



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-38-46
УДК 62-713.3

Научная статья / Research article

Оценка работоспособности бензиновых электромагнитных форсунок по величинам среднего абсолютного отклонения объема тестовой жидкости

А.А. Ходяков , С.В. Хлопков ✉, В.В. Басова

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

История статьи

Поступила в редакцию: 28 ноября 2021 г.
Доработана: 15 января 2022 г.
Принята к публикации: 25 января 2022 г.

Ключевые слова:

электромагнитные форсунки, средние абсолютные отклонения, объем тестовой жидкости, грубый промах, метод extra flushing, ультразвук, измерительные цилиндры, режим, процедура

Аннотация. Проведена оценка технического состояния электромагнитных форсунок (ЭМФ) бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива. Техническое состояние ЭМФ определялось с помощью стенда для очистки и тестирования форсунок. Использована поэтапная очистка форсунок от загрязнений, то есть в две стадии. На первом этапе применен режим extra flushing (без ультразвука). Моющим средством при таком способе очистки служила безводная моющая жидкость BG-210, состоящая из гидроочищенной тяжелой и легкой нефти, растворителя Стоддарда, 2-бутоксизанола, изопропилового спирта, ксилола. На втором этапе форсунки очищались в течение 10 мин в ультразвуковой ванне, наполненной моющей жидкостью LAVR Ln 2003. Показано, что рассчитанные средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости отражают не только присутствие в форсунках загрязнений, но и иллюстрирует течение процесса очистки. Средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости после химической обработки и воздействия ультразвуком ниже в 2–9 раз аналогичных параметров, полученных в неочищенных химическими реагентами и ультразвуком форсунках.

Для цитирования

Ходяков А.А., Хлопков С.В., Басова В.В. Оценка работоспособности бензиновых электромагнитных форсунок по величинам среднего абсолютного отклонения объема тестовой жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 38–46. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-38-46>

Evaluation of the gasoline electromagnetic injectors performance by the average absolute deviation values of the test liquid volume

Aleksandr A. Khodyakov , Sergey V. Khlopkov ✉, Vlada V. Basova

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

Article history

Received: November 28, 2021
Revised: January 15, 2022
Accepted: January 25, 2022

Abstract. An assessment of the technical condition of electromagnetic injectors (EMI) of gasoline engines with direct fuel injection has been carried out. The technical condition of the EMI was assessed using a stand for cleaning and testing injectors. A step-by-step cleaning of the nozzles from contami-



Keywords:

electromagnetic nozzles, average absolute deviations, test liquid volume, gross slip, extra flushing method, ultrasound, measuring cylinders, mode, procedure

nation was used, that is, in two stages. At the first stage, the “extra flushing” mode (without ultrasound) was applied. The detergent for this cleaning method was anhydrous BG-210 washing liquid, consisting of hydrotreated heavy and light oils, Stoddard’s solvent, 2-butoxyethanol, isopropyl alcohol, and xylene. At the second stage, the nozzles were cleaned for 10 minutes in an ultrasonic bath filled with LAVR Ln 2003 washing liquid. It is shown that the calculated average absolute deviations of the test liquid volume reflect not only the presence of contaminants in the nozzles, but also illustrates the cleaning process. The average absolute deviations of the volume of the test liquid after chemical treatment and exposure to ultrasound are 2–9 times lower than those obtained in nozzles that were not cleaned with chemical reagents and ultrasound.

For citation

Khodyakov AA, Khlopkov SV, Basova VV. Evaluation of the gasoline electromagnetic injectors performance by the average absolute deviation values of the test liquid volume. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):38–46. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-38-46>

Введение

Известно, что техническое состояние (ТС) электромагнитных форсунок (ЭМФ) оказывает влияние на работу бензинового двигателя [1–10]. 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].

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, используя метод extra flushing (химическая обработка без ультразвука), и в ультразвуковых ваннах, в водных растворах, содержащих поверхностно-активные вещества [4; 10].

Техническое состояние ЭМФ оценивают по отклонениям пропускной способности (статической и динамической производительности) от эталонного значения (новые форсунки) или по отклонению от среднего расхода тестовой жидкости (ТЖ) при испытании снятых с двигателей форсунок на стендах [1; 2; 5; 6; 8; 11–14]. При этом пропускная способность, расход тестовой жидкости, выраженные в относительных единицах, могут быть как со знаком плюс (увеличенная пропускная способность, увеличенный расход), так и со знаком минус (уменьшенная пропускная способность, уменьшенный расход). Такое условное деление не позволяет провести градацию загрязненности форсунок. Поэтому целью данной работы стали

стендовые испытания снятых с двигателей форсунок и оценка по рассчитанным средним абсолютным отклонениям объема тестовой жидкости технического состояния устройств, присутствия в них загрязнений.

1. Экспериментальная часть

Объекты исследования – электромагнитные форсунки бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива. Форсунки эксплуатировались в силовых агрегатах автомобилей BMW F10, Skoda Fabia, KIA Optima, KIA Sorento. Испытания проводили на четырех комплектах форсунок (в каждом комплекте четыре форсунки), снятых с двигателей автомобилей с пробегом от 120 до 190 тыс. км. Испытывали форсунки Siemens Bosch 0261 500 109 (а/м BMW F10), VAG 04E 906 036 AF (а/м Skoda Fabia), Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) и Continental 35310-2G710 (а/м KIA Sorento).

Техническое состояние ЭМФ оценивали, используя стенд для очистки и тестирования форсунок с ультразвуковой ванной и функцией extra flushing. В качестве тестовой использовали жидкость LAVR Ln 2004. Проверку форсунок на герметичность осуществляли с помощью функции «Тест на утечки» при давлении 8 бар. Опыт проводили, принимая во внимание не только уровень тестовой жидкости в измерительном цилиндре, но и формирование менисков на соплах форсунок.

Работоспособность ЭМФ проверяли в автоматическом режиме (АР). Параметром, связанным с производительностью форсунок, был объем (q , мл) тестовой жидкости, поступающей в мерные ци-

линдров при испытании ЭМФ на стенде. Объем ТЖ оценивали по ее уровню в цилиндрах. Параметр q полностью открытой форсунки определяли по данным, полученным на режиме «Пролив» (АР-1). Оценивали также q в режиме имитации работы двигателя на холостом ходу (800 об·мин⁻¹; АР-2). Объем тестовой жидкости измеряли в режиме имитации частоты вращения коленчатого вала $n = 3500$ об·мин⁻¹ (АР-3), $n = 5200$ об·мин⁻¹ (АР-4), а также имитируя режим (АР-5) динамических разгонов (800–5200 об·мин⁻¹) и торможений (5200–800 об·мин⁻¹).

Минимальное число измерений q , определяемым по объему ТЖ в мерных цилиндрах, рассчитывали по формуле [15]:

$$n = \frac{t_{\gamma}^2 \cdot \omega^2}{\varepsilon^2}, \quad (1)$$

где t_{γ} – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности γ (аналогичный коэффициент Стьюдента только при $n = \infty$); ω – коэффициент вариации; ε – относительная погрешность вычисления случайной величины (требуемая точность результата $\varepsilon = \pm 2\%$).

В результате проведенных расчетов установлено, что число повторных испытаний для требуемой точности составило ~ 1 измерение.

Форму факела распыла форсунок оценивали при давлении ТЖ 4–6 бар. Для лучшей визуализации формы, принимаемой порцией выходящей из сопла жидкости, использовали специальное устройство, позволяющее подавать в ЭМФ под давлением воздух.

Очистку форсунок от загрязнений проводили поэтапно, в две стадии. На первом этапе использовали режим extra flushing (без ультразвука). Моющим средством при таком способе очистки была выбрана безводная моющая жидкость ВГ-210, состоящая из гидроочищенной тяжелой и легкой нефти, растворителя Стоддарда, 2-бутоксиэтанола,

изопропилового спирта, ксилола. Процедура extra flashing является аналогом проточного метода очистки форсунок, но отличается от него тем, что для повышения степени очистки в поток моющей жидкости через специальный клапан подается воздух под давлением на 2 бара ниже давления моющей жидкости в рампе. Насыщение моющей жидкости воздушными пузырьками усиливает очищающее действие средства за счет эффектов «кипения» и гидростатического удара, возникающего в момент запыриания распылителя форсунки. Все это повышает динамическое давление внутри форсунки и приводит к разрыву пузырьков воздуха, что можно считать схожим с процессом кавитации при воздействии на жидкость ультразвука.

На втором этапе в течение 10 мин проводили ультразвуковую очистку форсунок от загрязнений. В качестве моющей жидкости использовали LAVR Ln 2003.

После каждого этапа очистки проверяли с помощью тестовой жидкости работоспособность форсунок.

2. Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований получены данные, позволяющие после статистико-математической обработки результатов опытов судить о работоспособности форсунок. Статистико-математическую обработку данных проводили, используя табличный процессор Microsoft Office Excel [16].

Техническое состояние комплекта форсунок оценивали по среднему абсолютному отклонению (среднее линейное отклонение):

$$\bar{d} = \frac{\sum |q_i - \bar{q}|}{n}, \quad (2)$$

где q_i – объем тестовой жидкости, поступающей в мерные цилиндры при испытании ЭМФ на стенде (i от 1 до 4), мл; \bar{q} – среднее значение объема тестовой жидкости, мл.

Таблица 1

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q_{AP-1} при испытании (режим «Пролив») форсунок до процедур воздействия на устройства жидкости ВГ-210 и ультразвука, среднее значение объема \bar{q}_{AP-1} , величины отклонений объема от среднего ($q_i - \bar{q}$)_{AP-1}, среднее абсолютное отклонение \bar{d}

ЭМФ	q_{AP-1} , мл				\bar{q}_{AP-1} , мл	$(q_i - \bar{q})_{AP-1}$, мл				\bar{d} , мл
Bosch 0 261 500 109 (а/м BMW F10)	67	46	58	66	59	+8	-13	-1	+7	7,3
VAG 04E 906 036 AF (а/м Skoda Fabia)	31	32	32	23	30	+2	+3	+3	-7	3,8
Continental 35310-2G710 (а/м KIA Sorento)	69	69	67	67	68	+1	+1	-1	-1	1,0
Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima)	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0

Table 1

Values of the volume of test fluid in measuring cylinders q_{AM-1} during testing (“Spill” mode) of injectors before the procedures for exposing devices to BG-210 liquid and ultrasound, the average value of the volume \bar{q}_{AM-1} , the volume deviations from the average $(q_i - \bar{q})_{AM-1}$, mean absolute deviation \bar{d}

EMI	q_{AM-1} , ml				\bar{q}_{AM-1} , ml	$(q_i - \bar{q})_{AM-1}$, ml				\bar{d} , ml
Bosch 0 261 500 109 (vehicle BMW F10)	67	46	58	66	59	+8	-13	-1	+7	7.3
VAG 04E 906 036 AF (vehicle Skoda Fabia)	31	32	32	23	30	+2	+3	+3	-7	3.8
Continental 35310-2G710 (vehicle KIA Sorento)	69	69	67	67	68	+1	+1	-1	-1	1.0
Continental 35310-2G710 (vehicle KIA Optima)	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0

Таблица 2

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q при испытании (в режиме AP-1-5) форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) до процедур воздействия на устройство жидкости BG-210 и ультразвука, среднее значение q (\bar{q}), величины отклонений объема от среднего $(q_i - \bar{q})$ и среднее абсолютное отклонение \bar{d}

Режим испытания	q , мл				\bar{q} , мл	$(q_i - \bar{q})$, мл				\bar{d} , мл
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0
AP-2	33	30	33	34	33	0	-3	0	+1	1,0
AP-3	36	35	37	37	36	0	-1	+1	+1	0,8
AP-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1,5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0,8

Table 2

Values of the volume of test fluid in the measuring cylinders q during testing (in the AM-1-5 mode) of Continental 35310-2G710 injectors (KIA Optima vehicles) before the procedures for exposing the device to BG-210 fluid and ultrasound, the average value of q (\bar{q}), the magnitude of the deviations of the volume from the mean $(q_i - \bar{q})$ and the mean absolute deviation \bar{d}

Test mode	q , ml				\bar{q} , ml	$(q_i - \bar{q})$, ml				\bar{d} , ml
AM-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0
AM-2	33	30	33	34	33	0	-3	0	+1	1.0
AM-3	36	35	37	37	36	0	-1	+1	+1	0.8
AM-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1.5
AM-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0.8

Таблица 3

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q при испытании (в режиме AP-1-5) форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) после химической обработки устройств, среднее значение q (\bar{q}), величины отклонений объема от среднего $(q_i - \bar{q})$ и среднее абсолютное отклонение \bar{d}

Режим испытания	q , мл				\bar{q} , мл	$(q_i - \bar{q})$, мл				\bar{d} , мл
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0
AP-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1,0
AP-3	35	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1,0
AP-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1,5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0,8

Table 3

Values of the volume of test fluid in measuring cylinders q during testing (in AM-1-5 mode) of Continental 35310-2G710 injectors (KIA Optima vehicles) after chemical treatment of devices, average value q (\bar{q}), deviations volume from the mean $(q_i - \bar{q})$ and the mean absolute deviation \bar{d}

Test mode	q , ml				\bar{q} , ml	$(q_i - \bar{q})$, ml				\bar{d} , ml
AM-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0
AM-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1.0
AM-3	35	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1.0
AM-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1.5
AM-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0.8

Таблица 4

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q при испытании (в режиме AP-1-5) форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) после воздействия ультразвука, среднее значение q (\bar{q}), величины отклонений объема от среднего ($q_i - \bar{q}$) и среднее абсолютное отклонение \bar{d}

Режим испытания	q , мл				\bar{q} , мл	$(q_i - \bar{q})$, мл				\bar{d} , мл
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0
AP-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1,0
AP-3	36	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1,0
AP-4	32	31	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1,5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0,8

Table 4

Values of test fluid volume in measuring cylinders q during testing (in AM-1-5 mode) of Continental 35310-2G710 injectors (KIA Optima vehicles) after exposure to ultrasound, average value q (\bar{q}), volume deviations from the mean ($q_i - \bar{q}$) and the mean absolute deviation \bar{d}

Test mode	q , ml				\bar{q} , ml	$(q_i - \bar{q})$, ml				\bar{d} , ml
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0
AP-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1.0
AP-3	36	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1.0
AP-4	32	31	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1.5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0.8

В табл. 1 приведены величины объема тестовой жидкости в измерительных цилиндрах при испытании форсунок до процедур воздействия на устройства жидкости BG-210 и ультразвука.

Из сопоставления данных (табл. 1) следует, что параметр $(q_i - \bar{q})_{AP-1}$ в режиме, когда форсунки открыты полностью, изменяется от -13 до +8 мл, а \bar{d} от 0 до 7. Аналогичный эффект наблюдается и на других режимах испытания, даже и для тех устройств, у которых $\bar{d} = 0$ (табл. 1). Так, в табл. 2 приведены результаты испытаний форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) с $\bar{d} = 0$.

Из сопоставления данных (табл. 2–4) следует, что изменение отклонений от среднего и варьирование параметра \bar{d} идентично для форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) как до их очистки, так и после химической обработки или воздействия ультразвуком. Поэтому полученные здесь отклонения, отличающиеся от значений $(q_i - \bar{q})$ и \bar{d} (табл. 1), являются погрешностями измерения объема тестовой жидкости на стенде.

Из анализа представленных данных следует сделать вывод, что техническое состояние испытанных на стенде комплектов форсунок различно. Если форсунки Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) можно отнести к разряду чистых устройств, то форсунки (за исключением комплекта Bosch 0 261 500 109 (а/м BMW F10); $\bar{d} = 7,3$) с параметром \bar{d} от 1 до 3,8 (табл. 1) од-

нозначно охарактеризовать как грязные нельзя. Поэтому было принято решение оценивать присутствие в форсунках загрязнений с помощью проверки данных \bar{d} на грубый промах.

Проведенный по уравнению (2) расчет показал, что в значениях \bar{d} для форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) грубый промах отсутствует. Поэтому считалось, что наличие в значениях средних абсолютных отклонений грубого промаха является свидетельством присутствия в форсунках загрязнений.

Наличие в данных грубого промаха проводили по величине максимального относительно отклонения [15]:

$$\tau_{\max} = \left| \frac{x_{\text{крит}} - \bar{x}}{S_n} \right|, \quad (3)$$

где $x_{\text{крит}}$ – максимальное значение \bar{d} ; \bar{x} – среднее значение \bar{d} ; S_n – стандартное отклонение.

Для выявления \bar{d} , соответствующих грубому промаху, рассчитанное значение τ_{\max} сопоставляли с его табличным аналогом $\tau_{\text{табл}}$. При $\tau_{\max} > \tau_{\text{табл}}$ считали, что в форсунках присутствуют загрязнения, при $\tau_{\max} < \tau_{\text{табл}}$ – форсунки чистые или загрязнены незначительно, то есть изменения объема тестовой жидкости, связанные с присутствием в форсунках загрязнений, перекрываются погрешностью измерения q_i .

Таблица 5

Средние абсолютные отклонения, среднее значение $\bar{d}(\bar{x})$, стандартное отклонение S_n , максимальное относительное отклонение τ_{\max} , табличное значение отклонения $\tau_{\text{табл}}$

Процедура	Режим испытания	ЭМФ			
		Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
		\bar{d} , мл			
До очистки форсунок	AP-1	7,3	3,0	1,0	0,0
	AP-2	3,5	1,3	1,0	1,0
	AP-3	3,3	0,5	0,3	0,8
	AP-4	2,8	1,3	0,5	1,5
	AP-5	1,8	1,3	0,3	0,8
После химической обработки	AP-1	3,0	2,3	0,8	0,0
	AP-2	2,8	0,5	0,8	1,0
	AP-3	1,5	1,3	0,3	1,0
	AP-4	1,8	0,5	0,3	1,5
	AP-5	1,5	1,3	0,3	0,8
После воздействия ультразвука	AP-1	0,8	1,0	0,5	0,0
	AP-2	1,8	0,5	0,3	1,0
	AP-3	1,8	0,8	0,0	1,0
	AP-4	1,8	0,5	0,3	1,5
	AP-5	1,8	0,8	0,3	0,8
\bar{x}		2,49	1,13	0,47	0,85
S_n		1,53	0,72	0,30	0,50
τ_{\max}		3,14	2,61	1,80	1,30
$\tau_{\text{табл}}$		2,46			

Table 5

Average absolute deviations, mean value $\bar{d}(\bar{x})$, standard deviation S_n , maximum relative deviation τ_{\max} , tabular deviation value τ_{table}

Procedure	Test mode	EMI			
		Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
		\bar{d} , ml			
Before cleaning the nozzles	AM-1	7.3	3.0	1.0	0.0
	AM-2	3.5	1.3	1.0	1.0
	AM-3	3.3	0.5	0.3	0.8
	AM-4	2.8	1.3	0.5	1.5
	AM-5	1.8	1.3	0.3	0.8
After chemical treatment	AM-1	3.0	2.3	0.8	0.0
	AM-2	2.8	0.5	0.8	1.0
	AM-3	1.5	1.3	0.3	1.0
	AM-4	1.8	0.5	0.3	1.5
	AM-5	1.5	1.3	0.3	0.8
After exposure to ultrasound	AM-1	0.8	1.0	0.5	0.0
	AM-2	1.8	0.5	0.3	1.0
	AM-3	1.8	0.8	0.0	1.0
	AM-4	1.8	0.5	0.3	1.5
	AM-5	1.8	0.8	0.3	0.8
\bar{x}		2.49	1.13	0.47	0.85
S_n		1.53	0.72	0.30	0.50
τ_{\max}		3.14	2.61	1.80	1.30
τ_{table}		2.46			

Таблица 6

Средние абсолютные отклонения, полученные при испытании форсунок в режим «Пролив»

Процедура	ЭМФ			
	Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
	\bar{d} , мл			
До очистки форсунок	7,3	3,0	1,0	0,0
После химической обработки	3,0	2,3	0,8	0,0
После воздействия ультразвука	0,8	1,0	0,5	0,0

Table 6

Average absolute deviations obtained when testing injectors in the “Spill” mode

Procedure	EMI			
	Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
	\bar{d} , ml			
Before cleaning the nozzles	7.3	3.0	1.0	0.0
After chemical treatment	3.0	2.3	0.8	0.0
After exposure to ultrasound	0.8	1.0	0.5	0.0

Из сопоставления данных (табл. 5) следует, что для форсунок Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10) и VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia) $\tau_{\text{макс}} > \tau_{\text{табл}}$, то есть соблюдается условие, при котором значения 7,3 и 3,0 являются свидетельством загрязнения форсунок. Для форсунок Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento) и Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima) $\tau_{\text{макс}} < \tau_{\text{табл}}$. Следовательно, форсунки чистые или загрязнены незначительно. Комплекс форсунок Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima), как это показано ранее, можно отнести к разряду чистых форсунок.

В табл. 6 представлены средние абсолютные отклонения, полученные в режиме испытания форсунок «Пролив». Из сопоставления данных следует, что величина \bar{d} для всех форсунок, кроме Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima), закономерно изменяется. До очистки форсунок \bar{d} максимален, после воздействия ультразвука – минимален. После химической обработки параметр \bar{d} занимает промежуточное положение. Такое изменение \bar{d} , обусловленное воздействием химических реагентов и ультразвука на сопловую часть распылителя (корпус, иглу распылителя), свиде-

тельствует, что среднее абсолютное отклонение отражает не только присутствие в форсунках загрязнений, но и иллюстрирует течение процесса очистки. Так, \bar{d} после химической обработки и воздействия ультразвука ниже в 2–9 раз аналогичного параметра, полученного при испытании форсунок до их очистки.

Заключение

На основе полученных на стенде результатов испытаний, анализа и обсуждения данных проведена оценка технического состояния электромагнитных форсунок бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива. Техническое состояние испытанных на стенде комплектов форсунок различно. Показано, что рассчитанные средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости отражают не только присутствие в форсунках загрязнений, но и иллюстрируют течение процесса очистки. Средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости после химической обработки и воздействия ультразвуком ниже в 2–9 раз аналогичных параметров, полученных в неочищенных химическими реагентами и ультразвуком форсунках.

Список литературы

1. *Верейтин 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 им. 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 в впрысковых ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. 2007. № 8. С. 29–31.
10. *Khlopkov S., Danilov I., Khodyakov A., Danilov S., Leonteva L.* Influence of electromagnetic atomizers' technical condition on power and ecological indicators of gasoline I.C.E. in operation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1687. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012021>
11. *Гаврилов К.Л.* Профессиональная диагностика ДВС, систем: топливоснабжения, зажигания, энерго-

снабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственно-го консультирования, 2017. 720 с.

12. *Бакайкин Д.Д.* Диагностирование электромагнитных форсунок бензиновых двигателей автомобилей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2013. 132 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. *Гусаков С.В., Савастенко А.А.* Испытания электромагнитных форсунок систем распределенного впрыскивания бензина: методическое пособие. М.: РУДН, 2005. 16 с.

15. *Денисов А.С., Басков В.Н.* Основы методики инженерного эксперимента: учебное пособие. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2012. 84 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006532338> (дата обращения: 25.07.2021).

16. *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.

References

1. Vereyutin AYu. *A method for diagnosing electromagnetic nozzles of engines with gasoline injection* (dissertation of a Candidate of Technical Sciences). Ryzan; 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 a 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, p. 253–258). Irkutsk: Irkutsk State University of Agriculture; 2016. (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; 2018. (In Russ.)
5. Zelenin VA, Suhanov SA. Method for preliminary diagnosing performance gasoline engine type injector. *Scientific Bulletin of the Nevinnomysk State Humanitarian and Technical University*. 2017;3:33–36. (In Russ.)
6. Berezyukov DS. *Development of a method for in-place diagnostics of electromagnetic nozzles of internal*

combustion engines with light fuel injection and research of changes in their performance (dissertation of a Candidate of Technical Sciences). Volgograd; 2012. (In Russ.)

7. Kiselev DV, Shurin SA. Flushing of nozzles and fuel rail of a gasoline engine without dismantling and using specialized equipment. *Scientific Problems of Material and Technical Support 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, Merkushev YuN. Functional diagnostics of electromagnetic injectors in sparkignited internal combustion engines. *Automotive Industry*. 2007;(8):29–31. (In Russ.)

10. Khlopkov S, Danilov I, Khodyakov A, Danilov S, Leonteva L. Influence of electromagnetic atomizers' technical condition on power and ecological indicators of gasoline I.C.E. in operation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1687:012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012021>

11. Gavrílov KL. *Professional diagnostics of internal combustion engines, systems: fuel supply, ignition, power supply, starting cars, road-building machines and agricultural machines*. 4th ed. Sergiyev Posad: Russian Center for Agricultural Consulting; 2017. (In Russ.)

12. Bakaykin DD. Diagnostics of electromagnetic nozzles of gasoline engines of automobiles operated in agriculture (Dissertation of a Candidate of Technical Sciences). Chelyabinsk; 2013. (In Russ.)

13. Bakaykin DD, Gritsenko AV, Abrosimov DA. Diagnostics of electromagnetic injectors of internal combustion engines in test modes. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2015;72(1):16–18. (In Russ.)

14. Gusakov SV, Savastenko AA. Tests of electromagnetic injectors of gasoline distributed injection systems: toolkit. Moscow: RUDN University; 2005. (In Russ.)

15. Denisov AS, Baskov VN. *Fundamentals of engineering experiment methodology: textbook*. Saratov: Saratov State Technical University; 2012. (In Russ.) Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006532338> (accessed: 25.07.2021).

16. Baraz VR, Pegashkin VF. *Using MS EXCEL for the analysis of statistical data*. 2nd ed., rev. and add. Nizhny Tagil: Nizhny Tagil Technological Institute (branch) Ural Federal University; 2014. (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. E-mail: 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. E-mail: khlopkov-sv@rudn.ru

Басова Влада Валерьевна, магистрант департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. E-mail: 1032202133@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. E-mail: 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. E-mail: 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. E-mail: 1032202133@rudn.ru