

УДК 669.85/86+502.7

## СОВРЕМЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭКОКАНЦЕРОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

**П.М. Канило, проф., д.т.н., А.В. Гриценко, проф., д.г.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

*Аннотация.* Проведен сравнительный анализ Европейских требований к экологической безопасности легковых автомобилей с различными двигателями внутреннего сгорания. Рассмотрены пути и методы минимизации экокancerогенной опасности автомобилей, включая использование альтернативных топлив с повышенным водородным показателем и существенное повышение качества рабочих процессов двигателей.

*Ключевые слова:* автотранспорт, двигатель внутреннего сгорания, нефтяные и альтернативные топлива, отработанные газы, бенз(а)пирен, оксиды азота, твердые частицы.

## СУЧАСНИЙ АНАЛІЗ ЕКОКАНЦЕРОГЕННОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

**П.М. Канило, проф., д.т.н., А.В. Гриценко, проф., д.г.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

*Анотація.* Проведено порівняльний аналіз Європейських вимог до екологічної безпеки легкових автомобілів з різними двигунами внутрішнього згорання. Розглянуто шляхи й методи мінімізації екокancerогенної небезпеки автомобілів, включаючи використання альтернативних палив з підвищеним водневим показником та істотне підвищення якості робочих процесів двигунів.

*Ключові слова:* автотранспорт, двигун внутрішнього згорання, нафтові й альтернативні палива, відпрацьовані газы, бенз(а)пирен, оксиди азоту, тверді частки.

## MODERN ANALYSIS OF ECOLOGICAL AND CANCEROGENIC DANGERS OF MOTOR CARS

**P. Kanilo, Prof., D. Sc. (Eng.),  
A. Hrytsenko, Prof., D. Sc. (Eng.),  
Kharkiv National Automobile and Highway University**

*Abstract.* The comparative analysis of the European requirements to ecological safety of motor cars with different combustion engines is carried out. Ways and methods of minimization of ecocarcinogenic danger caused by motor cars including the use of alternative fuels with a high hydrogen index and substantial upgrading of working processes of engines are considered.

*Key words:* motor transport, internal combustion engine, oil and alternative fuel, exhaust gases, benzo(a)pyrene, nitric oxides, particulate pollutant.

### Введение

В мире эксплуатируется более 1 млрд транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и их количество непрерывно растет. Человечество не сможет решить топливно-экологическую проблему такого коли-

чества автомобилей, если доля потребления традиционных нефтяных топлив автотранспортом будет и дальше составлять более 90 %. Именно исчерпание природных ресурсов, в первую очередь нефтяных, при условии 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 и экологической опасности автомобилей реальное практическое значение имеют два, а именно: существенное повышение топливной экономичности автомобилей, в том числе применением более совершенных энергоустановок с высокой экономичностью и параметрической надежностью, а также – замещение нефтяных топлив (частичное или полное) альтернативными энергоносителями с повышенными водородными показателями.

Постоянно ужесточаются нормы на уровни выбросов токсичных веществ (СО, СН, NOx, ТЧ) с отработанными газами (ОГ) автомобилей (Евро-3, 2005 г.; Евро-5, 2008 г.; Евро-6, 2015 г.). Однако нормирование указанных вредных веществ (ВВ) по существу является надводной частью «айсберга» эколого-химической опасности автомобилей, т.к. наиболее опасные для человека супертоксиканты, в том числе канцерогенные углеводороды (КУ) и их производные, пока «бесконтрольны». Такое раздельное и неполное нормирование эколого-химических показателей автомобилей может в недостаточной степени (а часто и ошибочно) оценивать их интегральную экологическую опасность, их приспособленность к ОС, а также эффективность применения как конструктивных и технологических усовершенствований ДВС, так и использование альтернативных видов топлив. Поэтому назрела необходимость интегрально оценивать экологическую опасность автомобилей с учетом суммарной канцерогенности ОГ двигателей.

### Анализ публикаций

Проблема канцерогенного загрязнения ОС, в первую очередь атмосферы крупных городов, является одной из наиболее острых и наименее решаемых среди всех экологических проблем. Считается, что ~ 90 % содержащихся в ОС канцерогенных углеводородов приходится на источники, обусловленные горением. При этом автотранспорт с ДВС является определяющим техногенным источником загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными ингредиентами (КМИ). Индикатором наличия КУ в ОС и в ОГ автомобилей в международной практике

принят бенз(а)пирен (БП – C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>). Следует особо отметить, что в условиях ОС многие КУ, включая БП, совместно с оксидами азота (NOx) синтезируют нитроканцерогенные соединения, обладающие мутагенными свойствами, т.е. способностью нарушать генетические программы клеток и вызывать в организме человека изменения наследственных свойств. Установлено также, что мелкодисперсные твердые (сажистые) частицы (ТЧ), а также пыль, сорбируя КУ, являются не только их носителями, но и многократно усиливают их канцерогенно-мутагенное воздействие на организм человека [1].

Экоканцерогенная опасность (ЭКО) автомобилей с ДВС в основном (~ на 95 %) характеризуется двумя парами супертоксикантов: (NOx + КУ) и (ТЧ + КУ), выбрасываемых с ОГ двигателей [1–4]. По мнению медиков, именно КМИ в атмосфере больших городов ~ на 80 % определяют риск возникновения злокачественных опухолей у людей [5]. Поэтому интерес к проблеме загрязнения среды человека КМИ во всем мире растет, но, к сожалению, еще быстрее распространяется само присутствие этих соединений в экосистемах. Следует особо отметить, что стремительное увеличение количества автомобилей и их дизелизация, расширение использования высокоароматизированных нефтяных топлив, а также увеличение доли использования устаревших автомобилей, а тем более автомобилей с неисправными ДВС, усугубляет решение отмеченных проблем.

Необычайно сильное влияние на канцерогенную опасность ОГ автомобилей оказывает техническое состояние ДВС (рис. 1).

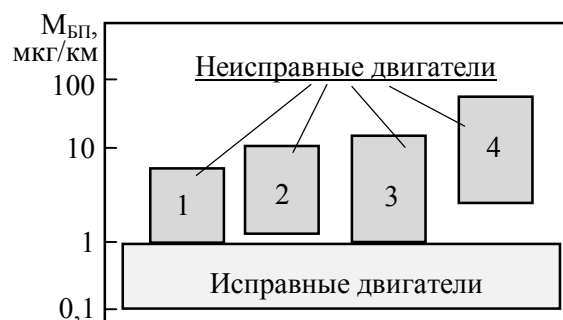


Рис. 1. Уровни выброса бенз(а)пирена с ОГ автомобилей при различных неисправностях бензиновых двигателей: 1 – нарушение регулировки холостого хода; 2 – угар масла; 3 – неисправности системы питания; 4 – неисправности системы зажигания

Из представленных на рис. 1 данных следует, что неисправности систем топливопитания и зажигания горючей смеси, влияющие непосредственно на процесс горения топлив, могут увеличивать уровни выбросов КУ (соответственно и ТЧ) с ОГ автомобилей на порядок и более. Кроме того, следует отметить, что по мере увеличения пробега автомобилей их эколого-химические (канцерогенно-мутагенные) показатели также ухудшаются. Так, после пробега 100 тыс. км автомобилями типа ВАЗ-2105 удельные уровни выбросов КУ с ОГ двигателей увеличились примерно в три раза [6].

В настоящее время в городах с развитым автомобильным транспортом, в том числе в России и Украине, среднесуточные концентрации БП в атмосфере превышают на порядок указанные концентрации БП в сельских районах. В местах же интенсивного движения автотранспорта концентрация БП в воздухе превышает допустимый уровень на два порядка и более [1, 4, 6]. Такой уровень роста загрязнения среды КМИ может привести к тому, что затраты на излечение «больного человечества» и оздоровление природы могут стать самой крупной статьей экономики мира. Поэтому снижение потребления нефтяных топлив и уровней выбросов КМИ в ОС, в том числе с ОГ транспортных средств с ДВС, и их обезвреживание являются одной из важнейших проблем современного мира. Федеральное ведомство по охране ОС в Германии, разделяя эти оценки, способствовало тому, что правительством была сформулирована задача: в ближайшие несколько лет уменьшить обусловленные автотранспортом выбросы КУ на 90 %. Проект использования синтетических дизельных топлив, в целях снижения выбросов КУ и ТЧ транспортными средствами с дизелями, уже реализуется в ряде штатов США, а также – в Нидерландах [7, 8].

### Цель и постановка задачи

Целью работы является провести, в соответствии с Европейскими нормами (табл.1), комплексный анализ экологической безопасности легковых автомобилей с различными ДВС и при использовании как нефтяных, включая высокоароматизированные, так и альтернативных топлив, но с дополнительным учетом суммарной канцерогенности ОГ. На основе экспериментальных данных под-

твердить, что суммарная канцерогенность ОГ автомобилей с ДВС определяется двумя парами супертоксикантов: (NO<sub>x</sub> + КУ) и (ТЧ + КУ), которые являются определяющими при оценке экологической опасности автомобилей. Показать, что Европейские требования к экологической безопасности легковых автомобилей с дизелями существенно менее жесткие, чем для автомобилей с бензиновыми двигателями. Но при этом следует отметить, что уже в нормах Евро-6 эта разница снижена (табл. 1).

Таблица 1 Европейские нормы на уровни выбросов ВВ с ОГ легковых автомобилей

Нормы	Тип ДВС	Выбросы ВВ с ОГ, г/км			
		СО	СН	NO <sub>x</sub>	ТЧ
Евро-3, 2000 г.	Б	2,3	0,20	0,15	
	Д	0,64	0,06	0,50	0,05
Евро-5, 2008 г.	Б	1,0	0,10	0,06	0,005
	Д	0,50	–	0,2	0,005
Евро-6, 2015 г.	Б	1,0	0,10	0,06	0,005
	Д	0,50	–	0,08	0,005

Примечание. Б – бензиновые, Д – дизельные двигатели.

### Канцерогенная опасность автомобилей

Удельные уровни выбросов токсичных и канцерогенных ингредиентов с ОГ легковых автомобилей с ДВС приведены в табл. 2.

Таблица 2 Экспериментальные данные

Тип ДВС	$m'_{CO}$	$m'_{CH}$	$m'_{NO_x}$	$m'_{ТЧ}$	$m'_{БП} \cdot 10^6$
	г/км				
1	6,7	2,3	2,4	0,01	8,9
2	4,9	2,4	2,2	0,005	6,3
3	2,6	1,9	1,2	–	1,0
4	1,7	2,1	0,9	–	0,8
5	0,8	1,0	2,3	–	0,3
6	0,5	0,4	0,7	–	0,2
7	0,2	0,6	1,0	–	0,2
8	0,3	0,2	0,1	–	0,7
9	2,7	0,34	0,25	–	0,7
10	1,7	0,3	2,0	0,8	32

Примечания. Доля NO/NO<sub>x</sub> ≈ 0,9. В ОГ ДВС типа (3–9) ТЧ практически отсутствовали.

В табл. 2 введены следующие обозначения: 1 – бензиновый ДВС типа ЗМЗ-402.10 (бензин А-92, И); 2 – ДВС типа ЗМЗ-4021.10 (бензин А-76, И); 3 – ДВС типа ЗМЗ-4022.10 (Ф-Ф); 4 – ДВС типа ЗМЗ-4027.10 (пропан-бутан, И); 5 – ДВС типа ЗМЗ-4021.10

(ОСНОГ, И); 6 – ДВС типа ЗМЗ-4022.10 (Ф-Ф, ОСНОГ); 7 – ДВС типа ЗМЗ-4027.10 (пропан-бутан, И, ОСНОГ); 8 – ДВС типа ЗМЗ-4021.10 (И, БСНОГ); 9 – ДВС типа ЗМЗ-405.22 (распределенный впрыск бензина А-95, БСНОГ); 10 – дизель типа ГАЗ-560; И, Ф-Ф – соответственно искровое и форкамерно-факельное зажигание горючей смеси; ОСНОГ, БСНОГ – соответственно окислительная и бифункциональная системы каталитической нейтрализации ОГ двигателей.

Удельные уровни выбросов ВВ с ОГ автомобилей, приведенные в табл. 2, определялись по следующей зависимости

$$m'_{ij} = \frac{\bar{m}_{ij} + \Delta m_{ij}}{4,06}, \text{ г/км,}$$

где  $\bar{m}_{ij}$ ,  $\Delta m_{ij}$  – соответственно математическое ожидание (среднее арифметическое значение) и суммарный доверительный интервал определения уровней выброса ВВ; 4,06 – пробег автомобиля за Европейский городской ездовой цикл, км.

Установлена также корреляционная зависимость между удельными уровнями выбросов с ОГ двигателей БП и приоритетной группой канцерогенных углеводородов (КУ) с учетом индекса их канцерогенной агрессивности (ИКА) [1]

$$\sum (m'_{КУ} \cdot \text{ИКА}) = 1,3 \cdot m'_{\text{БП}}, \text{ г/км.}$$

В соответствии с приведенными в табл. 2 данными важно отметить, что удельные массовые уровни выбросов БП и ТЧ с ОГ автомобилей с дизелями существенно выше, чем при использовании других типов ДВС и, особенно, при оборудовании этих двигателей системами каталитической нейтрализации ОГ.

Следует отметить, что значимое влияние на уровни выбросов БП и ТЧ с ОГ двигателей 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. 3 приведены усредненные данные по уровням выбросов

ТЧ и БП с ОГ легковых автомобилей с дизелями при их испытании по Европейскому городскому ездовому циклу в зависимости от уровня содержания ароматических углеводородов в дизельных топливах.

Таблица 3 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 и их (ЭКО)<sub>j</sub>. 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].

Итак, расширение доли использования устаревших автомобилей, а тем более автомобилей с изношенными и неисправными ДВС, широкая дизелизация автотранспортных 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.

### Обобщенный анализ экокканцерогенной опасности легковых автомобилей с ДВС

Особо значимым является вопрос о роли влияния нормируемых токсичных ингредиентов (СО, СН, NOx, ТЧ), а также суммарной канцерогенности ОГ легковых автомобилей на их интегральную эколого-химическую безопасность или, точнее, на их экокканцерогенную опасность (ЭКО)<sub>j</sub>. Многочисленными исследованиями [1–3, 6–8] было установлено, что (ЭКО)<sub>j</sub> транспортных средств с ДВС в основном (на 95 % и более) характеризуется уровнями выбросов с ОГ двигателей: NOx, ТЧ и КУ. Массовая доля

СО и СН в  $(ЭКО)_j$  автомобилей с ДВС не превышает  $\sim 3\%$ . Для обобщения ранее представленных экспериментальных данных (табл. 2) предлагается удельный интегральный показатель  $(ЭКО)_j$  для легковых автомобилей с ДВС, а также соответствующий интегральный показатель применительно к европейским международным нормам  $[ЭКО]_j$  и критерий  $K_j$  – соответствия удельного интегрального экокандерогенного показателя легкового автомобиля международным нормам:

$$(ЭКО)_j = 10^3 \left\{ \sum_{i=1}^n k_i \frac{m'_{ij}}{[ПДК_i]_{cc}} \right\}, \quad (1)$$

$$[ЭКО]_j = 10^3 \left\{ \sum_{i=1}^n k_i \frac{[m'_i]_j}{[ПДК_i]_{cc}} \right\}, \quad (2)$$

$$K_j = (ЭКО)_j / [ЭКО]_j, \quad (3)$$

где  $[ПДК_i]_{cc}$  – среднесуточные предельно допустимые концентрации регламентируемых токсичных и канцерогенных ингредиентов в атмосферном воздухе городов:  $[NO] = 0,06$ ;  $[NO_2] = 0,04$ ;  $[ТЧ] = 0,05$ ;  $[БП] = 1 \cdot 10^{-6}$ , мг/нм<sup>3</sup>;  $n$  – количество ингредиентов в ОГ автомобилей с ДВС, учитывающихся при оценке экокандерогенной опасности;  $j$  – для легковых автомобилей, оборудованных ДВС с принудительным воспламенением горючей смеси – (Б) и оборудованных дизелями – (Д);  $m'_i$ ,  $[m'_i]$  – соответственно удельные реальные и допускаемые уровни выбросов  $i$ -х ВВ с ОГ легковых автомобилей при их испытании по Европейскому городскому ездовому циклу ( $m'_i$ : NO, NO<sub>2</sub>, ТЧ), а также – БП, г/км;  $k_i$  – безразмерные показатели усиления совмещенного действия особо опасных токсичных и канцерогенных веществ на человека (и все живое) в условиях городской среды (с учетом явлений синергизма – образование нитроканцерогенов и мутагенов, промотирование мелкодисперсными ТЧ канцерогенной агрессивности ОГ, доокисление NO в NO<sub>2</sub>, повышение кислотности среды и т.д.).

Ниже, в табл. 4, приведены данные по оценке факторных коэффициентов усиления совместного вредного воздействия ряда токсичных и канцерогенных ингредиентов на человека в условиях городской езды.

В таблице:  $k_i = \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \delta_i$ ;  $\alpha_i$  – поправка, учитывающая вероятность накопления газообразной примеси и аэрозолей в компонентах окружающей среды и в цепях питания, а также поступление газообразных примесей и аэрозолей в организм человека неингаляционным путем;  $\beta_i$  – поправка на вероятность образования при участии исходных газообразных примесей и аэрозолей, выбрасываемых в атмосферу, других загрязнителей (явления синергизма), более опасных, чем исходные;  $\delta_i$  – поправка, учитывающая действие на различные реципиенты, помимо человека. На основе ранее изложенных корреляционных зависимостей ( $\Sigma KY_{(OГ)} = 1,3 \cdot m_{БП}$ ) показатель  $k_{KY} = 1,3 \cdot k_{БП} = 5,2$ .

Таблица 4 Значение коэффициентов при определении степени усиления вредного воздействия ряда ВВ, выбрасываемых с ОГ автомобилей

ВВ	Коэффициенты			
	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\delta_i$	$k_i$
СО + СН	1	1	1	1
NOx	1	2	1,5	3
БП	2	2	1	4
ТЧ	2	1	1,2	2,4

Предложенный показатель  $(ЭКО)_j$  характеризует удельную кратность разбавления ОГ автомобиля чистым воздухом (удельный нормообмен, нм<sup>3</sup>/км) до нормируемого уровня  $[ЭКО]_j$ . При этом допустимые уровни БП  $[m'_{БП}]_j$  с ОГ автомобилей определяются из граничных условий для нормируемых уровней NOx  $[m'_{NOx}]_j$  (исходя из условия, что в ОГ автомобиля массовая доля NO  $\sim 90\%$ , а NO<sub>2</sub>  $\sim 10\%$ ) по следующей зависимости:

$$3 \cdot \left( \frac{0,9[m'_{NOx}]_j}{[NO]_{cc}} + \frac{0,1[m'_{NOx}]_j}{[NO_2]_{cc}} \right) \approx 5,2 \frac{[m'_{БП}]_j}{[БП]_{cc}}. \quad (4)$$

В соответствии с данными, приведенными в табл. 1 и 2, и при использовании зависимости (4) были рассчитаны условно допустимые уровни  $[m'_{БП}]_j$ , а также граничные интегральные показатели  $[ЭКО]_j$  для легковых автомобилей с бензиновыми (Б) и дизельными (Д) двигателями применительно к международным нормам: Евро-3 (действующим в Украине), Евро-5 и Евро-6 (табл. 5).

На основании экспериментальных исследований легкового автомобиля типа ГАЗ с двигателем ЗМЗ-402 на стенде с беговыми

барабанами по Европейскому городскому ездовому циклу (Евро-5) и при использовании бензина А-92 (АУ  $\approx 40\%$ ) установлено:  $m_{\text{NOx}} = 2,4$ ;  $m_{\text{БП}} = 8,9 \cdot 10^{-6}$ ;  $m_{\text{ТЧ}} \approx 0,01$  г/км;  $m_{\text{NOx}}/[m_{\text{NOx}}] \approx 40$ ;  $m_{\text{ТЧ}}/[m_{\text{ТЧ}}] \approx 2$ ;  $m_{\text{БП}}/[m_{\text{БП}}] \approx 14,8$ .

**Таблица 5** Расчетные значения граничных показателей экотоксичности опасности легковых автомобилей с ДВС

Тип ДВС	$[m'_{\text{БП}}] \cdot 10^6$ , г/км / $[\text{ЭКО}] \cdot 10^{-3}$ , нм <sup>3</sup> /км		
	Евро-3	Евро-5	Евро-6
Б	1,4 / 15	0,6 / 6,4	0,6 / 6,4
Д	4,8 / 52	1,8 / 20	0,8 / 10,6

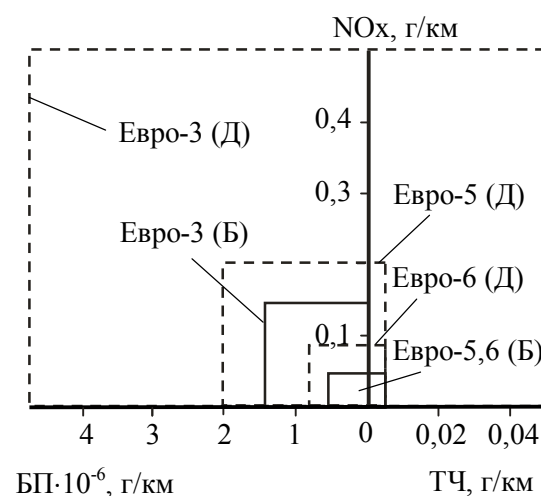
При этом интегральные показатели указанного автомобиля соответствовали:  $(\text{ЭКО})_{\text{Б}} \approx 170$ ,  $[\text{ЭКО}]_{\text{Б}} \approx 6$ , а  $K_{\text{Б}} = (\text{ЭКО})_{\text{Б}} / [\text{ЭКО}]_{\text{Б}} \approx 28$ , т.е. нормы Евро-5 превышены в 28 раз.

Экспериментальные исследования автомобиля типа ГАЗ с дизелем ГАЗ-560 (дизельное топливо, АУ  $\approx 45\%$ ) показали:  $m_{\text{NOx}} = 2,0$ ;  $m_{\text{БП}} = 32 \cdot 10^{-6}$ ;  $m_{\text{ТЧ}} = 0,8$  г/км;  $m_{\text{NOx}}/[m_{\text{NOx}}] \approx 10$ ;  $m_{\text{БП}}/[m_{\text{БП}}] \approx 18$ ;  $m_{\text{ТЧ}}/[m_{\text{ТЧ}}] \approx 160$ ;  $[\text{ЭХО}]_{\text{Д}} \approx 300$ ;  $K_{\text{Д}} \approx 14$ . Таким образом, легковой автомобиль типа ГАЗ с дизелем по сравнению с указанным выше автомобилем с бензиновым ДВС загрязняет ОС более существенно: твердыми частицами  $\sim$  в 80 раз, а канцерогенными составляющими  $\sim$  в 4 раза (при практически равных уровнях выбросов NOx). Поэтому широкая дизелизация автотранспорта усугубляет решение проблем, связанных со снижением загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными ингредиентами.

Таким образом, международные требования к экологическим (канцерогенно-мутагенным) показателям легковых автомобилей с дизелями существенно менее жесткие (хотя, как отмечалось ранее, именно автомобили с дизелями в наибольшей степени определяют канцерогенно-мутагенную опасность для жителей больших городов), чем для легковых автомобилей с бензиновыми двигателями. Так, допустимые уровни выбросов NOx и БП с ОГ легковых автомобилей с дизелями, а соответственно, и интегральный показатель экотоксичности опасности  $[\text{ЭКО}]_{\text{Д}}$ , существенно ниже, чем для автомобилей с бензиновыми ДВС. Поэтому назрела необходимость не отдельно (по нормируемым уровням выбросов с ОГ автомобилей токсичных ингредиентов), а интегрально (с учетом

суммарной канцерогенности ОГ двигателей) оценивать экологическую, а вернее – канцерогенно-мутагенную, опасность для человека автомобилей с ДВС.

На рис. 2 графически представлены данные (в соответствии с Евро-3, принятыми в Украине, Евро-5 и Евро-6, табл. 1) по допустимым уровням выбросов NOx и ТЧ, а также по «условно» допустимым уровням выбросов БП (КУ) (табл. 5) с ОГ легковых автомобилей, оборудованных бензиновыми и дизельными двигателями.



**Рис. 2.** Изменения международных норм на уровни выбросов вредных веществ (NOx, ТЧ, а также БП) с ОГ дизелей (Д) и бензиновых (Б) двигателей, определяющих экотоксичность опасности легковых автомобилей

Как видно из рис. 2, уже в требованиях Евро-6 предусмотрены повышенные требования к экотоксичности опасности легковых автомобилей с дизелями.

### Методология экологизации автомобилей

Так как транспортные средства с ДВС являются основными потребителями нефтяных топлив (а их запасы ограничены), то их экологизация должна выполняться не односторонне, а обязательно с учетом решения топливной проблемы. В первую очередь должны получить распространение способы и средства, обеспечивающие, с одной стороны, снижение потребления нефтяных топлив автотранспортом, а с другой – существенное повышение их топливной экономичности и экотоксичности безопасности.

Важным направлением в повышении топливной экономичности и экологической безопасности автомобилей с ДВС является использование альтернативных, в том числе композитных бензоводородных, топлив (табл. 6) [10–13]. Следует особо отметить, что данные испытаний микроавтобуса с ДВС ( $V_h = 2,45$  л и  $\varepsilon = 8,2$ ) на стенде с беговыми барабанами по городскому ездовому циклу при использовании бензоводородных топливных композиций (БВТК) показали существенное улучшение его экономических и экологических показателей [1].

Таблица 6 Результаты испытаний легковых автомобилей с ДВС при использовании альтернативных топлив

Топлива	$m'_{CO}$	$m'_{CH}$	$m'_{NOx}$	$m'_{БП} \cdot 10^6$	$[\text{ЭКО}]_j \cdot 10^3$
	г/км				м <sup>3</sup> /км
Природный газ	1,3	1,0	0,4	0,2	15
Метанол	0,8	1,1	0,3	0,25	10
Бензин А92 +10% мас. H <sub>2</sub>	1,2	0,3	0,25	0,2	6
Водород	–	–	0,2	–	4

*Примечание.* При использовании указанных топлив в ОГ автомобилей практически отсутствовали ТЧ, поэтому  $[\text{ЭКО}]_j$  автомобилей определялось в основном уровнями выбросов NOx с ОГ двигателей.

Пример возможной взаимосвязи между уровнями  $[\text{ЭКО}]_j$  легковых автомобилей с ДВС и их эксплуатационной топливной экономичностью представлен на рис. 3.

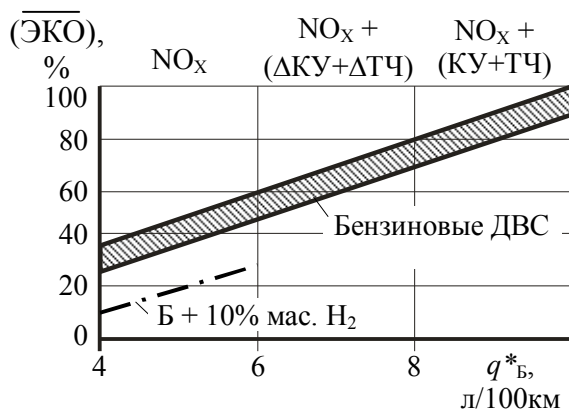


Рис. 3. Относительная экоканоцерогенная опасность легковых автомобилей с ДВС в зависимости от их эксплуатационной экономичности:  $q^*_{Б}$  – приведенный расход бензина по городскому ездовому циклу

Одной из высокоэффективных и надежных систем нейтрализации NOx в ОГ автомобилей с ДВС является каталитическая система накопительного типа (рис. 4).

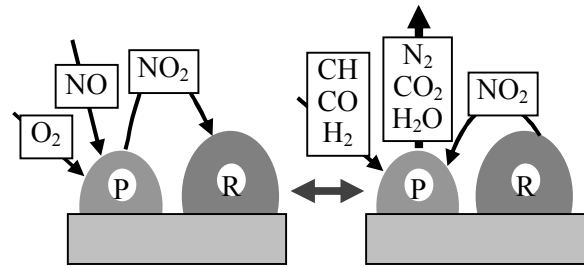


Рис. 4. Схема работы нейтрализатора накопительного типа: слева – в цилиндрах двигателя сгорает бедная горючая смесь, справа – смесь стехиометрического или богатого состава

Принцип действия рассматриваемого нейтрализующего устройства заключается в том, что при работе двигателя на горючих смесях беднее стехиометрической платина нейтрализатора способствует превращению оксида азота и кислорода в диоксид азота, который временно накапливается (адсорбируется) в самом нейтрализаторе. Но как только двигатель начинает работать на обогащенной горючей смеси, например при наборе мощности, диоксид азота освобождается и, взаимодействуя с несгоревшими углеводородами, оксидом углерода и водородом, переходит в молекулярный азот [1].

Компьютеризация управления ДВС и автомобилем – это глобальный путь и наиболее эффективный способ повышения его эксплуатационных топливно-экологических показателей. На рис. 5 приведена одна из схем энергоустановки автомобиля с комбинированной адаптивной микропроцессорной системой управления и регулирования (КАМПСУиР) ДВС.

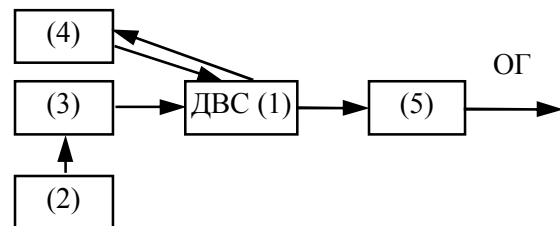


Рис. 5. Схема современной системы управления и регулирования энергоустановки автомобиля

В соответствии со схемой цилиндры ДВС оборудуются датчиками преддетонации (1). Используемые топлива (2) содержат минимальные уровни ароматических (особенно полиароматических) углеводородов и серы, а используемые добавки нетрадиционных топлив, в том числе водорода, повышают отношение Н/С и увеличивают ОЧ бензинов. Используется комбинированная электронная система управления подачей топлива (3), обеспечивающая высокую степень точности дозирования и качества распыления топлива. Применяется комбинированная адаптивная микропроцессорная система управления и регулирования (4), которая обеспечивает работу ДВС на режимах преддетонации в цилиндрах (рис. 6) и поддержание минимального эксплуатационного расхода топлива путем выбора и установления оптимальных комбинаций параметров работы ДВС ( $\alpha_{см}$ ,  $\varphi_{зж}$ ,  $\varepsilon$  и т.д.). На автомобиле устанавливается также восстановительная система каталитической нейтрализации ОГ накопительного типа (рис. 4), обеспечивающая существенное снижение уровней выбросов NOx с ОГ двигателя.

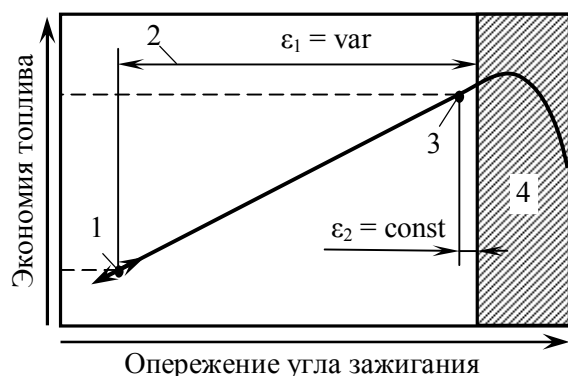


Рис. 6. Схема работы ДВС с датчиками преддетонации: 1 – рабочая точка при традиционном управлении ДВС; 2 – защитный интервал на отсутствие детонации в цилиндрах ДВС на эксплуатационных режимах; 3 – рабочая точка при адаптивном микропроцессорном управлении ДВС; 4 – зона детонации

Наилучшие результаты обеспечивает комплексная компьютерная система регулирования двигателей внутреннего сгорания, которая вмонтирована в общую систему управления автомобиля. В таком случае оптимизируются не только топливно-экономические и экологические показатели автомобиля, но и обеспечиваются его динамические качества и эксплуатационная безопасность. Такие компью-

терные системы могут реально оптимизировать управление двигателем и автомобилем по комплексной целевой функции, например, по среднеэксплуатационному расходу топлива или эколого-экономическому критерию при обеспечении необходимой надежности.

Сочетание практически всех описанных выше технических решений было осуществлено на ряде автомобилей фирмы «Тойота» (с непосредственным впрыском бензина под большим давлением  $P > 120$  МПа), что позволило обеспечить значительную экономию топлива (до 30 %) и существенно снизить их экологическую опасность.

### Выводы

Из представленных данных можно сделать следующие выводы:

1. Автотранспорт является основным потребителем нефтяных топлив и определяющим техногенным загрязнителем атмосферы городов канцерогенно-мутагенными ингредиентами.

2. Канцерогенная опасность автомобилей с ДВС более чем на 90 % определяется двумя парами супертоксиантов: (КУ + NOx) и (ТЧ + КУ), которые в условиях ОС синтезируют еще более опасные соединения, обладающие мутагенными свойствами, т.е. способностью нарушать генетические программы клеток и вызывать в организме человека изменения наследственных свойств. Поэтому в требованиях к экологической безопасности автомобилей с ДВС должна учитываться суммарная канцерогенная составляющая ОГ.

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;



- ограничение содержания в моторных топливах ароматических и особенно полиароматических углеводородов, а также серы;
  - 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;
  - применение комбинированных адаптивных микропроцессорных систем управления и регулирования рабочих процессов ДВС и автомобилей в целом.
5. Необходимо ужесточение Европейских норм на уровни выбросов NOx, твердых частиц и БП с ОГ автомобилей, в первую очередь оборудованных дизелями, являющихся основными техногенными загрязнителями атмосферы городов канцерогенно-мутагенными ингредиентами.

### Литература

1. Канило П.М. Автотранспорт. Топливно-экологические проблемы и перспективы: монография / П.М. Канило. – Х.: ХНАДУ, 2013. – 272 с.
2. Канило П.М. Эколого-химические показатели автомобильных ДВС с учетом канцерогенности отработавших газов / П.М. Канило, М.В. Шадрин // Двигатели внутреннего сгорания: сб. науч. тр. – 2006. – № 2. – С. 154–159.
3. Канило П.М. Интегральные эколого-химические показатели автомобилей с поршневыми двигателями / П.М. Канило, М.В. Сарапина // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2007. – Вып. 20. – С. 68–74.
4. Лукачев С.В. Образование и выгорание бенз(а)пирена при сжигании углеводородных топлив / С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев, А.А. Горбатко. – М.: Машиностроение, 1999. – 152 с.
5. 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.
6. Канило П.М. Проблемы загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными супертоксиантами / П.М. Канило, В.В. Соловей, К.В. Костенко // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2011. – Вып. 52. – С. 47–53.
7. Канило П.М. Эколого-химические показатели автомобильных ДВС с учетом канцерогенности отработавших газов / П.М. Канило, М.В. Шадрин // Двигатели внутреннего сгорания: сб. науч. тр. – 2006. – № 2. – С. 154–159.
8. Канило П.М. Минимизация канцерогенной опасности энергоустановок / П.М. Канило, А.Л. Шубенко // Проблемы машиностроения: сб. науч. тр. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 73–80.
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.В. Парсаданов // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 22. – С. 86–92.
11. Канило П.М. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П.М. Канило, К.В. Костенко // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 23. – С. 107–113.
12. Канило П.М. Анализ эффективности использования альтернативных топлив на автотранспорте / П.М. Канило, К.В. Костенко // Проблемы машиностроения: сб. науч. тр. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 69–73.
13. Канило П.М. Будущее автотранспорта – альтернативные топлива и канцерогенная безопасность / П.М. Канило, М.В. Сарапина // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 31. – С. 40–49.

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

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2015 г.