

ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

УДК 621.436

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ В ПЕРИОД ПРОГРЕВА ПОСЛЕ ХОЛОДНОГО ПУСКА

С.В. Гусаков, А.З. Шарипов, А.А. Меньших

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В статье рассматриваются проблемы снижения выбросов вредных веществ в период прогрева автомобильных двигателей с искровым зажиганием после холодного пуска. В этот период вследствие низких температур происходит неполное сгорание топлива, а эффективность каталитического нейтрализатора низкая. В статье рассмотрен метод повышения эффективности прогрева двигателя и нейтрализатора путем применения активных химических продуктов термического разложения бензина.

Ключевые слова: токсичность, двигатель внутреннего сгорания, холодный пуск, быстрый прогрев, активные химические продукты разложения бензина.

Автомобиль является основным источником вредных выбросов в крупных городах и промышленных мегаполисах. Несмотря на кризисные явления в мировой экономике, автомобильный парк продолжает расти. Поэтому промышленно развитые страны постоянно ужесточают нормативные требования по ограничению вредных выбросов с отработавшими газами (ОГ) автомобильных двигателей, ведущие мировые производители автомобилей и научные центры проводят поисковые исследования по разработке новых высокоэффективных технических решений по совершенствованию их экологических качеств. Международные экологические стандарты для автотранспорта, основными из которых являются Правила 83 и 49 ЕЭК ООН и Федеральный стандарт США, периодически ужесточают нормативные требования по выбросу вредных веществ транспортными средствами, учитывая климатические особенности региональных условий эксплуатации (регионы с жарким и холодным климатом, высокогорье и др.).

Анализ режимов работы автомобильного бензинового двигателя в условиях городской эксплуатации показывает, что значительное влияние на суммарные вредные выбросы оказывает режим работы непрогретого двигателя после его холодного пуска. Принятый ранее в Правилах 83 ЕЭК ООН (поправки 02 и 03) го-

городской ездовой цикл автомобилей массой до 3,5 т (в основном для легковых и грузопассажирских автомобилей) предусматривал перед началом испытаний прогрев двигателя в течение 40 сек. после холодного пуска. Испытания проводились в помещении при выдержке автомобиля и стабилизации его теплового состояния в течение не менее 8 час. при температуре от 20 до 30 °С.

Однако такая процедура испытаний не отражает условия эксплуатации автотранспорта в северных регионах евро-азиатского континента, в Скандинавских странах и России, где средняя температура в зимнее время (3—6 месяцев в году) опускается ниже 0 °С. Такие условия эксплуатации автомобиля увеличивают выброс оксида углерода и углеводородов в 1,5—2 раза, причем большая часть повышенных вредных выбросов приходится на период работы непрогретого двигателя. Поэтому уже в Правилах 83.04 ЕЭК ООН (ЕВРО-4) внесено изменение в городской ездовой цикл (исключена 40-секундная фаза предварительного прогрева двигателя). Испытания и отбор пробы ОГ для газового анализа начинаются с 12 сек. работы двигателя на холостом ходу. Однако и эта процедура испытаний не отражала условия эксплуатации автомобилей в северных странах. В последующем изменении в Правилах 83.04—83.05 ЕЭК ООН (ЕВРО-4) введено дополнительное испытание охлажденного до -7 °С автомобиля по первой городской фазе ездового цикла и введены отдельные нормы на выброс оксида углерода и углеводородов автомобилей за эту фазу испытаний. Такое изменение процедуры испытаний с одновременным ужесточением нормированных вредных выбросов более реально отражает условия эксплуатации автомобиля в зимнее время. Одновременное ужесточение нормированных вредных выбросов в новых поправках к Правилам 83 ЕЭК ООН (нормы ЕВРО-4 — ЕВРО-6) потребовали от производителей введения в конструкцию автомобиля и двигателя новых технических решений, обеспечивающих эффективную работу системы бифункциональной нейтрализации в период прогрева двигателя, особенно при отрицательных температурах окружающей среды.

На рисунке 1 показан график ездового цикла Правил 83 ЕЭК ООН, который включает пять фаз движения автомобиля.

Ездовой цикл начинается с холодного пуска двигателя и после работе на режиме холостого хода в течение 12 сек. Первые четыре фазы включают участки, имитирующие городское движение автомобиля. Первая фаза практически вся протекает в режиме прогрева автомобиля и двигателя. Пятая фаза имитирует высокоскоростное загородное движение автомобиля. В нижней части рис. 1 показаны три гистограммы массовых выбросов оксида углерода, углеводородов и оксидов азота за каждую фазу ездового цикла. Вариант А соответствует выбросам с классической конструкцией выпускной системы при удаленности реакторной полости нейтрализатора от двигателя 1230 мм, а вариант Б — приближенный нейтрализатор, удаленность реактора от двигателя 850 мм. Вариант В предусматривает конструкцию системы выпуска с так называемым катколлектором, то есть нейтрализатор конструктивно сформирован как единое целое с выпускным коллектором двигателя. При этом удаленность реакторной полости нейтрализатора от двигателя минимальная и составляет 200 мм. Справа приведены суммарные массовые вредные выбросы автомобиля за весь ездовой цикл.

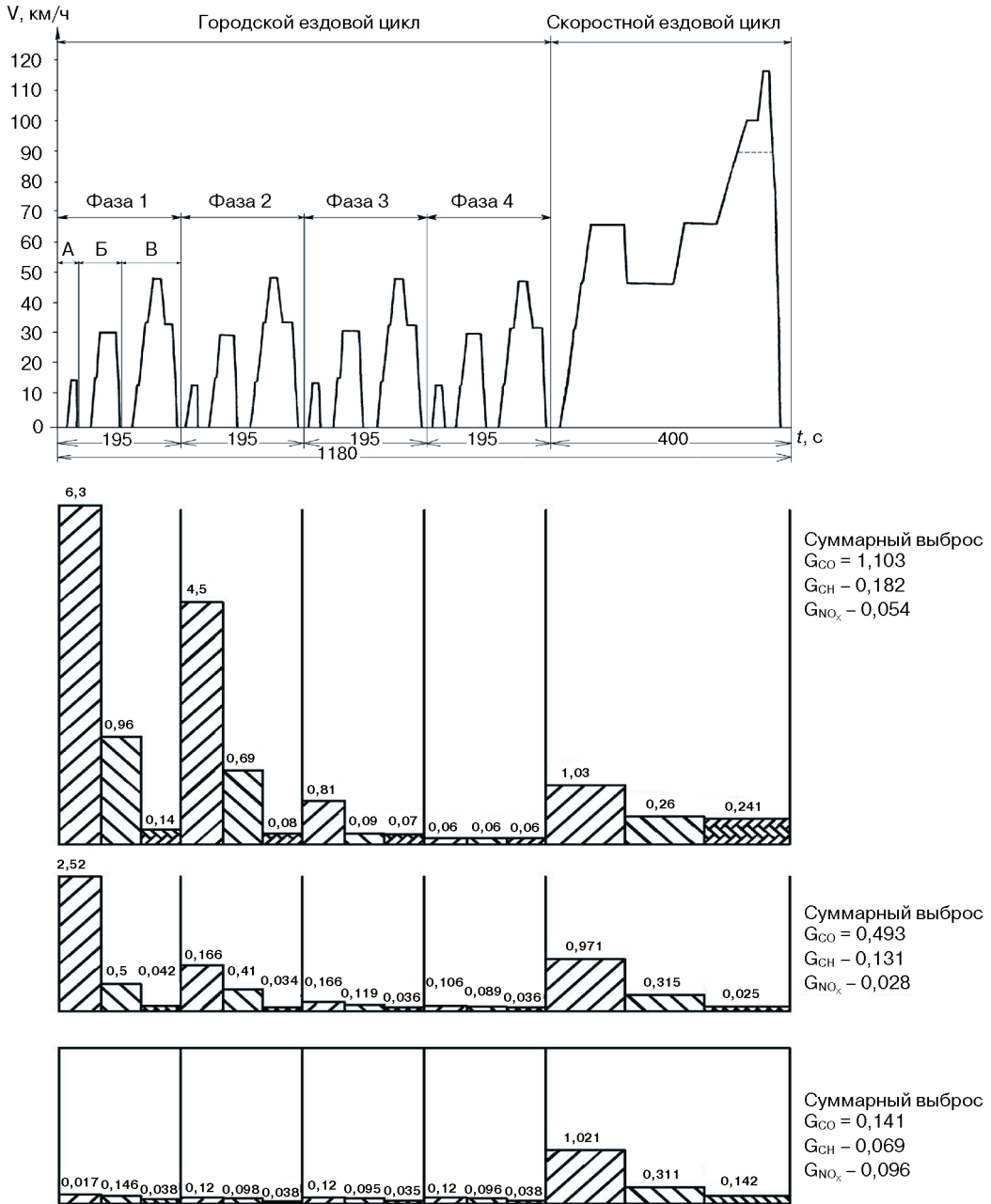


Рис. 1. Баланс выброса вредных веществ автомобилями ВАЗ на различных фазах ездового цикла Правил 83 ЕЭК ООН при различном удалении нейтрализатора от выпускного фланца двигателя

Анализируя приведенные на рис. 1 данные, можно отметить, что у автомобиля, удовлетворяющего нормативным требованиям ЕВРО-3 (вариант А), только за первые две фазы городской части ездового цикла выбрасывается 80—90% оксида углерода и углеводородов от полной массы их выбросов за весь ездовой цикл испытаний автомобиля. У автомобиля, удовлетворяющего нормативным требованиям ЕВРО-4 (вариант Б), имеющего более экологически совершенные двига-

тель и систему нейтрализации и выбрасывающего по массе меньше вредных веществ, доля вредных выбросов в первой фазе уменьшается, но по отношению к нормативному показателю еще более возрастает. У автомобиля с катколлектором наименьший выброс вредных веществ. Но каталитический блок находится в зоне максимальных температур отработавших газов, которые на режимах работы двигателя на полной мощности достигают более 1000 °С. Это способствует быстрому термическому старению подложки каталитического блока и, как следствие, потере степени конверсии вредных выбросов.

Повышенные выбросы в первой фазе городского ездового цикла определяются несколькими факторами.

К первой группе факторов относятся особенности протекания процессов смесеобразования и сгорания в условиях непрогретого двигателя на режимах холостого хода и малых нагрузок. Ко второй группе относится неэффективность работы системы нейтрализации. В эти периоды значительная часть теплоты отработавших газов теряется вследствие теплообмена на пути к нейтрализатору, что не позволяет быстро прогреться полости реактора до температуры Light off, соответствующей эффективной конверсии вредных веществ. Чем ниже температура холодного пуска, тем медленнее протекает этот процесс при движении автомобиля.

Для минимизации негативных последствий от рассмотренных выше факторов, влияющих на общий выброс вредных веществ автомобильным двигателем, был предложен ряд мероприятий.

Прогрев двигателя после холодного пуска практически всегда начинается с работы двигателя на режиме холостого хода. Особенности процессов образования, воспламенения и сгорания рабочего заряда смеси значительно влияют на повышенный выброс вредных веществ в этот период. Так как двигатель работает на обогащенном составе топливовоздушной смеси, в ОГ содержится высокое содержание оксида углерода и углеводородов. Режим холостого хода в силу своих характерных особенностей является неблагоприятным по протеканию рабочего процесса двигателя. Холодное состояние двигателя существенно ухудшает процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания рабочего заряда смеси. Поэтому к первой группе можно отнести мероприятия по уменьшению негативного влияния факторов холодного двигателя и особенностей его работы на режиме холостого хода. Сюда включены методы и устройства, направленные на ускорение прогрева двигателя и, главное, на уменьшение времени выхода его на режим стехиометрического состава смеси, который необходим для эффективной работы бифункциональной системы нейтрализации.

Для ускорения прогрева двигателя, как правило, электронный блок управления сразу после холодного пуска обеспечивает его работу на повышенной частоте вращения холостого хода с регулировкой системы зажигания на более поздние углы опережения, что увеличивает теплоотдачу в стенки цилиндров и быстрее прогревает охлаждающую жидкость и циркулирующее в двигателе моторное масло. В странах с холодным климатом используются системы предварительного прогрева масла в картере перед холодным пуском двигателя и накопители тепла для отдачи его в двигатель при холодном пуске.

Интересное техническое решение предлагается в патенте США № 6698389. Для ускорения прогрева двигателя после холодного пуска и быстрого выхода на стехиометрический состав смеси предлагается в системе впуска двигателя устанавливать специальный каталитический конвертер, в который подают водородное топливо, получаемое в бортовом электролизере. В конвертере в присутствии кислорода происходит интенсивный экзотермический процесс каталитического окисления водорода с выделением большого количества тепла. Это тепло расходуется на нагрев входящего в двигатель воздуха, нагрев охлаждающей жидкости и моторного масла в картере, таким образом, нагревая все детали двигателя. Недостатком такого технического решения является сложность конструкции такого типа системы и большие энергетические затраты на получение водорода в электролизере.

Однако только ускорения прогрева двигателя недостаточно для быстрого выхода на эффективный режим работы всей комплексной системы нейтрализации отработавших газов двигателя, что ведет к повышенному выбросу вредных веществ в этот период. Поэтому требуются мероприятия по быстрому переводу двигателя на работу при стехиометрическом составе смеси в пределах требуемой нейтрализатором ширины окна бифункциональности путем регулирования состава топливоздушнoй смеси в процессе прогрева двигателя быстрого разогрева до оптимальной температуры работы по заданному электронным блоком алгоритму.

Большую роль играют мероприятия, обеспечивающие быстрый прогрев кислородного датчика λ -зонда и каталитического блока нейтрализатора после холодного пуска, которые можно отнести ко второй группе. Сюда относятся различные методы уменьшения потери теплоты ОГ в выпускном трубопроводе от двигателя на пути к нейтрализатору, например, такие как теплоизоляционные покрытия или двуполостные выпускные трубы с воздушным теплоизоляционным зазором. Эти методы не получили широкого распространения из-за недостаточной эффективности и технологической сложности.

К другой категории технических решений относятся различные способы принудительного разогрева нейтрализатора. Наиболее известными из них являются так называемые стартовые быстро прогреваемые нейтрализаторы маленького объема, устанавливаемые прямо за выпускным коллектором. Они должны быть устойчивы к сверхвысоким температурам, быстро начинать окислять продукты неполного сгорания в отработавших газах с выделением дополнительного тепла и таким образом инициировать вступление в работу основного каталитического блока нейтрализатора. Известно достаточно много технических решений по разогреву нейтрализатора: с помощью электрических подогревателей, сжигания части топлива с большим выделением тепла в выпускном трубопроводе до нейтрализатора, системы СВЧ разогрева нейтрализатора. Эти методы также не нашли широкого применения из-за их экономической неэффективности вследствие увеличения расходов топлива или высокого энергопотребления и технологической сложности. Кроме того, время прогрева нейтрализатора после холодного пуска двигателя до начала его эффективной работы (период *light off*) остается достаточно продолжительным, что ведет к повышенному выбросу вредных веществ в этот период. Таким образом, анализ существующих методов снижения выброса вредных

веществ показывает, что в начальный период работы двигателя после его холодного пуска необходимо соблюдение двух основных принципов: 1) быстрый перевод двигателя на работу при стехиометрическом составе смеси; 2) быстрый выход каталитического нейтрализатора на эффективный режим работы, то есть уменьшения времени его прогрева (периода light off).

На основе приведенного выше анализа была поставлена задача разработки комплексного метода на основе применения системы средств ускоренного прогрева автомобильного двигателя и бифункционального нейтрализатора отработавших газов после холодного пуска, обеспечивающих снижение выброса вредных веществ с отработавшими газами до перспективных норм ЕВРО-6 и ЕВРО-7.

Решение задачи обеспечивается тем, что в период прогрева двигателя после холодного пуска к потоку отработавших газов и одновременно в поступающую в цилиндры двигателя основную топливно-воздушную смесь добавляются химически активные продукты конверсии бензина (ПКБ). ПКБ получают в каталитическом реакторе бортового термохимического конвертера. Добавка химически активных ПКБ к основной части горючей бензовоздушной смеси инициирует процессы ее сгорания в цилиндрах двигателя. Это ускоряет переход на режим горения топливно-воздушной смеси обедненного состава ($\alpha \geq 1$), таким образом интенсифицируя прогрев двигателя. При этом образование токсических продуктов неполного сгорания топлива при непрогретом двигателе может быть существенно уменьшено. Кроме того, на выпуске двигателя обеспечивается концентрация «избыточного» кислорода в отработавших газах, что принципиально важно с точки зрения возможности ускорения прогрева и выхода на эффективный режим работы нейтрализатора. Добавка химически активных ПКБ в отработавшие газы на входе в каталитический реактор нейтрализатора в присутствии кислорода обеспечивает экзотермическое их окисление с выделением большого количества теплоты. Эта теплота под воздействием газового потока активно диффундирует и быстро распределяется по сотовой структуре монолитной основы катализатора, способствуя его эффективному объемному нагреванию. При этом необходимая химическая (тепловая) мощность нагревания может быть обеспечена при окислении незначительного количества ПКБ в условиях максимальной эффективности объемного теплообмена по сравнению, например, с эффективностью электрического контактного способа подогрева каталитического блока нейтрализатора. Кроме того, взаимодействие продуктов ПКБ как химически активного реагента с кислородом позволяет связать свободный кислород в отработавших газах, что инициирует восстановительные реакции конверсии оксидов азота на бифункциональном катализаторе даже при относительно низких температурах при работе двигателя на холостом ходу в период его прогрева. Таким образом, предлагаемая комплексная система позволяет быстро прогреть двигатель после холодного пуска и перевести состав приготавливаемой топливной системой смеси на стехиометрический, а за счет экзотермического окисления ПКБ в нейтрализаторе быстро прогреть каталитический блок до рабочей температуры.

Способ работы двигателя на основе реализации предлагаемого комплексного метода представлен на принципиальной схеме (рис. 2) и осуществляется следующим образом.

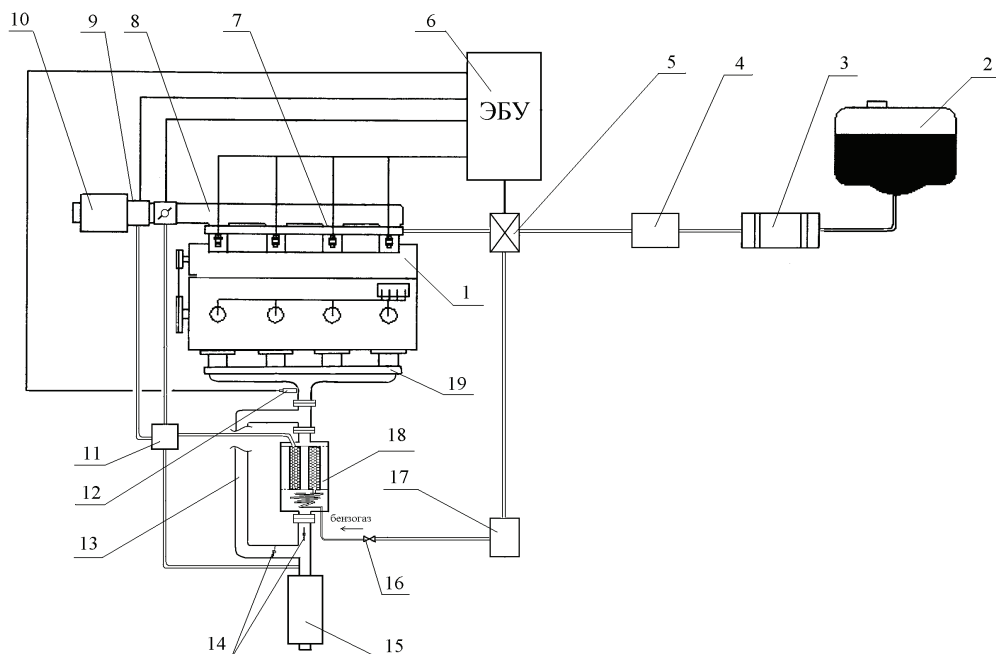


Рис. 2. Принципиальная схема комплексной системы интенсификации стартового прогрева двигателя и каталитического нейтрализатора:

- 1 — двигатель; 2 — топливный бак; 3 — топливный насос; 4 — топливный фильтр; 5 — блок распределитель; 6 — электронный блок управления; 7 — топливная рампа; 8 — впускной коллектор с дроссельным узлом; 9 — дозатор воздуха; 10 — воздушный фильтр; 11 — блок распределитель; 12 — кислородный датчик; 13 — байпас; 14 — дроссельные клапаны; 15 — нейтрализатор; 16 — обратный клапан; 17 — теплообменник-испаритель; 18 — конвертер; 19 — выпускной коллектор

Холодный пуск двигателя. После пуска двигателя и отключения стартера электронный блок управления 6 включает реле распределителя 5 для подачи части бензина в испаритель 17.

Запуск системы получения продуктов конверсии бензина. В испарителе при температурах 70—80 °С происходит выкипание 10—15% легких пусковых фракций бензина с образованием бензогаза. Тяжелые жидкие фракции постоянно обновляются за счет рециркуляции бензина, т.е. возврата оставшейся не испаренной части бензина в топливную магистраль до электронасоса 3.

Доля бензина, подаваемого в испаритель, составляет от 50 до 80% от доли бензина, подаваемого основной системой впрыскивания топлива на холостом ходу в этот период. Она уменьшается обратно пропорционально нарастанию нагрузки двигателя по мере его прогрева. Бензогаз под давлением 0,25 МПа из верхней части испарителя подается на вход в теплообменник-перегреватель в термохимическом конвертере 18. Спираль теплообменника омывается потоком горячих отработавших газов. На выходе из перегревателя температура бензогаза возрастает до 600—800 °С. Перегретый бензогаз подается в рабочую полость реактора конвертера, где при постоянном подводе тепла от отработавших газов происходит процесс эндотермического синтеза бензина с образованием нового ПКБ, имеющего теплотворную способность выше бензина как исходного продукта.

Режим ускоренного прогрева двигателя и каталитического нейтрализатора. После начала работы конвертера образовавшиеся в нем химически активные продукты конверсии бензина по сигналам блока управления ЭБУ разделяются в бло-

ке распределителе 11 на две части. Первая часть ПДБ подается в задрессельное пространство впускного коллектора 8 для образования топливной смеси из бензина, ПКБ и воздуха. Химически активные продукты ПКБ способствуют интенсификации процесса сгорания основной топливовоздушной смеси и обеспечивают быстрый перевод работы двигателя на стехиометрический состав смеси в пределах заданного ЭБУ диапазона окна бифункциональности нейтрализатора.

Вторая часть ПКБ разбавляется воздухом, направляется в выпускную систему и далее в нейтрализатор 15, выполняя функцию химического реагента для ускорения экзотермического разогрева каталитического блока с целью быстрого его выхода на эффективный режим работы. С этого момента по сигналу бортовой диагностики ЭБУ выключает систему получения ПКБ и подачи их в двигатель и нейтрализатор, то есть ЭБУ переводит двигатель в штатный режим работы. При этом с помощью клапанов-заслонок 14 отработавшие газы двигателя направляются по байпасу 13 в обход термохимического конвертера, предотвращая его перегрев и выход из строя на нагрузочных режимах работы двигателя. Общее время работы системы ускоренного разогрева двигателя и нейтрализатора составляет 10—15 сек.

Так как двигатель в начальный период прогрева требует обогащенный состав смеси, в отработавших газах существует дефицит кислорода. Поэтому в этот период из воздушного фильтра 10 через управляемый от электронного блока 6 дозатор 9 в отработавшие газы поступает дополнительный воздух. Он необходим для интенсификации экзотермического окисления ПКБ в нейтрализаторе. Активное проникновение ПКБ в пористую структуру подложки катализатора способствует его эффективному объемному нагреванию. При этом ПКБ, как химически активный реагент, обуславливает возможность преобразования (нейтрализации) токсических компонентов ОГ на катализаторе даже при относительно низких температурах. В выпускном трубопроводе до и после нейтрализатора установлены два кислородных датчика для диагностики начала и прекращения эффективной работы нейтрализатора.

Реализация предлагаемого комплексного метода и системы средств для его реализации в практике двигателестроения позволит при минимальных финансовых затратах эффективно решать перспективные проблемы экологической безопасности на отечественном транспорте, связанные с переходом на новое законодательство.

IMPROVEMENT OF ECOLOGICAL PARAMETERS OF THE AUTOMOBILE ENGINE WITH SPARK IGNITION IN PERIOD HEATING AFTER COLD START-UP

S.V. Gusakov, A.Z. Sharipov, A.A. Menshikh

Department of heating engineers and heat engines
Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

This article about problems of reduction of emissions of harmful substances in the period automobile engines with spark ignition after cold start-up. In this period owing to low temperatures there is an incomplete combustion of fuel, and efficiency catalytic the converter is low. In article is considered the method of increase of efficiency heating of the engine and converter is considered by application of active chemical products of thermal decomposition of gasoline.

Key words: toxicity, the engine of internal combustion, cold start-up, fast warming up, active chemical products of decomposition of gasoline.