

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВС ТЕСТОВЫМ МЕТОДОМ

**А.В. Гриценко<sup>1</sup>, В.Д. Шепелев<sup>1</sup>, Ф.Н. Граков<sup>2</sup>,  
К.И. Лукомский<sup>3</sup>, Г.Н. Салимоненко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>3</sup>Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,  
г. Челябинск, Россия

Согласно научным исследованиям, посвященным статистике возникновения неисправностей в ДВС, наибольшее распространение отказов наблюдается в системе зажигания (25 %) и системе питания (35 %). Работоспособное состояние топливной системы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) возможно сохранить за счет разработки эффективных методов тестового диагностирования. С целью теоретических исследований в методической части исследований был разработан прибор для тестового диагностирования ДВД-4. Использование разработанных методик и приборных средств позволило провести экспериментальные исследования по диагностированию работоспособности системы топливоподачи. Анализируя полученные данные эксперимента, можно утверждать, что: наблюдается устойчивая взаимосвязь между изменением частоты вращения коленчатого вала ДВС и изменением длительности впрыска электромагнитной форсунки; степень износа электротопливного насоса (ЭТН) определяется смещением устойчивого значения частоты вращения коленчатого вала в зону низких значений частот при тех же длительностях впрыска форсунки. Полученные данные после испытания ЭТН позволяют спланировать дальнейший алгоритм действий по поддержанию работоспособности системы топливоподачи.

*Ключевые слова:* экология, экономичность, двигатель внутреннего сгорания, диагностирование.

### Введение

В Российской Федерации с введением норм ЕВРО наблюдается достаточно серьезное отставание по сравнению с европейскими странами и Америкой. Даже в сумме автомобили с нормами ЕВРО 4, 5, 6 не составляют 50 % от всего автопарка страны. В связи с этим экологическая ситуация во многих российских городах имеет критический уровень [1, 2].

### Теоретические исследования

Вся топливная система имеет различные последовательные и параллельные гидравлические сопротивления [3, 4]. Так, фильтры грубой и тонкой очистки установлены последовательно в системе питания и их засорение вызывает рост последовательного сопротивления. К последовательным сопротивлениям можно отнести топливопроводы [5, 6]. Сам же ЭТН и износ его роликов приводит к росту параллельных утечек [7–10]. Из энергетического баланса следует, что полная потеря напора равна сумме потерь напора на всех последовательно соединенных участках [11, 12]. При изменении структурных параметров (сопротивления, утечек в топливной системе) будут изменяться параметры электрического топливного насоса: сила тока, напряжение питания [13–15]. Эти параметры являются косвенными параметрами структурных: давления в топливной системе и подачи топлива [16–21].

Рассмотрим зависимость в виде уравнения баланса энергии источника тока ЭТН с энергией по перемещению жидкости в топливной магистрали:

## Контроль и испытания

$$E_{\text{подв}} = E_{\text{перед}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{подв}}$  – подведенная энергия к рабочим контактам ЭТН, Дж;  $E_{\text{перед}}$  – переданная энергия топливу, подаваемому в топливопровод, Дж.

Представим левую и правую части в раскрытом виде:

$$I \cdot U \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \cdot t + \mu \cdot S_{\text{общ}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P^3}{\rho}}, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока потребления ЭТН, А;  $U$  – напряжение питания на контактах ЭТН, В;  $t$  – время работы ЭТН, с;  $R$  – сопротивление ЭТН, Ом;  $\Delta P$  – перепад давления на участке, кПа;  $\mu$  – коэффициент расхода топлива;  $S_{\text{общ}}$  – общая площадь проходного сечения топливопровода, которая зависит от вида неисправности (засоренность последовательных элементов или утечки в насосной части ЭТН, параллельное гидравлическое сопротивление), м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Общая площадь проходного сечения топливопровода при загрязнении последовательных элементов топливной системы определяется по формуле

$$\mu \cdot S_{\text{общ}} = \mu \cdot S_1 + \mu \cdot S_2, \quad (3)$$

где  $S_1$  – площадь проходного сечения первого засорившегося элемента, м<sup>2</sup>;  $S_2$  – площадь проходного сечения второго засорившегося элемента, м<sup>2</sup>.

Общая площадь проходного сечения топливопровода при утечках в ЭТН (параллельных элементах) определяется по формуле:

$$\frac{1}{\mu \cdot S_{\text{общ}}} = \frac{1}{\mu \cdot S'_1} + \frac{1}{\mu \cdot S'_2} \quad (4)$$

где  $S'_1$  – площадь проходного сечения топливопровода нагнетающей стороны, м<sup>2</sup>;  $S'_2$  – суммарная площадь проходного сечения утечек, м<sup>2</sup>.

Приравняем левую и правую части уравнения (1), сократив на время работы  $t$  в формуле (2), выразим из нее силу тока потребления ЭТН:

$$I = \frac{\frac{U^2}{R} \cdot t + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \mu \cdot S_{\text{общ}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P^3}{\rho}}}{U}. \quad (5)$$

Таким образом, установлена теоретическая зависимость силы тока потребления ЭТН от электрических параметров приводного двигателя ( $U$ ,  $R$ ) и технического состояния основных элементов ЭТН ( $\mu \cdot S_{\text{общ}}$ ,  $\Delta P$ ). Проведем моделирование и последующий анализ по уравнению (5) неисправностей в топливной системе. Результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2.

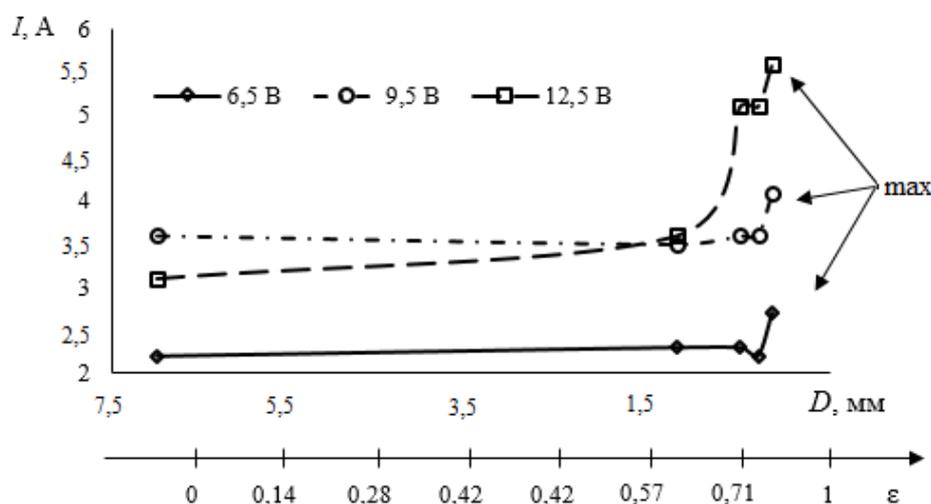


Рис. 1. Закономерности изменения силы тока  $I$  при имитации засорения топливных элементов  $D$  (эквивалентный диаметр сечения) и степени засорения  $\varepsilon$

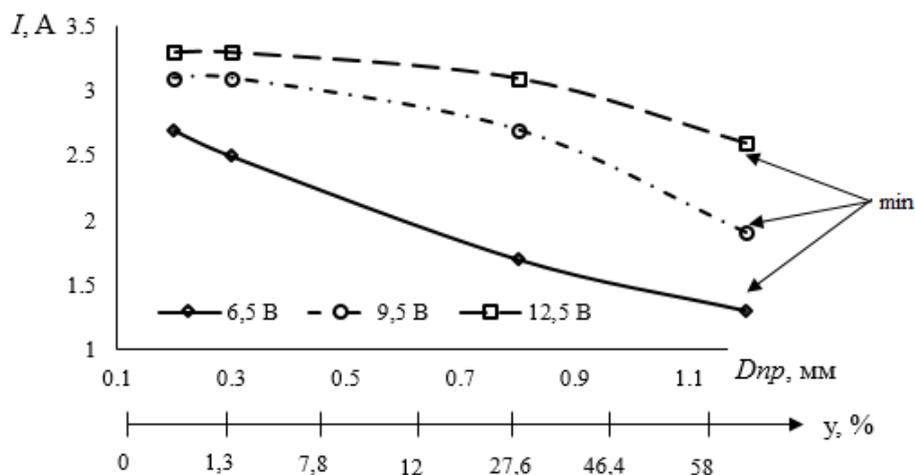


Рис. 2. Закономерности изменения силы тока  $I$  при моделировании утечек у в насосной секции ЭТН (параллельном гидравлическом сопротивлении)

При анализе данных на рис. 1 выявлено, что при уменьшении диаметра сечения топливопровода последовательно загрязненных элементов (например, засорился топливный фильтр тонкой очистки, топливопровод) сила тока потребления увеличивается.

Увеличение силы тока потребления ЭТН связано с повышением гидравлического сопротивления в топливной системе, по этой причине ротор ЭТН вращается под значительно большей нагрузкой, вследствие чего поглощается большее количество энергии. Причем из рис. 1 видно, что существенный рост силы тока наблюдается с эквивалентного сечения 1 мм. Чем больше напряжение питания ЭБН, тем больше ток, протекающий в его обмотках.

Проведем анализ данных, представленных на рис. 2. При анализе данных по рис. 2 выявлено, что при увеличении диаметра утечек в насосной части ЭТН сила тока потребления заметно снижается. Из-за наличия зазоров, неплотностей в насосной секции ЭТН топливо не поступает в нагнетающую полость насоса, из-за чего ротор вращается свободно, потребляемая энергия снижается с увеличением эквивалентного диаметра утечек.

### Методика экспериментального исследования

Экспериментальные исследования предусматривают исследования различных факторов, влияющих на диагностические параметры электрического бензонасоса. Исследования предусматривали статические режимы (при неработающем двигателе) и динамические (при функционирующем двигателе).

В качестве экспериментальной установки использовался исследовательский стенд на базе двигателя ВАЗ-2114, установленный на раму, который представлен на рис. 3 а.

а)



б)



Рис. 3. Экспериментальная установка: а) исследовательский стенд на базе двигателя ВАЗ-2114, установленный на раму; б) прибор ДБД-4 для полного и частичного отключения искрообразования в цилиндре двигателя и изменения длительности впрыска

## Контроль и испытания

Для формирования тестовых воздействий на систему топливоподачи, а конкретнее на ЭТН, использовался прибор ДБД-4 (рис. 3 б). Прибор подключается при помощи разъемов «+» и «-» к аккумулятору исследовательского стенда и питается бортовым напряжением 12 В, а также другим разъемом подсоединяется в разрыв электромагнитных форсунок, для чего к штатному разъему форсунок присоединяется разъем прибора. В рабочем режиме экран прибора ДБД-4 представлен на рис. 4 а и 4 б.

Из рис. 4 а и б видно, что коррекцию топливоподачи можно осуществлять как в сторону «-», так и «+». Коррекция отсчитывается от базового значения времени впрыска, установленного программно для данного типа двигателя. В коррекции топливоподачи и заключается тестовое воздействие на ЭТН.

При проведении экспериментальных исследований были выбраны три значения величины напряжения: 6, 9 и 12 В. Минимальное значение напряжения 6 В выбрано по причине его ограничения в технических условиях завода-изготовителя. Предлагается для идеального технического состояния снять характеристики для напряжений 6, 9 и 12 В, а после провести экспериментальные исследования с искусственно сформированными неисправными состояниями ЭТН. Таким образом, методом сравнения по разности полученных характеристик можно определить степень износа ЭТН.

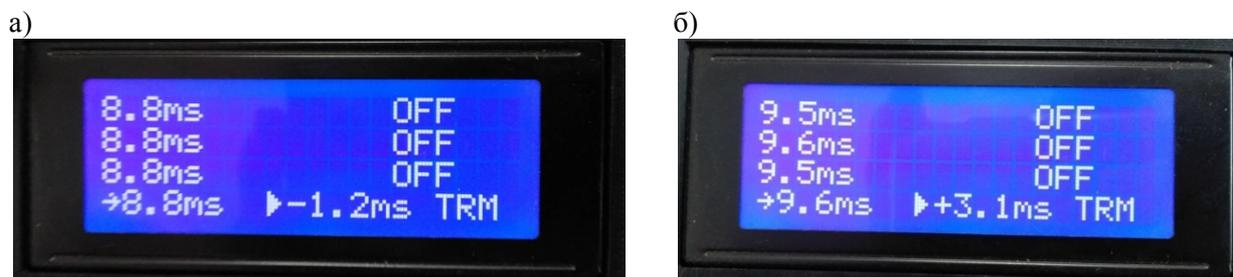


Рис. 4. Экран прибора ДБД-4 в эксплуатационном режиме при одном работающем цилиндре ДВС при трех отключенных: а) базовое время впрыска форсунки – 8,8 мс; коррекция составляет – 1,2 мс; итоговое время впрыска форсунки  $8,8 - 1,2 = 7,6$  мс; б) базовое время впрыска форсунки – 9,6 мс; коррекция составляет + 3,1 мс; итоговое время впрыска форсунки  $9,6 + 3,1 = 12,7$  мс

### Результаты экспериментальных исследований

Целью проведения многофакторного эксперимента являлось определение степени влияния калиброванных отверстий жиклеров, установленных в топливную систему одновременно при последовательном и параллельном соединении, а также влияния напряжения питания ЭТН, задаваемое блоком управления на силу тока потребления ЭТН  $I$  давление в системе питания  $P$  и объем утечек топлива  $Q$ . Эксперимент проводился по схеме на рис. 5.

Для параллельного соединения устанавливались калиброванные жиклеры  $J_{нар}$  0,2 мм, 0,6 мм, 1,0 мм, где интервал изменения  $\Delta = 0,4$  мм (рис. 6). Для последовательного соединения в топливопровод устанавливались  $J_{noc}$ : 0,2 мм, 0,7 мм, 1,2 мм с интервалом  $\Delta = 0,5$  мм. Данный эксперимент также проводился при искусственной имитации одновременно утечек топлива в корпусе ЭТН и засоренности топливных фильтров. Блоком управления задавалось 3 значения напряжения: 6,5 В, 9,5 В и 12,5 В.

Контролирующими факторами (см. рис. 6) являются:  $J_{noc}$  – диаметр калиброванного отверстия жиклера, установленного последовательным соединением в топливопровод,  $J_{нар}$  – диаметр калиброванного отверстия жиклера, установленного параллельным соединением в топливопровод,  $U$  – напряжение питания ЭТН, устанавливаемое внешним блоком управления «Вымпел-50», В.

Откликом являются следующие показатели: сила тока потребления ЭТН  $I$ , давление в системе питания  $P$  и объем утечек топлива  $Q$ . Интервалы и уровни варьирования факторов приведены в таблице.

*Исследование влияния показателей  $U$ ,  $J_{нар}$ ,  $J_{noc}$  на диагностический параметр  $P$*

Для всех значений отклика в MathCad 14 задавалось общее уравнение регрессии, которое выглядит следующим образом:

$$\text{Given } \sum_{i=1}^{27} \left[ \text{vy}1_i - \left[ a1 \cdot (M_{i,1})^{a2} + b1 \cdot (M_{i,2})^{b2} + c1 \cdot (M_{i,3})^{c2} + g \cdot M_{i,1} \cdot M_{i,2} + m \cdot M_{i,1} \cdot M_{i,3} + n \cdot M_{i,2} \cdot M_{i,3} \right] \right]^2, \quad (6)$$

где  $a1, b1, c1, g, m, n$  – коэффициенты регрессии;  $i$  – число опытов (равное 27);  $M_{i,1}$  – 1-й фактор – напряжение питания ЭТН, В;  $M_{i,2}$  – 2-й фактор – жиклер, установленный параллельно топливопроводу, мм;  $M_{i,3}$  – 3-й фактор – жиклер, установленный последовательно топливопроводу, мм;  $a2, b2, c2$  – коэффициенты наилучшего приближения функции.

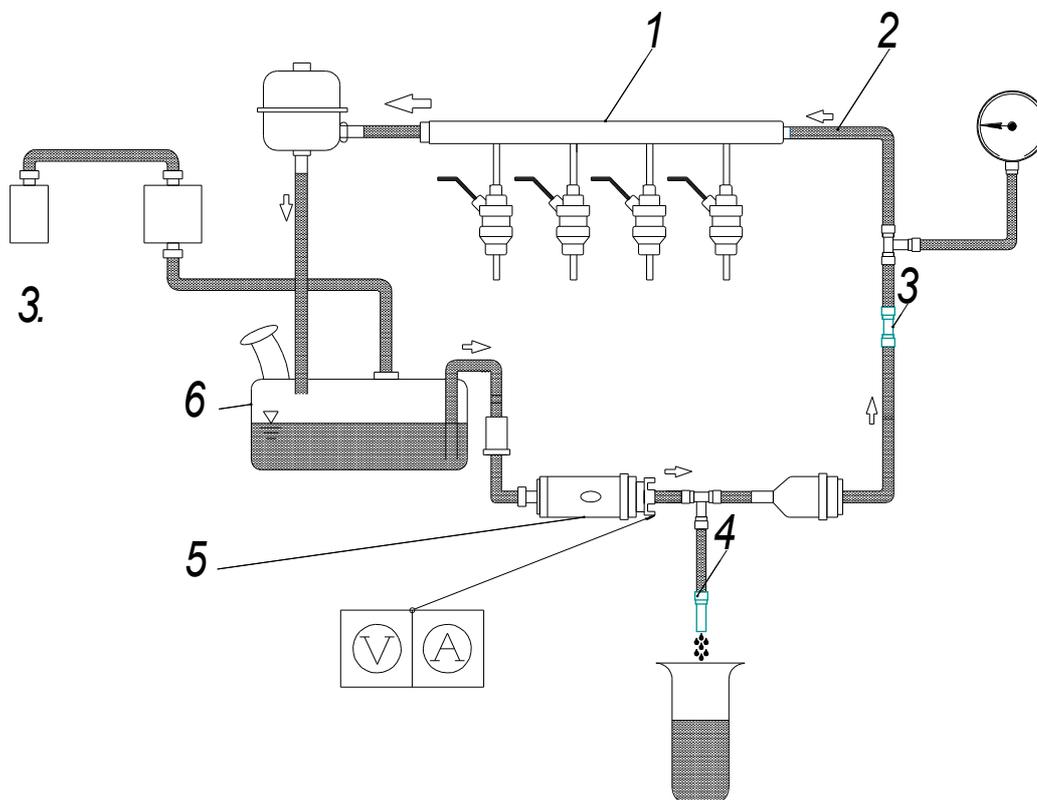


Рис. 5. Схема проведения трехфакторного эксперимента:  
1 – топливная рама; 2 – топливопровод; 3 – жиклер последовательного соединения;  
4 – жиклер параллельного соединения; 5 – топливный насос; 6 – топливный бак

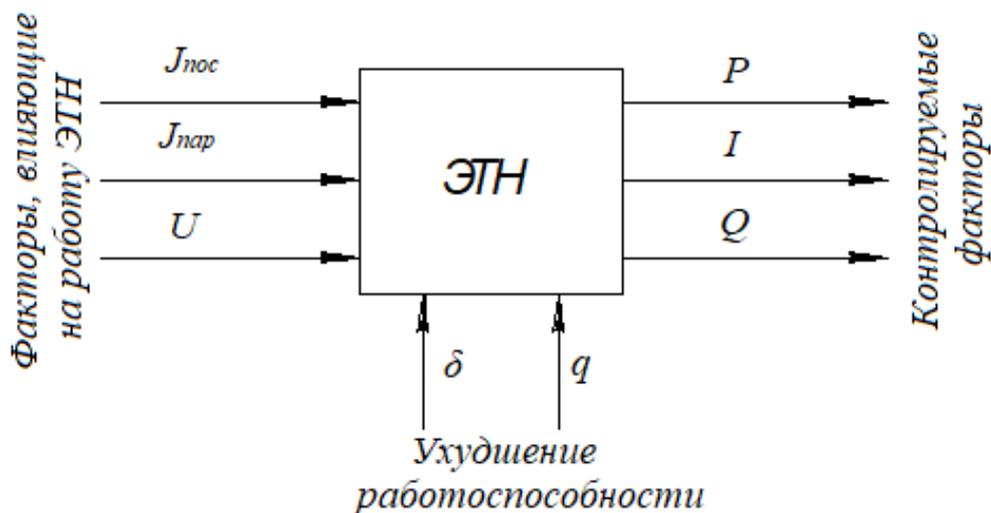


Рис. 6. Входные и выходные параметры при проведении трехфакторного эксперимента

Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Кодированное обозначение	Уровень варьирования			Интервал, $\Delta$
		-1 (нижний)	0	+1 (верхний)	
1	2	3	4	5	6
Калиброванный жиклер, соединенный последовательным способом, $J_{noc}$ , мм.	$M_{i,1}$	0,3	0,75	1,2	0,5
Калиброванный жиклер, соединенный параллельным способом, $J_{нар}$ , мм.	$M_{i,2}$	0,2	0,6	1	0,4
Напряжение питания ЭТН, $U$ , В.	$M_{i,3}$	6,5	9,5	12,5	3

После ввода значений опытов было получено следующее уравнение регрессии для давления  $P$  в системе топливоподачи:

$$P(U, J_{нар}, J_{noc}) = 12,328 \cdot U^{1,1} + 33,133 \cdot J_{нар}^{-0,568} - 0,025 \cdot J_{noc}^{-2,921} + 2,808 \cdot U \cdot J_{нар} + 2,82 \cdot U \cdot J_{noc} + 33,585 \cdot J_{нар} \cdot J_{noc} \quad (7)$$

*Исследование влияния показателей  $U$ ,  $J_{нар}$ ,  $J_{noc}$  на диагностический параметр – силу тока  $I$  питания ЭТН*

Было получено следующее уравнение регрессии, полученное путем вычислений, аналогично давлению в системе топливоподачи:

$$I(U, J_{нар}, J_{noc}) = 0,978 \cdot U^{0,495} + 0,052 \cdot J_{нар}^{-2,026} + 2,049 \cdot J_{noc}^{2,154} + 0,263 \cdot U \cdot J_{нар} - 0,4 \cdot U \cdot J_{noc} - 0,667 \cdot J_{нар} \cdot J_{noc} \quad (8)$$

*Исследование влияния показателей  $U$ ,  $J_{нар}$ ,  $J_{noc}$  на диагностический параметр – количество топлива, утекающего через параллельно ЭТН установленный жиклер  $Q$*

В результате исследований получили следующее уравнение регрессии:

$$Q(U, J_{нар}, J_{noc}) = -1,27 \cdot U^{1,856} + 294,986 \cdot J_{нар}^{2,338} + 0,939 \cdot J_{noc}^{-3,261} + 56,125 \cdot U \cdot J_{нар} + 9,715 \cdot U \cdot J_{noc} - 472,949 \cdot J_{нар} \cdot J_{noc} \quad (9)$$

Полученные уравнения регрессии (7)–(9) в раскодированном виде позволили построить поверхности откликов критерия оптимизации – давления в системе топливоподачи, силы тока потребления насоса и объема утечек топлива через параллельно ЭТН установленный жиклер от  $J_{noc}$ ,  $J_{нар}$  и  $U$  (рис. 7–12).

Для построения поверхностей отклика критерия оптимизации от выбранных факторов использовались средства пакета программы Statistica 12. Рассмотрим попарные влияния входных факторов на выходные параметры.

Рассмотрим зависимость величины давления  $P$  в системе топливоподачи от установленных калиброванных жиклеров при параллельном  $J_{нар}$  и последовательном соединении  $J_{noc}$  в топливном проводе (см. рис. 7).

Зависимость на рис. 7 можно представить в виде уравнения:

$$P(J_{нар}; J_{noc}) = 202,7469 + 37,5 \cdot J_{нар} + 116,8724 \cdot J_{noc} - 69,4444 \cdot J_{нар}^2 + 37,037 \cdot J_{нар} \cdot J_{noc} - 63,1001 \cdot J_{noc}^2 \quad (10)$$

Анализ данных, представленных на рис. 7, показывает, что уменьшение эквивалентного сечения последовательного жиклера приводит к уменьшению давления в топливной магистрали. Это связано с тем, что образуется перепад давления на жиклере, который заметно увеличивается по мере роста гидравлического сопротивления.

С увеличением сечения параллельно ЭТН установленного жиклера давление уменьшается. Это объясняется тем, что большая часть топлива начинает уходить в параллельном потоке, в то время как последовательный поток заметно уменьшается.

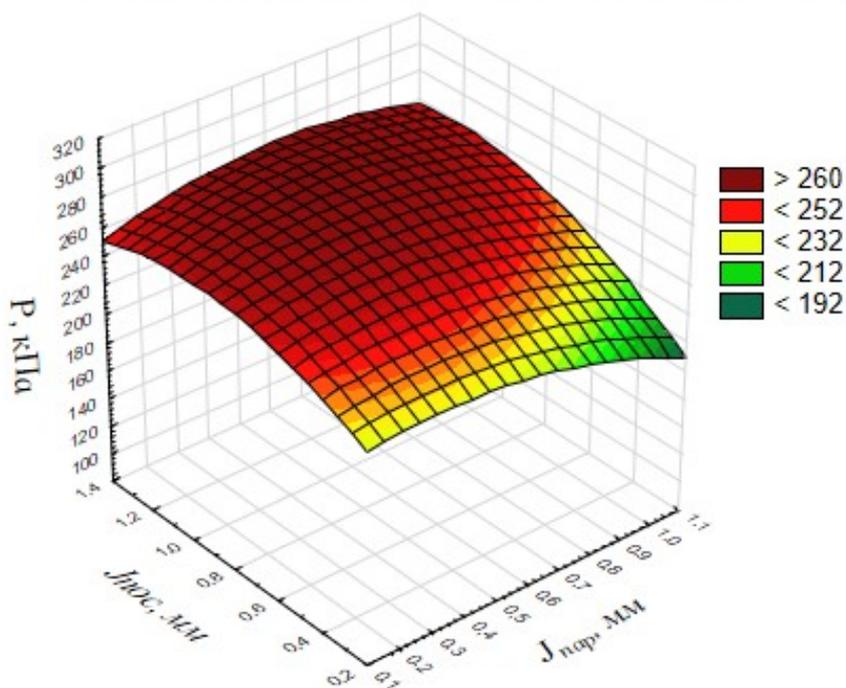


Рис. 7. Зависимость величины давления  $P$  в системе топливоподачи от установленных калиброванных жиклеров при параллельном  $J_{пар}$  и последовательном соединении  $J_{пос}$  в топливопроводе

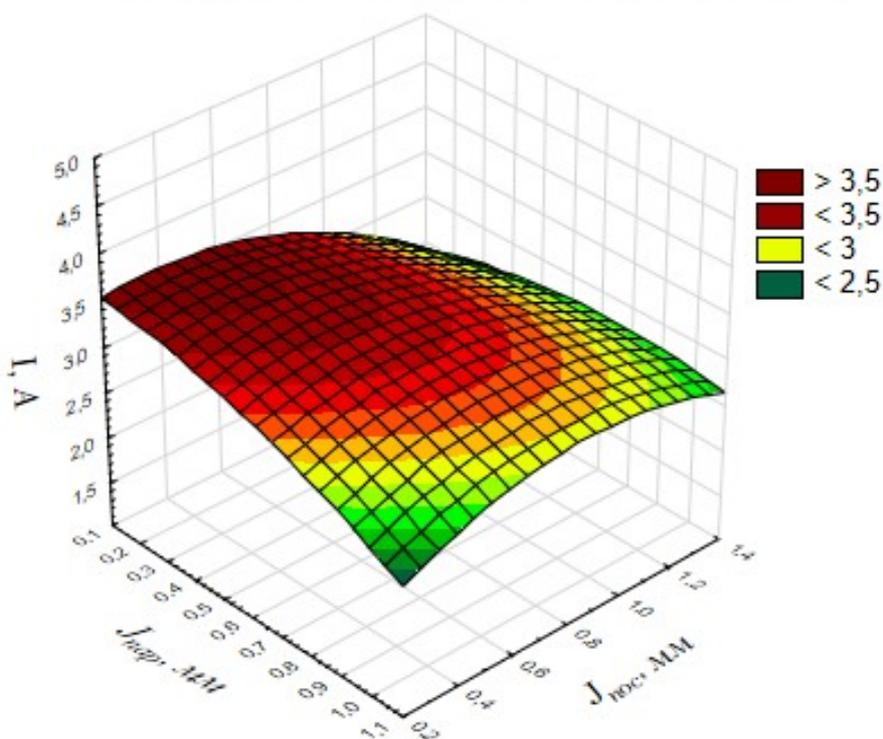


Рис. 8. Зависимость силы тока  $I$  в СТ от установленных калиброванных жиклеров при параллельном  $J_{пар}$  и последовательном  $J_{пос}$  соединении в топливопроводе

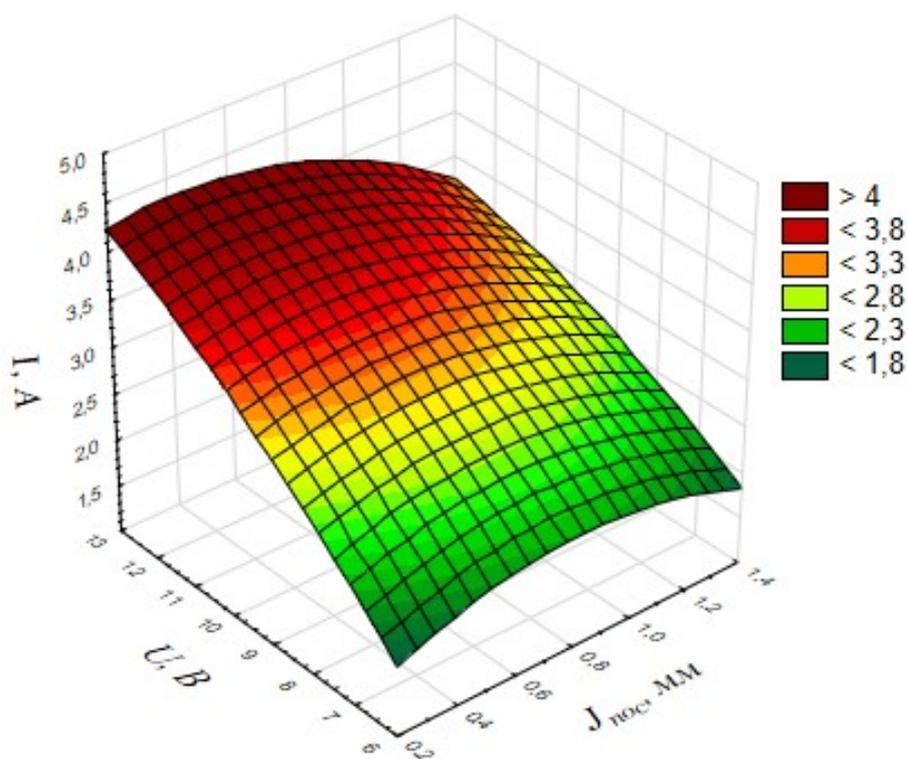


Рис. 9. Зависимость силы тока питания ЭТН от напряжения питания насоса и установленного калиброванного жиклера при последовательном  $J_{\text{лос}}$  соединении в топливопроводе

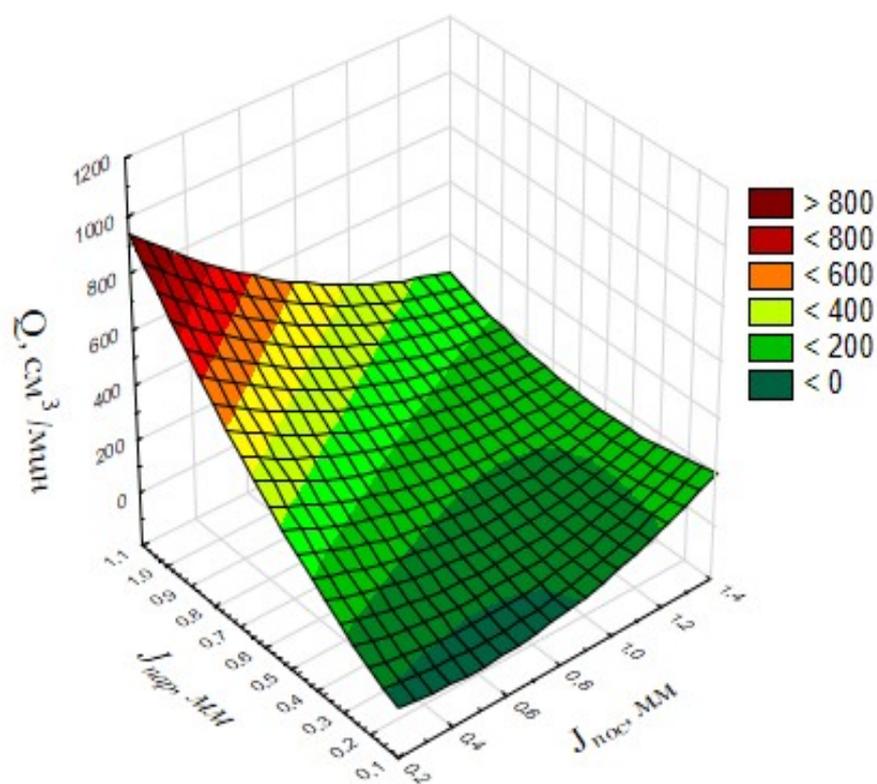


Рис. 10. Зависимость объема утечек топлива через параллельно ЭТН установленный жиклер  $Q$  от калиброванных сечений жиклеров при последовательном  $J_{\text{лос}}$  и параллельном соединении  $J_{\text{пар}}$  в топливопроводе

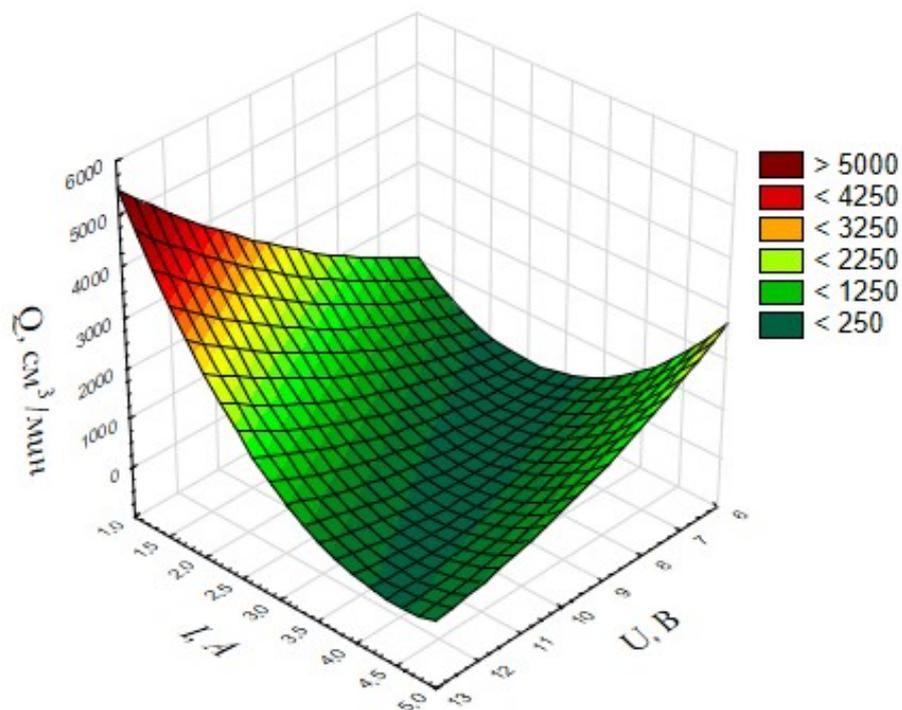


Рис. 11. Зависимость объема утечек топлива через параллельно ЭТН, установленный жиклер от значения силы тока, потребляемого насосом и напряжения при последовательном и параллельном соединении жиклеров в топливопроводе

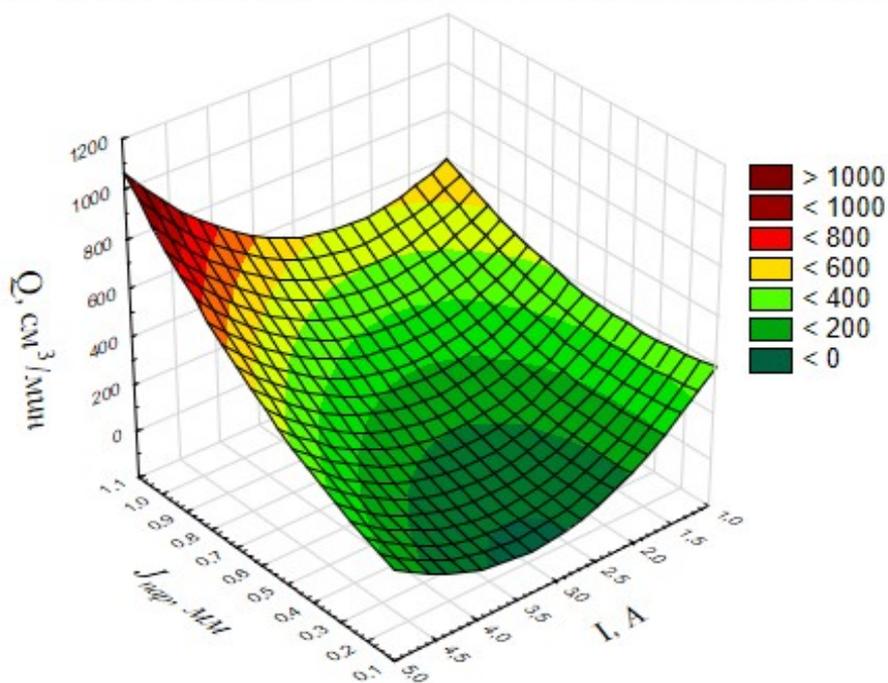


Рис. 12. Зависимость объема утечек топлива через параллельно ЭТН установленный жиклер  $Q$  от значения силы тока  $I$  потребляемой насосом при параллельном  $J_{пар}$  соединении жиклера в топливопроводе

Рассмотрим зависимость величины тока питания ЭТН в системе топливоподачи от установленных калиброванных жиклеров при параллельном  $J_{пар}$  и последовательном соединении  $J_{пос}$  в топливопроводе (см. рис. 8).

## Контроль и испытания

Зависимость на рис. 8 можно представить в виде уравнения:

$$I(J_{\text{нар}}, J_{\text{нос}}) = 3,44 - 0,3611 \cdot J_{\text{нар}} + 0,7613 \cdot J_{\text{нос}} - 0,7986 \cdot J_{\text{нар}}^2 + 1,1111 \cdot J_{\text{нар}} \cdot J_{\text{нос}} - 1,1248 \cdot J_{\text{нос}}^2 \quad (11)$$

На рис. 8 с уменьшением сечения последовательного жиклера возрастает сила тока потребления ЭТН (область, выделенная темно-серым цветом). Данный фактор имеет наибольшую значимость на изменение силы тока. При возрастании гидравлического сопротивления в последовательных магистралях сила тока резко растет. С увеличением сечения параллельного жиклера сила тока заметно снижается. Снижение тока можно объяснить некоторой разгрузкой напорной линии, так как часть топлива сливается через жиклер (имитация утечек через неплотности ЭТН).

Проведем анализ зависимости силы тока питания ЭТН от напряжения питания и установленного калиброванного жиклера при последовательном  $J_{\text{нос}}$  соединении в топливопроводе (см. рис. 9).

Зависимость на рис. 9 можно представить в виде уравнения:

$$I(U, J_{\text{нос}}) = -2,1256 + 2,6008 \cdot J_{\text{нос}} + 0,6864 \cdot U - 1,1248 \cdot J_{\text{нос}}^2 - 0,1235 \cdot J_{\text{нос}} \cdot U - 0,016 \cdot U^2 \quad (12)$$

На рис. 9 с увеличением напряжения при последовательно установленном жиклере возрастает сила тока потребления ЭТН. Причем сила тока увеличивается интенсивнее при установленном сечении жиклера меньшего размера. Это объясняется увеличением гидравлического сопротивления в последовательном топливопроводе.

Проведем анализ зависимости объема утечек топлива через параллельно ЭТН установленный жиклер  $Q$  от калиброванных сечений жиклеров при последовательном  $J_{\text{нос}}$  и параллельном соединении  $J_{\text{нар}}$  в топливопроводе (см. рис. 10).

Зависимость на рис. 10 можно представить в виде уравнения:

$$Q(J_{\text{нос}}, J_{\text{нар}}) = 48,8225 - 206,9547 \cdot J_{\text{нос}} + 666,1111 \cdot J_{\text{нар}} + 291,6324 \cdot J_{\text{нос}}^2 - 748,1481 \cdot J_{\text{нос}} \cdot J_{\text{нар}} + 371,1806 \cdot J_{\text{нар}}^2 \quad (13)$$

На рис. 10 с увеличением сечения жиклера, параллельно установленного ЭТН, значительно увеличиваются утечки топлива через него, достигая при 1,1 мм значения 930 см<sup>3</sup>/мин, в то время как при сечении 0,1 мм утечки не превышают 100 см<sup>3</sup>/мин. При увеличении последовательно установленного жиклера утечки возрастают в зоне малых сечений параллельных жиклеров и, наоборот, уменьшаются в зоне больших сечений параллельных жиклеров.

Проведем анализ зависимости объема утечек топлива через параллельно ЭТН установленный жиклер  $Q$  от значения силы тока  $I$ , потребляемого насосом, и напряжения  $U$  при последовательном и параллельном соединении жиклеров в топливопроводе (см. рис. 11).

Зависимость на рис. 11 можно представить в виде уравнения:

$$Q(I, U) = 128,8102 - 258,3644 \cdot I + 777,9588 \cdot U + 32,2314 \cdot I^2 - 241,4565 \cdot I \cdot U + 440,2246 \cdot U^2 \quad (14)$$

На рис. 11 с увеличением напряжения питания на насосе сила тока возрастает слабо или не изменяется, это говорит о больших утечках топлива в системе.

Рассмотрим зависимость объема утечек топлива через параллельно ЭТН установленный жиклер  $Q$  от значения силы тока  $I$ , потребляемой насосом при параллельном  $J_{\text{нар}}$  соединении жиклера в топливопроводе (см. рис. 12).

Зависимость на рис. 12 можно представить в виде уравнения:

$$Q(J_{\text{нар}}, I) = 866,8039 - 537,3294 \cdot J_{\text{нар}} + 515,5308 \cdot I + 482,7916 \cdot J_{\text{нар}}^2 - 167,4379 \cdot J_{\text{нар}} \cdot I + 74,2468 \cdot I^2 \quad (15)$$

На рис. 12 видно, что при увеличении диаметра проходного сечения жиклера параллельного соединения значительно возрастают утечки топлива. При увеличении тока питания насоса утечки также возрастают.

Расхождение величин давления, подачи топлива и силы тока, полученных экспериментально при тестовом диагностировании и на основе реализации математических моделей, не превышает 4–6 %, что подтверждает корректность результатов теоретических исследований и высокую эффективность тестового диагностирования ЭТН и других элементов топливной магистрали.

## Выводы

Таким образом, основным итогом проведенных экспериментальных исследований является разработка методологии диагностирования электрических топливных насосов. Разработан принципиально новый тестовый метод диагностирования ЭТН, заключающийся в формировании тестового воздействия путем отключения ряда цилиндров, управления длительностью впрыска и напряжением питания ЭТН. Обосновано применение приборных средств, реализующих разработанную методику: ДБД-4, МТ-10, «Вымпел-50». Основным техническим результатом является повышение эффективности процесса диагностирования системы топливоподачи и достоверности определения технического состояния ЭТН.

Научная ценность разработанной технологии тестового диагностирования, средств для ее реализации состоит в возможности повышения эффективности проведения экспериментальных исследований ЭТН, других элементов топливной магистрали для обоснования их технологической способности при эксплуатации автотракторных двигателей.

## Литература/References

1. Kurnykina O.V., Popova O.V., Zubkova S.V., Karpukhin D.V., Pavlov V.P., Varenik P.K., Aleshkova I.A., Novitskaya L.Y. Air Pollution by Road Traffic and Its Measurement Methods. *EurAsian J. of BioSciences*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 181–188.
2. Gritsenko A., Zadorozhnaya E., Shepelev V. Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading. *Tribology in Industry*, 2018, vol. 2, no. 40, pp. 300–310. DOI: 10.24874/ti.2018.40.02.13.
3. Liu X., Jing B., Shi H., Qiang X., Sheng Z. Optimized Design of Fuel Pump Fault Diagnosis Experimental Device and Test Program. *J. of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2017, vol. 37, no. 6, pp. 1187–1194. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2017.06.018.
4. Krogerus T. R., Hyvönen M. P., Huhtala K. J. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Diesel Fuel Injection Systems. *J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, 2016, vol. 138, no. 8. DOI: 10.1115/1.4032417.
5. Wang Z., Qian Y., Wang L., Zhang S., Luo X. The Extraction of Hidden Fault Diagnostic Knowledge in Equipment Technology Manual Based on Semantic Annotation. *Conference Proceeding Series of 8th International Conference on Software and Computer Applications*, 2019, Part F147956, pp. 419–424.
6. Gritsenko A., Kukov S., Glemba K. Theoretical Underpinning of Diagnosing the Cylinder Group During Motoring. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1182–1187.
7. Ерохов В.И. Системы впрыска бензиновых двигателей (конструкция, расчет, диагностика): учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2011. 552 с. [Erokhov V.I. *Sistemy vpryska benzinovykh dvigateley (konstruktsiya, raschet, diagnostika)* [Injection Systems of Gasoline Engines (design, calculation, diagnostics)]. Moscow, Hot line – Telecom, 2011. 522 p.]
8. Hsu P., Lin K., Shen L. Diagnosis of Multiple Sensor and Actuator Failures in Automotive Engines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1995, vol. 44, no. 4, pp. 779–789. DOI:10.1109/25.467962.
9. Salikhov R.F., Makushev Y.P., Musagitova G.N., Volkova L.U., Suleymanov R.S. Diagnosis of Fuel Equipment of Diesel Engines in Oil-And-Gas Machinery and Facilities. *AIP Conference Proceedings on Oil and Gas Engineering Conference*, 2019, no. 2141.
10. Hu Q., Wu S.F., Lai M., Stottler S., Raghupathi R. Prediction of pressure fluctuations inside an automotive fuel rail system. *SAE Technical Papers*, 1999. DOI: 10.4271/1999-01-0561.
11. Vlasov D.B., Ignatiev A.G., Almetova Z.V. Methodological Aspects of Diagnostics of Electric Gasoline Pumps in Operation of Automobiles. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, no. 0(9783319956299), pp. 2193–2201. DOI:10.1007/978-3-319-95630-5\_236.
12. Tormos B., Martín J., Carreño R., Ramírez L. A General Model to Evaluate Mechanical Losses and Auxiliary Energy Consumption in Reciprocating Internal Combustion Engines. *Tribology International*, 2018, no. 123, pp. 161–179. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.03.007.

13. Jiao X., Jing B., Qiang X., Liu X., Li J., Zhou W. Fault Diagnosis and Test Platform for Airborne Fuel Pumps. *Zhendong Yu Chongji. J. of Vibration and Shock*, 2017, vol. 36, no. 1, pp. 120–128. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.01.018.
14. Chen S., Liu W., Tsai J., Hung I. Vehicle Fuel Pump Service Life Evaluation Using on-board Diagnostic (OBD) data. *Proceedings of the 2016 International Conference on Orange Technologies*, 2018, pp. 35–84.
15. Boumaza M., Omara A. Numerical Investigation of Transport Phenomena Properties on Transient Heat Transfer in a Vertical Pipe Flow. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.*, 2015, vol. 27, no. 2, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.jksues.2013.06.004.
16. Postriotti L., Cavicchi A., Paolino D., Guido C., Parotto M., Di Gioia R. An Experimental and Numerical Analysis of Pressure Pulsation Effects of a Gasoline Direct Injection System. *Fuel*, 2016, vol. 173, pp. 8–28. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.012.
17. Yakimov I.V., Krivtsov S.N., Potapov A.S., Svirbutovich O.A. Fuel flow and Pressure in Common Return Line as a Diagnostic Parameter of Electro-Hydraulic Injectors Technical State. *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering on 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering*, 2019, vol. 632, no. 1.
18. Ahsan M. Prediction of Gasoline Yield in a Fluid Catalytic Cracking (FCC) Riser Using K-Epsilon Turbulence and 4-lump Kinetic Models: A Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.*, 2015, vol. 27, no. 2, pp. 130–136. DOI: 10.1016/j.jksues.2013.09.001.
19. Baur R., Blath J.P., Bohn C., Kallage F., Schultalbers M., Modeling and Identification of a Gasoline Common Rail Injection System. *SAE Technical Papers*, 2014, no. 1. DOI: 10.4271/2014-01-0196.
20. Jiao X., Jing B., Huang Y., Liang W., Xu G. A Fault Diagnosis Approach for Airborne Fuel Pump Based on EMD and Probabilistic Neural Networks. *Proceedings of 2016 Prognostics and System Health Management Conference on 7th IEEE Prognostics and System Health Management Conference*, 2017, vol. 7819831.
21. Muhamad Said M., Abdul Aziz A., Abdul Latiff Z., Mahmoudzadeh Andwari A., Shahril Nizam Mohamed Soid, Investigation of Cylinder Deactivation (CDA) Strategies on Part Load Conditions. *SAE Technical Paper*, 2014-01-2549. DOI: 10.4271/2014-01-2549.

**Гриценко Александр Владимирович**, доктор технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, alexgrits13@mail.ru.

**Шепелев Владимир Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shepelev vd@susu.ru.

**Граков Федор Николаевич**, кандидат технических наук доцент кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», Южно-Уральский аграрный государственный университет, г. Челябинск, gfn@74.ru.

**Лукомский Константин Иванович**, кандидат технических наук, доцент 4-й кафедры общетехнических дисциплин, Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Челябинск, klukomsky@mail.ru.

**Салимоненко Григорий Николаевич**, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, salimonenkog@mail.ru.

*Поступила в редакцию 11 августа 2020 г.*

## DIAGNOSTICS OF THE FUEL SUPPLY SYSTEM OF AUTO ICES BY THE TEST METHOD

A.V. Gritsenko<sup>1</sup>, alexgrits13@mail.ru,  
V.D. Shepelev<sup>1</sup>, shepelevvd@susu.ru,  
F.N. Grakov<sup>2</sup>, gfn@74.ru,  
K.I. Lukomsky<sup>3</sup>, klukomsky@mail.ru,  
G.N. Salimonenko<sup>1</sup>, salimonenkog@mail.ru

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup>South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>3</sup>Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,  
Chelyabinsk, Russian Federation

According to scientific studies dealing with the statistics of ICE (internal combustion engine) failures, most of them are registered in the ignition system (25 %) and the power system (35 %). The operable state of the ICE fuel system can be maintained by developing effective testing methods. For the purpose of theoretical research, we designed a DBD-4 testing device in the methodological part of our research. The use of the developed methodologies and instrumentation allowed us to carry out experimental studies to diagnose the operability of the fuel supply system. Analyzing the obtained experimental data, we can affirm that: there is a stable relationship between the change in the ICE crankshaft speed and the change in the injection duration of the electromagnetic injector; the degree of wear of the electric fuel pump (EFP) is determined by the shift of the stable value of the crankshaft speed to the zone of low speed values at the same injection durations. The data obtained after testing the EFP allows us to plan a further algorithm of actions to maintain the operability of the fuel supply system.

*Keywords: diagnostics, power system, electric fuel pump, wear, losses.*

*Received 11 August 2020*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Диагностирование системы топливоподачи автомобильных ДВС тестовым методом / А.В. Гриценко, В.Д. Шепелев, Ф.Н. Граков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 71–83. DOI: 10.14529/engin200407

### FOR CITATION

Gritsenko A.V., Shepelev V.D., Grakov F.N., Lukomsky K.I., Salimonenko G.N. Diagnostics of the Fuel Supply System of Auto ICES by the Test Method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 71–83. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200407

---