

УДК 621.43.03

М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, И.В. Шепеленко, доц., канд. техн. наук, А.А. Матвиенко, доц., канд. техн. наук, Аль Соодани Салем М. Муташаир, доц., канд. техн. наук.

Кировоградский национальный технический университет

Исследование влияния загрязнений электромагнитных форсунок на параметры бензиновых двигателей

Приведены основные виды загрязнений электромагнитных форсунок бензиновых двигателей. Рассмотрен механизм образования разных видов загрязнений. Исследовано влияние загрязнений на параметры двигателей.

электромагнитная форсунка, загрязнения, двигатель

М.В. Красота, І.В. Шепеленко, О.О. Матвієнко, Аль Соодані Салем М. Муташаїр

Кіровоградський національний технічний університет

Дослідження впливу забруднень електромагнітних форсунок на параметри бензинових двигунів

Приведені головні види забруднень електромагнітних форсунок бензинових двигунів. Розглянуто механізм обробки різних видів забруднювань. Досліджено вплив забруднювань на параметри двигунів.

електромагнітна форсунка, забруднення, двигун

Постановка проблемы. В процессе эксплуатации техническое состояние форсунок, оцениваемое значением их рабочих показателей, неизбежно ухудшается из-за загрязнения элементов проточной части, износа запирающего элемента и седла, отклонения характеристик электромагнитной системы, засорения индивидуальных сетчатых фильтров и др. Эти эксплуатационные изменения рабочих показателей электромагнитной форсунки определяются качеством и составом применяемого топлива, условиями эксплуатации двигателя, особенностями изменения нагрузок при работе двигателя в составе транспортного средства, культурой технического обслуживания автомобильной техники и др.

Эксплуатационные изменения рабочих показателей форсунок (статической и динамической производительности, неравномерности подачи топлива в комплекте форсунок) оказывают сложное и взаимосвязанное влияние на экономические и экологические характеристики двигателя, его пусковые качества, на динамику транспортного средства.

Существующие способы очистки электромагнитных форсунок (химические, ультразвуковые) часто не дают желаемого эффекта и не позволяют в процессе эксплуатации восстановить их рабочие показатели до исходных значений.

Необходимость очистки форсунок возникает или по факту ухудшения характеристик двигателя, или после 20...30 тыс. км пробега при очередном ТО. Статистика показывает, что с необходимостью очистки инжекторов связано более половины всех ремонтов систем впрыска бензина, а с учётом планово-профилактических очисток это число достигает 80...85%. Такое частое обращение к инжекторам неизбежно требует их тщательной диагностики. Как правило, тестируются сопротивление обмотки, производительность, баланс, герметичность, факел.

Инерционность проверяют не всегда, и чаще всего из-за отсутствия нужной аппаратуры. Однако установить истинное состояние электромагнитного инжектора можно только по совокупности всех параметров, поэтому практика заставляет искать доступные диагностические методы.

На сегодняшний день все новые автомобили с бензиновым двигателем имеют системы распределенного впрыска. Однако при этом возникают специфические проблемы, связанные с эксплуатацией этих систем, в основном - из-за невысокого качества бензина (около 40 % выпускаемого топлива не соответствует действующим отечественным техническим регламентам) и недостаточно высокой культуры эксплуатации автомобильной техники. Во многом эти проблемы и определяют эксплуатационные изменения рабочих показателей электромагнитных форсунок.

Актуальность. Актуальность работы обусловлена широким распространением систем впрыскивания топлива и существующей проблемой поддержания заданных энергетических и экологических характеристик автомобильных бензиновых двигателей в условиях эксплуатации путем сохранения рабочих показателей электромагнитных форсунок.

Цель работы. Цель работы - исследовать влияние загрязнений электромагнитных форсунок на эксплуатационные и экологические показатели бензиновых двигателей.

Электромагнитная форсунка представляет собой быстродействующий гидравлический клапан с электромагнитным приводом запирающего элемента. В системах топливоподачи с электронным управлением форсунки выполняют две функции:

- дозируют топливо в соответствии с длительностью электрических управляющих импульсов, формируемых электронным блоком управления (контроллером) по определенному алгоритму в зависимости от режимных параметров работы двигателя;
- распыляют (диспергируют) топливо до частиц требуемых размеров для достижения необходимой степени гомогенизации топливовоздушной смеси.

Электромагнитная форсунка является последним и важнейшим звеном на пути бензина к цилиндру. Цикловая доза впрыскиваемого бензина 2-литрового двигателя в режиме частичной нагрузки составляет всего 0,03...0,04 мл. Строгая геометрия конструкции, миниатюрные размеры в сопряжении «запорный элемент – седло распылителя» и прецизионное изготовление обеспечивают точность дозы и мелкую дисперсность распыла бензина при номинальной инерционности подвижных частей. Однако это происходит только тогда, когда все внутренние детали инжектора идеально чисты.

Для оценки рабочих параметров форсунки используется ее рабочая (расходная) характеристика - зависимость величины цикловой подачи топлива q от длительности τ управляющего электрического импульса: $q=f(\tau)$.

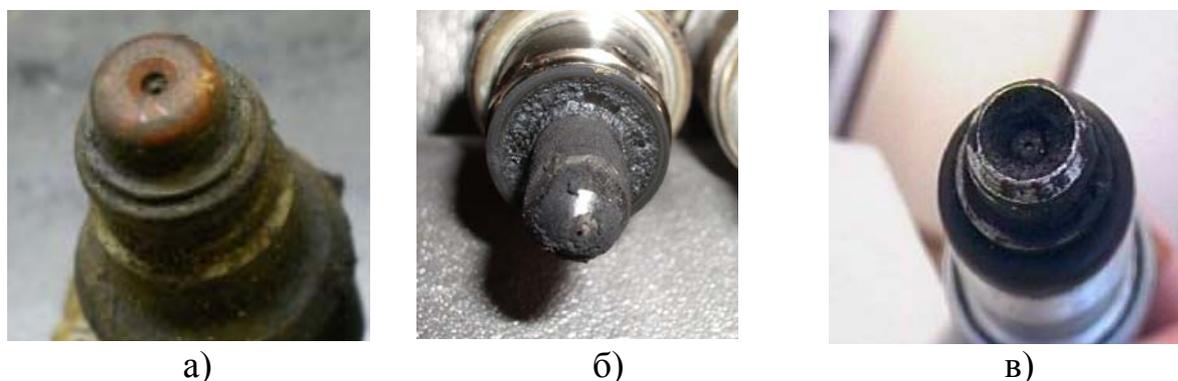
Основной, и до сих пор нерешенной проблемой при эксплуатации электромагнитных форсунок в составе систем впрыскивания бензина, является их загрязнение, вызываемое целым рядом причин.

Механизм образования загрязнений на элементах электромагнитных форсунок изучен не полностью. Сами загрязнения имеют сложный физико-химический состав, свойства которого определяются строением молекул загрязняющих веществ и факторами их образования, а также физическими и химическими свойствами твердой поверхности. Известно, что в основе механизма различных загрязнений лежит явление адгезии.

В соответствии с общей классификацией загрязнений деталей поршневого двигателя, загрязнения электромагнитных форсунок можно подразделить на три вида:

нагары, лаки и осадки [1-3] (рис. 1). Каждое из них образуется по собственному механизму. По взаимодействию с поверхностью различные виды загрязнений принципиально можно разделить на три основные группы: слабосвязанные, умеренно связанные и прочно связанные.

Образуются отложения следующим образом. После остановки горячего двигателя из пленки топлива, оставшейся на штифтах и внутренних поверхностях распылителей, что ниже запорного клапана, испаряются легкие фракции. Тяжелые же остаются на деталях, так как смывать их в это время нечем – свежие порции топлива не поступают к распылителю, и запорные клапаны форсунок закрыты. К тому же, в этот момент отсутствует охлаждение топливом. Корпус форсунки дополнительно нагревается, получая тепло от горячей головки блока цилиндров через впускной коллектор, ускоряя процесс выпаривания. Из оставшихся тяжелых фракций и образуются смолистые отложения. Накапливаясь, они препятствуют запорному конусу плотно сесть на седло, вследствие чего нарушается герметичность форсунки.



а – лаковые отложения; б - смолистые отложения; в - нагар

Рисунок 1 – Загрязнения электромагнитных форсунок

Остаточное давление топлива в рампе после остановки мотора сохраняется. Оно потихоньку проталкивает бензин через негерметичный клапан, и процесс закоксовывания идет интенсивнее. Потеря герметичности осложняет запуск двигателя ввиду отсутствия давления в топливной магистрали и возможности образования паровых пробок. Кроме того, с потерей герметичности ухудшается отсечка топлива. Вместо того чтобы резко оборвать факел, отправив всю порцию во впускной канал, окончание впрыска происходит плавно. Последние капли его не могут "выстрелить" и стекают по распылителю.

Проходное сечение сопла форсунки – кольцевая щель, образованная корпусом распылителя и запорным клапаном. С появлением отложений просвет уменьшается (рис. 2). Соответственно уменьшается и количество топлива, дозируемого форсункой за каждый рабочий такт. Если система управления не имеет обратной связи, то изменение пропускной способности форсунок приведет к обеднению рабочей смеси. Последствия этого проявляются в снижении мощности, появлению детонации и т.д.

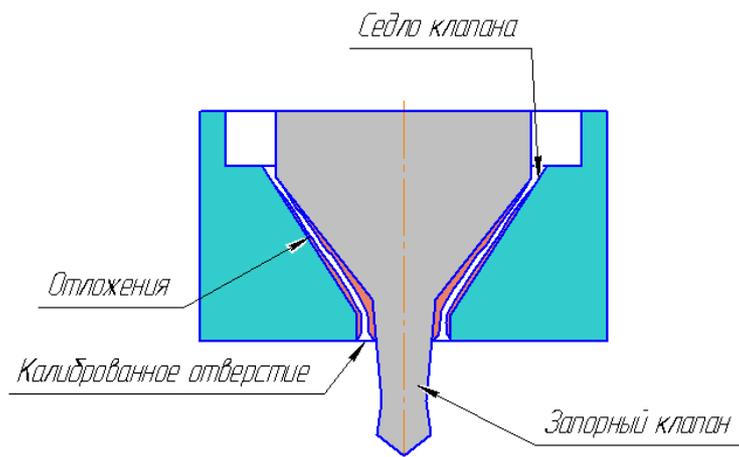


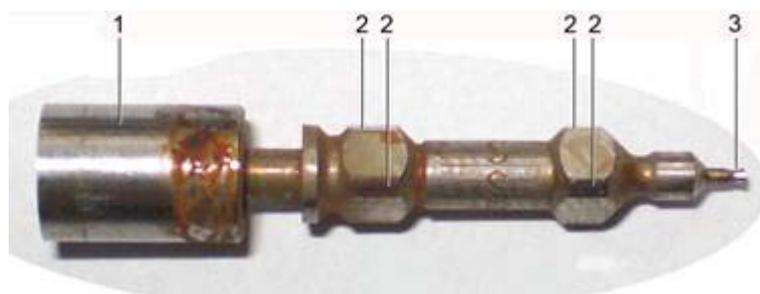
Рисунок 2 – Отложение загрязнений в кольцевой щели электромагнитной форсунки

Если на автомобиле установлена система с обратной связью по сигналу лямбда-зонда, то она сможет при небольшом изменении производительности скомпенсировать это изменение путем увеличения времени впрыска. Однако, у такого увеличения есть предел, называемый пределом регулировки. Более того, если даже средняя производительность комплекта форсунок снизится ненамного, но разница между отдельными форсунками будет значительна, это приведет к неудовлетворительной работе системы. В современных системах управления двигателем пока нет достаточно быстрой обратной связи, позволяющей корректировать время впрыска для каждой форсунки индивидуально. К тому же, многие системы применяют попарный или одновременный тип впрыска, при котором несколько форсунок управляются ECU одним выходным ключом.

Нарушается и форма факела – значит, часть топлива попадает не в просвет впускного канала, а, к примеру, на стенки впускного коллектора. Таким образом, топливо поступает в цилиндр не в виде однородной смеси, а в виде топливной пленки. Также, ухудшается однородность распыления. Из форсунок вылетают крупные капли, не успевающие испариться, перемешаться с воздухом и, следовательно, сгореть в цилиндрах [1-3].

Если в топливе присутствуют мелкодисперсные твердые частицы, проникающие через фильтр тонкой очистки (ржавчина, мелкий песок, некоторые порошкообразные присадки для повышения октанового числа и т.п.), то клапан подвергается абразивному воздействию. Вследствие этого – искажение геометрии дозирующего отверстия, нарушение формы факела топлива, нестабильная производительность инжектора.

В инжекторе накапливаются не только смолы, но и отложения коррозии (рис. 3). Для точного удержания запорного элемента относительно седла при продольных перемещениях, грани иглы и направляющая втулка выполнены в виде прецизионно прилегающей пары. Если смолы откладываются на запорном элементе, клапане и седле и, главным образом, нарушают производительность форсунки и конус распыла, то коррозия в сопряжениях пары увеличивает трение и становится основным фактором роста инерционности иглы в моменты открытия и закрытия инжектора. В зависимости от характера и степени загрязнения это может привести как к уменьшению, так и к увеличению дозы впрыснутого инжектором топлива, а также к ухудшению атомизации, частичному или полному переходу в капельный режим и нарушению герметичности.



1 – сердечник; 2 – направляющие грани; 3 – запорный элемент штока

Рисунок 3 - Игла, покрытая коррозией

Значительно реже встречается другая причина неудовлетворительной работы форсунок – загрязнение входных фильтров. Входные фильтры форсунок относительно небольших размеров и призваны лишь гарантировать чистоту топлива, поступающего в форсунки, отсекая особо мелкие включения, проникшие через магистральный фильтр тонкой очистки топлива. Поглощающая способность их невелика, а засорившись, они оставляют форсунки на голодном пайке. Чтобы этого не допустить, нужно внимательно следить за состоянием фильтра тонкой очистки топлива.

Диагностические признаки загрязненных инжекторов имеют одинаковый характер практически на всех моделях современных автомобилей:

- неустойчивый холостой ход автомобиля: двигатель "троит";
- затрудненный пуск двигателя: двигатель запускается с второго-третьего раза, трудно стабилизируются холостые обороты;
- провал при резком нажатии на педаль акселератора, некомфортное вождение;
- ухудшение разгона автомобиля и потеря мощности: автомобиль с акпп затягивает низшие передачи, вяло набирает скорость, слышны хлопки в выпускной системе;
- пропуски воспламенения топливной смеси: подергивания при разгоне, присутствуют коды ошибок по потери искрообразования (misfire), сопровождающиеся выходом из строя свечей зажигания, высоковольтных проводов, катушек зажигания;
- выход из строя кислородных датчиков (O_2 sensors) и каталитического нейтрализатора: сокращение ресурса обусловлено повышенной температурой выпускных газов и большим количеством несгоревших компонентов, которые осаждаются в выпускном тракте;
- постоянно увеличивающийся расход топлива: так как загрязнение инжекторов - постепенный процесс, то водитель обычно замечает это не сразу.

Последствия продолжительной работы двигателя с загрязненными форсунками, можно разделить по времени воздействия на III стадии:

I стадия возникает при пробегах 10 -30 тыс.км: потеря мощности и некомфортное вождение (вялый разгон, провалы при ускорении, повышенный расход топлива, некорректный режим переключения передач в акпп с электронным управлением, присутствие кодов ошибок в блоке управления двигателем, связанных с работой системы зажигания, кислородных датчиков и др.).

II стадия наступает от 30 тыс.км: на фоне резкой потери мощности, наступает повреждение узлов высоковольтной части системы зажигания (малый ресурс свечей, "пробой" высоковольтных проводов, выход из строя катушек зажигания), двигатель с трудом заводится (а иногда совсем отказывается заводиться) в условиях низких температур.

Накапливается нагар и шлаковые отложения на тарелках клапанов газораспределения, в камерах сгорания, поршнях двигателя. В связи с неэффективным

режимом сгорания воздушно-топливной смеси, накапливаются отложения сажи и шлаков на кислородных датчиках и в катализаторе выпускной системы двигателя. Кислородный датчик выходит из строя, не отработав положенный ресурс, катализатор перегревается и начинает разрушаться.

III стадия наступает всегда, если не будут приняты меры устранения последствий повреждений в I и II стадиях: перегрев и повреждение выпускных клапанов, "залегание" поршневых колец, как следствие этого, резкий износ цилиндров и в итоге - капитальный ремонт двигателя.

Анализ источников информации [1-4], выполненных в этой области, позволяет выделить ряд условий, влияющих на загрязнение электромагнитных форсунок для впрыскивания бензина. Их можно сгруппировать в виде трех основных факторов: температура деталей распылителя, свойства и качество применяемого бензина, время контакта частиц топлива и масла с поверхностью распылителя.

Известно [1-4], что способность системы управления двигателем компенсировать влияние загрязнения форсунок в значительной степени зависит от величины неравномерности подачи топлива форсунками в одном комплекте.

Техническое состояние форсунок, определяемое значением их рабочих показателей, оказывает существенное влияние на энергетические и экологические характеристики автомобильного бензинового двигателя. Загрязнение и износ элементов форсунки могут приводить к ухудшению топливной экономичности, изменению токсичных выбросов с отработавшими газами (ОГ), повышению склонности двигателя к детонации, затрудненному его пуску и ухудшению динамики автомобиля.

Очевидно, что указанные нарушения в работе двигателя требуют очистки или замены форсунок. С целью исследования влияния загрязнения форсунок на параметры двигателя были проведены исследования характеристик двигателей с разными пробегами.

Объектом исследования явились три однотипных комплекта электромагнитных форсунок производства фирмы R. Bosch. Первый комплект форсунок имел наработку 100 тыс. км пробега автомобиля, второй - 150 тыс. км. третий комплект составляли новые форсунки.

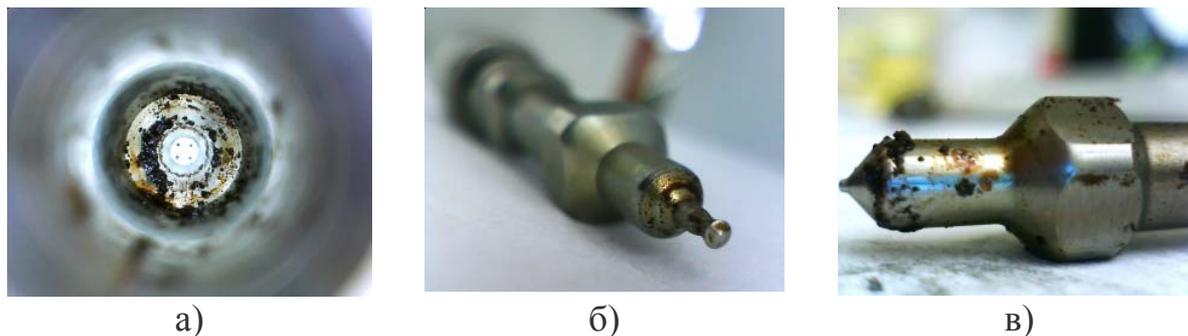
Результаты исследования количественных показателей 1-го и 2-го комплекта относительно величин 3-го (нового) показывают изменение статической производительности $q_{\text{стат}}$ в пределах 0,8... 1,5 % и - 0,5...2,3 % соответственно. Динамическая производительность $q_{\text{дин}}$ изменилась более значительно - на 1,8...5,8 % и 3,2... 12 %. При этом изменения величины неравномерности подачи топлива δ , в 1-ом и 2-ом комплектах форсунок составили 6,0 и 8,5 %.

Во всех случаях прослеживается однозначная тенденция к увеличению различий в количественных показателях с ростом наработки форсунок (пробега автомобиля), причем, чем дольше эксплуатировались форсунки, тем более значительны эти различия по отношению к новым форсункам.

При этом было установлено, что у форсунок со значительной наработкой увеличивается цикловая подача, несмотря на загрязнение ее проточной части.

Таким образом, как количественные, так и качественные показатели электромагнитных форсунок неизбежно изменяются в процессе эксплуатации, что вызывается разнонаправленным действием последствий загрязнения и износа элементов их проточной части.

Полученные микрофотографии показывают наличие как загрязнения элементов проточной части форсунки, так и износа иглы и седла (рис. 4)



а)

б)

в)

а – седло; б – запорный конус; в –запорная игла

Рисунок 4– Фотографии загрязнений элементов форсунки (x50)

Полученные фотографии (рис. 4) различных элементов форсунки свидетельствуют о том что, несмотря на различия составов отечественного и зарубежного бензинов, а также разные условия эксплуатации автомобильной техники в нашей стране и за рубежом, закономерности образования загрязнений в проточной части и их химический состав идентичны.

Анализ фотографий запирающего элемента (иглы) новой форсунки и форсунки с наработкой показывает заметные различия в расположении на поверхности иглы линии ее контакта с седлом. Так, линия контакта на игле у форсунки с наработкой располагается дальше от ее вершины, что свидетельствует о ее более глубокой посадке в седло. Следовательно, при более глубокой посадке иглы увеличивается и величина подъема иглы у форсунки с наработкой. Таким образом, на основе экспериментальных данных можно считать, что причинами изменения показателей форсунок являются как последствия загрязнения се проточной части, так и износа запирающего элемента и седла в процессе эксплуатации.

Были выполнены результаты исследования влияния эксплуатационных изменений показателей электромагнитных форсунок на энергетические и экологические характеристики автомобильного бензинового двигателя ВАЗ-2114.

Сравнительные испытания двигателя ВАЗ-2114 с комплектами форсунок, имеющими различную наработку, проводились на моторном стенде. Снимались внешняя скоростная характеристика, а также ряд нагрузочных характеристик двигателя в диапазоне частот вращения вала $n=1500...3500 \text{ мин}^{-1}$.

Проведенные эксперименты показали, что эксплуатационные изменения рабочих показателей электромагнитных форсунок существенно влияют на энергетические и экологические характеристики автомобильного бензинового двигателя. Так, с форсунками, имеющими наработку 150 тыс. км пробега автомобиля (при отсутствии их периодической очистки), эффективная мощность двигателя N_e , снижается на 3...9 %, а эффективный крутящий момент M_e падает на величину 4...6 % в диапазоне $n = 5500 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 5).

Удельный эффективный расход топлива возрастает на 6 % при одновременном увеличении выброса токсичных компонентов с отработавшими газами - оксида углерода CO на 15...25 %, углеводородов CH - на 15...40 % (рис. 6). Это может приводить к ухудшению динамики автомобиля и пусковых качеств двигателя.

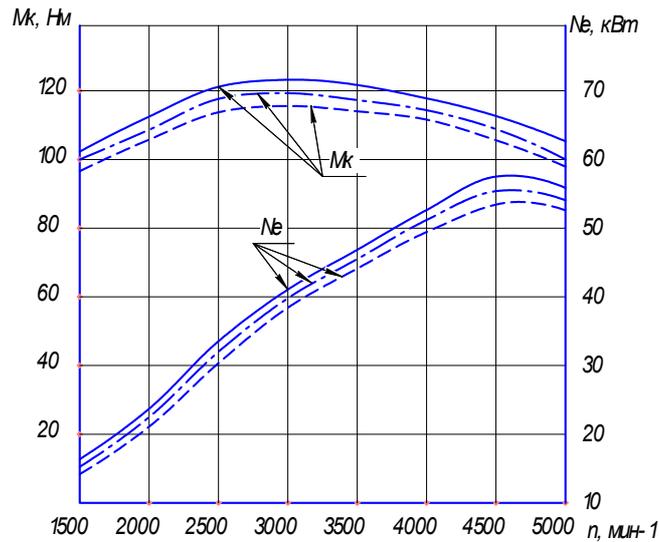
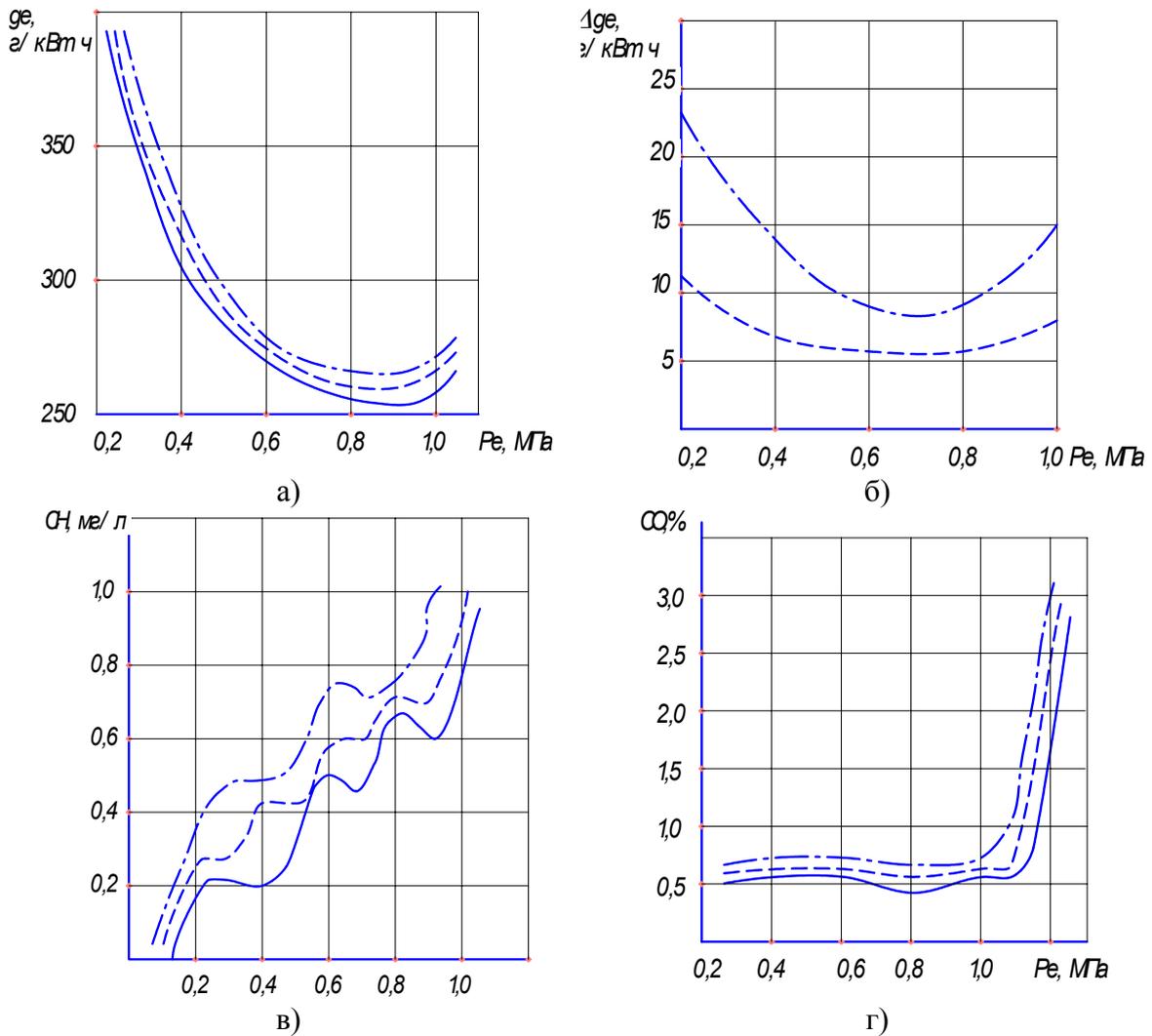


Рисунок 5 – Изменение показателей по внешней скоростной характеристике двигателя ВА3-2111



а - удельный эффективный расхода топлива g_e ; б - относительная разница по удельному расходу топлива Δg_e ; в - выбросы углеводородов СИ; г - выбросы оксида углерода СО

Рисунок 6 – Изменение показателей двигателя ВА3-2114 по нагрузочной характеристике (частота вращения вала $n=3000 \text{ мин}^{-1}$)

Основными причинами падения характеристик двигателя при эксплуатационном изменении рабочих показателей форсунок является ухудшение смесеобразования вследствие снижения качества диспергирования топлива и уменьшения угла конуса распыливания топлива при снижении завихренности потока в проточной части форсунок, а также возрастающая неравномерность цикловых подач топлива в их комплекте.

Следует отметить, что в системах управления двигателями с использованием контура обратной связи по сигналу λ -зонда, контроллер не может компенсировать возрастающую неравномерность цикловых подач в комплекте форсунок, поскольку корректирующая поправка для управляющего импульса форсунок определяется в целом для всего двигателя, а индивидуальные различия в дозировании топлива форсунками по отдельным цилиндрам учесть невозможно.

Выводы. Выполнен анализ процессов загрязнения и последствий износа элементов электромагнитной форсунки, выявлено их влияние на работу автомобильного бензинового двигателя.

Экспериментально полученные данные по эксплуатационным изменениям рабочих показателей электромагнитных форсунок свидетельствуют о том, что после наработки 150 тыс. км пробега автомобиля их рабочие характеристики могут существенно изменяться, причем, как в сторону увеличения, так и уменьшения динамической производительности. При этом наиболее критичным для двигателя является возрастающая неравномерность подачи топлива в комплекте форсунок, которую не может компенсировать микропроцессорная система управления двигателем.

Эксплуатационные изменения рабочих показателей электромагнитных форсунок существенно влияют на энергетические и экологические характеристики автомобильного бензинового двигателя. Так, после наработки форсунок 150 тыс. км пробега автомобиля (при отсутствии их периодической очистки) эффективная мощность двигателя снижается на 3...9 %, эффективный крутящий момент падает на величину 4...6 %. При этом возрастает удельный эффективный расход топлива на 2...6 % и увеличивается выброс токсичных компонентов с отработавшими газами - оксида углерода CO на 15...25 %, углеводородов CH - на 15...40 %. В целом это приводит к ухудшению динамики автомобиля и пусковых качеств двигателя.

Список литературы

1. Овчинников Г.В. Влияние загрязнения и износа элементов электромагнитных форсунок на характеристики автомобильного бензинового двигателя. Автореф. дис. канд. техн. наук/Овчинников Г. В. – Владимир, 2009. – 18 с.
2. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей. — М.: За рулем, 1998.-440 с.
3. Системы управления бензиновыми двигателями. Пер. с нем. 1-е русское изд. М.: За рулем, 2005. - 432 с.
4. Ерохов В.И. Системы впрыска легковых автомобилей: эксплуатация, диагностика, техническое обслуживание и ремонт. — М.: Астрель-АСТ, 2003. — 159 с.
5. Ананьин А.Д. Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник/А.Д. Ананьин и др. М.: Академия, 2008.
6. Автомобильный справочник Bosch/пер. С англ.. М.: За рулем, 2004.

Michael Krasota, Igor Shepelenko, Alexander Matvienko, Al Soodani Salem M. Mutashair

Kirovograd National Technical University

Investigation of the effect of contaminants on the parameters of electromagnetic injectors gasoline engines

Aim of work - to prospect influence of contaminations of electromagnetic sprayers on the operating and ecological indexes of petrol engines. The analysis of processes of contamination and consequences of wear of elements of electromagnetic sprayer is executed, their influence is educed on work of motor-car petrol engine.

Most critical for an engine is an increasing unevenness of serve of fuel in the complete set of sprayers, that the microsystem of management can not compensate by an engine. Exploitation of change of working indexes of electromagnetic sprayers substantially influence on power and ecological descriptions of motor-car petrol engine. After work of sprayers 150 thousand kilometre of run of car(in default of their periodic cleaning) effective engine power goes down on 3...9 an effective twisting moment falls on a size 4...6 Here the specific effective expense of fuel increases on 2...6 the troop landing of toxic components increases with by working gases - oxide of carbon With on 15...25 hydrocarbons of CH - on 15...40. On the whole it results in worsening of dynamics of car and starting internalss of engine.

omagnetic injector , contaminants motor

Одержано 21.10.13

УДК 621.644:621.833.15

Ю.В. Кулешков, проф., канд. техн. наук, Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук, М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, К.Ю. Кулешкова, инж
Кировоградский национальный технический университет

Анализ экспериментальных исследований пульсации мгновенной подачи шестеренного насоса

В статье представлены результаты анализа результатов экспериментальных исследований пульсации мгновенной подачи и давления за рабочий цикл шестеренного насоса и сравнение их с результатами теоретических исследований.

шестеренный насос, мгновенная подача, пульсация

Ю.В. Кулешков, Т.В. Руденко, М.В. Красота, К.Ю. Кулешкова

Кировоградський національний технічний університет

Аналіз експериментальних досліджень пульсації миттєвої подачі шестеренного насоса

В статті представлені результати аналізу результатів експериментальних досліджень пульсації миттєвої подачі та тиску за робочий цикл шестеренного насосу і порівняння їх з результатами теоретичних досліджень.

шестеренний насос, миттєва подача, пульсація

Актуальность. Шестеренный насос (НШ) имеет высокие удельные характеристики, малую зависимость работоспособности от запыленности и температуры окружающей среды, что позволило ему найти самое широкое распространение в гидроприводах машин разного назначения: начиная с сельскохозяйственных, горнодобывающих, дорожных и строительных машин и заканчивая авиационной техникой. Одним из недостатков в работе НШ является пульсация мгновенной подачи (МГП) и давления.

Разработка и исследование методов снижения пульсации МГП и давления НШ является актуальной научно-технической проблемой, которая имеет важное значение для развития насосостроения в Украине.