцерогенных углеводородов (КУ) приходится на источники, обусловленные процессами горения. Индикатором наличия КУ в ОС и ОГ автотранспортных средств в международной практике принят бенз(а)пирен (БП – $C_{20}H_{12}$). В условиях ОС многие КУ, совместно с оксидами азота (NO_x) и другими составляющими, синтезируют соединения, в том числе нитроканцерогенные, обладающие мутагенными свойствами, т.е. способные нарушать генетические программы клеток и вызывать в организме человека изменения наследственных свойств. Установлено также, что мелкодисперсные твердые частицы (ТЧ), в том числе сажа, пыль и т.д., сорбируя канцерогенные ингредиенты, являются не только их носителями, но и многократно усиливают их канцерогенно-мутагенное воздействие на организм человека [2 – 4]. По мнению медиков, именно канцерогенные вещества в атмосфере больших городов примерно на 80 % определяют риск возникновения злокачественных опухолей у людей [5, 6]. В городах с развитым автомобильным транспортом среднесуточные концентрации БП в атмосфере превышают на порядок и более указанные концентрации БП в сельских районах. В местах же интенсивного движения автотранспорта концентрация БП в воздухе превышала допустимый уровень на два порядка [2, 3]. Поэтому снижение потребления нефтяных топлив и уровней выбросов предельно опасных КМИ в ОС, в том числе с ОГ транспортных средств, является одной из важнейших проблем современного мира. Федеральное ведомство по охране окружающей среды в Германии, разделяя эти оценки, способствовало тому, что правительством была сформулирована задача: в ближайшие несколько лет уменьшить обусловленные автотранспортом выбросы КУ на 90 %. Кстати, проект использования синтетических дизельных топлив, в целях снижения выбросов КУ и ТЧ транспортными средства-

ми с дизелями, уже реализуется в Нидерландах, а также в ряде штатов США [4].

Цель и постановка задачи

Охарактеризовать экокандерогенную опасность современных транспортных средств с ДВС и определить рациональные пути ее минимизации. Проанализировать перспективы применения различных альтернативных топлив в качестве как основных, так и дополнительных энергоносителей для автомобильного транспорта. Показать необходимость отработки и внедрения высокоэффективных и экологически безопасных комбинированных энерготехнологических комплексов, вырабатывающих электрическую и тепловую энергию и способных производить синтетические энергоносители для транспорта.

Кандерогенная опасность автомобилей при использовании нефтяных топлив

Автотранспорт является основным потребителем нефтяных топлив и определяющим техногенным источником загрязнения атмосферы городов КМИ. Следует учитывать, что ЭКО транспортных средств с ДВС в основном (~ 95 %) характеризуется двумя парами супертоксикантов: КУ+NO_x и КУ+ТЧ, выбрасываемыми с ОГ двигателей. При этом доля оксида углерода (СО) и легких несгоревших углеводородов (СН) в ЭКО автомобилей с ДВС не превышает ~ 3 % [7]. Поэтому, на основе многочисленных экспериментальных данных, предложен удельный интегральный показатель (ЭКО)_j легковых автомобилей и критерий его соответствия международным нормам $K_j = (\text{ЭКО})_j / [\text{ЭКО}]_j$ с учетом санитарно-гигиенических нормативов для токсичных и кандерогенных ингредиентов [ПДК_i]_{cc}, а также суммарной кандерогенности ОГ. При этом были установлены положительные корреляционные связи между суммарной кандерогенной активностью приоритетной группы КУ (с учетом индекса кандерогенной активности (ИКА) *i*-го КУ) и БП (ИКА = 1) в ОГ автомобилей с ДВС [7]

$$\sum_{i=1}^{14} \bar{m}_{\text{КУ}(i)} \cdot \text{ИКА}_i \cong 1,3 \cdot \bar{m}_{\text{БП}},$$

где $\bar{m}_{\text{БП}}$, $\bar{m}_{\text{КУ}(i)}$ – усредненная масса уровней выбросов БП и *i*-го КУ с ОГ автомобиля при его испытании по Европейскому городскому

ездовому циклу, г/км. Чтобы учесть эффект усиления совмещенного токсичного и кандерогенного действия ряда ингредиентов на человека в условиях городской среды, установлены экспертные коэффициенты: $k_{\text{NO}_x} = 3$; $k_{\text{БП}} = 4$; $k_{\text{КУ}} = (4 \times 1,3) = 5,2$; $k_{\text{ТЧ}} = 2$. При этом интегральные показатели (ЭКО)_j автомобилей и допускаемые по европейским требованиям [ЭКО]_j (с учетом того, что массовая доля NO в ОГ автомобилей по отношению к NO_x составляет ~ 90 %) представляются следующим образом:

$$(\text{ЭКО})_j = 10^3 \cdot \left\{ 3 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot m_{\text{NO}_x}}{[\text{NO}]_{\text{cc}}} + \frac{0,1 \cdot m_{\text{NO}_x}}{[\text{NO}_2]_{\text{cc}}} \right) + 5,2 \frac{m_{\text{БП}}}{[\text{БП}]_{\text{cc}}} + 2 \frac{m_{\text{ТЧ}}}{[\text{ТЧ}]_{\text{cc}}} \right\} \cdot \frac{\text{нм}^3 \text{воздуха}}{\text{км}},$$

$$[\text{ЭКО}]_j = 10^3 \cdot \left\{ 3 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot [m_{\text{NO}_x}]}{[\text{NO}]_{\text{cc}}} + \frac{0,1 \cdot [m_{\text{NO}_x}]}{[\text{NO}_2]_{\text{cc}}} \right) + 5,2 \frac{[m_{\text{БП}}]}{[\text{БП}]_{\text{cc}}} + 2 \frac{[m_{\text{ТЧ}}]}{[\text{ТЧ}]_{\text{cc}}} \right\} \cdot \frac{\text{нм}^3 \text{воздуха}}{\text{км}}.$$

Допускаемые уровни выбросов БП $[m_{\text{БП}}]_j$ определялись из такой зависимости

$$3 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot [m_{\text{NO}_x}]}{[\text{NO}]_{\text{cc}}} + \frac{0,1 \cdot [m_{\text{NO}_x}]}{[\text{NO}_2]_{\text{cc}}} \right) \approx 5,2 \frac{[m_{\text{БП}}]}{[\text{БП}]_{\text{cc}}}. \quad (1)$$

Принятые обозначения: m_i , $[m_i]$ – экспериментально полученные и допустимые уровни выбросов вредных веществ с ОГ автомобиля, г/км; [ПДК_{NO}]_{cc} = 0,06; [ПДК_{NO₂}]_{cc} = 0,04; [ПДК_{БП}]_{cc} = 1·10⁻⁶; [ПДК_{ТЧ}]_{cc} = 0,05 мг/м³; допустимые уровни выбросов токсичных веществ с ОГ легковых автомобилей по Евро-V (с октября 2008 г.): $[m_{\text{NO}_x}]_Б = 0,06$; $[m_{\text{NO}_x}]_Д = 0,2$; $[m_{\text{ТЧ}}]_{Б,Д} = 0,005$ г/км; условно допускаемые уровни выбросов БП с ОГ легковых автомобилей, определяемые в соответствии с (1), составляют для Евро-V: $[m_{\text{БП}}]_Б = 0,6 \cdot 10^{-6}$; $[m_{\text{БП}}]_Д = 2 \cdot 10^{-6}$ г/км; Б – бензиновые двигатели, Д – дизели.

На основании исследований легкового автомобиля типа ГАЗ с двигателем ЗМЗ-402 на стенде с беговыми барабанами по Европейскому городскому ездовому циклу и при использовании бензина А-92 (АУ ≈ 40 %) установлено: $m_{\text{NO}_x} = 2,4$; $m_{\text{БП}} = 9 \cdot 10^{-6}$ г/км; $m_{\text{ТЧ}} \approx 0,01$ г/км; $m_{\text{NO}_x} / [m_{\text{NO}_x}] \approx 40$; $m_{\text{БП}} / [m_{\text{БП}}] \approx 15$; $m_{\text{ТЧ}} / [m_{\text{ТЧ}}] = 2$. При этом показатели автомобиля с бензиновым двигателем:

(ЭКО)_Б ≈ 200·10³, [ЭКО]_Б ≈ ≈6·10³ нм³/км, а $K_B = (ЭКО)_B / [ЭКО]_B \approx 33$, т.е. нормы Евро-V превышены более чем в 30 раз. Исследования автомобиля типа ГАЗ с дизелем ГАЗ-560 (дизельное топливо, АУ ≈ 45 %) показали: $m_{NOx} = 2,0$; $m_{БП} = 32 \cdot 10^{-6}$; $m_{ТЧ} = 0,6$ г/км; $m_{NOx} / [m_{NOx}] \approx 10$; $m_{БП} / [m_{БП}] \approx 16$; $m_{ТЧ} / [m_{ТЧ}] \approx 100$. Таким образом, легковой автомобиль типа ГАЗ с дизелем, по сравнению с указанным выше автомобилем с бензиновым ДВС, загрязняет ОС более существенно: твердыми частицами ~ в 60 раз, а канцерогенными составляющими ~ в 4 раза (при практическом равенстве выбросов NO_x). Поэтому широкая дизелизация автотранспорта усугубляет решение проблем, связанных со снижением загрязнения атмосферы городов КМИ.

Необычайно сильное влияние на канцерогенную опасность ОГ автомобилей оказывает техническое состояние ДВС. Из рис. 1 следует, что неисправности систем топливопитания и зажигания горючей смеси, влияющие непосредственно на процесс горения топлив, могут увеличивать уровни выбросов БП с ОГ автомобилей на порядок и более. Кроме того, следует отметить, что по мере увеличения пробега автомобилей их экологические показатели также ухудшаются. Так, после пробега 100 тыс. км автомобилями ВАЗ-2105 удельные уровни выбросов КУ с ОГ увеличились в три раза, а уровни выбросов NO_x – в 1,5 раза [8].

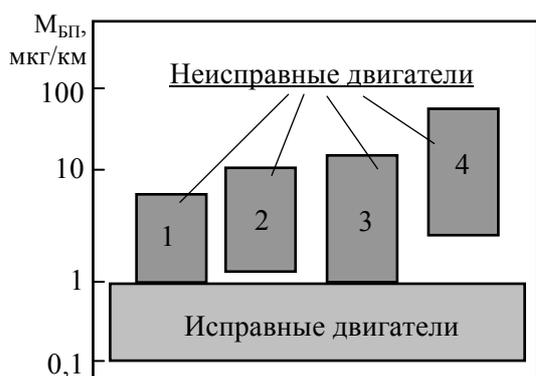


Рис. 1. Уровни выброса бенз(а)пирена с ОГ автомобилей при различных неисправностях бензиновых двигателей: 1 – нарушение регулировки холостого хода; 2 – угар масла; 3 – неисправности системы питания; 4 – неисправности системы зажигания

Следует особо отметить, что значительное влияние на уровни выбросов БП и ТЧ с про-

дуктами сгорания оказывает вид топлива, в том числе его структура и водородный показатель, включая уровни содержания АУ и особенно ПАУ. В современных нефтяных топливах существенно увеличена доля АУ и ПАУ, поэтому изучаемый процесс по уровням выбросов БП и ТЧ с ОГ транспортных средств с ДВС предельно актуален. В табл. 1 приведены усредненные данные по уровням выбросов вредных веществ (ВВ: ТЧ 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.

Таблица 1 Экспериментальные данные

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

Представленные данные указывают, что использование топлив с повышенным содержанием АУ приводит к существенному росту уровней выбросов ТЧ и БП с ОГ автомобилей, т.е. к повышению канцерогенно-мутагенной агрессивности ОГ автомобилей. В США была исследована мутагенная активность ТЧ, выбрасываемых с ОГ автомобилей, оборудованных дизелями. Она оказалась (в расчете на километр пробега) почти на порядок выше, чем мутагенная активность ТЧ, выбрасываемых с ОГ автомобилей, оборудованных бензиновыми двигателями [9]. Поэтому расширение доли использования устаревших автомобилей, а тем более автомобилей с изношенными и неисправными ДВС, широкая дизелизация транспортных средств, а также применение моторных топлив с повышенным содержанием АУ усугубляет решение экологических проблем, связанных со снижением загрязнения ОС, в первую очередь атмосферы больших городов, КМИ.

Канцерогенная опасность автомобилей при использовании альтернативных топлив

К альтернативным топливам для автомобильных ДВС относят:

– природный газ как наиболее эффективный энергоноситель на переходный период;

- синтетические моторные топлива (СМТ), в первую очередь спиртовые, а также диметилловый эфир (ДМЭ) для дизельных ДВС;
- биотоплива;
- электроэнергию (электромобили);
- водород, который может использоваться как высокоэффективная добавка к горючим смесям и в качестве необходимого компонента при производстве СМТ, а также основного энергоносителя.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные по результатам исследований ряда легковых автомобилей с ДВС типа ЗМЗ по Европейскому городскому ездовому циклу при использовании различных, в том числе синтетических и комбинированных, топлив.

Таблица 2 Экспериментальные данные

Моторные топлива	Н/С, %	г/км			
		m_{CO}	m_{CH}	m_{NOx}	$m_{БП} \cdot 10^6$
Бензин А-92*	16,3	6,7	2,3	2,4	8,9
Бензин А-76	16,8	4,9	2,4	2,2	6,3
Пропан-бутан	19,0	1,7	2,1	1,0	1,2
Бензин А-76 + 30 % метанола	21,9	5,0	1,8	0,9	0,8
Бензин А-92+ +10% H ₂	26,0	1,2	0,4	0,5	0,8
Природный газ	33,3	1,3	1,0	0,8	0,6
Метанол	35,0	0,8	1,1	0,8	0,6
Водород	100	–	–	0,2	–

Примечание. Доля $NO/NO_x \approx 0,9$; * – при оборудовании автомобиля бифункциональной системой нейтрализации ОГ (БСНОГ) уровни выбросов БП и NO_x снизились ~ на порядок.

Из приведенных данных следует, что использование энергоносителей с повышенным содержанием водорода (природный газ, бензоводородные смеси и др.), а также оборудование автомобилей системами каталитической нейтрализации отработанных газов приводит к существенному снижению их (ЭКО);

Природный газ – наиболее эффективный заменитель нефтяных топлив для городского автотранспорта. Высокие теплотехнические и детонационные показатели природного газа, широкий диапазон изменения концентрационных пределов воспламенения газозвдушенных горючих смесей позволяют существенно повысить степень сжатия в ДВС с принудительным, в том числе с форкамерно-факельным, воспламенением, реализовать

энергетически и экологически высокоэффективное сжигание обедненных газозвдушенных смесей (граница воспламенения бедной смеси характеризуется $\alpha_{\max} = 1,67$ и остается неизменной для всех значений степеней сжатия $\varepsilon \leq 16$). При его использовании в ДВС существенно снижаются выбросы с ОГ супертоксикантов (KU, NO_x, TC) [10].

В 60 странах мира на природном газе работает более 3,5 млн автомобилей, пробег на одной заправке достигает 400 км. Мировым лидером является Аргентина (более 1 млн автомобилей, работающих на природном газе). В соответствии с планами Европейской экономической комиссии ООН до 2020 года 23,5 млн автомобилей, или приблизительно десятая часть европейского парка машин, будет работать на природном газе; главным образом это городские автобусы, микроавтобусы, легковые автомобили, находящиеся в индивидуальном пользовании. В Германии перевод автомобилей на использование природного газа является одним из приоритетных направлений энергетического развития и экологической безопасности. Во Франции введен запрет на использование углеводородных топлив (кроме природного газа) на муниципальных автобусах и мусороуборочных автомобилях. В Италии введен запрет на строительство АЗС без блока заправки природным газом.

Дальнейшее повышение экономических, экологических и динамических характеристик газовых двигателей достигается за счет дополнительного использования синтез-газа ($H_2 + CO$), который готовится путем конверсии части природного газа в компактном каталитическом реакторе непосредственно на борту газомобиля с использованием микропроцессорной системы управления. Таким образом, резкое улучшение качества сгорания природного газа за счет введения иницирующих добавок синтез-газа ведет к возможности работы ДВС на более обедненных горючих смесях, экономии топлива и дальнейшему существенному снижению уровней выбросов супертоксикантов. Разработанные генераторы синтез-газа прошли демонстрационные стендовые испытания в России (на АвтоВАЗе, ЗМЗ, в НАМИ). Практически везде наблюдалось не только резкое улучшение экологических показателей газомобилей, но и значительное (до 24 %) увеличение их топливной экономичности при движении по городу. Опытный газомобиль, который работал

на смеси метана с добавками синтез-газа, во время автопробега по маршруту Санкт-Петербург – Москва (сентябрь 2008 г.) продемонстрировал, что эта разработка – один из важных практических шагов в решении топливно-экологической проблемы городского транспорта на ближайшие десятилетия. На перспективу следует отметить, что огромные количества метана (не менее 10^4 квадриллионов м^3) хранятся в метаногидратах, залегающих в осадках Мирового океана. В Черном море метаногидраты залегают на глубине 200–400 м [1].

Метанол в настоящее время наиболее широко используется (среди синтетических топлив) в качестве основного и дополнительного моторного топлива. Он также может быть преобразован в синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2$) в каталитическом реакторе на борту автомобиля. Стендовые испытания автомобильного двигателя ЗМЗ-402 с реактором показали, что на основном эксплуатационном режиме (~ 30 % от номинальной мощности) эффективный КПД двигателя возрос с 28 % (при работе на бензине А-92, $\alpha \cong 0,95$) до 33 % (при работе на испаренном метаноле ($\alpha \cong 1,5$)) и до 36 % – при каталитической конверсии метанола (степень конверсии метанола ~ 60 %, $\alpha \cong 2,1$). Причем при работе на продуктах конверсии метанола в ОГ двигателя практически отсутствовали CO , CH и ТЧ , а NO_x , по сравнению с работой на бензине, снизились более чем на порядок. Следует отметить, что к настоящему времени уже появились экспериментальные образцы электрохимических генераторов (ЭХГ) с использованием продуктов конверсии метанола в качестве энергоносителя.

Водород является одним из самых энергоемких и экологически чистых энергоносителей для различного рода энергоустановок (ЭХГ, ДВС, ГТД, парогазовых энерготехнологических установок и т.д.). Предполагается, что переход к водородной экономике, а затем к водородной цивилизации – один из наиболее возможных путей для сохранения экосистемы планеты Земля пригодной для жизни. Проблема получения сравнительно дешевого водорода – ключевой вопрос для развития водородной энергетики. Однако рост цен на традиционные энергоносители, политическая нестабильность в странах, экспортирующих нефть, экологические проблемы – все это приводит к осознанию (на международном уровне) необходимости проведения широко-

масштабных исследований и ускоренного развития технологий в области водородной энергетики. Конгресс США принял решение о финансировании в размере 1,3 млрд долларов работ по водородным ЭХГ для автомобилей. Япония поддерживает развитие технологий, основанных на водороде и топливных элементах, с общим бюджетом 2,4 млрд евро. Страны ЕС и Россия активно разрабатывают стратегию консолидации усилий правительств и крупных межнациональных компаний в области разработки водородных технологий. Следует отметить, что крупные негосударственные компании, главным образом автомобильные, также вкладывают в разработку водородных технологий значительные средства. Подписано соглашение «Международное партнерство по водородной экономике» следующими странами: США, Россия, Китай, Япония, Германия, Великобритания, Франция, Италия, Канада и др. Предполагается, что это соглашение обеспечит механизм организации, оценки и координации многосторонних исследований, разработок и программ развертывания, которые ускорят переход к глобальной водородной экономике. Очевидно, однако, что для перехода к водородной энергетике необходимо решить ряд серьезных научных, технологических и технических задач.

Следует особо отметить, что определенный опыт использования жидкого водорода в качестве топлива имеется на космических кораблях США и в авиации (США – фирма «Локхид», Россия – КБ им. А.Н. Туполева). Жидкий водород, полученный в криогенных установках, блестяще оправдал возлагаемые на него надежды. Топливная пара «жидкий водород – жидкий кислород» является непревзойденной по своим техническим и эксплуатационным характеристикам, а самое главное – опыт, накопленный при использовании жидкого водорода в ракетной технике, убедительно доказал реальность его применения в самых различных областях народного хозяйства. В целом ряде случаев ведущие зарубежные автомобильные фирмы («Мерседес», «Фольксваген», «Тойота», «Рено» и др.) вместо бензина уже сейчас используют водород как топливо для автомобилей в жидком, газобразном (под давлением) состоянии или в виде гидридов металлов.

Согласно программе «Европа – Квебек», осуществляемой Германией и Канадой, на

водород переводится весь городской автобусный парк Гамбурга. Относительно дешевый водород производится на канадских гидроэлектростанциях (за счет «провальной» гидроэлектроэнергии, вырабатываемой в ночное время и в межсезонье, что особенно эффективно). Затем водород сжижают и на специальных танкерах доставляют в Европу. В Испании управление городским транспортом Барселоны в рамках европейского проекта «Clean urban transport for Europe» («Чистый городской транспорт для Европы») в порядке эксперимента запустило в эксплуатацию три линии автобусов с водородными топливными элементами. Правительство Японии заявило о том, что к 2020 г. выведет на дороги страны ~ 50 тыс. водородных автомобилей, обеспечив их соответствующими заправками. Исландия объявила о своих планах по полному переходу страны на водородную энергетику к 2030 году. Этот пилотный проект разрабатывают и финансируют американские и европейские транснациональные корпорации. Предусматривается получать водород из геотермальных источников – основного богатства страны. По оценкам разработчиков программы, масштабы производства водорода могут достичь такого уровня, что Исландия может стать самым большим в мире экспортером этого вида топлива. В решениях саммита «Группы восьми» (G8) в Санкт-Петербурге (2006 г.) отмечалось: «Мы поддерживаем переход к водородной энергетике и считаем необходимым интенсифицировать исследования для повышения эффективности работы транспортных средств на водороде и водородных топливных элементах для содействия созданию водородной экономики».

Очень важно, что водород может быть использован для прямого преобразования химической энергии в электрическую в ЭХГ. Вредные выбросы при этом практически отсутствуют. КПД топливного элемента может достигать очень высоких значений от 40 до 70 %, причем он мало зависит от установленной мощности (в отличие от ДВС). Именно прогресс в разработке топливных элементов с высоким КПД вселяет уверенность в перспективах использования водорода как энергоносителя при создании как автономных стационарных, так и транспортных энергоустановок. В ряде стран (США, Японии, Германии и др.) идут интенсивные научные и технологические поиски по созданию высокоэффективных ЭХГ и на их основе – электростанций малой и средней мощности.

В США, например, были созданы ЭХГ для космических кораблей «Апполон», «Шаттл» и «Джемини» мощностью от 10 до 200 кВт; в Японии – коммерческие энергоустановки и электростанции на этой основе мощностью 50, 100 и 1000 кВт. Автомобильные концерны «Форд моторс», «Дженерал моторс» и «Крайслер» (США), «Мерседес», «Опель», «Фольксваген» (Германия), «Тойота» и «Хонда» (Япония), «Рено» (Франция) и др. осваивают ЭХГ для своих опытных автомобилей и уже в ближайшие годы планируют серийный выпуск автомобилей с альтернативными двигателями энергоустановками на водороде, объединенные с новыми технологиями аккумулялирования водорода, в том числе с использованием нанотрубок на основе модификации углерода C_{60} [1]. Проводятся обширные исследования по отработке ЭХГ с использованием вместо водорода природного газа, а также продуктов газификации метанола.

Что касается комбинированных топлив, обширные исследования были проведены по использованию водорода в качестве дополнительного энергоносителя в автомобильном транспорте (Россия, Украина, Германия, Япония, США и др.). Водород как дополнительное топливо имеет ряд преимуществ: высокая удельная теплота сгорания и антидетонационная стойкость, хорошая воспламеняемость углеводородно-водородно-воздушных смесей в широком диапазоне 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 % масс.) в цилиндры ДВС с традиционным искровым воспламенением обедненных бензоводородовоздушных смесей обеспечивают экономию бензина до 40 %.

При этом приведенные эксплуатационные затраты на комбинированное бензоводородное топливо при замещении 30 % бензина (Б) водородом (H_2) уменьшаются ($\Delta Z_{Б+H_2}$, рис. 2) на 15 % (с учетом относительной энергетической стоимости водорода (\bar{C}), превышающей стоимость бензина в 2,2 раза, и снижения уровня экокancerогенной опасности автомобиля). Важным является также то, что

при сжигании обедненных бензоводородо-воздушных смесей ингибируются процессы образования КУ и АЧ, а также снижаются уровни образования NO_x при повышенной полноте выгорания топлива [7].

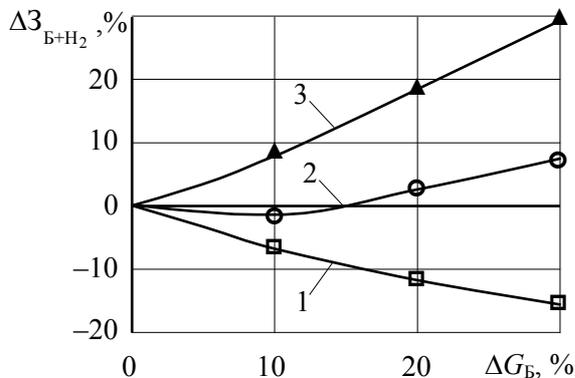


Рис. 2. Влияние частичного замещения бензина (ΔG_B) водородом на изменение удельных эксплуатационных затрат по топливной составляющей, где: $\bar{C} = C_{ТУ.Т.(H_2)} / C_{ТУ.Т.(Б)}$; ТУ.Т. – тонн условного топлива; 1 – $\bar{C} = 2,2$; 2 – $\bar{C} = 2,9$; 3 – $\bar{C} = 3,7$

Особо эффективным может быть совместное использование высокоароматизированных топлив с добавками водорода. Ниже предложен критерий, характеризующий изменение уровней эффективного содержания водорода в жидком нефтяном топливе с $g_{AU} > 30\%$ $g_{HT(эф)} = [g_{HT} - (g_{AU} - 30)^n]$, где g_i – соответствующие доли водорода и АУ в %, $n = 0,4 \pm 0,02$.

При этом минимально необходимая массовая доля добавки водорода (Δg_{H_2}) по отношению к исходному ароматизированному топливу может быть оценена из зависимости $\Delta g_{H_2} = \{ [g_{HT}]_{эф} - g_{HT(эф)} \}$. Например, при использовании широкофракционного жидкого моторного топлива с содержанием АУ ($g_{AU} = 50\%$) и, соответственно, водорода ($g_{HT} = 12\%$) уровень эффективного содержания водорода (при выбранном базово-эффективном содержании водорода $[g_{HT}]_{эф} = 13,5\%$, характерном для нефтяного топлива с содержанием АУ $\approx 30\%$) определя-

ется как $g_{HT(эф)} = [12 - (50 - 30)^{0,4}] = 8,7\%$. Тогда $\Delta g_{H_2} = 13,5 - 8,7 = 4,8\%$.

Итак, проведенные исследования показывают, что в настоящее время эффективно использование водорода в качестве дополнительного энергоносителя ($\Delta g_{H_2} \leq 10\%$ масс.). При этом существенно повышается топливная экономичность автомобилей при их эксплуатации в городских условиях, снижается расход бензина до 40% и, что особенно важно, существенно (на порядок и более) уменьшаются уровни выбросов супертоксикантов (КУ, NO_x , ТЧ) с ОГ.

Энерготехнологические комплексы с производством синтетических топлив

Наиболее вероятным сырьем для производства синтетических топлив, как отмечалось ранее, является уголь. Для Украины, с ее богатыми запасами угля, предельно важным является как повышение энергоэффективности его использования в условиях дефицита природного газа, так и производство синтетических топлив на основе продуктов его газификации.

В ряде работ [11–14] отмечается, что будущее энергетики, в том числе водородной, будет прежде всего связано с комбинированными энерготехнологическими комплексами. Уже в сегодняшней конъюнктуре атомно-водородные комплексы экономически более выгодны, чем традиционные. Например, комплексы, в которых водород получается методом электролиза в часы «провала» электрической нагрузки, оказываются экономически оправданными. Поэтому предельно важным в настоящее время, в том числе и для Украины, является создание (на основе международного сотрудничества) высокоэффективных и экологически более безопасных энерготехнологических комплексов на базе парогазовых установок с использованием водородно-кислородно-плазменных технологий сжигания угольной пыли (без использования природного газа) и с дополнительным производством водорода, кислорода и синтетических углеводородных топлив. Схемы таких энерготехнологических комплексов на базе угольных ТЭС и АЭС, в том числе с одновременным производством синтетических газообразных и жидких топлив, приведены на рис. 3 [15].

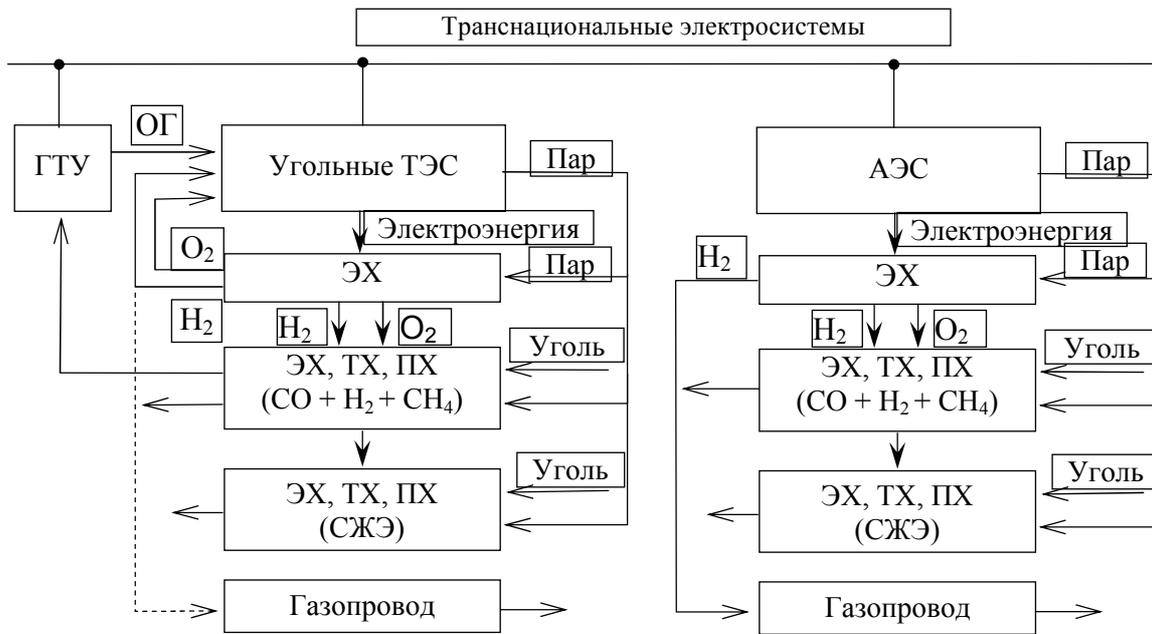


Рис. 3. Схемы угольно-водородно-кислородных энерготехнологических комплексов: ОГ – отработанные газы; ЭХ, ТХ, ПХ – электро-, термо-, плазмохимические циклы; СЖЭ – синтетические жидкие энергоносители

Выводы

1. Автотранспорт является основным потребителем нефтяных топлив и определяющим техногенным загрязнителем атмосферы городов канцерогенными ингредиентами.

2. Канцерогенная опасность автомобилей с ДВС примерно на 95 % определяется двумя парами супертоксикантов: (КУ+NO_x) и (КУ+ГЧ), которые в условиях ОС могут синтезировать еще более опасные соединения, обладающие мутагенными свойствами, т.е. способные нарушать генетические программы клеток и вызывать в организме человека изменения наследственных свойств.

3. Существенный рост численности автотранспортных средств, широкая дизелизация автомобилей, расширение доли автомобилей с изношенными и неисправными двигателями, использование топлив с повышенным содержанием ароматики усугубляет решение указанных топливно-экологических проблем.

4. Одними из важнейших путей решения топливно-экологических проблем автотранспорта являются:

– повышение их эксплуатационной топливной экономичности и параметрической надежности;

– расширение в городах доли газомобилей и электромобилей;

– ограничение содержания в моторных топливах ароматических и особенно полиароматических углеводородов;

– расширение доли использования альтернативных топлив: природного газа, синтетических углеводородных топлив и водорода в качестве как основных, так и дополнительных энергоносителей;

– оборудование автомобилей современными системами нейтрализации отработанных газов ДВС, в том числе накопительного типа, а также системами улавливания твердых частиц, на которых сорбируется значительная доля канцерогенных углеводородов.

5. Наиболее вероятным масштабным сырьем для производства синтетических топлив является уголь. Необходима отработка и внедрение высокоэффективных и экологически более безопасных комбинированных энерготехнологических комплексов, в том числе угольно-водородно-плазменных парогазовых энергоустановок, на которых будет вырабатываться электрическая и тепловая энергия, а также производиться газообразные и жидкие синтетические энергоносители, включая водород.

Литература

1. Кривцова В.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 4. Ветроводородная энергетика: учебник / В.И. Кривцова, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 606 с.
2. Лукачев С.В. Выброс канцерогенов при сжигании углеводородных топлив / С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев, М.Ю. Орлов. – Самара: Изд-во Самар. аэрокосм. ун-та, 2007. – 160 с.
3. Канило П.М. Проблемы загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными супертоксикантами / П.М. Канило, В.В. Соловей, К.В. Костенко // Вестник ХНАДУ: сб. научн. тр. – 2011. – Вып. 52. – С. 47–53.
4. Канило П.М. Минимизация канцерогенной опасности энергоустановок / П.М. Канило, А.Л. Шубенко // Пробл. машиностроения: сб. научн. тр. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 73–80.
5. Шабад Л.М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде / Л.М. Шабад. – М.: Медицина, 1973. – 367 с.
6. Матвеева Н.А. Гигиена и экология человека / Н.А. Матвеева, А.В. Леонов, М.П. Грачева и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
7. Канило П.М. Эколого-химические показатели автомобильных ДВС с учетом канцерогенности отработавших газов / П.М. Канило, М.В. Шадрин // Двигатели внутреннего сгорания: сб. научн. тр. – 2006. – № 2. – С. 154–159.
8. Коротков М.В. Пробег и экологическая безопасность автомобиля / М.В. Коротков // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 5. – С. 8–10.
9. Канило П.М. Пути улучшения экологических показателей автомобилей при использовании высокоароматизированных нефтяных топлив / П.М. Канило, К.В. Костенко, М.В. Сарапина // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 22. – С. 31–37.
10. Канило П.М. Природный газ – наиболее эффективный заменитель нефтяных топлив на автотранспорте / П.М. Канило, Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко и др. // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – 2008. – Вып. 22. – С. 86–92.
11. Мацевитый Ю.М. Применение водородных технологий для повышения энергоэффективности теплоэлектростанций в условиях дефицита газа / Ю.М. Мацевитый, В.В. Соловей, А.Л. Шубенко, П.М. Канило // Проблемы машиностроения: сб. научн. тр. – 2008. – Т.11, № 4. – С. 3–7.
12. Пономарев-Степной Н.Н. Атомная энергия и энергетическая безопасность // Атомная энергия: сб. научн. тр. – 2006. – Т.101, Вып. 4. – С. 247–254.
13. Канило П.М. Технологии сжигания низкосортных углей в энергоустановках без дополнительного использования мазута и природного газа / П.М. Канило, Д.М. Ваврив, В.В. Соловей и др. // Проблемы машиностроения: сб. научн. тр. – 2007. – Т.10, № 1. – С. 91–98.
14. Канило П.М. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П.М. Канило, К.В. Костенко // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – 2008. – Вып. 23. – С. 107–113.
15. Канило П.М. Водород в двигателях газотурбинного типа и энерготехнологических установках / П.М. Канило, В.В. Соловей, В.Е. Костюк, К.В. Костенко // Проблемы машиностроения: сб. научн. тр. – 2007. – Т.19, № 4. – С. 26–32.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2012 г.