Порядок визначення параметрів кореляційного рівняння такий:

$$\begin{cases} r = \dfrac{\Delta \lg N_i \cdot \Delta \lg R_i}{S_R \cdot S_N}, \text{ де} \\ S_R = \sqrt{(\Delta \lg R_i)^2}; \\ S_N = \sqrt{(\Delta \lg N_i)^2}; \\ S_{Nr} = S_N \sqrt{1 - r^2}. \end{cases} \quad (7)$$

Вирази (6) та (7) можна використовувати як для теоретичного визначення кореляційного зв'язку між R та N, так і для обробки експериментальних даних щодо емпіричного зв'язку між цими інтегральними показниками. На рис. 2 показано полігону кореляційного зв'язку між R та N для довірчого інтервалу $P = 95\%$.

Таким чином, створено інженерну методику визначення інтегральних показників діагностування технічного стану дизелів АНТ та встановлено кореляційний зв'язок між цими інтегральними показниками.

Ця методика допоможе об'єктивно підійти до прогнозування надійності та довговічності дизельних двигунів АНТ завдяки логістичному підходу, тобто складаючи інтегральні показники R та N як стохастичні параметри.

Список літератури:

1. Іващенко І.І., Приймаков О.Г. Прогнозування залишкового ресурсу та надійності дизелів авіаційної наземної техніки // Вісн. Харк. держ. техн. ун-ту сільськ. господарства. – 2003. – № 17. – С. 289–294. 2. Способ оценки ресурса дизеля до первой переборки / А.К. Костин и др. // Двигателестроение. – 1981. – № 11. – С. 47–48. 3. Краснокутський В.Н., Шунайлов Г.О., Іващенко І.І. Вібродіагностика розцентрування спряжених валів // Вестн. науки и техники. – 2002. – № 2–3. – С. 16–21. 4. Дизели, дизель-генераторы, газовые двигатели, газомотокомпрессоры и турбокомпрессоры / Номенклатурный справ. – М.: НИИинформтяжмаш, 1973. – 123 с. 5. Дизели, дизель-генераторы, газовые двигатели, газомотокомпрессоры и турбокомпрессоры / Номенклатурный справ. – М.: НИИинформтяжмаш, 1975. – 94 с. 6. Дизели, дизель-генераторы, газовые двигатели, газомотокомпрессоры и турбокомпрессоры / Номенклатурный справ. – М.: НИИинформтяжмаш, 1977. – 82 с. 7. Двигатели внутреннего сгорания / Номенклатурный справочник. Ч. 1. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1979. – 88 с. 8. Двигатели внутреннего сгорания / Номенклатурный справ. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1981. – 96 с. 9. Приймаков О.Г., Масягін В.І.. Втомленість авіаційних конструкцій та засоби її попередження // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ».– 2002. – № 1. – С. 99–105.

УДК 621.436.068.9

Е.Л. Меркиш, д-р техн. наук; О.Р. Игнатов, канд. техн. наук

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Исследования показывают, что в ближайшие 50 лет двигатели внутреннего сгорания (ДВС) будут основным источником энергии на автомобильном транспорте. Необходимость решения проблем уменьшения загрязнения окружающей среды (ОС), экономного использования природных ресурсов, удовлетворения требований клиента значительно повлияли на процессы совершенствования конструкции ДВС и улучшения качества применяемых топлив и моторных масел (рис. 1).

Применяемые моторные масла составляют группу нефтепродуктов, которая вносит весомый «вклад» в формирование токсичности выхлопа двигателей на стадии их эксплуатации. В процессе работы ДВС смазочное масло поступает в камеру сгорания двигателя через уплотнения цилиндропоршневой группы (ЦПГ), сгорает вместе с топливом и, таким образом, в основном формируется расход масла. Нарушения в конструкции и износ детали ЦПГ вызывает повышенный расход масла. О важности проблемы уменьшения расхода масла в транспортных ДВС свидетельствует тот факт, что на 100 легковых автомобилей в Германии приходится 40 % автомобилей, имеющих повышенный расход масла [1].

Задачи, связанные с расходом масла, имеют два аспекта. Первый – экономический, связанный с применением дорогостоящих, качественно улучшенных сортов масел, второй – экологический. Действие высоких температур и давлений в цилиндре двигателя способствует физико-химическим превращениям

смазочного масла и топлива, что в конечном итоге приводит к образованию токсических компонентов в отработавших и картерных газах двигателя и выбросу их в окружающую среду.

Увеличение расхода масла в ДВС происходит вследствие следующих причин:

- подачи масла через поршневые кольца в камеру сгорания;
- увеличения толщины масляной пленки на поверхности цилиндровой втулки после прохождения поршня и повышения ее средней температуры;
- процесса адсорбции – десорбции паров масла и топлива;
- адсорбирования на поверхности сажи (или других частиц) паров масла.

Попадая в камеру сгорания и картерное пространство двигателя, смазочное масло проходит через лабиринт уплотнений ЦГП, состоящий из комплекта поршневых колец и поверхностей поршня и втулки цилиндра. Такой лабиринт представляет каналы с переменным проходным сечением, по которым также происходит течение газов, состоящих из продуктов испарения и сгорания топлива. Суммарная величина эквивалентного проходного сечения ЦПГ может увеличиваться в тактах сжатия – расширения вследствие «вибрации» колец, а также износа деталей ЦПГ [2].

Под действием высоких температур, давлений и наличия местных гидравлических сопротивлений в уплотнении ЦПГ в жидкой фракции масла образуются пузырьки газа (явление кавитации). Они смешиваются с потоком газа утечки из камеры сгорания, повышая концентрацию токсических веществ в картере двигателя [3].

Конечным итогом вышеперечисленных внутрицилиндровых процессов является наличие в отработавших газах (ОГ) несгоревших углеводородов или углеводородной части твердых частиц (PM), происходящей от сгорания смазочного масла (PM_{LUBE}).

На рост интенсивности процессов адсорбции – десорбции между топливом и маслом влияет увеличение толщины масляной пленки и температуры масла.

В случае адсорбции паров топлива в масляной пленке и высоких температур в процессе сгорания – расширения наступает уменьшение вязкости верхнего слоя масла на поверхности втулки цилиндра. С учетом появления вихрей вследствие открытия выпускного клапана происходит испарение масла в процессе такта выпуска. Над донышком поршня образуется топливомасляный туман, который является источником несгоревших углеводородов, поступающих в систему выхлопа.

Пары масла, освободившиеся вследствие десорбции, могут окисляться. Однако окислению подвергается небольшая часть паров масла из-за резкого уменьшения коэффициента избытка воздуха в конце процесса сгорания. Следовательно, эта доля масла несущественно влияет на эмиссию углеводородов.

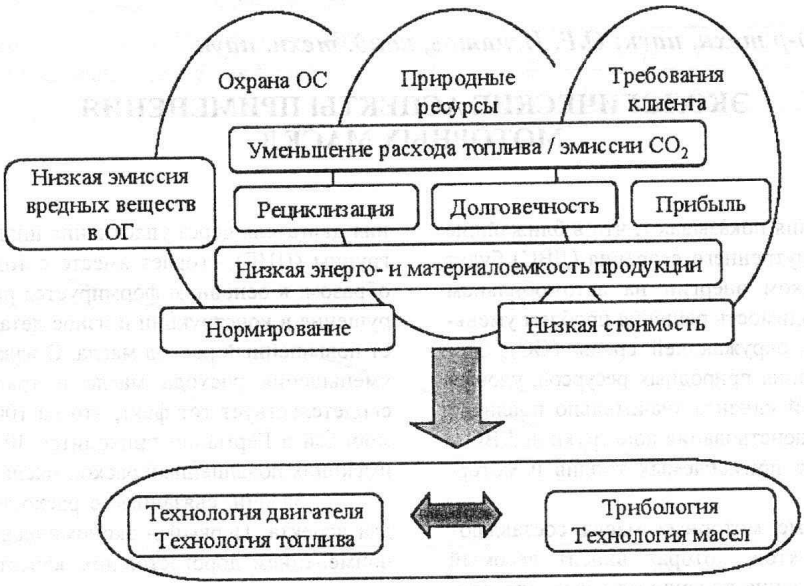


Рис. 1. Связь факторов, определяющих качество моторных масел

В результате действия высоких температур в цилиндре ДВС имеют место распад (пиролиз) и перестройка (пиросинтез) углеводородных структур паров масла. Это отрицательно влияет на степень токсичности ОГ. Вследствие таких процессов образуются тяжелые углеводороды PAC (Polycyclic Aromatic Compounds), к которым можно отнести PAH и гетероциклические углеводороды, содержащие в своей структуре атом азота, серы и кислорода.

Часть десорбированных паров масла попадает в систему выхлопа, пространства которой имеют низкую температуру. Низкая температура газов и незначительная концентрация в них кислорода способствуют эмиссии углеводородов (CH) с не перестроенными структурами. В результате испарения легких фракций масла, окисления и перегрева масляной пленки наступает образование и откладывание частиц лаков и нагаров на поверхности деталей ЦПГ. Поверхности таких частиц аккумулируют CH и их соединения. В результате перемещения поршня и колец в его канавках, утечек газов через неплотности ЦПГ, частицы лаков и нагаров попадают в ОГ и картер двигателя. Этот процесс также влияет на формирование PM.

Существование детерминированной связи между расходом смазочного масла и уровнем эмиссии токсичных компонентов в ОГ ДВС подтверждают испытания, проведенные в Познаньском технологическом университете, результаты которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Увеличение эмиссии токсических компонентов (в процентах) при двукратном увеличении расхода масла (q_0)

Двигатель	Вид пробы	CH	CO	NO_x
126A1.076 q_0 = 1,43 г/(кВт·ч)	(х) ECE R15 (г)	24 28,5	–2,5 –4	3 3
126A2.000 q_0 = 0,87 г/(кВт·ч)	(х) ECE R15 (г)	16,5 14,5	–2 –3,5	2,5 2,5
115C.076/52 q_0 = 0,91 г/(кВт·ч)	(х) ECE R15 (г)	9,5 11,5	–3 1	1 –1
D3.152UR/P–08 q_0 = 1,51 г/(кВт·ч)	(х) ECE R15 (г)	17,5 —	3 —	0,5 —

Испытания проводились на тормозной барабанной установке с автомобилями массой менее 3500 кг в соответствии с европейским ездовым циклом ECE R15. Реализованы холодные (х) и горячие (г) тесты. Подтвержден значительный рост эмиссии CH, в среднем на 18%, при двух видах испытаний – холодном и горячем. Для бензиновых двигателей отмечена тенденция незначительного уменьшения CO (2%) и увеличения NO_x – около 2%.

Для двигателей, предназначенных для автомобилей с массой более 3500 (дизельные двигатели с непосредственным впрыском), исследования выполнены по правилам ECE R49 (13-фазовый тест) на тормозной двигательной установке. Результаты сведены в табл. 2.

Подтверждено увеличение эмиссии CH и дымности $D_в$ для двигателей с самовоспламенением при росте расхода масла.

Среди более 200 составляющих ОГ двигателя группа CH является самой представительной. Некоторые углеводороды, например бензен, в значительном количестве попадают в ОС особенно в последнее время, когда он применяется в производстве топлив, свободных от Pb. Ароматическое кольцо бензена достаточно прочно, поэтому в реакции, например, с *OH, отрывается только атом водорода и образуется фенол (рис. 2) [4].

Полученные таким путем и присутствующие в атмосфере фенолы являются кислотными и часто токсическими. Высокая концентрация этого соединения (около 60 мг/дм^3) вызывает быструю смерть.

Другие CH, попадая в атмосферу из системы выхлопа автомобиля, под действием солнечного света вступают в реакцию с кислородом и соединениями азота, образуя перекиси, альдегиды, азотаны перекисей и озон (соединения фотохимического смога).

Таблица 2. Увеличение эмиссии токсических компонентов (в процентах) при двукратном увеличении расхода масла

Двигатель	Вид пробы	CH	$D_в$	CO	NO_x
SB3.1	ECE R49 $n = 1600$ мин$^{-1}$ ($N_e = N_{max}$)	18 25	13 12	3 1	1,5 –1
SW400	ECE R49 $n = 1600$ мин$^{-1}$ ($N_e = N_{max}$)	18 20	11 10	–2 –4	–1 2
4C90	ECE R49	25	—	–2	–1

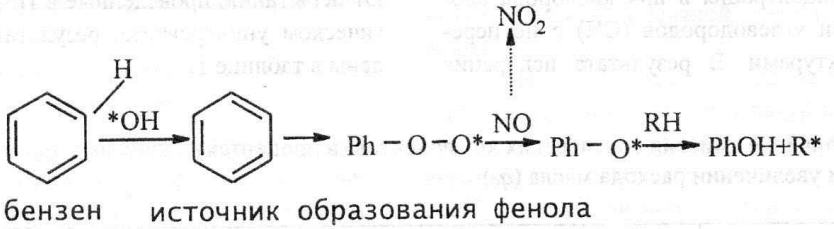


Рис. 2. Реакция образования фенола

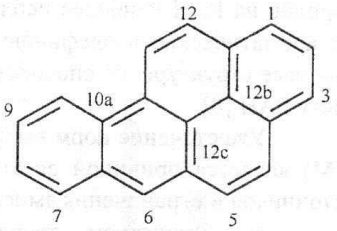
Токсичность CH зависит от их растворимости в воде и крови. Относительно сильные наркотики – ненасыщенные CH класса двуэтиловых не вызывают сильного отравления вследствие их незначительной растворимости в крови. Опасными являются ненасыщенные CH этилового ряда, так как они обладают большей способностью соединяться с кровью. Например, бутилен действует на организм как наркотик, раздражает дыхательные пути и имеет неприятный запах.

Особо опасными являются полициклические ароматические углеводороды PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons). Легкость аккумулирования в живых организмах и их последующее вредное действие на организмы обеспечивают их высокую токсичность.

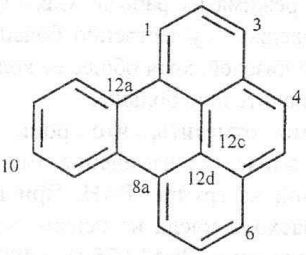
Таблица 3. Характеристики выбранных PAH

№	Соединения	Химический символ	Молекулярная масса, г/моль	Температура кипения, °C	Канцерогенность 1*	Мутагенность
1	Флуорантен	$C_{16}H_{10}$	202	375	–	0
2	Пирен	$C_{16}H_{10}$	202	393	–	+
3	Бензо(а)антрацен	$C_{18}H_{12}$	228	438	+	++
4	Хризен	$C_{18}H_{12}$	228	448	+	+
5	Бензо(в)флуорантен	$C_{20}H_{12}$	252	448	+	+
6	Бензо(I)флуорантен	$C_{20}H_{12}$	252	481	++	++
7	Бензо(к)флуорантен	$C_{20}H_{12}$	252	481	+	+
8	Бензо(е)пирен	$C_{20}H_{12}$	252	493	+	+
9	Бензо(а)пирен	$C_{20}H_{12}$	252	496	+++	+++
10	Дибензо (AC+AH) антрацен	$C_{22}H_{14}$	278	524	+	+
11	Антантрен	$C_{22}H_{12}$	276	547	–	+
12	Коронен	$C_{22}H_{12}$	300	602	+	+

Примечание. 1* – влияние: отсутствие (–), неисследованное (0), слабое (+), среднее (++), сильное (+++)



а)



б)

Рис. 3. Строение некоторых РАН:
а – бензо(а)пирена; б – бензо(е)пирена

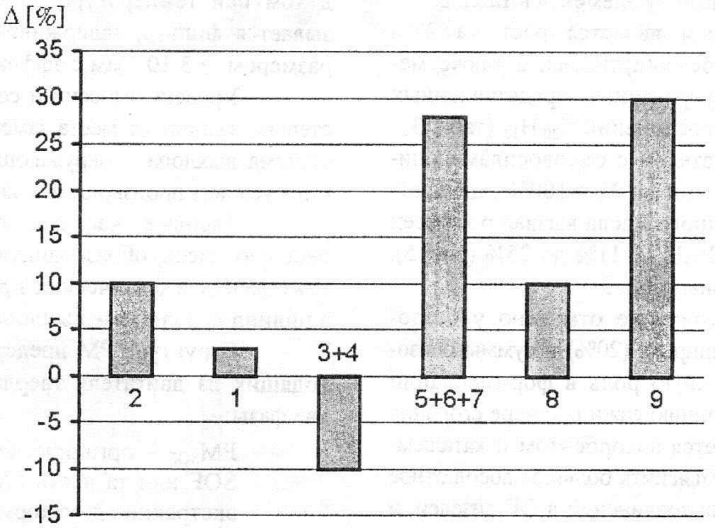


Рис. 4. Процентное изменение концентрации соединений РАН в отработавших газах бензинового автомобильного двигателя 126А1.176

РАН образуют группу соединений широко распространенных в природе. Их присутствие обнаружено в пробах ненарушенного грунта с больших глубин, возраст которых 100 000 лет. В структуру этих СН входят 4–6 ароматических колец. Большинство частиц РАН имеют симметричную неполярную структуру.

Среди них существуют соединения, которые отличаются канцерогенным, мутагенным и тератогенным действиями (табл. 3) [5]. Растворенные в жирах РАН могут аккумулироваться в жировых тканях человека и животных, вызывая впоследствии тяжелые отравления и хронические заболевания.

Наиболее заметными по активности и токсичности среди РАН являются бензо(I)флуорантен, бензо(а)пирен, бензо(е)пирен (рис. 3). Среди этой группы своей канцерогенностью и распространенностью выделяется бензо(а)пирен $C_{20}H_{12}$. Например, 10 ежемесячных инъекций этого вещества в количестве 0,05 мг вызывали новообразования в легких у 28% исследуемых крыс [4]. Наличие четырех бензеновых колец является необходимым условием, но недостаточным для биологической активности вещества. Например, бензо(е)пирен менее активен, чем изомер (а) (рис. 3).

Ракообразующее действие ароматических углеводородов основывается на присоединении частиц РАН к макрочастицам ДНК и РНК или белков. Ключевым этапом в процессе активизации $C_{20}H_{12}$ является преобразование его в окись. Легкость окисления РАН является мерой их активности. Образование бензо(а)пирена, как и других РАН, происходит в результате пиролиза тяжелых фракций моторных топлив и смазочного масла при сравнительно умеренных температурах 400–700 °С, в условиях сильного недостатка кислорода. При температуре свыше 1000 °С бензо(а)пирен разлагается на водород и сажу, поэтому его образование и сохранение возможно лишь в относительно холодных пристеночных слоях, в частности на поверхности втулки цилиндров ДВС, которая покрыта масляной пленкой [6]. Бензо(а)пирен хорошо адсорбируется и прочно удерживается в порах, образующихся в процессе сгорания мелких сажевых частиц. Практически только вместе с ними, т. е. в виде дыма, он выбрасывается в атмосферу и в таком виде попадает в легкие. Следует отметить, что содержание $C_{20}H_{12}$ в сажевых частицах может колебаться в крайне широких пределах в зависимости от

типа двигателей и режима их работы. Сажа бензиновых двигателей содержит существенно больше этого вещества, чем сажа дизелей, хотя общее ее количество во втором случае значительно больше.

Необходимо отметить, что рост расхода масла по-разному влияет на изменение эмиссии отдельных соединений из группы РАН. При двукратном увеличении расхода масла на бензиновом автомобильном двигателе типа 126А1.076 ($n = 4000$ мин$^{-1}$, $N_e = 100\%$) наблюдается даже небольшое уменьшение выбросов, например, для суммы бензо(а)антрацена и хризена (рис. 4). Номер соединения на рисунке соответствует порядковому номеру элемента в табл. 3.

Особенно важным является рост на 28% наиболее токсического бензо(а)пирена, а также менее токсичных бензофлуорантенов, представленных на графике суммой трёх соединений $C_{20}H_{12}$ (табл. 3).

В случае с двигателем с самовоспламенением, типа 4С90 ($n = 3800$ мин$^{-1}$ и $N_e = 100\%$), двукратный рост расхода смазочного масла вызвал рост всех измеренных соединений РАН от 11% до 25% (рис. 5). Обозначения представлены табл. 3

Наибольшее увеличение отмечено у бензо(а)пирена (25%), бензо(е)пирена (20%) и суммы бензофлуорантенов (20%). Важную роль в формировании эмиссии РАН отводят наличию сажи в камере сгорания двигателя, которая является адсорбентом и катализатором [7]. Этим можно объяснить большое абсолютное количество ароматических соединений в ОГ дизелей, и подтверждением можно считать отмеченный рост РМ на 17% при проведении указанного эксперимента.

Эмиссия РАН зависит от вида применяемого смазочного масла. В случае минеральных масел важным является наличие ароматических, олефиновых и парафиновых соединений в общей массе масла. С позиции склонности к перестройке структуры углеводородов на РАН наиболее неблагоприятными считают ароматические и олефиновые соединения. Парафиновые структуры не способствуют существенному росту РАН [8].

Ужесточение норм выбросов твердых частиц (РМ) является причиной всестороннего анализа их источников и ограничения эмиссии (рис. 6).

Под понятием твердых частиц ($PM_T = PM_{TOTAL}$) понимается твердая или жидкая, органическая или неорганическая масса, которая осаждается на абсолютном фильтре при прохождении через него потока отработавших газов, разбавленных воздухом при температуре 52 ± 3 °С. Абсолютным называется фильтр, задерживающий твердые частицы размером $\geq 3 \cdot 10^{-4}$ мм с эффективностью 99%.

Уровень эмиссии и состав РМ в значительной степени зависит от места замера в системе цилиндра – система выхлопа – окружающая среда. Важным являются условия производимых замеров эмиссии РМ [9].

Твердые частицы представляют полидисперсную смесь, образованную в результате сложных химических и физических процессов, происходящих в цилиндре и системе выхлопа.

Структура РМ представлена на рис. 7. В выходящих из двигателя твердых частицах различают две фазы:

- PM_{SOF} – органическая растворимая фракция SOF или та часть РМ, которая подвергается экстракции двухлорметанолом CH_2Cl_2;
- PM_{INSOL} – нерастворимая фракция INSOL, основой которой является твердый углерод («solid», PM_c), приближенный к форме графита [10, 11].

Кроме показанных на рис. 7 элементов, в состав PM_{INSOL} входят металлы и частицы, содержащие углерод RPM (Residual Particulate Mass).

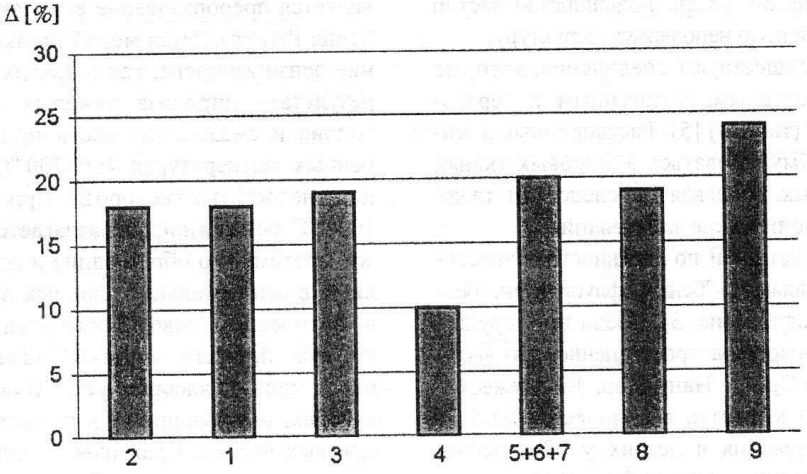


Рис. 5. Процентное изменение концентрации соединений РАН в отработавших газах дизельного автомобильного двигателя 4С90

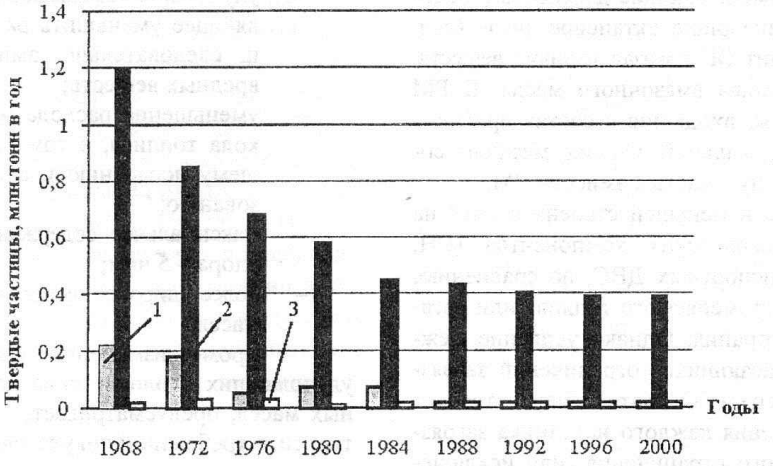


Рис. 6. Эмиссия твердых частиц в Германии:
1 – ДВС; 2 – энергетика и промышленность; 3 – бытовое хозяйство

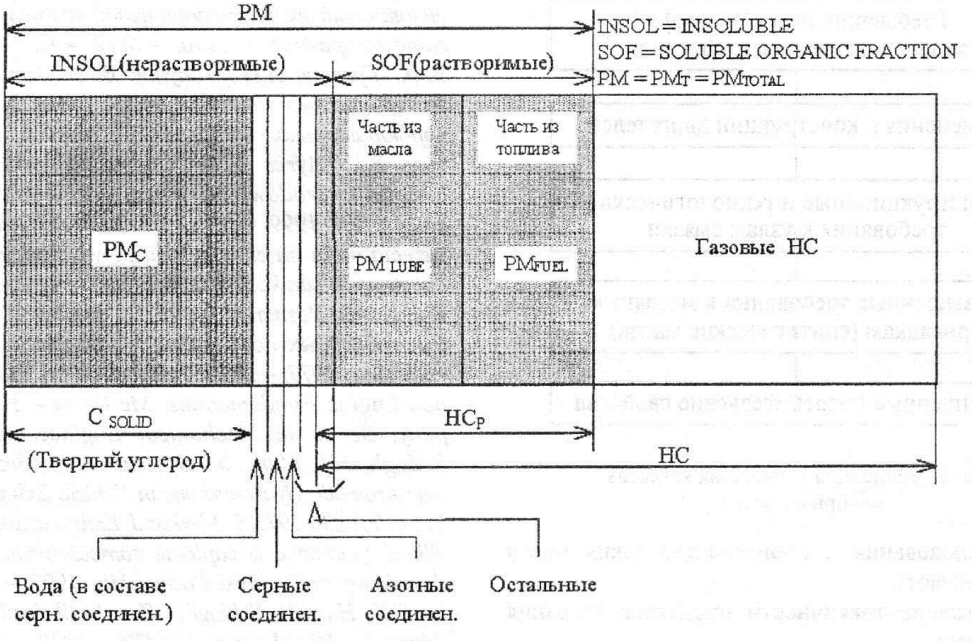


Рис. 7. Схема строения твердой частицы

Эмиссия PM в бензиновых двигателях невелика и «обязана» наличию соединений свинца и серы в топливе. Образование углеводородной части PM (HC_P) в этих двигателях в основном формируется применяемым смазочным маслом и в незначительной степени – неполным сгоранием топлива.

Количество твердых частиц, образующихся в двигателях с самовоспламенением, значительно больше вследствие присутствия в ОГ частиц сажи, которые выполняют роль адсорбентов. Исследования показывают, что доля твердых частиц, происходящая от смазывающего масла (PM_{LUBE}), в общей массе частиц (PM_{TOTAL}) может колебаться от 2–25% [7] до 30% [10]. При этом отмечается существенная зависимость величины выбросов от режимов работы ДВС. Наименьшая эмиссия наблюдается при номинальном и полном нагружениях двигателя, наибольшая (повышенный расход масла) при низких частотах и нагрузках. Что касается органической растворимой фракции PM_{SOF}, то доля в ней смазочного масла может составлять от 16 до 80% [7, 10].

PM содержит металлы, образующиеся в результате износа элементов двигателя, а также наличия примесей в топливе. Особенно опасными являются оксиды кремния и алюминия. Источником металла может быть смазочное масло, металлические

добавки к топливу, уменьшающие дымность (соединения бария) и повышающие октановое число (свинец). Детальный анализ ОГ показал наличие веществ, образованных из состава смазочного масла. В РМ обнаружены элементы, входящие в состав присадок масла: цинк, фосфор, кальций. Однако металлы составляют незначительную часть в эмиссии РМ.

Расход масла в меньшей степени влияет на уровень эмиссии токсических компонентов (СН, РАН, РМ) в ОГ транспортных ДВС, по сравнению, например, с сортом применяемого топлива или организации процесса сгорания. Однако усиление международных норм, касающихся ограничений загрязнения окружающей среды ОГ автомобилей, требует детального рассмотрения каждого источника загрязнения и максимального ограничения (или исключения) его деятельности. В связи с этим определились тенденции исследований по улучшению качества моторных масел и условий их эксплуатации (рис. 8).

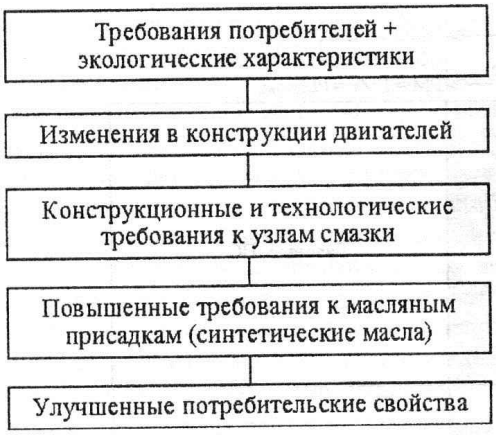


Рис. 8. Тенденция улучшения качества моторных масел

Исследования и производство таких масел предусматривают:

- снижение токсичности продуктов сгорания масел;
- улучшение смазывающих свойств, позволяющее уменьшить расход топлива на 2,7% и, следовательно, эмиссию CO_2 и других вредных веществ;
- уменьшение расхода масла до 0,1% от расхода топлива, в том числе благодаря меньшему испарению и склонности к пенообразованию;
- максимальное содержание фосфора – 0,12%, хлора – 5 чнм;
- более широкое использование синтетических масел.

Кроме изменений фракционного состава, улучшающих экологические характеристики моторных масел, предусматривается более полное удовлетворение требований покупателей.

Список литературы:

1. TUV. Auto – Report 90/91. VDI – Verlag GmbH. Dusseldorf, 1991. 2. Станиславский Л.В., Игнатов О.Р., Коваленко А.А. Гидравлические характеристики уплотнений цилиндропоршневой группы дизеля // Двигателестроение. – 1990. – №12. – С. 7–9. 3. Кутенёв В.Ф., Гусаков А.П., Топунов В.Н. Методы борьбы с токсичностью отработавших газов автомобильных карбюраторных двигателей. – Москва, 1972. 4. Alloway B.I., Ayres D.C. Chemiczne podstawy zanieczyszczania srodowiska. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999. – str. 423. 5. Merkisz J. Studium wplywu zuzycia oleiu na emisies zwiazkow toksyczwych wszybkoobrotowych silnikach spalinowych. – Poznan: Wydawnictwo Politechniki Poznanskiej, 1992. 6. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с. 7. Heywood I.B. Luternal Combustion Engine Fundamentals. Mc Graw – Hill Book Company. Series in Mechanical Engineering USA, 1988. 8. Zaghini N., Mangolini S., Arteconi M., Sezzi F.: Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in Vehicle Exhanst Gas. SAE – Paper 730836/1973. 9. Merkisz J. Emisja czasntr statych pozez silkini spalinowe o zaplome samoczynnym. Poznan: Wydawnictwo Politechniki Poznanskiej, 1997. – 240 с. 10. Moser F.X., Haas E., Schlogl H. Zur Partikelemission von Nutzfahrzeug – Dieselmotoren // MTZ. – 1990. – 515 с.

УДК 629.113.006

А.В. Гогайзель, канд. техн. наук, В.А. Зуев, инж., Ю.В. Горбик, инж.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Традиционно топливная экономичность автомобиля оценивается расходом топлива – контрольным, при движении по городскому и магистральному циклу, в режиме установившегося движения – и топливно-скоростной характеристикой на магистрально-холмистой дороге. Методы их практи-