

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ НЕЙТРАЛИЗАТОРА АВТОМОБИЛЬНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.К. Иванов, к.т.н., доц., Ю.В. Галышев, д.т.н., доц.
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Представлены результаты испытаний автомобильного бензинового двигателя, проведенных с целью получения экспериментальных данных для оценки влияния эксплуатационных факторов на эффективность работы нейтрализатора для снижению выбросов углеводородов и оксида углерода. На основании анализа полученных результатов испытаний выделены режимы работы и факторы, в наибольшей степени влияющие на содержание указанных токсичных компонентов в отработавших газах. Даны рекомендации по реализации дополнительных возможностей и резервов для выполнения норм токсичности по заявленному экологическому классу.

В настоящее время широкое распространение каталитических нейтрализаторов позволяет до минимума сократить вредные выбросы в отработавших газах (ОГ) легковых автомобилей с бензиновыми двигателями. Для подтверждения соответствия заявленному экологическому классу автомобили периодически подвергаются испытаниям, включающим так называемый стандартный ездовой цикл. Европейский ездовой цикл (NMEFZ), принятый в большинстве Европейских стран, включая Российскую Федерацию, с максимальным приближением моделирует условия движения автомобиля в городе и частично в загородном режиме [1]. Однако существует целый ряд факторов, связанных с режимами работы двигателя во время испытаний и с неисправностями, возникающими в период эксплуатации автомобиля, воздействие которых может препятствовать безусловному выполнению существующих норм выбросов углеводородов (СН) и оксида углерода (СО) для автомобиля по заявленному экологическому классу.

К наиболее неблагоприятным режимам работы бензинового двигателя, затрудняющим выполнение заявленных норм токсичности по ездовому циклу, следует отнести режимы холодного пуска и прогрева, а также часто повторяющиеся режимы ускорения и торможения автомобиля на низших передачах [1, 2]. Вынужденное использование обогащенного состава смеси для надежного запуска и последующей устойчивой работы непрогретого

двигателя снижает эффективность окислительных реакций в нейтрализаторе в условиях дефицита кислорода, что приводит к резкому увеличению выбросов СН и СО. Приходится учитывать, что активное окисление вредных веществ в нейтрализаторе начинается только при достижении рабочей температуры свыше 300 °С, а замкнутый контур в электронном блоке управления (ЭБУ) с корректировкой состава смеси от датчика кислорода (ДК) не включается, пока температура керамического элемента ДК не достигнет значения примерно 350 °С [3]. Таким образом, при запуске холодного двигателя требуется определенное время для прогрева нейтрализатора и управляющего ДК до достижения рабочих температур, при которых осуществляется эффективная нейтрализация вредных компонентов ОГ. Поскольку проверка автомобиля на соответствие заявленному экологическому классу свыше норм Евро-3 начинается с отбора ОГ непосредственно после пуска холодного двигателя, любая задержка включения в активную работу нейтрализатора, вызванная какими-либо неполадками в условиях непрогретого двигателя, сказывается на эффективности очистки ОГ от СН и СО. Известно также, что на неустановившихся режимах работы двигателя, связанных с ускорением и торможением автомобиля при испытаниях по Европейскому ездовому циклу, максимум выбросов СО и СН может быть намного выше, чем на установившихся режимах работы [1, 2].

К числу неисправностей, наиболее неблагоприятно влияющих на количество вредных выбросов в период эксплуатации двигателя, в первую очередь следует отнести пропуски воспламенения рабочей смеси в отдельных цилиндрах двигателя, вызванные перебоями в системах зажигания и топливоподдачи, а также выход из строя управляющего ДК. Причем известно, что эти неисправности в первую очередь приводят к увеличению выбросов СН и в меньшей степени СО [4–6]. Поскольку полностью исправные автомобили, находящиеся в эксплуатации, часто с трудом укладываются в заявленные нормы вредных выбросов, любой из перечисленных эксплуатационных дефектов двигателя может вызвать превышение этих норм.

В условиях эксплуатации всесторонняя проверка автомобилей на предмет соответствия заявленному экологическому классу является весьма дорогостоящим и труднодоступным мероприятием, поскольку для полного воспроизведения ездового цикла необходимо наличие специализированного стенда с беговыми барабанами и дополнительным оборудованием. Учитывая это обстоятельство, в данной работе представлен упрощенный способ оценки влияния отдельных режимов и других вышеупомянутых эксплуатационных факторов на количество выбросов СН и СО с целью определения возможностей штатного нейтрализатора минимизировать эти выбросы. Эффективность работы нейтрализатора оценивалась путем сравнения экспериментальных данных по выбросам указанных компонентов в системе выпуска ОГ до и после нейтрализатора.

Для получения экспериментальных данных в стационарных условиях использовался автомобиль марки Chevrolet Cruze, оснащенный четырехцилиндровым 16-клапанным двигателем FD3 рабочим объемом 1600 см³ с распределенным впрыском бензина во впускной трубопровод и штатным нейтрализатором. Сравнительные испытания проводились с помощью диагностического комплекса FSA-740 фирмы Bosch [7], укомплектованным газоанализатором BEA-050 с программным обеспечением ESA (Emission-System-Analysis), позволяющим быстро регистрировать значения упомянутых компонентов СН (в единицах ppm) и оксида углерода СО (в % по объему), свободного кислорода O₂ и углекислого газа CO₂ (в % по объему), а также вычислять значения состава смеси по газовому анализу. Регистрация этих значений проводилась с помощью фото- и видеофиксации, фрагмент которой показан на рис. 1. Диагностическая программа ESI[tronic] 2.0 позволяла оперативно фиксировать значения температуры рабочих жидкостей, частоты вращения коленчатого вала (*n*), угла опережения зажигания и других параметров двигателя, а также вести наблюдения за характером изменения напряжения управляющего ДК.

Весь объем испытаний был разделен на два цикла. В первом цикле проводились испытания на режимах холодного пуска и прогрева двигателя, а во втором — все испытания проходили при полностью прогретом двигателе на режимах холодного хода и неустановившихся режимах с небольшими значениями *n*.

При отсутствии специализированной холодильной камеры испытания в первом цикле проводились в боксе при начальной температуре порядка 15 °С и состояли из трех стадий. Первая стадия проходила в штатных условиях без имитации каких-либо неисправностей в системе

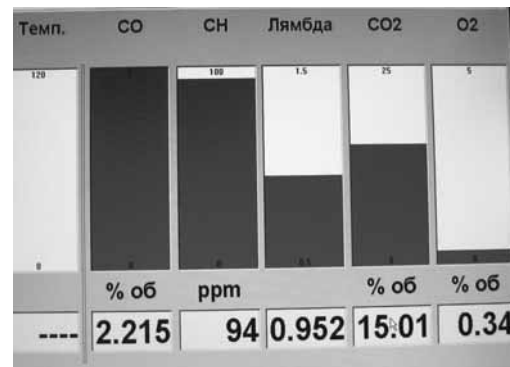


Рис. 1. Фрагмент значений газового анализа и состава смеси (лямбда), полученных с помощью программы ESA

управления двигателем (СУД) с отбором ОГ из выпускной трубы. На второй стадии испытаний управляющий ДК был отключен и двигатель работал по разомкнутому контуру без обратной связи от ДК к ЭБУ с имитацией неисправности в электропроводке, связывающей ДК с ЭБУ. На третьей стадии испытаний вместо установленного штатного управляющего ДК был установлен штуцер и отбор ОГ производился из системы выпуска ОГ до нейтрализатора. Для идентичности условий испытаний каждая стадия проводилась в разные дни, чтобы двигатель успел полностью остыть (до 15 °С). Длительность каждой стадии испытаний составляла 300 с и фиксировалась с помощью секундомера. Измерения производились сначала через 10 с, 30 с и затем через каждые 30 с после пуска двигателя. При этом диапазон изменения температуры охлаждающей жидкости находился в пределах от 15 °С перед запуском до 70–75 °С в конце испытаний. По мере прогрева двигателя значение *n* постепенно снижалось от 1100 об/мин до 800 об/мин, а угол опережения зажигания находился в пределах 2–4 град ПКВ до ВМТ.

Наиболее важные результаты испытаний представлены на рис. 2, где показаны зависимости эмиссии СН и СО от времени работы холодного двигателя после запуска.

Анализ представленных зависимостей показывает, что содержание СН и СО в первые секунды (10–30 с) после пуска двигателя было достаточно велико независимо от способа отбора ОГ. Однако на первой стадии испытаний в штатных условиях отбора ОГ содержание СН и СО несколько меньше, чем содержание тех же компонентов до нейтрализатора. Этот факт означает, что окислительные реакции в нейтрализаторе начинались спустя непродолжительное время после запуска холодного двигателя. Значительно быстрее наблюдалось снижение этих компонентов спустя 60 с после запуска, что обусловлено началом подачи активного сигнала от управляющего

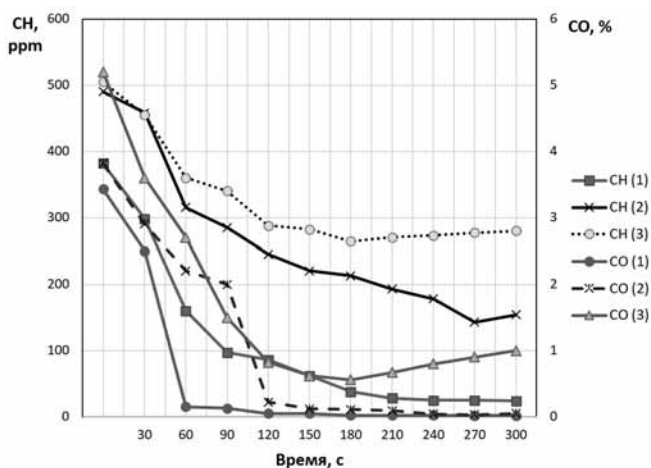


Рис. 2. Зависимости эмиссии СН и СО от времени работы холодного двигателя после запуска при различных условиях:

СН (1) и СО (1) — значения на первой стадии испытаний в штатных условиях; СН (2) и СО (2) — значения на второй стадии без ДК; СН (3) и СО (3) — значения на третьей стадии без ДК и с отбором ОГ до нейтрализатора

ДК (по данным программы ESI[tronic] 2.0) и постепенному переходу к составу смеси, близкому к стехиометрическому. В дальнейшем значения СН постепенно снижались, но оставались несколько завышенными (25–90 ppm), несмотря на достижение нейтрализатором рабочей температуры порядка 550 °С. При этом следует отметить, что на протяжении этой стадии испытаний содержание O_2 в ОГ было близко к нулю и, видимо, его не хватало для полного окисления СН.

На второй стадии испытаний при отсутствии управляющего напряжения ДК содержание СН после нейтрализатора значительно возросло из-за подачи более богатой смеси и, соответственно, меньшего содержания O_2 в ОГ. На третьей стадии испытаний при отборе ОГ до нейтрализатора содержание СН и СО возросло еще больше. Сравнивая результаты испытаний на второй и третьей стадиях видно, что даже в отсутствие управляющего напряжения ДК нейтрализатор способен существенно снижать выбросы СН и СО на режиме прогрева двигателя. Однако для этого необходимо располагать большим количеством O_2 в ОГ, что на режимах холодного пуска и прогрева практически недостижимо без использования системы дополнительной подачи воздуха.

Во втором цикле испытаний для оценки влияния других факторов были выбраны четыре режима работы двигателя в исправном состоянии и четыре режима работы с имитацией распространенных дефектов, возникающих в эксплуатации. Первые четыре режима включали холостой ход (XX) при постоянных значениях $n = 1000$ и

3000 об/мин, режим разгона двигателя от 1000 до 3000 об/мин при открытии педали газа на 20 % и режим торможения двигателя от 3000 до 1000 об/мин при сбросе педали газа. Выбор режимов разгона и торможения двигателя без внешней нагрузки в диапазоне указанных значений n обусловлен желанием в стационарных условиях проведения испытаний приближенно воспроизвести неустановившиеся режимы работы двигателя при движении автомобиля по Европейскому ездовому циклу на первой и второй передачах. Остальные четыре режима проводились только на установившихся режимах XX при тех же значениях n , но с отключением работы одного цилиндра двумя разными способами. Сначала отключалась одна форсунка, имитируя неисправность в системе топливоподдачи, а затем отключение цилиндра производилось путем установки заведомо неисправной свечи, имитируя дефект в системе зажигания.

Результаты испытаний представлены на рис. 3, где показаны значения содержания отдельных компонентов в ОГ и вычисленный по данным газового анализа приблизительный состав смеси (λ) на вышеперечисленных режимах работы. Причем на неустановившихся режимах значения всех компонентов зафиксированы в момент максимальных значений СН и СО.

Для оценки эффективности работы нейтрализатора на различных режимах работы, включая режимы с неисправностями, отбор ОГ производился из разных мест. На первой стадии испытаний, результаты которых представлены в верхней части рис. 3, отбор ОГ осуществлялся обычным способом из штатной выпускной системы. На второй стадии испытаний, результаты которых представлены в нижней части рис. 3, отбор ОГ производился из штуцера, установленного до нейтрализатора на месте крепления управляющего ДК. При этом разъем управляющего ДК был отключен и, следовательно, система управления двигателя работала по разомкнутому контуру, несколько обогащая рабочую смесь.

Из анализа представленных на рис. 3 результатов испытаний следует, что при отборе ОГ из штатной выпускной системы и наличии каталитического нейтрализатора в рабочем состоянии выбросы СН и СО на установившихся режимах близки к нулевым значениям.

Наблюдается некоторый всплеск значений этих компонентов на переходном режиме (режим 3), обусловленный кратковременным обогащением состава смеси. Тем не менее, выбросы СН на рассматриваемых неустановившихся режимах после нейтрализации сокращаются на порядок по сравнению с выбросами до нейтрализатора.

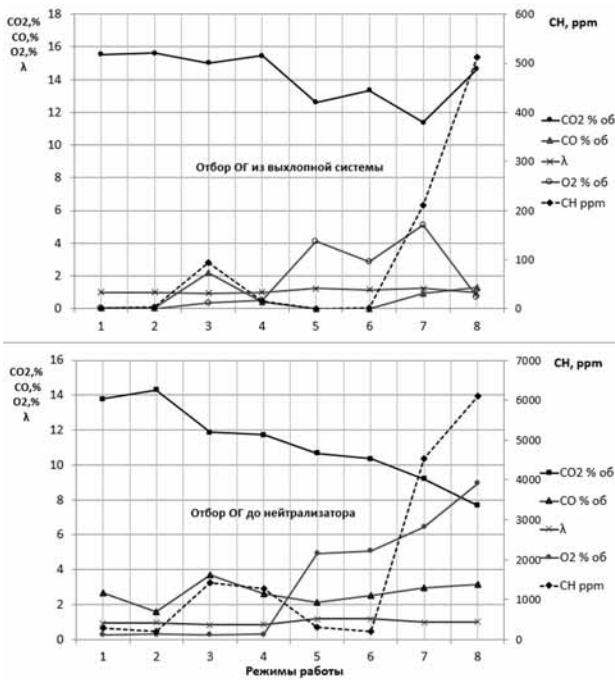


Рис. 3. Значения содержания отдельных компонентов в отработавших газах и состав смеси λ на различных режимах работы двигателя:

1 — ХХ при $n = 1000$ об/мин; 2 — ХХ при $n = 3000$ об/мин; 3 — режим ускорения от $n = 1000$ до $n = 3000$ об/мин; 4 — режим торможения от $n = 3000$ до $n = 1000$ об/мин; 5 — ХХ при $n = 1000$ об/мин с отключением форсунки; 6 — ХХ при $n = 3000$ об/мин с отключением форсунки; 7 — ХХ при $n = 1000$ об/мин с неисправной свечой; 8 — ХХ при $n = 3000$ об/мин с неисправной свечой

Выключение одного цилиндра из рабочего процесса двигателя путем отключения форсунки (режимы 5 и 6) не вызывает ощутимого повышения выбросов СН и СО по сравнению с выбросами исправного двигателя при отборе ОГ из штатной выхлопной системы благодаря избыточному содержанию O_2 в ОГ. В этом случае кратковременное выключение из работы цилиндра не представляет опасности для нормальной работы нейтрализатора. Иная картина наблюдается в случае выключения из работы цилиндра вследствие отсутствия рабочей искры при исправной форсунке (режимы 7 и 8). Такой дефект сразу многократно увеличивает выбросы СН по сравнению с выбросами исправного двигателя. Хотя и в этом случае выброс СН при отборе ОГ после нейтрализатора на порядок меньше, чем до нейтрализатора, что свидетельствует об эффективности его работы. Однако даже кратковременная работа с таким дефектом опасна, поскольку значительная часть топлива догорает в элементах нейтрализатора, разогревая его до недопустимых температур и разрушая его структуру. Приведенный пример показывает, что даже отдельные пропуски рабочих циклов, вызванные дефектами в системе зажигания, крайне

нежелательны из-за резкого повышения выбросов СН и опасности выхода из строя нейтрализатора. Поэтому в большинстве современных автомобилей система управления, распознав данный дефект, выключает форсунку в цилиндре, где происходят пропуски воспламенения рабочей смеси.

Подводя итоги проделанной работы, можно сделать следующие основные выводы.

Дана количественная оценка влияния отдельных эксплуатационных факторов на содержание СН и СО в ОГ с отбором газов до и после нейтрализатора.

Анализ результатов первого цикла испытаний (рис. 2) показывает, что проверяемый штатный нейтрализатор при включении управляющего ДК способен практически на порядок снизить содержание СН и СО в ОГ на режимах холодного пуска и прогрева. Вследствие нехватки O_2 для более эффективных окислительных реакций имеется определенный резерв для дальнейшего снижения СН (30–100 ppm), который может быть реализован за счет сокращения времени подогрева ДК и установки системы дополнительной подачи воздуха на входе в нейтрализатор.

Из анализа результатов второго цикла испытаний (рис. 3) следует, что при полностью прогревом двигателе и исправном контуре управления от ДК нейтрализатор эффективно снижает выбросы СН и СО до минимальных значений на всех проверяемых режимах с малыми расходами смеси. Существенный ресурс по снижению выбросов СН появляется при возникновении эксплуатационных дефектов, вызывающих пропуски рабочих циклов из-за неисправностей в системе зажигания.

Практическое значение предлагаемого способа оценки влияния эксплуатационных факторов заключается в возможности использования результатов испытаний для определения резервов по снижению токсичных компонентов в ОГ автомобиля в случаях превышения установленных норм.

Литература

1. Системы управления бензиновыми двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. — М. : ООО «Книжное издательство "За рулем"», 2005. — 432 с.
2. Токсичность автомобильных двигателей: Учеб. Пособие/ К.А. Морозов. — М. : МАДИ (ТУ), 1997. — 84 с.
3. Лещенко В.П. Кислородные датчики. — М. : Легион-Автомобиль, 2003. — 112 с.
4. Кульчицкий А.Р. Токсичность поршневых ДВС. Экспериментальная оценка экологического уровня двигателя: учеб. пособие. — Владимир : Изд. Влад. гос. ун-та, 2011. — 116 с.
5. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие/К.А. Кульчицкий. — Владимир : Владим. гос. ун-т. — 2-е изд. — М. : Акад. проект, 2004. — 398 с.
6. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. — М. : Изд. Российского университета дружбы народов, 1998. — 216 с.
7. Диагностика двигателей. Лабораторный практикум на диагностическом комплексе FSA-740: учеб. пособие/ А.К. Иванов. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 30 с.