Тип статьи: научная
УДК 73.31.41
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-5-26-35

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФОРСУНОК БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Дмитрий Владимирович Доровских [1]***, Анатолий Александрович Лавренченко*** [2]
[1,2] *Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия*
[1] dima.dorovskikh@yandex.ru, [2] anatoliy_658@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Доровских, dima.dorovskikh@yandex.ru
Corresponding author: Dmitry Dorovskikh, dima.dorovskikh@yandex.ru

Реферат. *Возникновение отклонений в работе системы питания, связанное с закоксовыванием топливоподающих форсунок, возможно при длительной эксплуатации автомобилей. Чаще всего, такая неисправность возникает, когда автомобиль дополнительно оснащен системой питания сжиженным (LPG) или сжатым (CNG) газом. В этом случае штатные форсунки, отвечающие за подачу бензина, работают непродолжительное время и не могут самоочищаться во время эксплуатации. Проведен анализ конструктивных особенностей бензиновых форсунок, влияющих на количество и форму топливных струй. Основные механизмы возникновения засорения и закоксовывания бензиновых форсунок, а также их влияние на работу двигателей с искровым зажиганием, рассмотрены. Обзор методов тестирования и восстановления рабочего состояния бензиновых форсунок представлен, результаты тестирования 12 комплектов форсунок до очистки и после приведены. Анализ полученных результатов показывает, что до очистки в 42% случаев одна форсунка имела большое отклонение; в 25% случаев две форсунки имели большое отклонение; в 17% случаев 4 форсунки находились за пределами медианного значения; в 17% случаев форсунки находились в пределах нормы. После очистки 75% форсунок находились в пределах нормы; в остальных случаях, хотя и выходящих за пределы нормы, наблюдалось улучшение параметров, за исключением одного случая, когда наблюдалось небольшое ухудшение. В большинстве случаев, ультразвуковая очистка позволяет восстановить работоспособное состояние форсунок, однако в единичных случаях, возможна заметная разница в расходе форсунок, подразумевающая дальнейшую их выбраковку и замену.*

Ключевые слова: *бензиновые форсунки, засорение, тестирование, разница в расходе топлива.*

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASONIC CLEANING ON THE PERFORMANCE OF ELECTROMAGNETIC INJECTORS OF GASOLINE ENGINES

Dmitriy Dorovskikh [1]***, Anatolij Lavrenchenko*** [2]
[1,2] *Tambov state technical university, Tambov, Russia*
[1] dima.dorovskikh@yandex.ru, [2] anatoliy_658@mail.ru

Abstract. *The occurrence of deviations in the operation of the power system associated with coking of the fuel injectors is possible during long-term operation of vehicles. Most often, such a malfunction occurs when the car is additionally equipped with a liquefied gas (LPG) or compressed gas (CNG) power system. In this case, the standard injectors responsible for supplying gasoline operate for a short time and cannot self-clean during operation. An analysis of the design features of gasoline injectors affecting the number and shape of fuel jets was carried out. The main mechanisms of clogging and coking of gasoline injectors, as well as their impact on the operation of spark-ignition engines, are considered. A review of methods for testing and restoring the operating condition of gasoline injectors is presented, the results of testing 12 sets of injectors before and after cleaning are given. Analysis of the results shows*

that before cleaning, in 42% of cases one nozzle had a large deviation; in 25% of cases, two nozzles had a large deviation; in 17% of cases, 4 injectors were outside the median value; in 17% of cases the injectors were within normal limits. After cleaning, 75% of the injectors were within normal limits; in the remaining cases, although outside the normal range, an improvement in parameters was observed, with the exception of one case where a slight deterioration was observed. In most cases, ultrasonic cleaning allows the injectors to be restored to working condition, however, in isolated cases, a noticeable difference in the injector consumption is possible, implying their further rejection and replacement.

Keywords: *gasoline injectors, fouling, testing, difference in fuel flow.*

Для цитирования: Доровских Д.В., Лавренченко А.А. Исследование влияния ультразвуковой очистки на показатели работы электромагнитных форсунок бензиновых двигателей // Наука в центральной России. 2023. Т. 65, № 5. С. 26-35. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-26-35.

For citation: Dorovskikh D., Lavrenchenko A. Investigation of the effect of ultrasonic cleaning on the performance of electromagnetic injectors of gasoline engines. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 65(5): 26-35. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-26-35.

Введение. Бензиновые двигатели с коллекторным впрыском топлива по сравнению с дизельными двигателями имеют преимущество по выбросам токсичных компонентов в выхлопных газах, таких как NOx и твердые частицы, но не по выбросам углекислого газа из-за более низкого КПД и, соответственно, более высокого расхода топлива [1]. Большая часть автопарка, особенно старых автомобилей, оборудована дополнительной газовой топливной системой на метане или пропан-бутане, и в этом есть свои экологические преимущества. Этот положительный эффект может быть снижен при длительной эксплуатации и некачественном обслуживании топливных систем [2]. Что касается элемента, отвечающего за непосредственную подачу топлива - форсунки, то наиболее частыми проблемами системы впрыска бензина является частичная закоксовка отдельных форсунок, что приводит к разной подаче топлива в отдельные цилиндры, то есть разной цикловой подаче топлива [3], [4]. Это может привести к ухудшению рабочего процесса в отдельных цилиндрах, повышенному расходу топлива, влиянию на вредные выбросы, в нагруженных двигателях к повреждениям в цилиндро-поршневой группе, из-за работы на бедных смесях в одном или нескольких цилиндрах.

Материалы и методы.

Конструкция форсунок.

Электромагнитные форсунки служат для дозирования топлива и обеспечения необходимого качества смесеобразования. По сути, они представляют собой быстродействующий нормально закрытый гидравлический клапан, который открывается под действием электромагнита и закрывается под действием пружины (Рисунок 1) [5].

На рисунке 1а показана конструкция одного из наиболее распространенных современных типов электромагнитных форсунок [6]. Игла 6 на нижнем конце заканчивается уплотнительным сферическим элементом. При отсутствии напряжения на катушке форсунки игла прижимается к седлу силой пружины (и давлением топлива). Седло имеет форму конуса с центральным отверстием. При подаче напряжения, под действием электромагнитного поля, уплотнительный сферический элемент поднимается с посадочного места и происходит подача топлива. При прерывании тока возбуждения, игла клапана под действием силы пружины вновь перемещается к седлу, прекращая подачу топлива. В конструкции данного типа, подача топлива и формирование топливной струи осуществляется с помощью направляющего распылителя, расположенного под седлом. Распылитель может быть с одним или несколькими отверстиями (чаще всего 1, 2 и 4; в отдельных случаях до 12), которые могут располагаться вертикально или под углом. Количество впрыскиваемого топлива в единицу времени в основном определяется геометрией зоны впрыска топлива (диаметром и количеством отверстий в распылителе), давлением топлива и противодавлением во впускном коллекторе. Герметичность форсунки в районе седла обеспечивается за счет принципа конусно-сферического уплотнения.

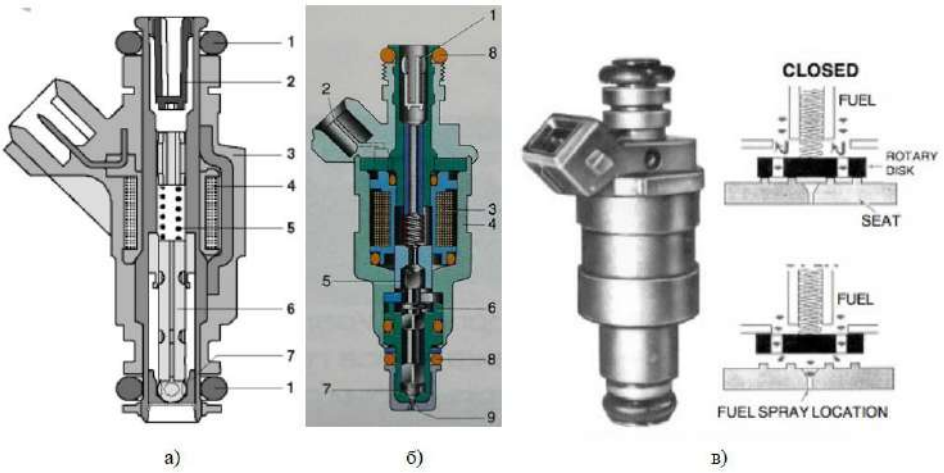

Рисунок 1 - Электромагнитные форсунки:
1а) 1 - уплотнительное кольцо, 2 – фильтр, 3 – корпус, 4 – электромагнитная катушка, 5 – пружина, 6 – игла, 7 – седло клапана и распыливающая пластина с отверстиями;
1б) 1 – фильтр, 2 - электрический разъем, 3 - электромагнитная катушка, 4 – корпус, 5 – сердечник, 6-корпус клапана, 7 - игла клапана, 8 – уплотнительное кольцо, 9 – распылительное отверстие

Кроме упомянутого выше типа, широко распространенной, особенно для старых автомобилей, является конструкция, в которой на переднем конце иглы образован специальный штифт для распыливания топлива - (Рисунок 1б). Уплотнительная поверхность клапана имеет коническую форму, а участок, где распыляется топливо, имеет кольцевую форму и образован между штифтом иглы клапана и центральным отверстием в седле.

В третьей распространенной конструкции, (Рисунок 1в) подвижный и уплотняющий элемент представляет собой диск, по которому топливо поступает через отверстие в направляющей пластине. Герметичность обеспечивается уплотнением диска к кольцу. Поскольку отверстие расположено сравнительно высоко, эти форсунки менее чувствительны к загрязнению и за счет небольшой массы диска обладают высоким быстродействием.

На смесеобразование влияет формирование топливной струи, то есть ее форма, угол направления и размер капель топлива в ней. Чтобы добиться хорошего распыления топлива в сочетании с малыми потерями на конденсацию и избежать образования пленочного слоя топлива, необходимо исключить попадание распыленного топлива на стенки впускного коллектора. Это означает, что для конкретного двигателя, на рассчитанном расстоянии от впускного клапана до форсунки, необходимо использовать форсунку с определенным углом струи.

На рисунке 2 показаны наиболее распространенные формы топливной струи [6].

Одиночная концентрированная струя (Рисунок 2а) – тонкая концентрированная и пульсирующая струя, в значительной степени позволяющая избежать попадания части распыленного топлива на стенки впускного коллектора. Такая форма струи подходит там, где между распылителем форсунки и впускным клапаном имеется большое расстояние. По современным представлениям, данный тип струи не рекомендуется из-за низкой степени распыления топлива и повышенного содержания углеводородов в выхлопных газах. Угол α80 – это угол, на который приходится 80% массы впрыскиваемого топлива.

Коническая струя (Рисунок 2.б) – формируется, когда через отверстия впрыска поступает одна или несколько отдельных струй топлива, при их перекрытии образуется конус. Типичная область применения конусно-струйных форсунок – двигатели с одним впускным клапаном на цилиндр. В некоторых случаях, они могут находить применение и в двигателях с двумя впускными клапанами на цилиндр.

Двойная струя (Рисунок 2.с) – такие форсунки используются в двигателях с двумя или тремя впускными клапанами на цилиндр. Отверстия для впрыска топлива в распылительной пластине

расположены таким образом, что образуются две топливные струи, которые, в свою очередь, могут состоять из нескольких отдельных струй. На угол α50 приходится 50% массы впрыскиваемого топлива и представляет собой угол расхождения двух струй. Угол β — это такой угол, на который приходится 70% массы единичной струи.

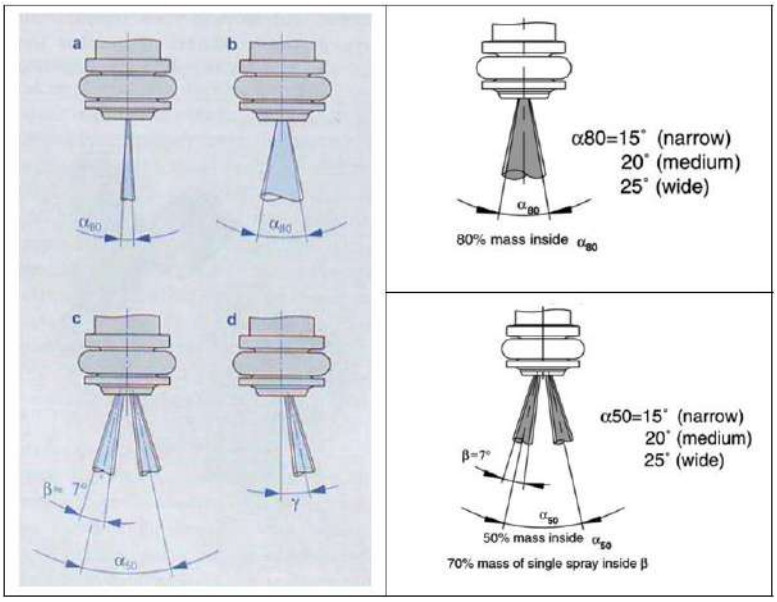

Рисунок 2 – Форма топливных струй

Топливная струя, в некоторых случаях, может отклоняться от оси форсунки на определенный угол γ с целью получения правильного состава горючей смеси.

Заданные параметры топливных струй получены на специальных лабораторных установках по стандартам SAE J1832 и SAE J2715.

Основная проблема при длительной эксплуатации – загрязнение и частичное засорение распылителя форсунки.

Механизм изменения характеристик топливных форсунок.

Существует несколько механизмов изменения характеристик форсунок. Первый связан с постепенным увеличением отверстий, вследствие естественного износа от проходящего топлива, что приводит к увеличению цикловой подачи. Это происходит при длительной эксплуатации и связано с эрозионным износом отверстий, через которые впрыскивается топливо. Износ отверстий распылителя приводит к изменению формы конуса распыла и практически не влияет на угол выхода топливной струи.

Другой основной механизм связан с уменьшением проходного сечения отверстий распылителя. Он выражается в постепенном накоплении отложений в области распылителя [7,8,9].

При отключении импульсов, подаваемых на форсунку, на ее передней части образуется капля бензина, а также могут налипать пары масла из вентиляции картера. Под действием повышенной температуры легкие фракции топлива испаряются, а алкены и другие тяжелые фракции углеводородов накапливаются в виде отложений, которые уменьшают площадь поперечного сечения калиброванного отверстия. Этот процесс сильно зависит от температуры, а также от состава и чистоты используемого топлива.

Алкены, называемые также олефинами, - это ненасыщенные углеводороды, высшие из которых представляют собой твердые воскообразные бесцветные вещества. Они являются одним из основных компонентов топлива (до 10%). Они могут вызывать образование отложений на впускных клапанах и передней части форсунок. Топливо с высоким содержанием алкенов требует дополнительных химических присадок для предотвращения образования отложений.

Бензин является хорошим растворителем, и при следующем запуске форсунок большая часть загрязнений смывается, но не большая часть может оставаться. Многократное повторение

вышеописанного процесса приводит к постепенному накоплению частиц нагара и уменьшению проходного сечения. Отложения могут постепенно покрывать всю периферию отверстия или частично только определенную область и постепенно увеличиваться, что в таком случае может привести к изменению формы и направления струи топлива.

Двигатели с непосредственным впрыском очень чувствительны к изменению формы струи и качества распыла, так как требуется, чтобы струя попадала в четко определенную область камеры сгорания, где должен быть достигнут локальный коэффициент избытка воздуха $\alpha \approx 1$.

Двигатели с впрыском во впускной коллектор, в основном чувствительны к уменьшению цикловой подачи топлива. При ухудшении качества впрыска, ухудшаются переходные характеристики двигателя и увеличивается содержание углеводородов в отработавших газах.

Уменьшение предельного проходного сечения на 8…10% в одной форсунке может привести к обеднению смеси и на некоторых режимах к пропускам воспламенения. В этом случае, в систему выпуска отработавших газов попадает несгоревший кислород, и датчик кислорода передает в электронный блок управления (ЭБУ) информацию о обедненной смеси. ЭБУ компенсирует это увеличением времени открытия на всех форсунках, что приводит к образованию богатой смеси в остальных цилиндрах и, соответственно, к увеличению расхода топлива и изменению токсичности отработавших газов.

Проверка и восстановление работоспособности форсунок.

Проверка работоспособности форсунок обычно проводится на стендах (Рисунок 3), имеющих возможность измерения расхода, качества распыла и герметичности - после прекращения подачи импульсов на форсунку не должно быть утечки топлива.

Для проверки расхода форсунок из-за взрывоопасности бензина не используют бензин, а применяют жидкости с аналогичными свойствами по вязкости и плотности. Допустимое отклонение от заданного расхода для новых форсунок, в большинстве случаев, составляет ±2%. Технические характеристики статического расхода форсунок обычно указываются при испытаниях с использованием n-гептана (Bosch, Siemens), при температуре 20°C, давлении 3,0 бар, напряжении 13,5 или 14 В постоянного тока. Другой, часто используемой испытательной жидкостью, особенно в условиях станций технического обслуживания (СТО), является уайт-спирит. Следует отметить, что из-за разной плотности тестовых жидкостей, измеренный расход будет разным, причем разница между n-гептаном и бензином составляет порядка 3÷4%, так как бензин имеет более высокую скорость истечения.

Рисунок 3 - стенд ASNU
a) общий вид, b) окно контроля качества распыления c) мерные цилиндры для контроля расхода

Измерение расхода с наименьшей погрешностью относительно заданных значений в условиях СТО трудоемко, так как расход очень чувствителен к свойствам тестовой жидкости - вязкости, плотности и температуре. Обычно, во время испытаний, температура тестовой жидкости значительно повышается, поэтому для поддержания ее значений в заданных пределах, тестовую жидкость необходимо охлаждать с помощью теплообменника. Большинство стендов не имеют такой возможности.

Следует иметь в виду, что в эксплуатации важно следить не столько за отклонением расхода от заводских данных, сколько за разницей в работе отдельных форсунок, так как система управления двигателем работает с обратной связью и при равномерном изменении расхода всех форсунок может самоадаптироваться на определенный процент.

Существует несколько методов очистки форсунок. Первый метод предполагает очистку с помощью сильных химических растворителей, добавляемых в топливо в баке. Достоинствами этого метода являются: простота применения, низкая стоимость, отсутствие необходимости демонтажа форсунок, наличие на рынке большого разнообразия коммерческих присадок. Недостатки связаны с возможностью растворения выпавших в осадок смолистых продуктов из бака и их постепенного осаждения на распылителе форсунки; невозможностью оценить, все ли форсунки восстановили свое рабочее состояние. Помимо закоксовывания, которое является наиболее распространенной неисправностью, форсунки могут иметь и другие проблемы, такие как электрические неисправности, заедание якоря, внешние утечки, частичное засорение фильтров механическими примесями, пружины с пониженной жесткостью и другие.

Следующий способ - очистка с использованием химических растворителей, заменяющих основное топливо и подаваемых непосредственно в систему питания двигателя. В этом случае используется установка для очистки системы питания с собственной системой циркуляции, которая подключается к входу и выходу топливной рейки, и двигатель работает только на жидкости из установки в течение 30 минут. Преимуществами являются более быстрый результат, по сравнению с предыдущим методом и возможность очистки верхней части тарелок впускных клапанов. Недостатки - невозможность оценить состояние после очистки; более высокая стоимость; существует риск повреждения некоторых компонентов системы питания из-за высокой концентрации агрессивных химических веществ; выделение вредных компонентов в процессе проведения процедуры очистки.

Третий способ - очистка в ультразвуковой ванне. Ультразвуковая ванна для очистки форсунок представляет собой емкость, на внешней стороне дна которой закреплены один или два пьезоэлектрических излучателя ультразвуковых волн с частотой 20 кГц или 40 кГц. Волны передаются от корпуса к жидкости в ванне и вызывают колебания с высокой частотой - 20 000 раз в секунду. Во время очистки на форсунку также подаются электрические импульсы, и за счет движения иглы часть жидкости поднимается вверх во внутренний канал форсунки, т.е. происходит обратный поток. Очистка основана в основном на явлении кавитации, а не столько на моющих свойствах используемого моющего средства, которое обычно имеет водную основу и является биоразлагаемым.

Кавитация - это явление, при котором в жидкости образуются паровые пузырьки в результате локального перепада давления или при прохождении интенсивной акустической волны. Когда образовавшийся пузырек попадает в область жидкости с повышенным давлением, пар конденсируется, образуется вакуум, и окружающая жидкость с большой скоростью устремляется к центру, где встречающиеся частицы вызывают микрогидравлический удар, сопровождающийся локальным давлением очень высокой величины. Таким образом, достигается эффект микроочистки и удаления поверхностных загрязнений.

Достоинствами метода ультразвуковой очистки являются: высокая степень очистки; возможность последующей проверки в различных режимах основных характеристик форсунок - изменение расхода между отдельными форсунками, качество распыления, герметичность; в случае необходимости некоторые их детали могут быть заменены на новые - например, нижние уплотнительные кольца; фильтры форсунок; защитные теплоизоляционные колпачки (Рисунок 1б). Недостатками данного метода являются его относительная дороговизна, трудоемкость и необходимость снятия форсунок с двигателя.

Результаты и обсуждение.

Для исследований были взяты бензиновые форсунки автомобилей, оснащенных газовой системой, у которых возникла проблема с работой двигателя на бензине. Исследования проводились на стенде ASNU Classic GDI (Рисунок 3). Стенд позволяет проверять расход, качество распыла и герметичность, очищать форсунки с помощью встроенной ультразвуковой ванны [10]. Рабочее давление регулируется в диапазоне 1…8 бар. Некоторые особенности стенда:

- может использоваться для всех типов форсунок систем с впрыском во впускной коллектор и непосредственным впрыском (без пьезоэлектрических форсунок);
- реализованы режимы статического и динамического испытания;
- реализованы 18 различных режимов для установки длительности впрыска и оборотов;
- есть функция тестирования индуктивности обмоток форсунок;
- USB-подключение к ПК для установки длительности и тока импульса.

Типичная проверка начинается со снятия форсунок с двигателя, внешней очистки от пыли и грязи и установки на стенд. В первую очередь проверяется герметичность. Для этого насос запускается на 120 секунд, в течение которых форсунки тщательно осматриваются на предмет утечек. По данным некоторых производителей, допускается образование капли, которая не должна капать в течение 30 или 60 секунд, и эти значения обычно указываются в специализированных диагностических программах, например Bosch ESI[tronic].

Следующей проверкой является проверка качества распыла топлива (Рисунок 3б). Здесь форсунки устанавливаются в верхней части стенда и визуально определяется качество распыла, сами форсунки крепятся на стойке на уплотнительных кольцах и есть возможность поворачивать их по отдельности для лучшего наблюдения за струей топлива.

Третья и самая важная проверка - проверка объемного расхода форсунок. Допустимое отклонение расхода между отдельными форсунками составляет ±2% для новых форсунок. Здесь возможны два вида проверки - статическая и динамическая. Статические испытания проводятся при 100%-ном импульсном заполнении, т.е. форсунка непрерывно впрыскивает топливо в течение предварительно заданного периода времени - обычно 30 или 60 секунд. Статический тест служит для сравнения сечения отверстий отдельных форсунок, при этом любые электрические неисправности в подъеме иглы форсунки игнорируются. При динамической проверке выбирается один из 16 предустановленных режимов. В проведенных испытаниях использовался режим 6, при котором длительность импульса составляла 6 мс при частоте 2500 мин$^{-1}$.

Таблица 1 - Результаты измерений расхода форсунок

№	Марка автомобиля	Режим	Δ расход до очистки, [%]				Δ расход после очистки, [%]			
			1 ф.	2 ф.	3 ф.	4 ф.	1 ф.	2 ф.	3 ф.	4 ф.
1	Honda Accord 2.0, 2005г.	Стат. 100% откр.	0.5%	-4.5%	-0.5%	0.5%	0.5%	-0.5%	-0.5%	0.5%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	0.5%	-4.6%	-0.5%	1.5%	0.0%	-2.0%	0.0%	0.0%
2	BMW 318 e46 1.9, 1998г.	Стат. 100% откр.	1.0%	-2.0%	-1.0%	1.0%	0.0%	-1.0%	0.0%	0.0%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	-0.5%	-1.5%	0.5%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%
3	VW Golf 1.8, 1997г.	Стат. 100% откр.	-2.1%	-3.1%	3.1%	2.1%	-0.5%	-2.5%	0.5%	0.5%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	-3.1%	-6.2%	3.1%	3.1%	-1.5%	-3.6%	1.5%	1.5%
4	Toyota Avensis T25 1.8, 2007г.	Стат. 100% откр.	0.5%	-0.5%	0.0%	0.0%	0.5%	-0.5%	0.0%	0.0%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	0.0%	-1.5%	0.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%
5	Toyota Avensis T22, 1.8, 2003г.	Стат. 100% откр.	-0.3%	-2.3%	0.8%	0.3%	0.5%	-0.5%	0.0%	0.0%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	1.0%	-5.1%	-1.0%	2.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%
6	Subaru Outback EJ20 2.0, 2005г.	Стат. 100% откр.	-5.6%	-0.5%	0.5%	1.5%	-1.5%	0.0%	0.0%	0.0%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	-4.7%	-2.6%	3.6%	2.6%	-1.3%	-0.3%	0.8%	0.3%
7	Renault 21 2.0i, 1991г.	Стат. 100% откр.	0.0%	3.8%	0.0%	-3.8%	-0.5%	5.3%	0.5%	-2.4%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	1.0%	4.9%	-1.0%	-2.9%	0.0%	5.4%	0.0%	0.0%
8	Opel Astra F 1.4i, 1992г.	Стат. 100% откр.	0.8%	-0.3%	-4.0%	0.3%	1.6%	0.5%	-1.6%	-0.5%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	1.6%	0.0%	-6.5%	0.0%	1.1%	0.0%	-2.1%	0.0%

9	Peugeot 106 KWF 1.4i, 2001г.	Стат. 100% откр.	-34.5%	0.0%	-6.9%	0.0%	-9.3%	0.0%	-4.7%	1.2%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	-27.3%	0.0%	-6.1%	1.5%	-8.3%	0.0%	-4.6%	1.5%
10	Opel Astra G 2.2i, 2001г.	Стат. 100% откр.	4.3%	-0.9%	-0.9%	0.9%	0.8%	-0.8%	-1.7%	0.8%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	0.4%	0.0%	-0.9%	0.0%	0.0%	-0.4%	0.0%	0.0%
11	BMW 318 e46 1.9, 1999г.	Стат. 100% откр.	-0.6%	0.6%	1.2%	-1.2%	-0.6%	0.0%	0.0%	0.0%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	-1.2%	1.2%	2.9%	-1.2%	-0.6%	0.6%	1.2%	-0.6%
12	Mercedes C180 (W203), 1.8i, 2004г.	Стат. 100% откр.	1.6%	-1.6%	2.6%	-2.1%	1.6%	-1.6%	0.5%	-0.5%
		2500мин$^{-1}$, 6мс	0.8%	-0.8%	3.4%	-3.9%	1.5%	-2.0%	1.5%	-1.5%

В таблице 1 приведены результаты измерений расхода форсунок 12 автомобилей у которых была дополнительно установлена в сертифицированной мастерской система питания сжиженным газом, которая, по мнению водителей, привела к ухудшению характеристик работы двигателя на бензине. Для упрощения интерпретации результатов, расход представлен в виде разницы с медианным значением.

Из анализа результатов, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что до очистки в 42% случаев одна форсунка имела большое отклонение; в 25% случаев две форсунки имели большое отклонение; в 17% случаев 4 форсунки находились за пределами медианного значения; в 17% случаев форсунки находились в пределах нормы. После очистки 75% форсунок находились в пределах нормы; в остальных случаях, хотя и выходящих за пределы нормы, наблюдалось улучшение параметров, за исключением одного случая, когда наблюдалось небольшое ухудшение параметров.

Выводы. В статье сделан обзор методов тестирования и восстановления работоспособного состояния форсунок, механизма ухудшения характеристик впрыска и представлены результаты испытаний 12 автомобилей. Основные выводы:

1. Наиболее распространенным случаем является тот, когда одна из форсунок имеет значительную разницу в расходе по сравнению с другими; за ним следует случай, когда две форсунки имеют большое отклонение;

2. В большинстве случаев, ультразвуковая очистка позволяет восстановить работоспособное состояние форсунок;

3. После очистки, настоятельно рекомендуется проверить форсунки, так как в небольшом проценте случаев, несмотря на некоторое улучшение, их параметры могут выходить за рамки допустимого отклонения. В единичных случаях, возможна заметная разница в расходе форсунок, подразумевающая дальнейшую их выбраковку и замену.

Список источников

1. Залознов, И. П. Повышение эффективности эксплуатации автомобилей за счет обоснования периодичности обслуживания электромагнитных форсунок : специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Залознов Иван Павлович. – Омск, 2003. – 115 с. – EDN NMOSZH.

2. Система питания автомобильных и тракторных газовых двигателей : Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки "Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов", "Агроинженерия" / А. А. Лавренченко, С. М. Ведищев, А. В. Милованов [и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2021. – 151 с. – ISBN 978-5-8265-2443-5. – EDN GCGVJA.

3. Залознов, И. П. Физико-химическая сущность процессов смолообразования в топливной системе бензиновых двигателей с впрыском / И. П. Залознов, Н. Г. Певнев // Современные проблемы транспортного строительства, автомобилизации и высокоинтеллектуальные научно-педагогические технологии : Тезисы докладов на Международной научной конференции,

посвященной 70-летию СибАДИ, Омск, 20–24 сентября 2000 года. Том I. – Омск: Сибади, 2000. – С. 59-60. – EDN YXJPRR.

4. Доровских, Д. В. Характер загрязнений распылителей форсунок, условия и механизм их образования / Д. В. Доровских, Е. А. Андреева // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : Материалы 3-й международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, 27 июня 2016 года. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2016. – С. 245-247. – EDN XXCOWP.

5. Ерохов, В. И. Системы впрыска бензиновых двигателей: конструкция, расчет, диагностика / В. И. Ерохов. – Москва, 2011. – 552 с. – ISBN 978-5-9912-0130-8. – EDN PZTVEZ.

6. Автомобильный справочник [Текст] / Konrad Reif и др.; Bosch. -3-е изд. - Москва: За рулем, печ. 2012. -1274 с.

7. Лисин, В. А. Повышение эффективности эксплуатации газобаллонных автомобилей путем обоснования нормативов обслуживания двухтопливной системы питания: специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лисин Виталий Александрович. – Омск, 2005. – 120 с. – EDN NNJOCN.

8. Овчинников, Г. В. Влияние загрязнения и износа элементов электромагнитных форсунок на характеристики автомобильного бензинового двигателя: специальность 05.04.02 "Тепловые двигатели": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Овчинников Григорий Викторович. – Владимир, 2009. – 144 с. – EDN NQQGQR.

9. Пантюхов, В. Д. Восстановление характеристик электромагнитных форсунок для впрыскивания бензина / В. Д. Пантюхов, И. П. Васильев // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Материалы Международной научно-практической конференции: Электронный ресурс, Омск, 07–09 декабря 2016 года. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), 2016. – С. 695-700. – EDN XSRLHX.

10. ASNU CLASSIC GDI – Instruction manual, Asnu corporation Europe Ltd, 2019.

Reference

1. Zaloznov, I. P. Povyshenie effektivnosti ekspluatacii avtomobilej za schet obosnovaniya periodichnosti obsluzhivaniya elektromagnitnyh forsunok: special'nost' 05.22.10 "Ekspluataciya avtomobil'nogo transporta": dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskih nauk / Zaloznov Ivan Pavlovich. – Omsk, 2003. – 115 s. – EDN NMOSZH.

2. Sistema pitaniya avtomobil'nyh i traktornyh gazovyh dvigatelej: Uchebnoe posobie dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij, obuchayushchihsya po napravleniyam podgotovki "Ekspluataciya transportno-tekhnologicheskih mashin i kompleksov", "Agroinzheneriya" / A. A. Lavrenchenko, S. M. Vedishchev, A. V. Milovanov [i dr.] ; Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii. Tambovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. – Tambov: Tambovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021. – 151 s. – ISBN 978-5-8265-2443-5. – EDN GCGVJA.

3. Zaloznov, I. P. Fiziko-himicheskaya sushchnost' processov smoloobrazovaniya v toplivnoj sisteme benzinovyh dvigatelej s vpryskom / I. P. Zaloznov, N. G. Pevnev // Sovremennye problemy transportnogo stroitel'stva, avtomobilizacii i vysokointellektual'nye nauchno-pedagogicheskie tekhnologii : Tezisy dokladov na Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu SibADI, Omsk, 20–24 sentyabrya 2000 goda. Tom I. – Omsk: Sibadi, 2000. – S. 59-60. – EDN YXJPRR.

4. Dorovskih, D. V. Harakter zagryaznenij raspylitelej forsunok, usloviya i mekhanizm ih obrazovaniya / D. V. Dorovskih, E. A. Andreeva // Ustojchivoe razvitie regiona: arhitektura, stroitel'stvo i transport : Materialy 3-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii instituta arhitektury, stroitel'stva i transporta Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Tambov, 27 iyunya 2016 goda. – Tambov: Izdatel'stvo Pershina R.V., 2016. – S. 245-247. – EDN XXCOWP.

5. Erohov, V. I. Sistemy vpryska benzinovyh dvigatelej : konstrukciya, raschet, diagnostika / V. I. Erohov. – Moskva, 2011. – 552 s. – ISBN 978-5-9912-0130-8. – EDN PZTVEZ.

6. Avtomobil'nyj spravochnik [Tekst] / Konrad Reif i dr.; Bosch. -3-e izd. - Moskva: Za rulem, pech. 2012. -1274 s.

7. Lisin, V. A. Povyshenie effektivnosti ekspluatacii gazoballonnyh avtomobilej putem obosnovaniya normativov obsluzhivaniya dvuhtoplivnoj sistemy pitaniya: special'nost' 05.22.10 "Ekspluataciya avtomobil'nogo transporta": dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskih nauk / Lisin Vitalij Aleksandrovich. – Omsk, 2005. – 120 s. – EDN NNJOCN.

8. Ovchinnikov, G. V. Vliyanie zagryazneniya i iznosa elementov elektromagnitnyh forsunok na harakteristiki avtomobil'nogo benzinovogo dvigatelya: special'nost' 05.04.02 "Teplovye dvigateli" : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskih nauk / Ovchinnikov Grigorij Viktorovich. – Vladimir, 2009. – 144 s. – EDN NQQGQR.

9. Pantyuhov, V. D. Vosstanovlenie harakteristik elektromagnitnyh forsunok dlya vpryskivaniya benzina / V. D. Pantyuhov, I. P. Vasil'ev // Arhitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj kompleksy: problemy, perspektivy, novacii: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii: Elektronnyj resurs, Omsk, 07–09 dekabrya 2016 goda. – Omsk: Sibirskaya gosudarstvennaya avtomobil'no-dorozhnaya akademiya (SibADI), 2016. – S. 695-700. – EDN XSRLHX.

10. ASNU CLASSIC GDI – Instruction manual, Asnu corporation Europe Ltd, 2019.

Информация об авторах

Д.В. Доровских - кандидат технических наук, доцент; А. А. Лавренченко - кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

D. Dorovskikh – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; A. Lavrenchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 13.09.2023 Принята к публикации (Accepted): 21.10.2023