



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154
УДК 621.43.03

Научная статья / Research article

Оценка технического состояния электромагнитных форсунок на стенде по погрешности измерения расхода тестовой жидкости

А.А. Ходяков , С.В. Хлопков ✉, В.В. Басова , О.И. Телков , А.Д. Космачева 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ khlopkov-sv@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 11 января 2022 г.
Доработана: 20 марта 2022 г.
Принята к публикации: 4 апреля 2022 г.

Ключевые слова:





электромагнитные форсунки, пробег, отклонение расхода тестовой жидкости, критерий Фишера, ошибка аппроксимации, регрессия, коэффициент детерминации

Аннотация. Установлено, что средние значения погрешности измерения расхода тестовой жидкости (ТЖ) электромагнитными форсунками (ЭМФ) связаны с пробегом автомобиля. Чем больше пробег, тем выше значение погрешности. Показано, что зависимость погрешности измерения расхода от пробега может быть описана в грубом приближении регрессией. Техническое состояние ЭМФ оценено прибором для очистки и анализа топливных форсунок HP-6B в комплекте с ультразвуковой ванной Ultrasonic Cleaner. Объекты исследования – ЭМФ бензиновых двигателей с распределенным впрыском топлива. Форсунки эксплуатировались в силовых агрегатах автомобилей ГАЗ-27040 V («Газель»), ZAZ Chance SX, ВАЗ 2121 («Нива»), Chevrolet Lacetti и др. Испытания проведены на 19 комплектах форсунок (в каждом комплекте по 4 форсунки), снятых с двигателей автомобилей с пробегом от 0 до 188 тыс. км. Испытаны форсунки Siemens DEKA ZMZ 6354, Siemens DEKA VAZ 6238, Siemens DEKA VAZ 20734, Siemens DEKA VAZ 20735, Bosch 0 280 158 502, Bosch 0 280 158 017, Bosch 0 280 158 022, Bosch 0 280 150 996, Denso 23209-39145.

Для цитирования

Ходяков А.А., Хлопков С.В., Басова В.В., Телков О.И., Космачева А.Д. Оценка технического состояния электромагнитных форсунок на стенде по погрешности измерения расхода тестовой жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 146–154. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154>

Evaluation of the technical condition of electromagnetic injectors on the test bench according to the error in measuring the flow rate of the test liquid

Aleksandr A. Khodyakov , Sergey V. Khlopkov ✉, Vlada V. Basova ,
Oleg I. Telkov , Anastasia D. Kosmacheva 

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation
✉ khlopkov-sv@rudn.ru

Article history

Received: January 11, 2022
Revised: March 20, 2022
Accepted: April 4, 2022

Abstract. It has been established that the average values of the error in measuring the flow rate of the test liquid (TL) by electromagnetic injectors (EMI) are associated with the vehicle mileage. The greater the mileage, the higher the value of the error. It is shown that the dependence of the error

Keywords:

electromagnetic injectors, mileage, average measurement errors of the test liquid flow rate, Fisher's criterion, average relative approximation error, regression, coefficient of determination

in measuring the flow rate on the run can be described in a rough approximation by regression. The technical condition of the EMI was assessed by an instrument for cleaning and analyzing fuel injectors HP-6V, complete with an Ultrasonic Cleaner ultrasonic bath. The objects of study are the EMI of gasoline engines with distributed fuel injection. The injectors were used in the power units of GAZ-27040 V ("Gazelle"), ZAZ Chance SX, VAZ 2121 ("Niva"), Chevrolet Lacetti and others, mileage from 0 to 188 thousand km. Siemens DEKA ZMZ 6354, Siemens DEKA VAZ 6238, Siemens DEKA VAZ 20734, Siemens DEKA VAZ 20735, Bosch 0 280 158 502, Bosch 0 280 158 017, Bosch 0 280 158 022, Bosch 0 280 150 9925, Denso 23925 injectors tested.

For citation

Khodyakov AA, Khlopov SV, Basova VV, Telkov OI, Kosmacheva AD. Evaluation of the technical condition of electromagnetic injectors on the test bench according to the error in measuring the flow rate of the test liquid. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):146–154. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154>

Введение

Известно, что техническое состояние (ТС) электромагнитных форсунок (ЭМФ) оказывает влияние на работу бензинового двигателя [1–9]. Проявлениями нарушений ТС устройства впрыска топлива являются неустойчивая работа двигателя (рывки и провалы при увеличении нагрузки на силовой агрегат), снижение его мощности, увеличение расхода топлива, повышенная токсичность отработавших газов [1–3]. Поэтому своевременная диагностика нарушений исправного состояния ЭМФ является задачей, решение которой позволит судить как об остаточном ресурсе, так и о периодичности проведения мероприятий, связанных с восстановлением работоспособности устройства. По рекомендации производителей замену форсунок, независимо от технического состояния механизма, осуществляют на пробеге 100–120 тыс. км. Средняя наработка на отказ может составлять и 125,8 тыс. км [10].

К неисправностям ЭМФ как устройства впрыска топлива относятся межвитковое замыкание обмотки соленоида, снижение жесткости пружины иглы запорного клапана, зависание иглы клапана в крайних верхнем или нижнем положениях [9]. Причинами, оказывающими влияние на работоспособность форсунок, могут быть образующиеся (в результате теплового воздействия) из углеводородов и смол нерастворимые в бензине поверхностные отложения [1–8]. К мероприятиям по установлению нарушений исправного состояния впрыска относятся проверка отсутствия механического повреждения форсунок и наличия соответствующего сигнала, поступающего от электронного блока управления, измерение сопротив-

ления обмотки каждой форсунки, диагностика баланса форсунок¹ [4]. Оценку технического состояния топливных форсунок проводят также и с использованием тестовых жидкостей на стендах. Поверяется герметичность клапана устройства, форма распыла факела тестовой жидкости, поступающей из форсунки, качество распыла жидкости, производительность форсунок² [4].

Пробег автомобилей и сроки эксплуатации ЭМФ не являются определяющими факторами для принятия решения о необходимости проведения процедур очистки форсунок. Техническое состояние устройства зависит не только от образования твердых углеродистых отложений в инжекторе, но и связано со сбоями в электронной системе управления двигателем, с засорением системы питания продуктами, возникающими при использовании низкокачественного бензина³ [1–8; 11]. Поэтому необходимость проведения процессов очистки инжекторов (или их замены) оценивают по представленным ранее проявлениям нарушений технического состояния ЭМФ. Диагностическими параметрами для выявления нарушений технического состояния форсунок, являющимися одновременно и факторами, по которым судят о применимости процедур очистки и замены инжекторов, могут быть баланс форсунок, время срабатывания электромагнита инжектора, расход

¹ Гаврилов К.Л. Профессиональная диагностика ДВС систем: топливоснабжения, зажигания, энергоснабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин: учебное пособие. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственного консультирования, 2017. 720 с.

² Там же.

³ Там же.

воздуха двигателем на холостом ходу и др.⁴ [1; 2; 9; 11–13]. Так, по зависимостям падения давления топлива в рампе от пропускной способности ЭФМ выявлены закономерности, свидетельствующие, что очистку форсунок целесообразно проводить при снижении их пропускной способности на величину 5–12 %, замену – при снижении пропускной способности на величину более 15 % [1].

Очистку форсунок от загрязнений проводят с помощью добавляемых в находящийся в топливном баке бензин химических реагентов или непосредственной подачей специальной жидкости на вход топливной рампы. Снятые с двигателя форсунки очищают от загрязнений в ультразвуковых ваннах и водных растворах, содержащих поверхностно-активные вещества⁵ [4].

При использовании способа очистки форсунок (без монтажа устройства с двигателя) с использованием химической добавки реагенты вводят в находящийся в топливном баке бензин каждые 2–3 тыс. км пробега [4]. В способе с непосредственной подачей специальной жидкости на вход топливной рампы двигателя очистку форсунок проводят через каждые 20 тыс. км пробега⁶. Наиболее часто встречающимися в литературе величинами наработки, при которой возникает необходимость очистки форсунок, является пробег автомобиля от 20 до 40 тыс. км⁷ [8; 11; 12]. Причем, представленные данные имеют рекомендательный характер. Это связано не только с маркой автомобиля и двигателя, но и с регионом, в котором транспортное средство эксплуатируется. Так, для автомобилей ГАЗ (с двигателем ЗМЗ-4062.10), эксплуатирующихся в Омске, периодичность очистки ЭФМ составила 30 тыс. км пробега [12].

Анализируя приведенную информацию следует отметить, что при очевидных достоинствах, связанных с представленными для запуска процедур очистки форсунок изменениями диагностических параметров, существуют и недостатки, к которым в первую очередь относятся отсут-

ствие сведений, представляющих как минимум обобщение для разных марок автомобилей, двигателей. Поэтому целесообразно провести оценку технического состояния топливных форсунок не на двигателе, а на стенде; испытывать не один или несколько, а не менее 15 комплектов снятых с моторов форсунок, которыми оснащены силовые агрегаты автомобилей с разным пробегом. Целью таких исследований является установление связи параметров, определяемых на стенде, с величинами пробега автомобилей.

1. Экспериментальная часть

Объектами исследования были ЭМФ бензиновых двигателей с распределенным впрыском топлива. Форсунки эксплуатировались в силовых агрегатах автомобилей ГАЗ-27040 V («Газель»), ZAZ Chance SX, ВАЗ 2121 («Нива»), Chevrolet Lacetti и др. Испытания проводили на 19 комплектах форсунок (в каждом комплекте по 4 форсунки), снятых с двигателей автомобилей с пробегом от 0 до 188 тыс. км.

Техническое состояние устройства впрыска топлива оценивали, используя прибор для очистки и анализа топливных форсунок НР-6В в комплекте с ультразвуковой ванной Ultrasonic Cleaner. Испытывали форсунки Siemens DEKA ZMZ 6354, Siemens DEKA VAZ 6238, Siemens DEKA VAZ 20734, Siemens DEKA VAZ 20735, Bosch 0 280 158 502, Bosch 0 280 158 017, Bosch 0 280 158 022, Bosch 0 280 150 996, Denso 23209-39145.

Измерения расхода тестовой жидкости (ТЖ; LAVR Ln 2004), прокачиваемой через форсунки насосом, осуществляли в автоматическом и ручном режимах настройки частоты n_t , ширины τ и числа импульсов N_t ⁸ [4; 10]. Режим 1 – атомизация (форсунки находятся в постоянно открытом состоянии); 2 – холостой ход, $n = 650 \text{ мин}^{-1}$ («минимум»), $\tau = 3 \text{ мс}$, $N_t = 2000$ импульсов; 3 – максимальная нагрузка, $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, $\tau = 12 \text{ мс}$, $N_t = 1000$ импульсов; 4 – работа при высоких скоростях, $n = 3600 \text{ мин}^{-1}$, $\tau = 6 \text{ мс}$, $N_t = 2000$ импульсов.

⁴ Гаврилов К.Л. Профессиональная диагностика ДВС систем: топливоснабжения, зажигания, энергоснабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин: учебное пособие. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственного консультирования, 2017. 720 с.

⁵ Там же.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

⁸ Гаврилов К.Л. Профессиональная диагностика ДВС систем: топливоснабжения, зажигания, энергоснабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин: учебное пособие. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственного консультирования, 2017. 720 с.

Расход q_i тестовой жидкости при испытании форсунок рассчитывали по формуле

$$q_i = \frac{Q_i}{t}, \quad (1)$$

где Q_i – объем топлива за время измерения t , мл; t – время измерения, мин.

2. Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований установлено, что расход тестовой жидкости в режиме 1 (атомизация) для форсунок, снятых с автомобилей с разным пробегом, не может быть обобщающим параметром, по которому следует оценивать техническое состояние устройства от пробега. Это связано с тем, что q отражает не только зависящую от наработки степень загрязнения форсунок, но и разницу в пропускной способности изделия (регламент производителя). Поэтому целесообразно для объектов исследования, отличающихся изначально производительностью, оценку технического состояния проводить по среднему значению погрешности измерения (Δq_{cp}) расхода ТЖ:

$$\Delta q_{cp} = \frac{\sum_i \pm \Delta q_i}{n}, \quad (2)$$

где $\pm \Delta q_i$ – погрешность среднего арифметического расхода тестовой жидкости, мл·мин⁻¹; n – число значений параметра $\pm \Delta q_i$ в интервале пробега.

Параметр $\pm \Delta q_i$ рассчитывали по формуле

$$\pm \Delta q_i = t_{0,95} \frac{s}{\sqrt{n_{изм}}}, \quad (3)$$

где $t_{0,95}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности 0,95; s – стандартное отклонение; $n_{изм}$ – число измерений (для комплекта из четырех форсунок $n_{изм} = 4$).

В табл. 1 представлены рассчитанные параметры $\pm \Delta q_i$ для форсунок с наработкой 57 и 150 тыс. км пробега. Из сопоставления данных следует, что значение $\pm \Delta q_i$, полученное в режиме 2, резко отличается от погрешности среднего арифметического расхода тестовой жидкости режимов 1, 3 и 4. Причем такое же отличие наблюдается и для фор-

сунок с другими показателями наработки. Поэтому при расчете Δq_{cp} по всем режимам испытания данные режима 2 не учитывали.

Таблица 1

Значения погрешности измерения $\pm \Delta q_i$ расхода тестовой жидкости при различных режимах испытания форсунок

Режим ручной настройки	Bosch 0 280 158 502 с пробегом 57 тыс. км, $\pm \Delta q_i$	Bosch 0 280 158 502 с пробегом 150 тыс. км, $\pm \Delta q_i$
1	1,8	21,4
2	0,4	1,7
3	1,6	14,1
4	1,3	13,4

Table 1

Values of measurement error $\pm \Delta q_i$ of the test liquid flow rate in various injector test modes

Manual tuning mode	Bosch 0 280 158 502 with a mileage of 57 thousand km, $\pm \Delta q_i$	Bosch 0 280 158 502 with mileage of 150 thousand km, $\pm \Delta q_i$
1	1.8	21.4
2	0.4	1.7
3	1.6	14.1
4	1.3	13.4

Таблица 2

Средние значения погрешности $\Delta q_{cp}, y_i$ измерения расхода ТЖ в интервале пробега L

L , тыс. км				
0–33	33–66	66–99	99–132	132–165
Δq_{cp}				
1,5	2,4	6,0	7,5	9,5

Table 2

Average values of the error $\Delta q_{cp}, y_i$ of measuring the flow rate of the test liquid in the run interval L

L , thousands km				
0–33	33–66	66–99	99–132	132–165
Δq_{avg}				
1.5	2.4	6.0	7.5	9.5

Из анализа данных (табл. 2) следует, что с увеличением пробега автомобиля наблюдается рост параметра $\Delta q_{cp}(y_i)$. Это свидетельствует о существовании связи между Δq_{cp} и L , исследование которой проводили, используя табличный

процессор Microsoft Office Excel⁹ [14; 15]. Объясняющей переменной x_i при таком исследовании была середина интервала пробега L .

Степень тесноты связи между значениями пробега и средними значениями погрешности измерения расхода ТЖ оценивали корреляционным анализом. Установлено, что коэффициент корреляции между параметрами $\Delta q_{\text{ср}}$ и пробегом составил 0,99. Следовательно, связь между значениями пробега и средними значениями погрешности измерения расхода ТЖ полная, функциональная.

В табл. 3 представлены уравнения регрессии, полученные аппроксимацией данных с помощью линии тренда, и величины достоверности аппроксимации – коэффициенты детерминации.

Таблица 3

Уравнения регрессии и величины достоверности аппроксимации R^2		
№ п. п.	Уравнение	R^2
1	$\hat{y} = 1,2875 \exp(1 \cdot 10^{-5}x)$	0,9345
2	$\hat{y} = 0,00006x + 0,073$	0,9723
3	$\hat{y} = 6 \cdot 10^{-5}x + 7 \cdot 10^{-12}x^2 + 0,1039$	0,9723
4	$\hat{y} = 0,0002x^{0,8901}$	0,9360

Table 3

Regression equations and approximation confidence values R^2		
Item number	Equation	R^2
1	$\hat{y} = 1.2875 \exp(1 \cdot 10^{-5}x)$	0.9345
2	$\hat{y} = 0.00006x + 0.073$	0.9723
3	$\hat{y} = 6 \cdot 10^{-5}x + 7 \cdot 10^{-12}x^2 + 0.1039$	0.9723
4	$\hat{y} = 0.0002x^{0.8901}$	0.9360

Регрессия в виде квадратичного уравнения нелинейная относительно объясняющих перемен-

ных и линейная относительно параметров модели¹⁰. Поэтому оценки метода наименьших квадратов преобразованной линейной модели, полученные при помощи функции «Регрессия» табличного процессора Microsoft Office Excel, являются оценками параметров нелинейной модели (табл. 4: параметры $F_{\text{расч}}$, R^2). Экспоненциальные и степенные модели, относящиеся к нелинейной по параметрам регрессии, внутренне линейные¹¹. Модель степенной регрессии $y_i = ax_i^b \varepsilon_i$ (a и b – коэффициенты регрессии, ε_i – случайная ошибка регрессии) после логарифмирования (линеаризации) $\ln y_i = \ln a + b \cdot \ln x_i + \ln \varepsilon_i$ и замены $\ln y_i$, $\ln a$, $\ln x_i$, $\ln \varepsilon_i$ на y^* , a^* , x_i^* , ε_i^* преобразуется в линейное уравнение вида $y_i^* = a^* + bx_i^* + \varepsilon_i^*$. Идентично и для модели $y_i = ae^{bx_i} \varepsilon_i$ (табл. 3) после логарифмирования $y_i^* = \ln y_i$, $\varepsilon_i^* = \ln \varepsilon_i$, $a^* = \ln a$ экспоненциальное уравнение преобразуется в линейное: $y_i^* = a^* + bx_i^* + \varepsilon_i^*$.

Для линеаризованной экспоненциальной модели в итоговых данных инструмента анализа «Регрессия» $\hat{a}^* = 0,2527$, $\hat{b}^* = 1,46397 \cdot 10^{-5}$. Искомое значение a в модели $y_i = ae^{bx_i} \varepsilon_i$ составило $a = e^{\hat{a}^*} = 1,287479$. Оцененная экспоненциальная модель приобретает вид $y = 1,287479 \exp(1,46397 \cdot 10^{-5}x)$, степенная после аналогичных преобразований – $y = 0,000224x^{0,890094}$.

Проверку статистической значимости уравнений регрессии проводили по критерию Фишера $F_{\text{расч}}$. Прогностическое качество оценивали индексом корреляции η ($\eta = R^2$). Вычисляли также среднюю относительную ошибку аппроксимации \bar{A} . Табличное значение критерия Фишера (критическое значение $F_{\text{крит}}$) определяли с помощью встроенной функции Excel «ФРАСПОБР» при уровне значимости 0,05. В уравнениях для расчета использовали \hat{y} – теоретическое (расчетное, предсказанное) значение $\Delta q_{\text{ср}}$; y_i – текущий параметр $\Delta q_{\text{ср}}$ (табл. 2); \bar{y} – средняя величина $\Delta q_{\text{ср}}$; n – число наблюдений; m – число параметров при переменных x . Результаты расчетов приведены в табл. 4.

⁹ Абдуллин Р.З., Абдуллин В.Р. Эконометрика в MS Excel: практикум. Иркутск: Изд-во БГУ, 2016. 135 с. URL: <http://lib-catalog.isea.ru> (дата обращения: 20.12.2021); Воскобойников Ю.Е. Эконометрика в Excel: в 2 ч. Ч. 1. Парный и множественный регрессионный анализ: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2005. 156 с.; Кадочникова Е.И. Эконометрика: конспект лекций. Казань: Казанский федеральный университет, 2013. 106 с.; Ляховецкий А.М., Кремянская Е.В., Климова Н.В. Статистика: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2016. 362 с.

¹⁰ Абдуллин Р.З., Абдуллин В.Р. Эконометрика в MS Excel: практикум. Иркутск: Изд-во БГУ, 2016. 135 с. URL: <http://lib-catalog.isea.ru> (дата обращения: 20.12.2021).

¹¹ Там же.

Таблица 4

Характеристика регрессионных моделей

Регрессия	\bar{A} , %	η	$F_{расч}$	$F_{крит}$	R^2
Квадратичная	14	0.9861	35.1	19.0	0.9723
Линейная	14	0.9861	105.4	10.1	0.9723
Экспоненциальная	15	0.9834	27.5	10.1	0.9671
Степенная	15	0.9799	61.1	10.1	0.9602

Table 4

Characterization of regression models

Regression	\bar{A} , %	η	$F_{estimate}$	$F_{critical}$	R^2
Quadratic	14	0.9861	35,1	19,0	0,9723
Linear	14	0,9861	105,4	10,1	0,9723
Exponential	15	0,9834	27,5	10,1	0,9671
Nonlinear	15	0,9799	61,1	10,1	0,9602

Критерием статистической значимости (адекватности) уравнений регрессии является условие, при котором $F_{расч} > F_{крит}$. Этому условию удовлетворяют значения критерия Фишера квадратичной, линейной, экспоненциальной и степенной регрессий (табл. 4). Точность математической модели оценивают по величине ошибки аппроксимации. Высокая точность модели характеризуется значениями \bar{A} ниже 10 %. Таким значением не обладает ни одна из представленных моделей (табл. 4). Поэтому был проведен расчет параметров экспоненциальной и степенной регрессий нелинейным оцениванием с использованием надстройки «Поиск решения» [15; 16]. В надстройке реализован поиск решения нелинейных задач методом обобщенного понижающего градиента. В табл. 5 представлены результаты проведенного расчета.

Таблица 5

Нелинейное оценивание параметров экспоненциальной и степенной регрессий

Уравнение после нелинейного оценивания	\bar{A} , %	η	$F_{расч}$	$F_{крит}$	R^2
$\hat{y} = 1,170\exp(1,460 \cdot 10^{-5}x)$	12	0,9296	24,6	10,1	0,8642
$\hat{y} = 0,0001136x^{0,9522}$	14	0,9854	98,7	10,1	0,9710

Table 5

Nonlinear estimation of parameters of exponential and nonlinear regressions

Equation after nonlinear estimation	\bar{A} , %	η	$F_{estimate}$	$F_{critical}$	R^2
$\hat{y} = 1.170\exp(1.460 \cdot 10^{-5}x)$	12	0.9296	24.6	10.1	0.8642
$\hat{y} = 0.0001136x^{0.9522}$	14	0.9854	98.7	10.1	0.9710

Из анализа данных (табл. 4, 5) следует, что все модели являются грубым приближением регрессии к реальной зависимости (значение средней ошибки аппроксимации для грубых моделей не должно превышать 15 %). Линейная и степенная регрессии более адекватно, чем квадратичная и экспоненциальная модели, описывают исходные данные.

Представленные модели могут быть использованы для практического применения, но с поправками, учитывающими количество объектов испытания. Так, для разработки систем обеспечения работоспособности электроники, управляемой двигателем, минимальный объем выборки обследования электронных компонентов составлял 58 [17]. Изменение интенсивности отказов электромагнитных форсунок от пробега автомобиля, установленное по представленным в работе данным, описывается экспоненциальной регрессией. При малом числе обследованных объектов (малая выборка) следует учитывать метод статистической обработки, предназначенный для работы именно с таким количеством результатов испытаний [18].

Заключение

Средние значения погрешности измерения расхода тестовой жидкости, наблюдаемые при испытании форсунок на стенде, связанные с пробегом автомобиля. Чем больше пробег, тем выше средние значения погрешности измерения расхода. Показано, что зависимость средних значений погрешности измерения расхода тестовой жидкости от пробега может быть описана в грубом приближении регрессией.

Список литературы

1. *Веревтин А.Ю.* Способ диагностирования электромагнитных форсунок двигателей с впрыскиванием бензина: дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2010. 143 с.
2. *Овчинников Г.В.* Влияние загрязнения и износа элементов электромагнитных форсунок на характеристики автомобильного бензинового двигателя: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2009. 144 с.
3. *Цэдэшиев Ц.В.* О необходимости промывки и очистки форсунок инжекторной системы питания // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: материалы региональной студенческой научно-практической конференции: в 2 т.

Т. 2. Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 2016. С. 253–258.

4. Григорьев М.В., Далидович А.А. Диагностика и обслуживание электромагнитных форсунок бензиновых ДВС: методические указания к лабораторной работе по курсам: «Эксплуатация наземных транспортно-технологических средств», «Основы диагностики наземных транспортно-технологических средств». М.: МАДИ, 2018. 52 с.

5. Зеленин В.А., Суханов С.А. Методика предварительного диагностирования работоспособности бензиновых ДВС инжекторного типа // Научный вестник НГГТИ. 2017. Т. 3. С. 33–36.

6. Березюков Д.С. Разработка метода безразборного диагностирования электромагнитных форсунок ДВС с впрыском легкого топлива и исследование изменений их рабочих показателей: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. 131 с.

7. Киселев Д.В., Шурин С.А. Промывка форсунок и топливной рейки бензинового двигателя без демонтажа и применения специализированной аппаратуры // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации: сборник научных трудов. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. С. 221–226.

8. Красота М.В., Шепеленко И.В., Матвиенко А.А., Аль Соодани Салем М. Муташиур. Исследование влияния загрязнений электромагнитных форсунок на параметры бензиновых двигателей // Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин. 2013. Т. 43. Ч. 2. С. 125–133.

9. Патрин А.Н., Нечаев В.В., Меркушов Ю.Н. Функциональное диагностирование электромагнитных форсунок впрысковых ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. 2007. № 8. С. 29–31.

10. Баженов Ю.В., Каленов В.П. Прогнозирование остаточного ресурса электронных систем управления двигателем // Вестник СибАДИ. 2017. № 2 (54). С. 52–59. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-52-59](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-52-59)

11. Грицай А.В., Горбань М.В., Аракельянц А.Г. Исследование работы инжекторного двигателя с электромагнитными форсунками различного технического состояния // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электронный сборник статей по материалам XXI студенческой международной заочной научно-практической конференции. 2014. № 6 (21). С. 109–114.

12. Залознов И.П. Повышение эффективности эксплуатации автомобилей за счет обоснования периодичности обслуживания электромагнитных форсунок: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2003. 115 с.

13. Бакайкин Д.Д., Гриценко А.В., Абросимов Д.А. Диагностирование электромагнитных форсунок ДВС

на тестовых режимах // АПК России. 2015. Т. 72. № 1. С. 16–18.

14. Бараз В.Р., Пегашкин В.Ф. Использование MS Excel для анализа статистических данных. 2-е изд., перераб. и доп. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014. 181 с.

15. Яковлев В.Б. Линейное и нелинейное оценивание параметров регрессии в Microsoft Excel // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2019. № 2 (48). С. 58–71.

16. Владленова В.О., Турундаевский В.Б. Некоторые особенности, возникающие при изучении нелинейной регрессии с использованием Excel и других программ // Экономика, статистика и информатика. 2014. № 1. С. 158–161.

17. Каленов В.П. Разработка системы обеспечения работоспособности электронных систем управления двигателем автомобиля в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2018. 164 с.

18. Горбунова Е.Б. Метод статистической обработки малых выборок данных в задачах прогнозирования и контроля состояния сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2018. 178 с.

References

1. Vereyutin AYu. *A method for diagnosing electromagnetic nozzles of engines with gasoline injection* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Ryazan; 2010. (In Russ.)

2. Ovchinnikov GV. *Influence of pollution and wear of elements of electromagnetic nozzles on the characteristics of an automobile gasoline engine* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Vladimir; 2009. (In Russ.)

3. Tsedashiev TsV. On the necessity of flushing and cleaning the nozzles of the injection power supply system. *Scientific Research of Students in Solving Urgent Problems of the Agro-Industrial Complex: Materials of the Regional Student Scientific-Practical Conference* (vol. 2). Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky; 2016. p. 253–258. (In Russ.)

4. Grigoriev MV, Dalidovich AA. *Diagnostics and maintenance of electromagnetic nozzles of gasoline internal combustion engines: guidelines for laboratory work on the courses “Operation of Ground Transport and Technological Means,” “Fundamentals of Diagnostics of Ground Transport and Technological Means.”* Moscow: MADI Publ.; 2018. (In Russ.)

5. Zelenin VA, Sukhanov SA. Method for preliminary diagnosing performance gasoline engine type injector. *Scientific Bulletin NSHTI*. 2017;3:33–36. (In Russ.)

6. Berezyukov DS. *Development of a method for in-place diagnostics of electromagnetic injectors of internal combustion engines with light fuel injection and a study of changes in their performance* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Volgograd; 2012. (In Russ.)
7. Kiselev DV, Shurin SA. Flushing injectors and fuel rail of a gasoline engine without dismantling and using specialized equipment. *Scientific Problems of Logistics of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of Scientific Papers*. St Petersburg: Polytechnic University Publ.; 2017. p. 221–226. (In Russ.)
8. Beauty MV, Shepelenko IV, Matvienko AA, Al Soodani Salem M. Mutashair. Study of the influence of contamination of electromagnetic injectors on the parameters of gasoline engines. *Design, Production and Operation of Agricultural Machinery*. 2013;43(part 2);125–133. (In Russ.)
9. Patrín AN, Nechaev VV, Merkushov YuN. Functional diagnostics of electromagnetic injectors of injection internal combustion engines with spark ignition. *Automotive Industry*. 2007;(8):29–31. (In Russ.)
10. Bazhenov YuV, Kalenov VP. Forecasting the residual life of electronic engine control systems. *Bulletin of SibADI. Section II. Transport*. 2017;(2(45)):52–59.
11. Gritsay AV, Gorban MV, Arakelyants AG. Study of the operation of an injection engine with electromagnetic nozzles of various technical conditions. *Scientific Community of Students of the 21st century. Technical Science: Electronic Collection of Articles based on Materials of the 21st International Student Correspondence Scientific and Practical Conference*. 2014;(6(21)):109–114. (In Russ.)
12. Zaloznov IP. *Improving the efficiency of car operation by substantiating the frequency of maintenance of electromagnetic injectors* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Omsk; 2003. (In Russ.)
13. Bakaikin DD, Gritsenko AV, Abrosimov DA. Diagnosing electromagnetic ICE injectors at text modes. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2015;72(1):16–18. (In Russ.)
14. Bazhenov YV, Kalenov VP. The forecasting of the residual resource of electronic engine control system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(2(54)):52–59. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-52-59](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-52-59)
15. Yakovlev VB. Linear and non-linear estimation of regression parameters in Microsoft Excel. *MCU Journal of Informatics and Informatization of Education*. 2019;(2(48)):58–71. (In Russ.)
16. Vladlenova VO, Turundaevsky VB. Some peculiarities arising in the study of nonlinear regression using Excel and other programs. *Economics, Statistics and Computer Science*. 2014;(1):158–161. (In Russ.)
17. Kalenov VP. *Development of a system for ensuring the operability of electronic control systems for a car engine in operation* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Vladimir; 2018. (In Russ.)
18. Gorbunova EB. *A method of statistical processing of small data samples in the problems of forecasting and monitoring the state of complex systems* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Novocherkassk; 2018. (In Russ.)

Сведения об авторах

Ходяков Александр Андреевич, кандидат химических наук, доцент департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-9391-2890, Scopus Author ID: 6701565417, eLIBRARY SPIN-код: 4780-1919; khodyakov-aa@rudn.ru

Хлопков Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-9536-7558, Scopus Author ID: 57212109092, eLIBRARY SPIN-код: 8997-3305; khlopkov-sv@rudn.ru

Басова Влада Валерьевна, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-1325-4646; 1032202133@rudn.ru

Телков Олег Игоревич, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-1412-6539; 1032202136@rudn.ru

Космачева Анастасия Дмитриевна, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3749-5225; 1032202134@rudn.ru

About the authors

Alexander A. Khodyakov, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9391-2890, Scopus Author ID: 6701565417, eLIBRARY SPIN-code: 4780-1919; khodyakov-aa@rudn.ru

Sergey V. Khlopkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9536-7558, Scopus Author ID: 57212109092, eLIBRARY SPIN-code: 8997-3305; khlopkov-sv@rudn.ru

Vlada V. Basova, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1325-4646; 1032202133@rudn.ru

Oleg I. Telkov, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1412-6539; 1032202136@rudn.ru

Anastasia D. Kosmacheva, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3749-5225; 1032202134@rudn.ru