

УДК 629.3.081.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ

*В.В. НЕВЗОРОВ, канд. техн. наук, доц. С.И. СУХОПАРОВ,
канд. техн. наук, проф. В.М. ОБЧИННИКОВ
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)*

На основе многофакторного анализа установлена взаимосвязь между экологическими параметрами двигателя и техническими характеристиками цилиндропоршневой группы. Введена новая количественная характеристика – степень закоксованности цилиндра и установлены основные факторы, влияющие на изменение степени закоксованности цилиндропоршневой группы от концентрации СН в отработавших газах и времени эксплуатации двигателя. Установлено, что основное влияние на степень закоксованности цилиндропоршневой группы бензинового двигателя оказывает неправильная организация процесса горения, связанная с отказами топливоподающей аппаратуры, системы зажигания и газораспределительного механизма. Полученные данные существенно расширяют возможности технической диагностики двигателей, их регулировки и повышения эксплуатационной надежности.

Введение. Любую работу по восстановлению характеристик автомобильного двигателя необходимо начинать с оценки его технического состояния. Часто на автомобилях даже с небольшим пробегом обнаруживаются отклонения эксплуатационных параметров от нормативных значений, что обусловлено как качеством изготовления, так и эксплуатацией техники на некачественном топливе и маслах. Известно, что залегание поршневых колец ведет к негативным последствиям для всего двигателя. Этому в определенной степени способствует общая тенденция мировых производителей к снижению высоты поршневых колец (для уменьшения потерь на трение), что ведет к снижению упругости и способности кольца к самоочистке. Определить такой дефект обычными методами практически невозможно [1].

Известные инструментальные методы диагностирования цилиндропоршневой группы (ЦПГ) можно свести к трем основным:

- оценке пневмоплотности конкретного цилиндра путем принудительной его опрессовки сжатым воздухом;
- интегральной оценке пневмоплотности сопряжения «гильза – компрессионное кольцо – канавка поршня» по расходу газов, прорывающихся в картер;
- оценке пневмоплотности конкретного цилиндра по максимальному давлению в конце такта сжатия.

В каждом из рассмотренных методов объективно заложен ряд недостатков, известных любому специалисту. Но главное – это принципиальная неспособность определить конкретную причину потери пневмоплотности ЦПГ без разборки двигателя [2, 4, 8].

Постановка задачи. Принципиально новый вакуумный метод диагностирования ЦПГ разработан В.А. Чечетом, который позволяет в целом свести к минимуму отмеченные недостатки и в совокупности с применением оценки конкретного цилиндра по максимальному давлению в конце такта сжатия достаточно достоверно оценить поэлементное состояние ЦПГ и, соответственно, определить вид и объем необходимых ремонтных или корректирующих воздействий [3, 5, 7].

Сущность метода заключается в следующем: в процессе прокручивания коленчатого вала стартером или пусковым двигателем измеряют разрежение в надпоршневом пространстве на рабочем такте расширения посредством вакуумного клапана. При этом на предыдущем такте сжатия осуществляется полная продувка цилиндра через редукционный клапан малого давления (рис. 1, а).

По величине «полного вакуума» P_1 можно охарактеризовать состояние гильзы цилиндра (качество поверхности и степень износа) и плотность сопряжения «клапан – седло». При малой степени износа и герметичности клапанов значения P_1 будут максимальны (в пределах 0,08...0,095 МПа) [7].

Известно, что в сечении изношенная гильза имеет форму эллипса. При большой степени износа (более 60 %) наличие зазора между эллипсным сектором зеркала цилиндра и круглым сектором компрессионного кольца обуславливает появление подсоса воздуха из картера на такте разрежения (расширения), который невозможно остановить даже за счет жидкостного уплотнения. Аналогичная картина наблюдается при наличии на поверхности гильзы вертикальных глубоких борозд. Соответственно значение P_1 уменьшается пропорционально износу или уменьшению плотности сопряжений газораспределительного механизма. При этом важно отметить, что измерение полного вакуума осуществляется с минимальной трудоемкостью, так как не требует сложных специальных приспособлений. Доступ к конкретному цилиндру осуществляется через отверстия для установки свечей зажигания или свечей накала у дизелей, а при их

отсутствии – через адаптер форсунки. Однако величина полного вакуума практически не несет информацию о состоянии колец. В некоторых случаях наблюдаются высокие значения $P1$ в отдельных или всех цилиндрах при неудовлетворительном состоянии поршневых колец. Причина этого явления достаточно проста – при хорошем качестве поверхности и малой степени износа гильзы и герметичных клапанах наличие масляной пленки всегда обеспечит высокую степень разрежения. Однако если герметизировать надпоршневое пространство на такте сжатия, то давление повышается до максимального значения в момент достижения поршнем верхней мертвой точки (ВМТ). При этом часть сжимаемого воздуха прорывается через поршневые кольца в картер двигателя. После достижения ВМТ поршень идет вниз (такт расширения или рабочий ход), возвращаясь в исходную точку начала такта сжатия.

В этом случае вакуумный клапан (рис. 1, б) определит «остаточный вакуум» $P2$, величина которого пропорциональна той части давления, которая была «потеряна» при прорыве части воздуха через компрессионные кольца. При малоизношенных и не закоксованных (подвижных) кольцах величина остаточного вакуума весьма незначительна и для исправного двигателя колеблется в диапазоне 0,011...0,02 МПа. При изношенных, закоксованных или поломанных компрессионных кольцах значение $P2$ существенно возрастает и может достигать 0,07 МПа [7].

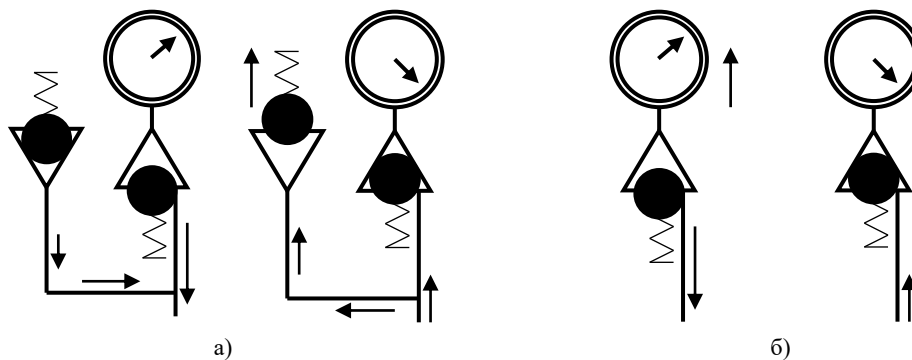


Рис. 1. Схемы клапанов для измерения:
а – полного вакуума $P1$; б – остаточного вакуума $P2$

С помощью данной методики достаточно быстро и точно можно определить относительную степень износа и механические дефекты гильз и колец. Между тем в практике эксплуатации и обслуживания двигателей внутреннего сгорания гораздо чаще встречаются неисправности, в основе которых лежит неполное сгорание топлива в камере сгорания или попадание туда масла из-за негерметичности колпачков и направляющих втулок клапанов. Как известно, наличие масла в цилиндре значительно влияет на достоверность оценки пневмоплотности ЦПГ любым из перечисленных выше методов. Однако вакуумный метод и здесь позволяет распознать причину возникновения неисправности. Например, завышенные показатели $P1$ свидетельствуют о наличии в цилиндрах дополнительного источника пневмоплотности (жидкостное уплотнение) в результате закоксовки колец, потерявших свою подвижность и тем самым усиливших насосный эффект, а при малой степени износа гильзы и аномально низком значении $P2$ (0,004...0,010 МПа) можно с высокой степенью достоверности утверждать о необходимости замены маслосъемных колпачков [7].

Особое место в классификации неисправностей ЦПГ отводится клапанному механизму. Теоретически в случаях небольшого нарушения пневмоплотности сопряжения «клапан – седло» значения $P1$, $P2$ (например, для дизеля) будут близки. И тогда, естественно, возникает зона информационной неопределенности, преодолеть которую возможно только с привлечением дополнительной диагностической информации (например, пневмокалибратора). Практически неисправность указанного сопряжения проявляется в виде внезапного отказа (прогар, скол, трещина), приводящего к потере работоспособности данного цилиндра. Образование условного отверстия в камере сгорания приводит к резкому уменьшению величины $P1$, так как никакой дополнительной источник пневмоплотности (лишнее масло, непрогоревшее топливо) не в состоянии его уплотнить.

Целью работы являлось исследование взаимосвязи экологических параметров двигателя внутреннего сгорания с техническими характеристиками (состоянием) ЦПГ, что потребовало провести ряд исследований: состояния ЦПГ автомобилей с *бензиновыми* двигателями, имеющих как нормативное, так и повышенное содержание вредных веществ в отработавших газах (ОГ), а также ЦПГ автомобилей с *дизельными* двигателями, имеющих как нормативные, так и повышенные показатели дымности ОГ. Кроме того, был проведен мониторинг состояния ЦПГ и экологических показателей *двигателей автомобилей* и определены основные направления повышения эксплуатационной надежности ДВС.

Методика проведения работы. Мониторинг технического и экологического состояния силовых установок автомобилей с последующей математической обработкой и анализом статистической информации проведен на базе поста диагностики транспортных двигателей научно-исследовательского центра «Экологическая безопасность и энергосбережение на транспорте» УО «Белорусский государственный университет транспорта» в течение 2006 года.

Проведение измерений токсичности отработавших газов автомобилей осуществлялось в соответствии с ГОСТ 17.2.2.03-87 «Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений содержания окиси углерода и углеводородов в отработавших газах автомобилей с бензиновыми двигателями» и ГОСТ 21393-75 «Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений дымности автомобилей с дизелями». Измерения осуществлялись с помощью двухкомпонентных газоанализаторов МЕТА Автотест, ГИАМ 29 и электронным оптическим дымомером МЕТА МП 1. Диагностика состояния ЦПГ проводилась с помощью анализатора герметичности цилиндров АГЦ-2 [8, 9, 12, 14].

В процессе проведения эксперимента мониторинг экологических и технических показателей ЦПГ осуществлялся в двух случайно составленных группах по сто автомобилей различных марок, конструкции и возрастной категории. Основным критерий разделения по группам – двигатель, дизельный или бензиновый.

Обсуждение результатов. При эксплуатации автомобилей изменяется техническое состояние их систем и агрегатов, что внешне проявляется в снижении их динамических свойств, повышении расхода горюче-смазочных материалов, в ухудшении пуска двигателя и др. [4, 10, 11]. Все это чаще всего является результатом процессов, сопутствующих рабочим. К таким процессам можно отнести образование отложений на деталях ЦПГ и газораспределительного механизма. Полностью устранить отрицательное воздействие закоксовывания цилиндров на рабочие параметры двигателя не представляется возможным. Но оценить влияние различных подсистем на развитие процесса, определить комплекс корректирующих воздействий, способных изменить динамику развития или устранить последствия, необходимо.

Для количественной оценки состояния ЦПГ введем понятие *степени закоксованности* (χ):

$$\chi = f(P1, P2), \quad (1)$$

представляющее собой безразмерную величину, характеризующую состояние ЦПГ и газораспределительного механизма:

$$\chi^u < \chi < 1, \quad (2)$$

где χ^u – степень закоксованности, соответствующая номинальным значениям $P1$ и $P2$. Для различных типов двигателей χ^u составляет 0,01...0,08.

Если предположить, что двигатели внутреннего сгорания контрольных групп эксплуатируются с соблюдением технических условий, то можно задаться вопросом об оптимальности распределения отказов между подсистемами, влияющими на качество работы ДВС в целом.

Под отказом при проведении мониторинга решено понимать превышение показателей токсичности отработавших газов автомобилей над нормативными (в отдельных случаях над рекомендованными заводом изготовителем), а также превышение степени закоксованности χ над χ^u .

Исследованиями установлено, что значения $P1$ и $P2$ для каждого типа двигателя и определенного состояния его ЦПГ имеют конкретные соотношения, с достаточной степенью достоверности характеризующая степень износа и закоксовки цилиндра. Для оценки степени закоксованности ЦПГ получена зависимость:

$$\chi = e^\psi - 1, \quad (3)$$

где ψ – параметр, учитывающий состояние гильзы цилиндра и износ компрессионных колец;

$$\psi = (a_1 \Delta P + a_2 P2 + a_3 \Delta P P2) / P1, \quad (4)$$

a_1, a_2, a_3 – поправочные коэффициенты, зависящие от типа двигателя; ΔP – величина, характеризующая герметичность цилиндра ($\Delta P = P1 - P2$).

Анализ данных мониторинга экологических показателей и состояния ЦПГ на основе натурального статистического эксперимента, учитывающего ранее принятые допущения, позволил составить диаграмму распределения отказов (рис. 2). Анализ же диаграммы выявил характерные неисправности подсистем ДВС, приводящие к превышению нормативной токсичности ОГ, и позволил оценить влияние состояния подсистем двигателя на степень закоксованности ЦПГ.

Установлено, что основное влияние на степень закоксованности ЦПГ бензинового двигателя оказывает неправильная организация процесса горения, связанная с отказами топливopодpодpющей аппаратуры, системы зажигания и газораспределительного механизма (ГРМ).

Анализируя полученные данные, с учетом диаграммы распределения отказов подсистем ДВС, связанных с превышением токсичности ОГ, и отказов, вызванных взаимодействием подсистем, строим потоковую диаграмму для определения влияния нормируемых показателей токсичности и отказов подсистем бензинового ДВС на степень закоксованности ЦПГ (рис. 3).

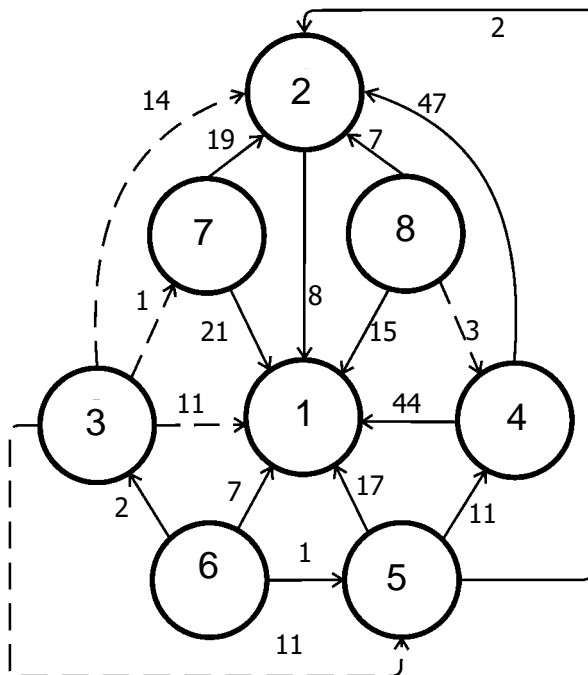


Рис. 2. Диаграмма распределения отказов подсистем ДВС, связанных с превышением токсичности ОГ, и отказов, вызванных взаимодействием подсистем:
 1 – состояние ДВС, при котором наблюдается превышение нормативных показателей токсичности ОГ;
 2 – цилиндропоршневая группа; 3 – электронная система управления двигателем; 4 – аппаратура топливоподачи (учитывая систему зажигания в бензиновых ДВС); 5 – автоматическая система опережения зажигания или впрыска топлива;
 6 – электрооборудование; 7 – механизм газораспределения; 8 – система смазки
 Примечание. Пунктиром показаны связи, появление которых зависит от конструкции ДВС.

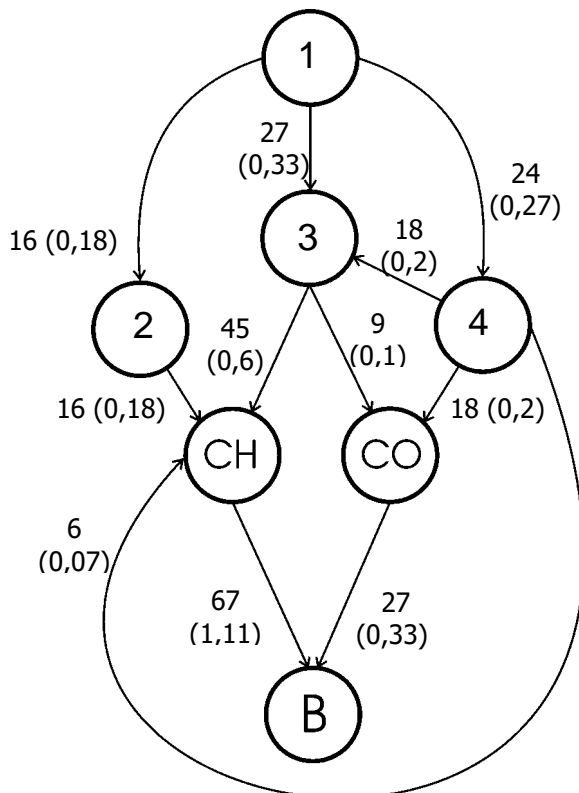


Рис. 3. Потоквая диаграмма для определения влияния нормируемых показателей токсичности и отказов подсистем бензинового ДВС на степень закоксованности ЦПГ:
 1 – оператор; 2 – механизм газораспределения; 3 – система зажигания; 4 – аппаратура топливоподачи;
 CO/CH – нормируемые показатели токсичности бензинового ДВС; В – сток

Далее выполняем расчет по известной методике [6, 13]. Очевидно, что в данном случае суммарный поток по всем путям равен числу отказов в контрольной группе автомобилей за один год эксплуатации. Для минимизации количества отказов по всей системе рассмотрим возможность снижения величины максимального потока в предложенной диаграмме (см. рис. 3). Для этого найдем критический путь, вычисляя количество и интенсивность отказов по каждому из путей (интенсивность отказов указана в скобках).

Очевидно, что путь $\{(1, 3); (3, \text{CH}); (\text{CH}, \text{B})\}$ является критическим и основное влияние на степень закоксованности χ оказывает увеличение нормируемого показателя CH.

Однако следует отметить значимость механизма газораспределения и высокую степень взаимодействия системы зажигания и аппаратуры топливopодачи.

Из этого следует, что для повышения эксплуатационной надежности двигателей автомобилей контрольной группы и уменьшения степени закоксованности ЦПГ необходимо, прежде всего, снизить поток по следующим путям:

- между вершинами 1 и 3 – отказы, связанные с выходом из строя свечей зажигания, высоковольтных проводов, механизма распределителя, автоматов опережения зажигания;
- между вершинами 1 и 4 – отказы, связанные с выходом из строя топливной аппаратуры (чрезмерное обеднение или обогащение смеси), систем электронного управления двигателем или датчиков, возникновением неучтенных подсосов воздуха во всасывающий коллектор;
- между вершинами 1 и 2 – отказы, связанные с неисправностями механизма газораспределения (неправильная установка ремня ГРМ, малые или увеличенные тепловые зазоры клапанов, прогар клапанов и др.);
- между вершинами 4 и 3 – отказы, связанные с эксплуатацией ДВС на обогащенной смеси, которая приводит к выходу из строя системы зажигания.

С учетом всего вышесказанного модель для оценки интенсивности изменения степени закоксованности ЦПГ от наиболее значимого фактора (CH) может быть представлена в общем виде как двухфакторное уравнение:

$$\chi = f(q, \tau), \tag{5}$$

где q – концентрация нормируемого показателя токсичности ОГ CH, ppm; τ – время, которое ДВС автомобиля находится в эксплуатации, мес.

Уравнение (5) может быть представлено в виде:

$$\chi = ((a_{1i} + a_{2i}q + a_{3i}\tau + a_{4i}q\tau + a_{5i}q^2 + a_{6i}\tau^2) / (a_{7i}q - a_{8i}\tau - a_{9i}))^{1/2}, \tag{6}$$

где $a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}, a_{5i}, a_{6i}, a_{7i}, a_{8i}, a_{9i}$ – коэффициенты уравнения, рассчитанные с использованием результатов обработки статистического эксперимента [6, 14].

Результаты расчета, полученные с использованием разработанной модели, представлены на рисунке 4.

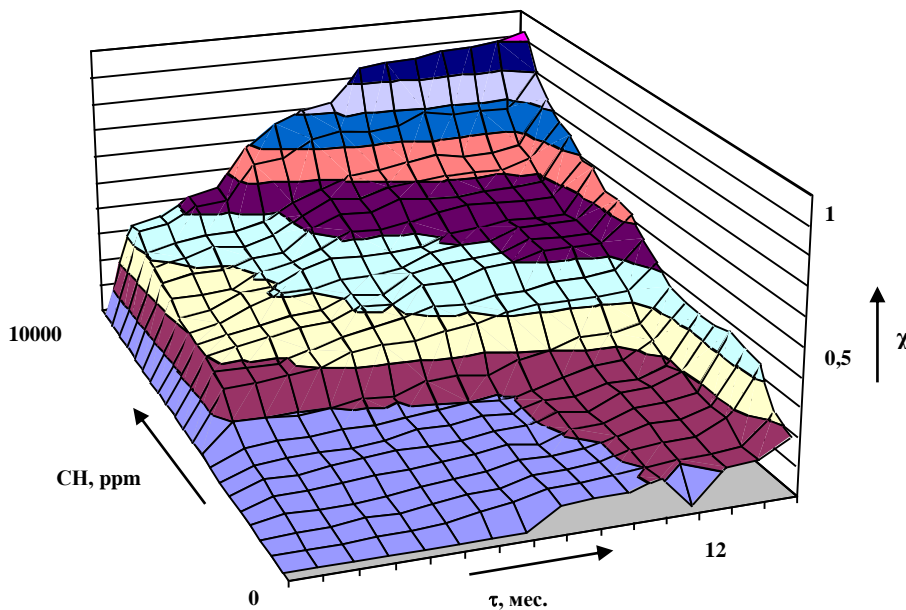


Рис. 4. Зависимость степени закоксованности ЦПГ от концентрации CH в ОГ и времени эксплуатации ДВС

Впервые с помощью комплексных исследований получены данные, которые позволили оценить влияние состава отработавших газов на состояние ЦПГ.

Анализ экспериментальных данных и модели показал, что основное влияние на закоксованность ЦПГ двигателя оказывает неправильная организация процесса горения топлива вследствие возникновения отказов в системах топливоподачи, зажигания и газораспределения, а основной причиной возникновения отложений является повышенное содержание углеводородов в ОГ.

Выявленные закономерности позволяют также утверждать, что эксплуатация ДВС с повышенным содержанием монооксида углерода в отработавших газах неизбежно приводит к выходу из строя системы зажигания и, как следствие, закоксовке ЦПГ.

Полученные в процессе исследования результаты, характеризующие зависимость состояния ЦПГ от показателей токсичности ДВС, позволят при планировании технического обслуживания автомобилей определить комплекс диагностических, корректирующих и восстановительных мероприятий, способных минимизировать негативное влияние залегания поршневых колец.

Выводы. Многофакторный анализ распределения отказов подсистем ДВС, связанных с превышением токсичности отработавших газов и отказов, вызванных взаимодействием подсистем, позволил установить взаимосвязь между экологическими параметрами двигателя и техническими характеристиками цилиндропоршневой группы. Для количественной характеристики изменения уровня закоксованности цилиндропоршневой группы от концентрации СН в отработавших газах и времени эксплуатации ДВС впервые введено научно обоснованное понятие *степень закоксованности цилиндра* в зависимости от типа двигателя. Создана математическая модель для оценки интенсивности изменения степени закоксованности ЦПГ от наиболее значимого фактора – содержания углеводородов в ОГ. Полученные данные существенно расширяют возможности технической диагностики двигателей, их регулировки и повышения эксплуатационной надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротков, М.В. Пробег и экологическая безопасность автомобиля / М.В. Коротков, Е.В. Бондаренко // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 5. – С. 8 – 9.
2. Голубихин, Ю.А. Методика диагностирования эколого-технических показателей дизельных двигателей транспортных средств по составу отработанных газов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Ю.А. Голубихин; С.-Петербург. гос. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2005. – 22 с.
3. Алифанов, А.Л. Об эффективности применения предварительной информации при прогнозировании в ремонте и эксплуатации автомобилей / А.Л. Алифанов // Изв. вузов. Горн. журнал. – 2000. – № 1. – С. 63 – 67.
4. Гринцевич, В.И. Экспертная оценка технического состояния автомобилей / В.И. Гринцевич // Вестн. Красноярск. гос. техн. ун-та. – 2001. – № 25. – С. 86 – 89.
5. Бондаренко, Е.В. Повышение эффективности эксплуатации и экологической безопасности автотранспортной системы на основе ресурсосберегающих технологий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10 / Е.В. Бондаренко; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург, 2005. – 35 с.
6. Спирков, С.Н. Теория статистики: учеб. комплекс. – 3-е изд. / С.Н. Спирков. – Минск: Изд-во МИУ, 2005. – 216 с.
7. Невзоров, В.В. Организация мобильного поста экспресс-диагностики технического состояния транспортных средств / В.В. Невзоров, В.М. Овчинников // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26 – 27 окт. 2004 г. – Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2004. – С. 220 – 221.
8. Болбас, М.М. Основы технической эксплуатации автомобилей: учебник / М.М. Болбас. – Минск: Амалфея, 2001. – 352 с.
9. Савич, Е.Л. Техническое обслуживание и ремонт легковых автомобилей: учеб. пособие / Е.Л. Савич, М.М. Болбас, В.К. Ярошевич; под общ. ред. Е.Л. Савича. – Минск: Высшая школа, 2001. – 479 с.
10. Nadeau, J. Mon carburant roult plus vert / J. Nadeau // Environ. mag. – 2000. – № 1589. – P. 36 – 40.
11. Mobiles Kozept für kleine Werkstätten. KFZ-Betrieb: Die Wochenzeitung für Autohaus und Werkstatt. – 2000. – 90, № 42. – S. 36.
12. Портативные измерители дымности дизелей / М.С. Высоцкий [и др.] // Грузовик и автобус, троллейбус и трамвай. – 2000. – № 7. – С. 26 – 28.
13. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен; пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
14. Невзоров, В.В. Улучшение экологических и экономических показателей двигателей внутреннего сгорания путем регулирования процесса топливоподачи / В.В. Невзоров, С.И. Сухопаров, Г.И. Росин // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2003. – С. 186 – 187.

Поступила 25.04.2007