

гатели внутреннего сгорания. – 2005. – № 1. – С. 35-39. 5. Марченко А.П. Улучшение технико – экономических показателей транспортного дизеля путем регулирования турбокомпрессора с безлопаточным

направляющим аппаратом / А.П. Марченко, В. А. Петросяну, Д.Е. Самойленко и др. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 1. – С. 3-6.

УДК 621.43.068.4

П.М. Канило, д-р техн. наук, И.В. Парсаданов, д-р техн. наук

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Возрастающие потребности человечества в производстве энергии предопределяют увеличение расхода природных ресурсов и загрязнение окружающей среды. Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) потребляют наиболее значительную долю нефтепродуктов и одновременно являются активным, постоянно действующим фактором химического, механического, теплового и других видов вредного воздействия на окружающую среду. Максимальный ущерб окружающей среде причиняется химическим фактором, связанным с загрязнением атмосферы токсичными веществами, находящимися в отработавших газах (ОГ). Основным потребителем нефтяных топлив является автомобильный транспорт.

Сегодня в мире насчитывается примерно 800 млн. автомобилей с ДВС и их производство постоянно растет. В ближайшее 10 – 20 лет число автомобилей, в первую очередь легковых, возрастет до 1 миллиарда и топливно-экологическая проблема обострится. Поэтому, практически всеми странами мира, планируется снижение потребления нефтяных моторных топлив, включая их замещение альтернативными топливами.

К альтернативным топливам относят топлива, не являющиеся продуктами переработки нефти и традиционные нефтяные топлива, модифицированные различными добавками. Наиболее перспективными альтернативными топливами являются: природный газ; синтетические моторные топлива

(СМТ), в том числе спиртовые; биотоплива, водород, который может использоваться как основное топливо, так и в качестве высокоэффективной добавки к горючим смесям, а также – как необходимый компонент при производстве СМТ, водотопливные эмульсии [1,2,3,4].

**Анализ топливно-ресурсной проблемы.** Согласно прогнозам, мировые ресурсы нефти ограничены, например, для стран Европы, включая Российскую Федерацию, – двумя-тремя десятками лет. Запасов природного газа в указанных странах (при современном уровне его потребления) предположительно должно хватить примерно на 60 лет (табл. 1). Так как природный газ имеет низкую энергетическую стоимость, примерно в 2 раза ниже стоимости современных бензинов (табл. 2), то по имеющимся запасам и стоимости его следует рассматривать в ближайшие десятилетия как одно из наиболее перспективных топлив для автотранспорта, особенно эксплуатируемого в крупных городах [5].

Разведанных запасов углей и сланцев с учетом производства СМТ на Земле хватит на сотни лет. В настоящее время потребительская стоимость энергетических углей (Ц<sub>у</sub>) находится на уровне 6 долл./ГДж, что в среднем почти в пять раз ниже стоимости современных нефтяных топлив. Однако удельная стоимость производства синтетического бензина по традиционным технологиям (рис. 1) пока существенно выше стоимости природного газа, но уже приближается к стоимостям нефтяных топлив [5,6,7].

Таблица 1. Запасы ресурсов (Европа и страны СНГ)

Показатели	Невозобновляемые ресурсы		
	Нефть, млн.т	Природный газ, млрд.м <sup>3</sup>	Уголь, млн.т н.э.
Ресурсы	19000	64010	110000
Добыча за год	845	1061	436
Потребление за год	960	1122	538
Запас, годы	22	60	240

Н.э. – нефтяной эквивалент. Источник. BP Statistical Review of World Energy 2008

Таблица 2. Эксплуатационные показатели моторных топлив

Вид топлива	Параметры					
	$H_H^P$ , МДж/кг	ОЧИ	$\alpha_{\text{гран}}$	Доля $H_T$ , %	$G_{CO_2(i)} / G_{CO_2(Б)}$ , %	Цена, долл./ГДж
Бензин (Б) А80 (АУ ≈ 35 %)	44	80	0,7-1,1	14	100	≥ 23
Бензин А98 (АУ ≈ 55 %)	44	98	0,7-1,1	13	110	≥ 25
Дизельное	43	–	0,9-5	12 – 13	110	≥ 25
Метан (сжатый)	50	120	0,8-1,7	25	80	≥ 16
Метанол	20	106	0,7-1,4	25*	80	≥ 25
Бензин А80 + 10% мас. $H_2$	54	98	0,7-2	24	60	≥ 25
Водород (сжатый)	120	130	0,2-5	100	0	25** – 90

\* – без учета кислорода; \*\* – водород для собственных нужд ТЭС.

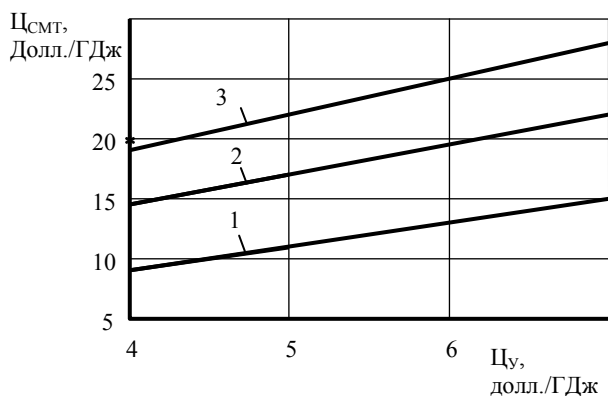


Рис. 1. Стоимость производства СМТ

1 – метанол + синтез-газ, 2 – метанол, 3 – бензин (метод Фишера-Тропша)

Совершенствование методов газификации углей [7], в том числе на основе использования плазменных технологий [8] с последующим получением метилового спирта и производства на его основе СМТ, позволит в ближайшие десятилетия начать их практическое использование в качестве дополнительного, а в последующем и основного, топлива для автотранспорта в Украине. Уголь является единственным отечественным топливом, добыча которого может полностью удовлетворить запросы теплоэнергетики. По оценкам специалистов в Украине балансовых запасов углей при годовом объеме добычи 100 млн.т хватит на 400 лет и более [7].

Мировой опыт применения альтернативных топлив на автотранспорте. В 60 странах мира на природном газе работает примерно 10 млн. автомобилей. Мировым лидером является Аргентина (более 1 млн. автомобилей работающих на природном газе).

В соответствии с планами Европейской экономической комиссии ООН до 2020 года ~ 30 млн. автомобилей в странах ЕС будут работать на природ-

ном газе, главным образом это городские автобусы, микроавтобусы, легковые автомобили, находящиеся в индивидуальном пользовании. Ежегодное потребление природного газа таким количеством машин составит более 50 млрд.м<sup>3</sup>. Например, в Германии к 2010 году количество автомобилей, работающих на природном газе, должно вырасти до 1 млн., к 2020 – до 8 млн. и составит более 30% от всего автопарка.

В некоторых странах Южной и Северной Америки, а также Европы, в двигателях с принудительным воспламенением широко используются бензо-метанольные смеси (М-15, М-20).

Ведущими мировыми автомобильными фирмами ("Хонда", "Тойота", "Дженерал моторс", "СААБ" и др.) созданы и испытываются модельные образцы автомобилей, в том числе с гибридными энергоустановками, включая использование и электрохимических генераторов, работающих на продуктах конверсии спиртовых топлив.

В США развернута кампания по замене каждого десятого литра бензина на биотопливо (БТ). В 2005 г. в США из кукурузы было произведено примерно 19 млрд. литров этанола. При таких темпах роста потребления БТ в 2008 г. на его производство уже потребовалось половина выращиваемой в США кукурузы.

Страны ЕС предполагают к 2010 г. заменить каждый 20-й литр бензина БТ. В настоящее время в Европе уже производится 1,7 млн. т БТ, полученного из рапса. Однако биологическое сырье имеет ограничения по выращиванию и, как считают эксперты, реальные объемы замены нефтяных моторных топлив биотопливами могут составить к 2025 г. не более 10 % [6].

Одним из наиболее вероятных направлений, способных качественно изменить сложившуюся си-

туацию в мировой транспортной энергетике, во многих странах считается переход к водородному топливу. Работы по развитию водородной энергетики в настоящее время активно ведут многие страны мира, включая США, Японию, Китай, Индию, Канаду, Австралию, страны ЕС [2, 9]. По прогнозам американских специалистов, в случае успеха запланированных исследований и внедрения новых технологий в 2020 г., автомобили на водородных топливных элементах позволят сократить спрос на нефть в США к 2040 г. более чем на 11 млрд баррелей в день. Водородная энергетика интенсивно внедряется в Германии. При поддержке правительства создаются новые компании, призванные обеспечить лидерство Германии в области водородной энергетики. Правительство предоставляет фонды для ведущих проектов, что вызывает приток частных инвестиций. На федеральном уровне на работы по водородной энергетике выделяется более 100 млн. евро в год. Автомобильные фирмы Германии успешно участвуют в мировой гонке за "водородный автомобиль". В популярных турах за мир чистой энергии (Дубай, Брюссель, Милан, Торонто, Лос-Анджелес) – победила компания BMW, которая продемонстрировала 15 водородных автомобилей. В настоящее время наиболее активна фирма Daimler Chrysler, создавшая ряд демонстрационных образцов автомобилей Neos и автобусов Nebus на топливных элементах. На эти работы в течение 2001–2005 гг. указанная фирма израсходовала более 2 млрд. евро.

Информация о водородных проектах поступает и из других стран Евросоюза. Так, 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. В столице Исландии Рейкьявике на водородное топливо переводят все пассажирские автобусы.

Накопленный в этой области опыт представляет несомненный интерес и для Украины как с точки зрения возможных изменений на мировом рынке традиционных энергоносителей, так и в контексте разработки собственных программ развития водородной энергетики и транспорта.

Анализ моторных качеств альтернативных топлив и эффективности их использования. Важные

эксплуатационные показатели ряда моторных топлив приведены выше в табл. 2. Следует особо отметить, что альтернативные топлива, обладающие повышенным водородным показателем и высокими антидетонационными качествами, наиболее эффективно могут быть использованы в ДВС с принудительным воспламенением обедненных горючих смесей, в том числе – в двигателях, получивших название "Отто-Дизель".

Моторные качества метана такие как высокие теплотехнические и детонационные показатели, широкий диапазон изменения концентрационных пределов обеднения позволяют в ДВС с принудительным воспламенением горючей смеси повысить степень сжатия, реализовать энергетически и экологически высокоэффективное сжигание обедненных газоздушных смесей. Применение в городском автотранспорте природного газа позволяет обеспечить значительный экономический эффект в результате снижения затрат на топливо и на возмещение экологического ущерба, снизить загрязнение атмосферы городов особо вредными ингредиентами ОГ автомобилей, в первую очередь канцерогенными составляющими [5].

Опыт многих стран мира подтверждает целесообразность использования спиртовых топлив в качестве дополнительного энергоносителя. Так, добавка метанола в количестве ~ 15 % к бензину с октановым числом 72 повышает октановое число до 82 и позволяет эффективно использовать такую бензометанольную смесь в серийно применяемых двигателях с принудительным воспламенением при ее обеднении. Применение метанола (или другого спиртового топлива) в качестве основного водородоносителя может рассматриваться как один из перспективных путей топливно-экологического совершенства автомобильных двигателей. Это обусловлено прежде всего тем, что конверсионный газ (конгаз), образующийся в результате конверсии метанола, содержит 67 % об. водорода и 33 % об. оксида углерода, являющихся экологически чистыми составляющими топлива и позволяющими существенно обеднять топливно-воздушную смесь и повышать топливную экономичность двигателя, а также снижать уровень токсичных веществ в ОГ.

Перспективным альтернативным топливом для автотранспорта является водород, в том числе в качестве дополнительного энергоносителя [1,2,6,9].

Водород, как моторное топливо, позволяет обеспечить широкие пределы эффективного и максимального обеднения топливовоздушной смеси ( $\alpha_{\eta(\max)}$  и  $\alpha_{(\max)}$ ), высокую скорость сгорания и антидетонационную стойкость, малую энергию воспламенения, большие значения коэффициентов диффузии, которые делают водород идеальной добавкой к традиционным углеводородным топливам. Важным, как показали обширные исследования, проведенные в ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины, является то, что массовые добавки водорода ( $g_{H_2}$ ) при сжигании обедненных бензоводородовоздушных смесей существенным образом повышают полноту выгорания топлива ( $\eta_T$ ), снижают уровни образования  $NO_x$ , ингибируют процессы образования твердых частиц и канцерогенных углеводородов (КУ). Установлено, что в условиях городской эксплуатации легковых автомобилей при использовании в ДВС обедненных бензоводородовоздушных смесей (доля водорода  $g_{H_2} \approx 10\%$  мас.) обеспечивается: уменьшение расхода бензина до 40 % (за счет замещения бензина водородом и повышения эксплуатационной топливной экономичности автомобилей), снижение выбросов с ОГ:  $NO_x$  – в пять раз, КУ – на порядок и более, а  $CO_2$  – примерно на 40 %.

Анализ влияния частичного замещения бензина водородом на изменение удельных эксплуатационных затрат по топливной составляющей, выполненный по разработанной методике оценки топливно-экономической эффективности использования водорода в качестве дополнительного энергоносителя [1], (рис.4), показал, что экономически оправданным является использование бензоводородных топлив (при  $g_{H_2} = 5-10\%$ ) даже при  $\bar{C}' = 2,2-3,0$ , т.е. при шести – восьми кратном отношении массовой стоимости водорода к стоимости бензина. Вследствие существенного повышения экологической безопасности ДВС (как будет показано далее) дополнительно расширяется (за счет снижения уровней экокомпенсаций) экономически целесообразный диапазон использования водорода в качестве дополнительного энергоносителя.

**Анализ экологических проблем автотранспорта.** ДВС автотранспорта являются основным загрязнителем ОС, особенно атмосферы крупных городов. Их интегральные экологохимические показате-

тели в значительной степени определяются эксплуатационной топливной экономичностью, параметрической надежностью и качеством используемых топлив, в том числе уровнями содержания водорода, ароматических углеводородов (АУ), серы и т.д.

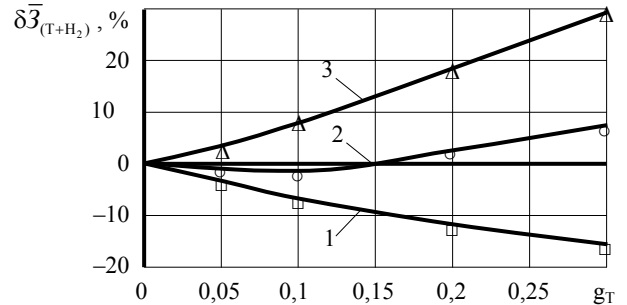


Рис. 4. Влияние частичного замещения бензина водородом на изменение удельных эксплуатационных затрат по топливной составляющей, где  $\bar{C}' = C_{T\text{y.T.}(H_2)} / C_{T\text{y.T.}(T)} : 1 - \bar{C}' = 2,2 ; 2 - \bar{C}' = 3,0 ; 3 - \bar{C}' = 4,0$ .

Анализ загрязненности атмосферы городов с интенсивным автомобильным движением показал, что наиболее опасными в ОГ двигателей (по степени воздействия на человека) являются:  $NO_x$  и твердые частицы, включающие КУ (БП) и особенно их производные – нитроканцерогенные вещества, обладающие, как следствие явлений синергизма, мутагенными свойствами. Именно БП, имеющий среднесуточную предельно допустимую концентрацию в атмосфере  $[ПДК_{БП}]_{CC} = 10^{-6} \text{ мг/м}^3$ , обладает наибольшим индексом канцерогенной агрессивности (ИКА). Одними из основных носителей канцерогенов и нитроканцерогенов, причем существенно усиливающими их агрессивность (промотирующее воздействие), являются мелкодисперсные ТЧ.

Сильное влияние на экологические показатели ДВС оказывает использование нефтяных топлив с повышенным содержанием АУ [1, 10, 11, 12]. На рис. 5 и 6 приведены усредненные данные по уровням выбросов ТЧ, БП и  $NO_x$  с ОГ легковых автомобилей с различными ДВС при их испытании по Европейскому городскому ездовому циклу в зависимости от уровня содержания АУ в моторных топливах.

Представленные данные указывают на то, что бензины и дизельные топлива, изготавливаемые из нефти по современным технологиям, характеризуются повышенным содержанием АУ, что приводит при их использовании к росту уровней выбросов ТЧ, БП и  $NO_x$  с ОГ двигателей.

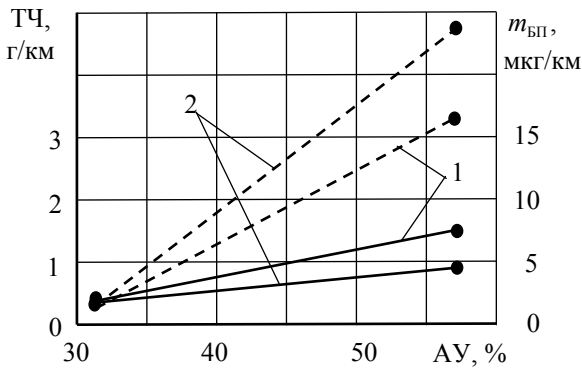


Рис. 5. Зависимость роста уровней выбросов ТЧ (—) и БП (---) от увеличения содержания АУ в дизельном топливе. Автомобили  
1 – Oldsmobile Delta 88 diesel, 2 – Peugeot 505 D [16]

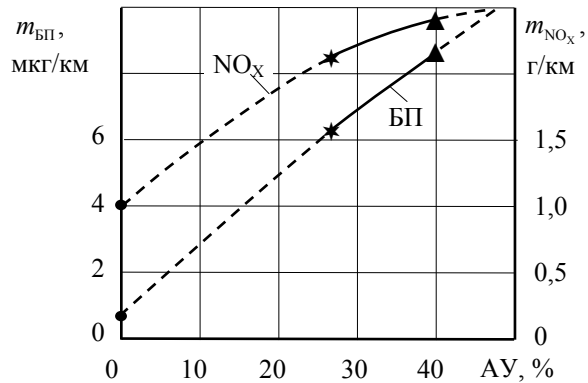


Рис. 6. Влияние содержания АУ в моторных топливах на уровни выбросов NO<sub>x</sub> и БП с ОГ легковых автомобилей типа ГАЗ  
● – метан, ★ – бензин А-76, ▲ – бензин АИ-93

В табл. 3 приведены экспериментальные данные по результатам исследований ряда легковых автомобилей с ДВС типа ЗМЗ по Европейскому городскому ездовому циклу при использовании различных топлив. Из представленных результатов следует, что использование альтернативных топлив (табл. 2) с повышенным содержанием водорода (природный газ, бензоводородные смеси и др.) приводит к снижению уровней выбросов NO<sub>x</sub>, БП и ТЧ с ОГ автомобилей.

На основе экспериментальных данных предложен удельный интегральный показатель экологохимической опасности (ЭХО)<sub>д</sub> двигателя легкового автомобиля и критерий соответствия его интегральных экологохимических показателей международ-

ным нормам  $K_j = (\text{ЭХО})_j / [\text{ЭХО}]_j$  с учетом: санитарно-гигиенических нормативов  $[ПДК_i]_{\text{сг}}$  для токсичных и канцерогенных ингредиентов, а также – суммарной канцерогенности ОГ. Для оценки эффекта усиления совмещенного токсичного и канцерогенного действия ряда ВВ на человека в условиях городской среды, установлены экспертные коэффициенты:  $k_{\text{NO}_x} = 3$ ;  $k_{\text{БП}} = 4$ ;  $k_{\text{КУ}} = 4 \cdot 1,3 = 5,2$  [1]. При этом интегральный показатель (ЭХО)<sub>д</sub> для ДВС с принудительным воспламенением (без учета СО и СН – см. табл. 4) может быть представлен следующим образом:

$$(\text{ЭХО})_д = 3 \left( \frac{0,9 m_{\text{NO}_x}}{[\text{NO}]_{\text{сг}}} + \frac{0,1 m_{\text{NO}_x}}{[\text{NO}_2]_{\text{сг}}} \right) + 5,2 \frac{m_{\text{БП}}}{[\text{БП}]_{\text{сг}}}$$

Таблица 3. Экспериментальные данные

№ п/п	Моторные топлива	$m_{\text{СО}}$	$m_{\text{СН}}$	$m_{\text{NO}_x}$	$m_{\text{БП}} \cdot 10^6$
		г/км			
1	Бензин АИ-93	6,7	2,3	2,4	8,9
2	Бензин А-76	4,9	2,4	2,2	6,3
3	Пропан-бутан	1,7	2,1	1,0	1,2
4	Бензин А-76 + 30 % метанола	5,0	1,8	0,9	0,8
5	Природный газ	1,3	1,0	1,0	0,6
6	Бензин АИ-93 + 10 % водорода	1,2	0,4	0,5	0,8
7	Метанол	0,8	1,1	0,8	0,6
8	Водород	–	–	0,2	–

Примечание. Доля NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ≈ 0,1.

Допускаемый по Европейским нормам показатель  $[\text{ЭХО}]_д$  может быть оценен как

$$[\text{ЭХО}]_д = 3 \left( \frac{0,9 [m_{\text{NO}_x}]}{[\text{NO}]_{\text{сг}}} + \frac{0,1 [m_{\text{NO}_x}]}{[\text{NO}_2]_{\text{сг}}} \right) + 5,2 \frac{[m_{\text{БП}}]}{[\text{БП}]_{\text{сг}}}$$

где:  $m_i$ ,  $[m_i]$  – соответственно, экспериментально

полученные и допустимые уровни выбросов ВВ с ОГ автомобиля, г/км;  $[NO]_{cc} = 0,06$  ;  $[NO_2]_{cc} = 0,04$  ;  $[BP]_{cc} = 10^{-6}$  мг/м<sup>3</sup> .

Допустимые уровни выбросов БП  $[m_{BP}]_B$  определялись (с учетом суммарной канцерогенной агрессивности ОГ) по следующей зависимости:

$$3 \left( \frac{0,9[m_{NO_x}]}{[NO]_{cc}} + \frac{0,1[m_{NO_x}]}{[NO_2]_{cc}} \right) \approx 5,2 \frac{[m_{BP}]_B}{[BP]_{cc}}$$

Обобщенные экологохимические показатели и долевое участие i-х ВВ в экологохимической опасности исследуемых легковых автомобилей при использовании различных топлив представлены в табл. 4, из которой следует, что доля (СО + СН) в рассматриваемом показателе не превышает для используемых бензинов 2 %, а для остальных топлив – 6 %. Расчетные данные по граничным значениям  $[\text{ЭХО}]_B$  и  $[m_{BP}]_B$ , а также по критериям экологохимической опасности ( $K_B$ ) исследуемых легковых автомобилей приведены в табл. 5.

Таблица 4. Экологохимические показатели автомобилей

Моторные топлива (см.табл. 3)	$(\text{ЭХО})_B \cdot 10^{-3}$ , нм <sup>3</sup> /км	$(\text{ЭХО}_i)/(\text{ЭХО})_B$ , %		
		СО+СН	NO <sub>x</sub>	БП
1	176	2	72	26
2	151	2	76	22
3	62	5	85	10
4	53	4	88	8
5	17	6	76	18
6	15	4	68	28
7	15	6	67	27
8	3	–	100	–

Таблица 5. Граничные и относительные экологохимические показатели автомобилей

Моторные топлива (см.табл. 3)	Евро-II	Евро-III	Евро-IV
	$[\text{ЭХО}] \cdot 10^{-3}$ , нм <sup>3</sup> /км / $[m_{BP}] \cdot 10^6$ , г/км		
	27 / 2,5	17 / 1,5	9 / 0,8
$K_B = (\text{ЭХО})_B / [\text{ЭХО}]_B$			
1	6,5	10,4	19,6
2	5,6	8,9	16,8
3	2,3	3,6	6,9
4	2,0	3,1	5,9
5	0,6	1,0	1,9
6	0,6	0,9	1,7
7	0,6	0,9	1,7
8	0,1	0,2	0,3

На основании результатов проведенных исследований легковых автомобилей, не оборудованных системами нейтрализации ОГ, можно сделать следующие выводы.

1. При использовании в ДВС легковых автомобилей различных углеводородных топлив наиболее вредными ингредиентами, выбрасываемыми с ОГ двигателей, являются NO<sub>x</sub> и КУ, которые в условиях городской езды синтезируют предельно опасные для человека нитроканцерогенные вещества, обладающие мутагенными свойствами. При этом мелкодисперсные ТЧ существенно усиливают их агрессивность. Повышенное содержание АУ, характерное для современных нефтяных топлив, резко усиливает эту закономерность.

2. Выполнение международных норм "Евро-II" (принятых в Украине) и "Евро-III" указанными легковыми автомобилями возможно при использовании: природного газа, спиртовых моторных топлив, а также водорода в качестве как основного, так и дополнительного энергоносителя. Нормы "Евро-IV" (как и "Евро-V") фактически могут выполняться только при использовании водорода в качестве основного энергоносителя.

3. Для повышения экологической безопасности легковых автомобилей с ДВС необходимо:

- максимальное повышение эксплуатационной топливной экономичности двигателей, в том числе поддержание высокой параметрической надежности их работы, что будет способствовать минимизации уровней выбросов особо опасных углеродсодержащих веществ (КУ, ТЧ), возможно даже при некотором росте уровней выбросов NO<sub>x</sub> (для снижения выбросов NO<sub>x</sub> рациональным является использование, например, современных восстановительных нейтрализаторов накопительного типа [13]);

- использование обедненных топливно-воздушных смесей с повышенным водородным показателем и пониженным содержанием АУ, а также – серы;

- осуществление электронно-управляемой многофазной подачи топлива непосредственно в цилиндры двигателей, существенное повышение качества смесеобразования, применение современных адаптивных систем регулирования качества рабочих процессов, включая и их экологохимические показатели.

**Список литературы:**

1. Канило П.М. Анализ эффективности и перспектив применения водорода в автомобильном транспорте / П.М. Канило, М.В. Шадрина // Проблемы машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 154 – 159. 2. Канило П.М. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П.М. Канило, К.В. Костенко // Автомобильный транспорт. – Вып. 23 – С. 107-113. 3. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия / И.В. Парсаданов – Харьков: Издательский центр НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с. – (Монография). 4. Марченко А.П. Проблемы экологизации двигателей внутреннего сгорания / А.П. Марченко, И.В. Парсаданов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2005. – №2.– С. 3–8. 5. Канило П.М. Природный газ – наиболее эффективный заменитель нефтяных топлив на автотранспорте / П.М. Канило, Ф.И. Абрамчук, А.П.

Марченко, И.В. Парсаданов // Автомобильный транспорт. – 2008. – Вып. 22. – С. 86 – 92. 6. Жизнь после нефти: альтернативные источники энергии [Электрон. ресурс]/ Стуруа Мэлор, Ф.Чайка, С.Лесков // Известия науки. – 2007. – С. 1–4. – Режим доступа к журн.: [www.inaika.ru](http://www.inaika.ru). 7. Степанов С.Г. Тенденции развития и новые инженерные решения в газификации угля / С.Г.Степанов // Уголь. – 2002. – № 11. – С. 87 – 92. 8. Канило П.М. Водородно-кислородно-плазменные технологии сжигания низкорреакционных энергоносителей / П.М. Канило, В.В. Соловей, В.Е. Костюк, К.В. Костенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 1. – С. 57 – 64. 9. Кузык Б.Н. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, Ю.В. Яковец ; предисл. С.М.Миранов – М.: Институт экономических стратегий. – 2007. – 400с.

УДК 621.432

**С.А. Сериков, канд. техн. наук, А.А. Дзюбенко, асп.**

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА**

**Введение**

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС), как объект управления, характеризуется существенной нелинейностью, нестационарностью и многосвязностью, что в значительной мере усложняет процесс идентификации математической модели. При математическом описании термодинамических процессов, происходящих в камере сгорания, и кинематических связей движущихся узлов необходимо учитывать большое количество параметров различных систем двигателя и их взаимодействие. Модели, полученные в виде систем нелинейных дифференциальных уравнений, оказываются чрезвычайно сложными, а их решение сопряжено с рядом трудностей вычислительного характера.

При исследовании особенностей различных режимов работы силовых установок транспортных средств, синтеза и оптимизации законов управления используются математические модели ДВС, к которым предъявляются такие требования как достаточная точность описания статических и динамических процессов, возможность идентификации на основе экспериментальных скоростных, нагрузочных, регулировочных и разгонных характеристик при неполноте или противоречивости данных, эффективность реализации моделирования в математических паке-

тах прикладных программ.

**Анализ публикаций**

Аналитическое описание сложных систем приводит к необходимости идеализации и упрощению некоторых зависимостей, при этом модель может потерять качественные свойства объекта. На практике, зачастую, для получения математической модели конкретного двигателя используют аппроксимацию статических экспериментальных характеристик, полученных в результате стендовых испытаний. В работе [1] при использовании полиномиальной аппроксимации решение полученной модели требует чрезмерно большого объема вычислений. В работе [2] аппроксимация проводилась посредством трехслойных искусственных нейронных сетей. Данный подход позволил автоматизировать процесс аппроксимирования. Такие модели имеют широкие возможности с точки зрения представления нелинейных зависимостей, а также обладают регулярной структурой и позволяют описывать как статические, так и динамические свойства системы.

В работе [3] рассмотрены методы автоматической идентификации информационных параметров силового агрегата автомобиля при непосредственном испытании на стенде, что позволяет в реальном мас-