



Оценка технического состояния электроуправляемых форсунок дизелей по характеристике топливоподачи

И. И. Габитов¹, А. В. Неговора¹, Ф. Р. Сафин¹,
Р. Ж. Магафуров¹, Н. В. Раков^{2*}

¹ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)

*nikolaymgu@yandex.ru

Введение. В настоящее время на станциях техобслуживания и ремонтных предприятиях отсутствуют доступные для широкого использования технологии и оборудование для точной оценки технического состояния форсунок аккумуляторных топливоподающих систем типа Common Rail. Реализованные на практике методы в основном дают обобщенную оценку работоспособности форсунки без выявления конкретного дефекта, что влечет за собой необоснованную замену еще работоспособных деталей электроуправляемых форсунок. Целью данной статьи является знакомство широкого круга специалистов с новым безмензурочным методом испытания форсунок с электронным управлением на основе оценки характеристик топливоподачи. Он позволяет выявить конкретные неисправности форсунок при безразборном диагностировании.

Материалы и методы. Работа основана на системном анализе заводских методик испытания форсунок, обзоре современных научных публикаций, использовании компьютерного моделирования в специализированных программах, а также экспериментальной проверке полученных результатов.

Результаты исследования. Предложенная авторами методика диагностирования дизельных форсунок с возможностью оценки технического состояния каждого элемента по топливоподаче позволяет существенно повысить информативность протокола проверки и на 24 % снизить трудоемкость ремонта электроуправляемых форсунок.

Обсуждение и заключение. Итогом исследования являются разработанные и апробированные авторами измерительный модуль и методика испытания форсунок дизелей с возможностью оценки технического состояния деталей, что позволяет выявить и устранить конкретные неисправности форсунок без разборки и избежать необоснованной замены исправных элементов при ремонте. Результаты исследования внедрены в центре по ремонту топливной аппаратуры Bosch Diesel Service ООО «Башдизель».

Ключевые слова: характеристика топливоподачи, ремонт форсунок, измерительный модуль, Common Rail, электронное управление

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Габитов И. И., Неговора А. В., Сафин Ф. Р., Магафуров Р. Ж., Раков Н. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Оценка технического состояния электроуправляемых форсунок дизелей по характеристике топливоподачи / И. И. Габитов, А. В. Неговора, Ф. Р. Сафин [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202102.207-226](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.207-226) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 207–226.

Original article

Assessment of the Technical Condition of Electric-Controlled Diesel Injectors According to the Fuel Supply Characteristics

I. I. Gabitov^a, A. V. Negovora^a, F. R. Safin^a, R. Zh. Magafurov^a, N. V. Rakov^{b*}

^aBashkir State Agrarian University (Ufa, Russian Federation)

^bNational Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

*nikolaymgu@yandex.ru

Introduction. Currently, there are no widely available technologies and equipment available at service stations and repair facilities to accurately assess the technical condition of Common Rail battery fuel supply system injectors. The methods implemented in practice mainly give a generalized assessment of the nozzle performance without identifying a specific defect, which entails an unjustified replacement of still working parts of electrically controlled injectors. The purpose of this article is to familiarize a wide range of specialists with a new non-slip test method for injectors with electronic control based on the evaluation of their fuel supply characteristics, which allows identifying specific malfunctions of the nozzle during the procedure of diagnostic without disassembling.

Materials and Methods. The study is based on a systematic analysis of the factory methods for testing injectors, a review of modern scientific publications, the use of computer simulation in specialized programs, and experimental testing of the obtained results.

Results. A method for testing and evaluating the technical condition of diesel injectors based on the fuel supply characteristics has been developed and tested that can significantly increase the information content of the diagnostic and reduce the overall labor intensity of repairing electronically controlled injectors by 24%.

Discussion and Conclusion. The authors have developed and tested a measurement module and a test procedure for diesel injectors with the ability to assess the technical condition of their parts, which allows identifying and eliminating specific malfunctions of injectors without disassembling them and avoid unjustified replacement of serviceable elements during repair. The results of the study have been implemented in the Bosch Diesel Service fuel equipment repair center of Bashdiesel LLC.

Keywords: fuel supply characteristics, injector repair, measuring module, Common Rail, electronic control

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gabitov I.I., Negovora A.V., Safin F.R., et al. Assessment of the Technical Condition of Electric-Controlled Diesel Injectors According to the Fuel Supply Characteristics. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):207-226. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.207-226>

Введение

Выполнение современных требований к технико-экономическим и экологическим показателям дизельных

двигателей невозможно обеспечить без электронного управления процессом топливоподачи. Изменение технического состояния любого элемента форсунки

приводит к ухудшению экологических и эксплуатационных показателей двигателя, поэтому все форсунки должны проходить регулярное тестирование в рамках планового техобслуживания. Конструкция электроуправляемых форсунок постоянно совершенствуется, соответственно, меняются методы и оборудование для их диагностирования и регулировки. Даже специализированные центры по ремонту топливной аппаратуры не владеют в полном объеме технологиями ремонта форсунок типа Common Rail вследствие отсутствия технической информации от заводов-производителей. Производители оборудования для диагностики и ремонта в настоящее время не предлагают методики и устройства для документального подтверждения соответствия отремонтированных форсунок заводским требованиям в условиях производства, например, путем фиксации и оценки характеристики топливоподачи, которая является наиболее информативным показателем качества работы форсунок дизелей с электронным управлением.

Отдельные образцы научно-исследовательских стендов фиксируют характеристики топливоподачи или измеряют цикловые подачи в достаточно узком диапазоне и требуют тщательной настройки и высокой квалификации персонала, что возможно только в исследовательских центрах. Концепция научного развития агропромышленного комплекса Российской Федерации до 2025 года утверждает необходимость «разработать технологии эффективного использования техники в отрасли»¹. В связи с этим исследования, направленные на совершенствование средств и способов контроля технического состояния электроуправляемых форсунок

дизелей, повышение точности диагностики и снижение трудоемкости ремонта, в настоящее время являются весьма актуальными и востребованными. Цель исследования – описание нового безмензурочного метода испытания форсунок с электронным управлением на основе оценки топливоподачи. Он позволяет выявить конкретные неисправности форсунок при безразборном диагностировании.

Обзор литературы

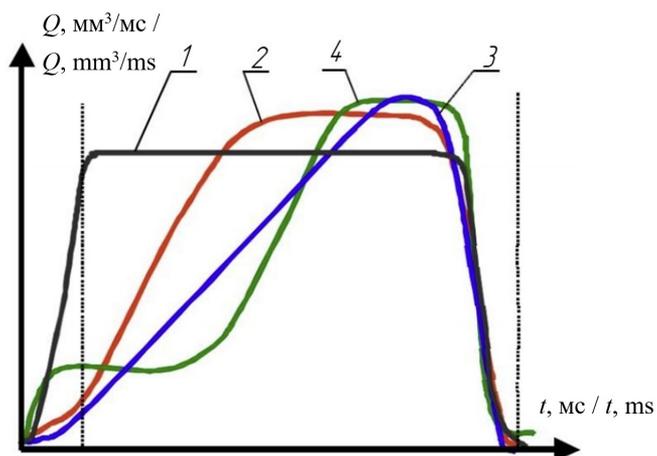
Авторами выполнен анализ работ, в ходе которого установлено, что на фоне изучения отдельных вопросов технического сервиса топливной аппаратуры в исследованиях отсутствуют доступные для широкого использования средства и технологии точной оценки технического состояния. Разработки в основном носят общий характер и не затрагивают вопросы технического сервиса конкретных агрегатов, в частности электроуправляемых форсунок.

В автотракторных дизельных двигателях используются разнообразные законы топливоподачи: треугольный, прямоугольный, трапециевидный, двухступенчатое или пятиступенчатое впрыскивание за цикл, при этом каждый впрыск имеет свою функцию (рис. 1). Характеристика выбирается в связи с условиями работы дизельного двигателя и режимом его эксплуатации.

Серийно выпускаемые топливоподающие системы с электронным управлением рассчитаны на гибкое управление характеристикой топливоподачи. В таблице 1 рассмотрены топливоподающие системы, в которых применяется регулирование давления при впрыскивании².

¹ О Концепции развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года [Электронный ресурс] // Утв. приказом Минсельхоза России от 25 июня 2007 года № 342. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902099525> (дата обращения: 18.02.2021).

² Магафуров Р. Ж. Разработка методики испытания форсунок автотракторных дизелей с электронным управлением: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2020. 163 с.



Р и с. 1. Разновидности характеристик основного впрыска: 1 – прямоугольная форма; 2 – форма с крутым передним фронтом; 3 – форма с пологим передним фронтом; 4 – ступенчатая форма

Fig. 1. Types of characteristics of the main injection: 1 – rectangular shape; 2 – shape with a steep front; 3 – shape with a flat front; 4 – step shape

Т а б л и ц а 1
Table 1

Электроуправляемые топливоподающие системы с регулированием давления впрыскивания
Electrically controlled fuel supply systems with injection pressure regulation

Параметр / Parameter	Тип системы питания / Type of power system					
	UIS, UPS	Common Rail	Common Rail с двумя рампами / Common Rail with two ramps	AVL	Bosch APCRS	ITV Twin-CR
Характеристика топливоподдачи / Characteristics of fuel supply	Изменение переднего фронта / Changing the leading edge					
Максимальное давление впрыска, МПа / Maximum injection pressure, MPa	210	165	180	135	250	180
Максимальная скорость нарастания давления, МПа/мс / Maximum pressure rise rate, MPa/ms	50	–	80	140	80	150
Гибкость / Flexibility	Низкая / Low	Средняя / Medium	Высокая / High		Очень высокая / Very high	

Как видно из таблицы 1, современные электроуправляемые топливоподающие системы развиваются в сторону управления величиной цикловой подачи не только за счет продолжительности впрыска, но и путем корректировки характеристик топливоподдачи. Отсюда следует, что для полного диагностирования и испытания форсунок с электронным управлением необходимо фиксировать и анализировать характеристики топливоподдачи при разных режимах работы [1–4].

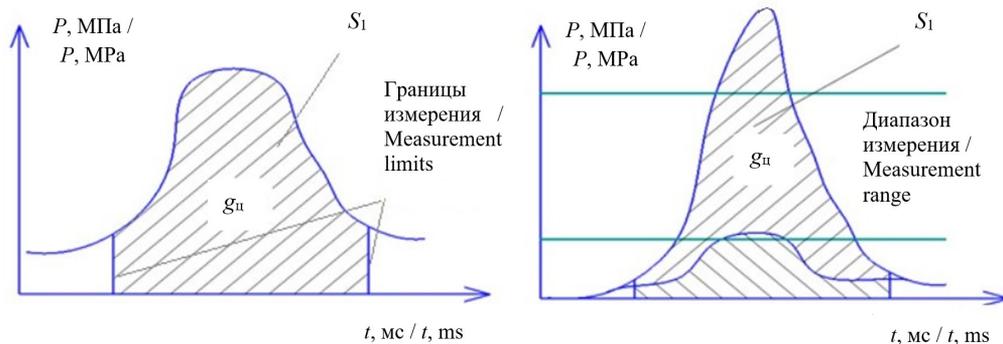
Изучение опубликованных работ и соответствующих патентов Р. М. Баширова, Л. В. Грехова, С. Н. Девянина, С. Н. Кривцова, В. А. Маркова, Б. Н. Файнлейба и др. позволило выявить наиболее эффективные способы испытания форсунок с электронным управлением [5–9]. Проанализированы промышленные методы и средства фиксации характеристики топливоподдачи, используемые фирмами Robert Bosch GmbH, Hartridge, Moehwald GmbH, IAV GmbH, EFS, Luccioni Group, Ono Sokki [10–13]. Способ впрыска топлива в длинный трубопровод является наиболее перспективным для разработки измерительного модуля и для фиксации характеристики топливоподдачи [14]. Метод предложен

фирмой Bosch и применяется в ряде исследований. Цикловой подачей здесь является площадь под кривой давления в адаптере впрыска. Основные недостатки – размытые границы начала и конца рабочего цикла и узкий диапазон давления (рис. 2). Это существенно ограничивает пределы подачи топлива [15].

Анализ научно-исследовательских работ позволил объединить актуальные вопросы технического сервиса топливной аппаратуры. В основе новой методики испытания форсунок с электронным управлением лежат расширение диапазона, повышение точности измеряемых цикловых подач и информативности диагноза.

Материалы и методы

Для реализации предложенной методики был проведен патентный поиск с всесторонним анализом преимуществ и недостатков подходящих устройств [16–20]. На этой основе разработан измерительный модуль с возможностью автоматической фиксации характеристики впрыскивания и оценки величины цикловых подач топлива (рис. 3). При работе топливо впрыскивается форсункой в длинный трубопровод, сглаживающий отраженные от препятствий волны давления.



Р и с. 2. Границы измерения цикловой подачи по характеристике впрыска и диапазон давлений, фиксируемых датчиком давления

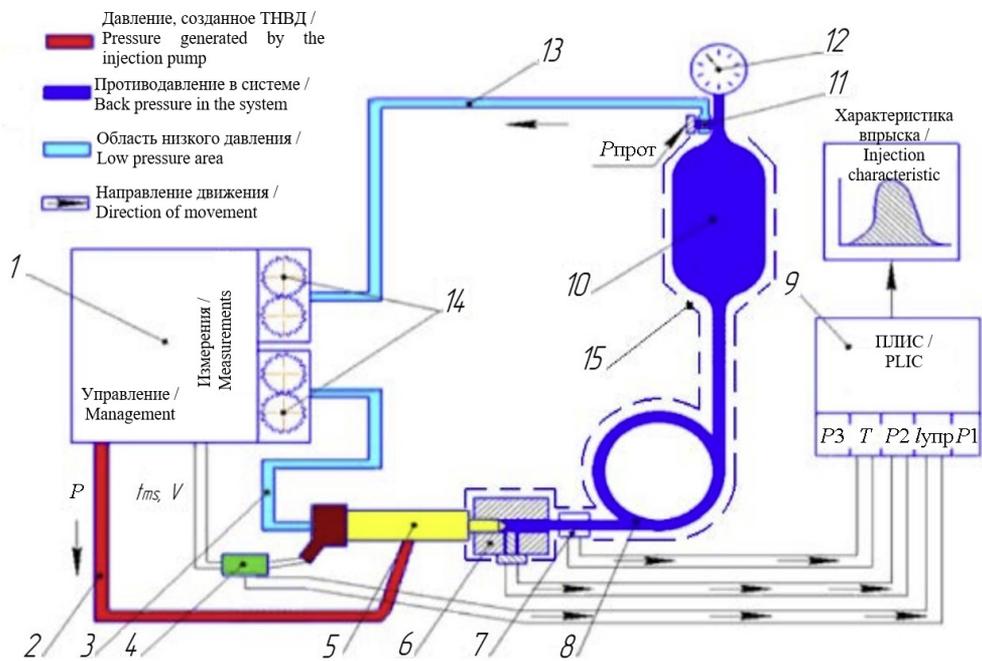
F i g. 2. The measurement limits of the cyclic supply according to the injection characteristic and the range of pressures recorded by the pressure sensor

Мгновенное изменение давления топлива регистрируется датчиком непосредственно около форсунки и преобразуется в программируемой логической интегральной схеме в характеристику топливоподачи.

Точность измерения величины цикловых подач, как и возможности фиксации характеристики топливоподачи измерительным модулем, определяется диапазоном давления тестовой жидкости, регистрируемого датчиком в адаптере впрыска. Данный диапазон можно корректировать, воздействуя на температуру тестовой жидкости и остаточное давление в трубопроводе в процессе испытания форсунки,

и таким образом расширить диапазон цикловых подач [21].

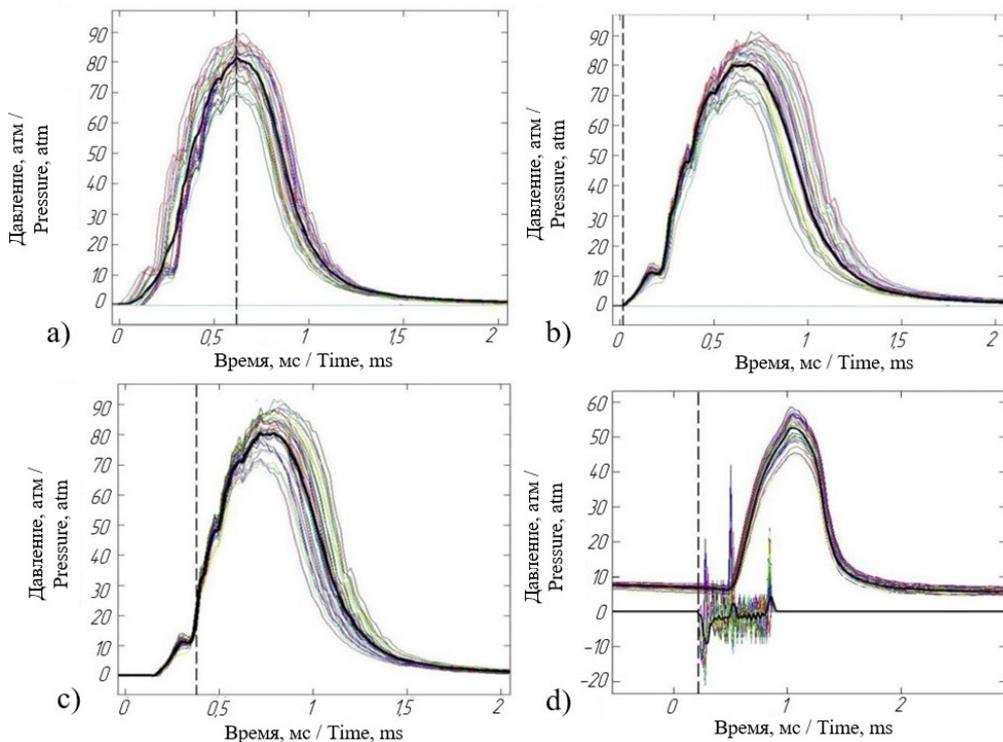
Регистрация сигналов с датчиков измерительного модуля позволяет автоматизировать фиксацию характеристик последовательных впрысков с возможностью их осреднения в LabVIEW. Для этого авторами разработан алгоритм и оригинальный продукт «Программа для обработки полученных данных с устройства для определения характеристики впрыскивания дизельных форсунок»³. В основе программы лежит новый алгоритм усреднения последовательно записанных характеристик топливоподачи, полученный путем исследования различных способов их наложения (рис. 4).



Р и с. 3. Функциональная схема измерительного модуля: 1 – блок управления; 2, 3, 8, 13 – топливопроводы; 4 – датчик тока сигнала управления; 5 – форсунка; 6 – адаптер впрыска с датчиком давления; 7 – термодатчик; 9 – программируемая логическая интегральная схема; 10 – ресивер; 11 – устройство регулировки давления; 12 – манометр; 14 – расходомеры

F i g. 3. Functional diagram of the measuring module: 1 – control unit; 2, 3, 8, 13 – fuel lines; 4 – current sensor of the control signal; 5 – nozzle; 6 – injection adapter with pressure sensor; 7 – thermal sensor; 9 – programmable logic integrated circuit; 10 – receiver; 11 – pressure adjustment device; 12 – pressure gauge; 14 – flow meters

³ Там же.



Р и с. 4. Усредненные характеристики топливоподачи (жирная линия), полученные по точкам: а) максимального давления впрыска; б) начала нарастания давления впрыска; с) перегиба переднего фронта характеристики; д) начала подачи управляющего импульса

Fig. 4. Averaged fuel supply characteristics (bold line) obtained from the points: a) the maximum injection pressure; b) the beginning of the increase in injection pressure; c) the inflection of the leading edge of the characteristic; d) the beginning of the supply of the control pulse

Установлено, что точное усреднение последовательных впрысков требует фиксации характеристик как минимум 30 последовательных впрысков, а их наложение следует производить по точкам, соответствующим началу управляющего импульса.

Результаты исследования

Гидродинамическая модель процесса работы измерительного модуля основана на решении уравнений движения и неразрывности изотермичного течения вязкой и сжимаемой жидкости в длинном трубопроводе. Датчик давления находится в самом начале трубопровода измерительного модуля,

значит можно принять, что $P_{x=0} = P_1$. Для надежной работы модуля необходимо, чтобы отраженные волны давления не возвращались к датчику до окончания измерения единичного впрыска, то есть априори $W_{x=0} = 0$. Учитывая данные условия для точки, соответствующей началу трубопровода, можно записать волновое уравнение в форме Д'Аламбера:

$$\begin{cases} P_1 = P_0 + F_{x=0}, \\ U_{x=0} = (P_1 - P_0) / \alpha\rho. \end{cases} \quad (1)$$

Характеристика топливоподачи при этом определится выражением:

$$Q(t) = \frac{f \cdot (P(t) - P_{\text{ост}})}{\alpha \cdot \rho}. \quad (2)$$

И текущее давление вблизи форсунки можно представить как

$$P(t) = Q(t) \frac{\alpha \cdot \rho}{f} + P_{\text{ост}}. \quad (3)$$

Анализ формулы 3 показывает, что давление $P(t)$ в начале трубопровода, с учетом остаточного давления $P_{\text{ост}}$ в трубопроводе, прямо пропорционально цикловой подаче $Q(t)$, плотности ρ тестовой жидкости, скорости α движения волны давления и обратно пропорционально площади f поперечного сечения трубопровода. Так как в нашем случае трубопровод имеет постоянный диаметр, а остаточное давление тоже устанавливается оператором, то давление у датчика впрыска при заданной цикловой подаче будет определяться только скоростью звука и плотностью тестовой жидкости.

Далее было проанализировано влияние температуры и остаточного давления тестовой жидкости на скорость распространения волны давления в трубопроводе. Учитывая, что коэффициент сжимаемости взаимосвязан с плотностью среды, они рассматривались совместно. Поскольку скорость звука определяется функцией $\alpha = f(P, T, \rho)$, то результаты измерений также зависят от температуры и плотности тестовой жидкости и ее вязкости.

Решение выражения (3) возможно только после определения фактической скорости распространения волны давления в трубопроводе и вязкости среды с учетом связи температуры и плотности тестовой жидкости:

$$\rho = \rho_{0t} \cdot \sqrt[\varkappa]{\frac{B + P_{\text{ост}}}{B}}, \quad (4)$$

где ρ_{0t} – плотность при температуре t и атмосферном давлении $P_{\text{атм}}$.

Аналогично вывели формулу для коэффициента сжимаемости:

$$\beta = \frac{1}{\varkappa B} \cdot \left(\frac{P + B}{B} \right)^{\frac{1-\varkappa}{\varkappa}}. \quad (5)$$

Скорость распространения волны давления определится как

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta}} = \sqrt{\frac{\varkappa}{\rho_0} B^{\frac{1}{\varkappa}} (P + B)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (3) можно представить в пригодном для анализа виде:

$$P = \frac{Q \cdot \rho_{0t}}{f} \cdot \sqrt[\varkappa]{\frac{B + P_{\text{ост}}}{B}} \times \sqrt[\varkappa]{\frac{\varkappa}{\rho_0} B^{\frac{1}{\varkappa}} (P_{\text{ост}} + B)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}} + P_{\text{ост}}. \quad (7)$$

Константы B и \varkappa приняты из эмпирических зависимостей, определенных для конкретной тестовой жидкости. Например, для дизельного топлива, наиболее близкого по свойствам к тестовой жидкости, приняты следующие значения⁴:

$$\begin{cases} B = 10^6 [222,3 - 1,26(t - 20) + 0,62(\rho_{20} - 825)], \\ \varkappa = 7,49 + 0,0086(t - 20). \end{cases} \quad (8)$$

Уравнение (8) явно показывает, что изменение остаточного давления в трубопроводе и температуры тестовой жидкости оказывает прямое влияние на давление в трубопроводе, что доказывает возможность его корректировки путем изменения данных режимных параметров при оценке характеристики топливоподачи. Для того чтобы

⁴ Там же.

расчетная характеристика топливоподачи соответствовала текущему графику, к выражению (2) был добавлен поправочный коэффициент k , который учитывает фактическое изменение скорости движения волны давления и плотности среды из-за скорректированных значений температуры и остаточного давления тестовой жидкости в трубопроводе:

$$Q(t) = k \cdot \frac{f \cdot (P(t) - P_{\text{ост}})}{\alpha \cdot \rho} \quad (9)$$

С помощью поправочного коэффициента k возможно привести расчетные значения давления в трубопроводе к фактическим данным, соответствующим стандартным условиям. Это позволяет компенсировать изменение физических свойств тестовой жидкости, а также прочих факторов, в том числе остаточного давления и температуры тестовой жидкости [22].

Указанный алгоритм гидродинамического расчета реализован в разработанном профессором Л. В. Греховым специализированном программном продукте «Впрыск», дополненном отдельным модулем, позволяющим исследовать процессы в трубопроводе за форсункой соответствующему измерительному модулю. Из всего диапазона возможных измерений при расчетах мы ограничились режимами «максимальная подача» и «предварительный впрыск». Далее был сформирован план численных исследований с диапазоном остаточного давления 0,1–2,5 МПа и температурой тестовой жидкости 40–90 °С. Расчеты производились в рамках однофакторного и двухфакторного экспериментов. Пример одного из вариантов расчета характеристики топливоподачи для разных значений остаточного давления показан на рисунке 5.

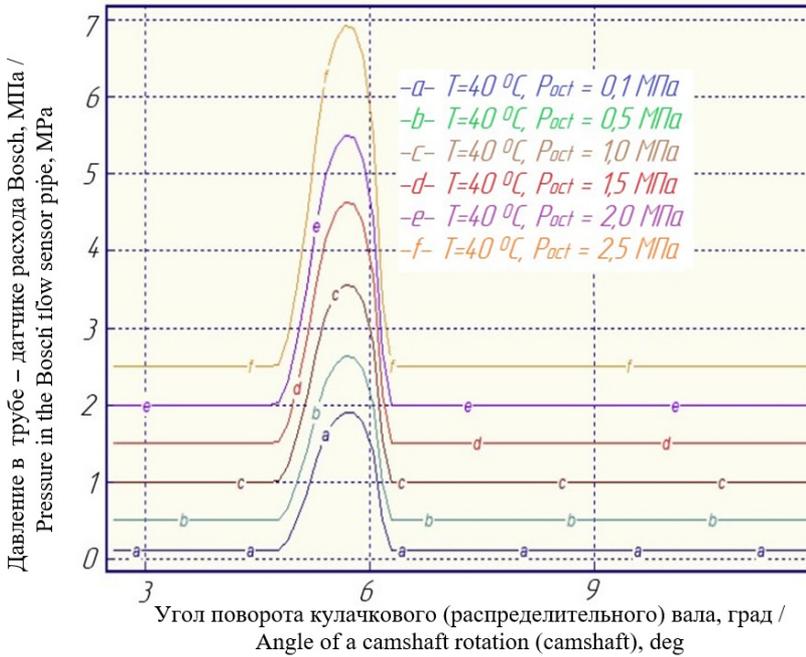
На графиках (рис. 6) видно, что повышение остаточного давления до 2,5 МПа приводит к увеличению площади S_1 более чем в 2 раза, что повышает точность при измерении малых цикловых подач. Необходимый для ее корректировки поправочный коэффициент при этом линейно возрастает с 1,0 до 0,466.

Анализ полученных результатов при изменении температуры тестовой жидкости показывает (рис. 6), что ее влияние на характеристику топливоподачи заметнее и приводит к снижению давления в трубопроводе в два раза (с 11,6 до 6,0 МПа). Используя данный факт, можно существенно расширить диапазон измеряемых модулем цикловых подач. При этом поправочный коэффициент изменяется в прямо пропорциональной зависимости с 1,0 до 1,943.

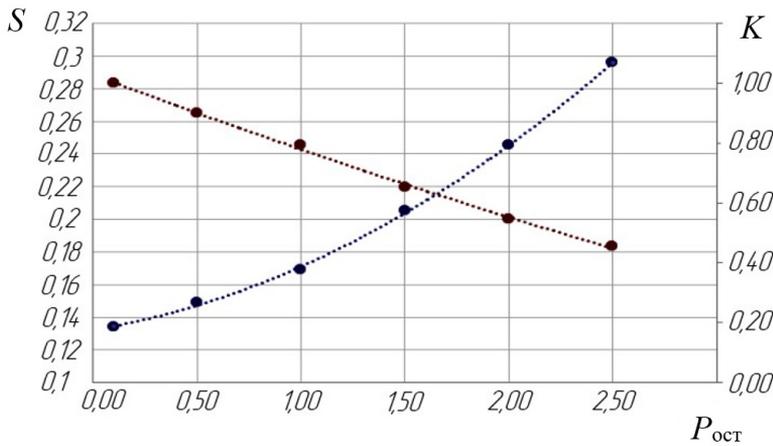
Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили рабочую гипотезу: расширить диапазон измеряемых цикловых подач возможно путем управляемого воздействия на величину остаточного давления и температуру тестовой жидкости в трубопроводе. Для минимальных цикловых подач (менее 10 мм³/цикл) площадь S_1 под характеристикой топливоподачи необходимо увеличивать за счет повышения остаточного давления, а при максимальных подачах (свыше 75 мм³/цикл) – снижать за счет подогрева трубопровода и тестовой жидкости в нем.

Для испытания электронных форсунок в лаборатории ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» была создана опытная установка на базе стенда ВТС-101⁵. В ходе экспериментов на разработанном измерительном модуле были экспериментально проверены полученные расчетным путем закономерности.

⁵ Там же.



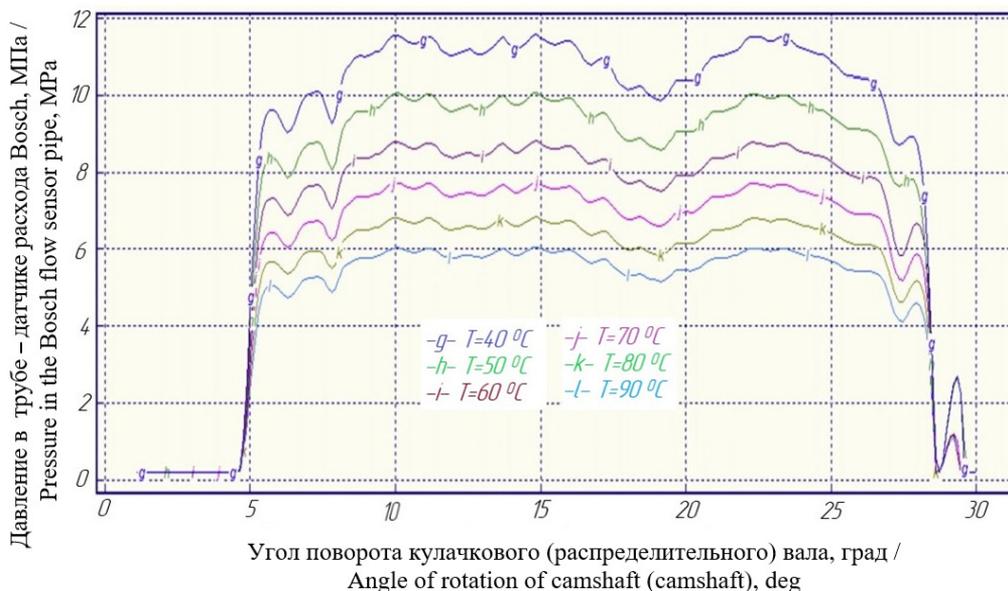
a)



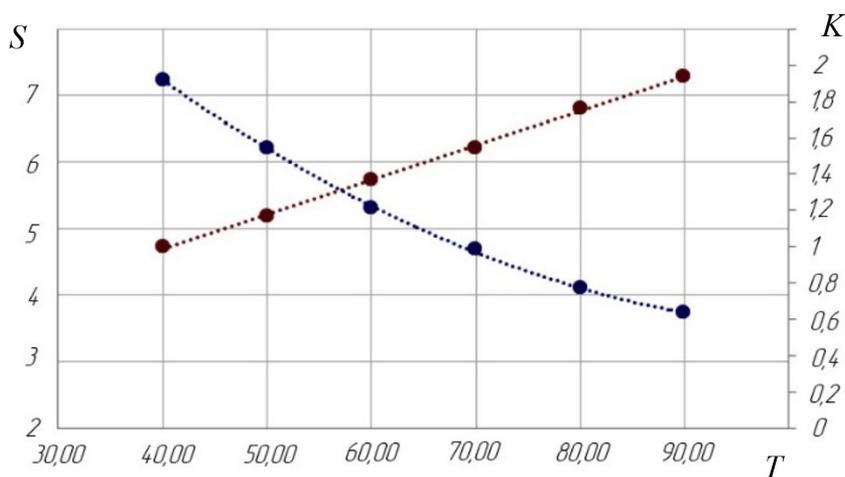
b)

Р и с. 5. Пример расчета характеристики топливоподачи для разных значений остаточного давления: а) расчетные графики давления в адаптере впрыска на режиме «предварительный впрыск»; б) расчетные значения поправочного коэффициента и площади под кривой при разном остаточном давлении ($g_{\text{и}} = 0,002 \text{ г}$ при $P_{\text{акк}} = 110 \text{ МПа}$)

Fig. 5. Example of calculating the fuel supply characteristic for different values of residual pressure: а) calculation graphs of the pressure in the injection adapter in the “pre-injection” mode; б) the calculated values of the area under the curve and the correction factor when the residual pressure changes ($g_{\text{и}} = 0.002 \text{ g}$ at $P_{\text{акк}} = 110 \text{ MPa}$)



a)



b)

Р и с. 6. Пример расчета характеристики топливоподачи для разных значений температуры тестовой жидкости: а) графики изменения давления в адаптере впрыска при изменении температуры топлива с 40 до 90 °С; б) Расчетные значения площади под кривой и поправочного коэффициента при изменении температуры тестовой жидкости⁶

Fig. 6. Example of calculating the fuel supply characteristic for different values of the test fluid temperature: a) graphs of the pressure change in the injection adapter when the fuel temperature changes from 40 to 90 °C; b) the calculated values of the area under the curve and the correction factor when the temperature of the test liquid changes

⁶ Там же.

Обработка результатов позволила определить закономерности влияния отраженной волны, остаточного давления и температуры тестовой жидкости в трубопроводе на характеристику топливоподачи. Для исключения воздействия температуры тестовой жидкости на рабочий процесс форсунки испытание проводилось при стабильной температуре тестовой жидкости, равной 50 °С, а управление параметрами измерительного модуля выполнялось только регулировкой температуры измерительного трубопровода и ресивера.

Для исследования процесса влияния температуры тестовой жидкости на максимальное давление в трубопроводе была разработана специальная методика [23]. Экспериментально полученные данные позволили сравнить лабораторные и расчетные исследования и проверить адекватность аналитических выражений, полученных для корректировки зафиксированных измерительным модулем результатов (табл. 2).

Видно, что эмпирический критерий $F_{\text{эмп}}$ меньше критического $F_{\text{крит}}$, значит, проверка адекватности подтверждает однородность данных выборки и сходимости результатов, что доказывает точность полученной математической модели и подтверждает выявленные закономерности воздействия температуры тестовой жидкости

на максимальное давление и площадь под кривой⁷.

Анализ полученных экспериментально данных показывает (рис. 7), что повышение температуры тестовой жидкости с 40 до 90 °С неизменно ведет к снижению давления в измерительном трубопроводе, что позволяет расширить границы диапазона измерения цикловых подач до величины 120 мм³/цикл, соответствующей максимальной цикловой подаче основных моделей парка автотракторной техники.

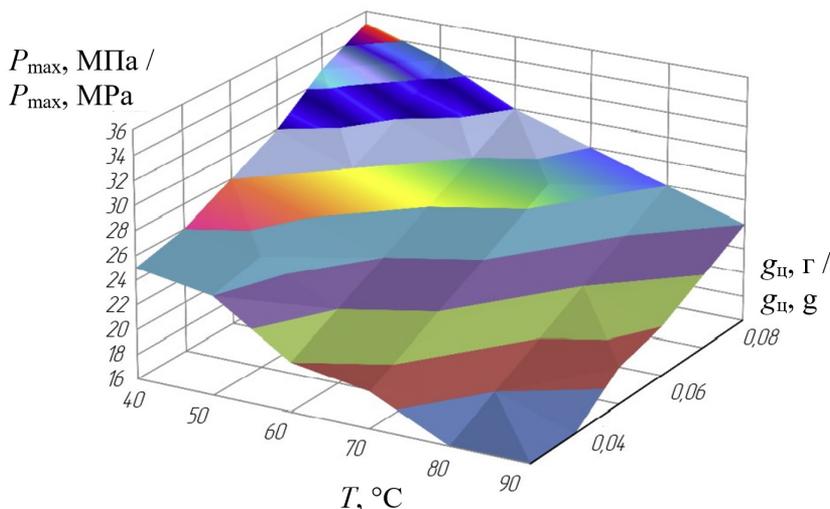
В ходе экспериментальных исследований форсунки на измерительном модуле было установлено, как влияет остаточное давление в трубопроводе измерительного модуля на максимальное давление в трубопроводе и на характеристику впрыска. Эксперименты проводились в режиме «предварительный впрыск» при работе форсунки с цикловой подачей 0,002 г, так как повышать давление в трубопроводе необходимо только на режимах малых цикловых подач. Также для выявления всех особенностей рабочего процесса измерительного модуля эксперименты были выборочно продолжены на разных режимах работы форсунки (табл. 3). Для управления были выбраны следующие параметры: $P_{\text{ост}}$ – остаточное давление в трубопроводе; $t_{\text{впр}}$ – продолжительность управляющего сигнала; $g_{\text{ц}}$ – цикловая подача.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

**Проверка адекватности расчетных данных
Checking the adequacy of analytical expressions**

Выборочная дисперсия (σ^2) / Sampling variance (σ^2)		F-критерий (критерий Фишера) / F-criterion (Fisher's criterion)		
1-я выборка / 1 st sample	2-я выборка / 2 nd sample	Эмпирический / Empirical	Критический (теоретический) / Critical (theoretical)	
3,00	3,17	1,05	1,61 ($\alpha = 0,10$)	1,84 ($\alpha = 0,05$) 2,66 ($\alpha = 0,01$)

⁷ Там же.



Р и с. 7. Зависимость максимального давления в адаптере измерительного модуля от температуры тестовой жидкости при различной цикловой подаче

Fig. 7. The dependence of the maximum pressure in the adapter of the measuring module on the temperature of the test liquid at different fuel delivery

Т а б л и ц а 3

Table 3

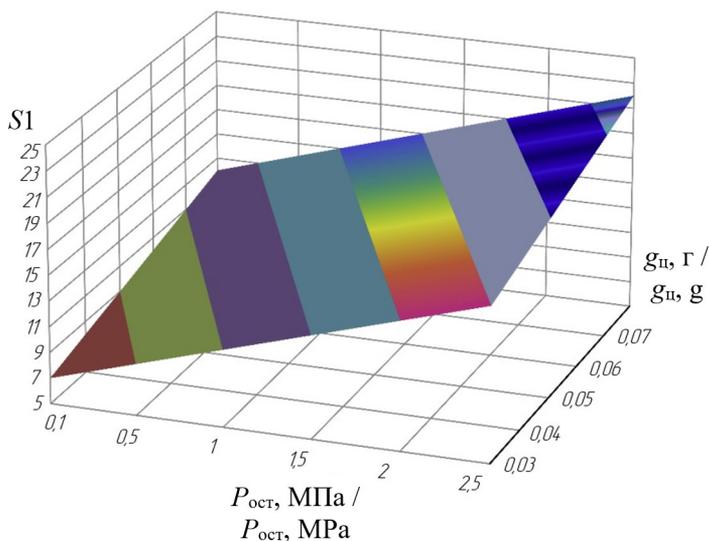
Данные экспериментальных исследований
Experimental study data

$P_{\text{ост}'} / P_{\text{ост}}$, МПа / МПа	$g_{\text{ц}}', \text{мм}^3/\text{цикл} / g_{\text{ц}}, \text{мм}^3/\text{cycle}$	Слив, $\text{мм}^3/\text{цикл} / \text{Drain}, \text{мм}^3/\text{cycle}$	$t, ^\circ\text{C}$	$S1, \text{мм}^2 / S1, \text{мм}^2$	$T_{\text{впр}}', \text{мс} / T_{\text{впр}}, \text{ms}$	$T_{P_{\text{max}}}', \text{мс} / T_{P_{\text{max}}}, \text{ms}$	$P_{\text{max}}', \text{МПа} / P_{\text{max}}, \text{МПа}$	dP_{max}
0,1	30,6	16,2	44,0	114,059	1,7460	0,9822	9,4516	29,398
0,5	30,3	16,5	44,1	112,935	1,7059	0,9468	9,5227	26,984
1,0	30,0	16,4	44,3	109,648	1,6864	0,9630	9,6203	24,608
1,5	29,5	16,4	44,2	106,472	1,6708	0,9377	9,7617	20,067
2,0	29,3	16,5	44,5	104,336	1,6484	0,9136	9,8198	17,606
2,5	29,0	16,3	44,4	101,556	1,6334	0,8836	9,9819	16,389

При анализе данных экспериментов (рис. 8) видно, что увеличение остаточного давления в трубопроводе с 0,1 до 2,5 МПа позволяет значительно поднять давление в трубопроводе в процессе впрыска и тем самым повысить точность измерения малых цикловых подач⁸. Такой способ управления

можно рекомендовать тем, кто разрабатывает стенды для испытания топливной аппаратуры с целью расширения диапазона измеряемых стендом подач, при этом для определения фактического значения цикловой подачи требуется применять соответствующие поправочные коэффициенты.

⁸ Там же.



Р и с. 8. Зависимость площади под кривой от остаточного давления тестовой жидкости в измерительном модуле при различной цикловой подаче⁹

F i g. 8. The dependence of the area under the curve on the residual pressure of the test liquid in the measuring module at different fuel delivery

Обсуждение и заключение

На основании анализа проведенных расчетных и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для современных топливоподающих систем с электронным управлением характеристика топливоподачи является наиболее информативным показателем качества работы форсунок, при этом использующиеся методы и оборудование для их технического обслуживания не рассчитаны на ее фиксацию и последующий анализ.

2. Разработана и апробирована методика диагностирования электронно-управляемых форсунок дизелей по характеристике топливоподачи, которая позволяет определить конкретные неисправности и сократить общую трудоемкость ремонта форсунок на 24 %.

3. Разработан и в производственных условиях апробирован новый измерительный модуль для оценки технического состояния форсунок дизелей по характеристике топливоподачи на разных режимах работы¹⁰.

4. Установлены закономерности, раскрывающие влияние режимных параметров на гидродинамические процессы в измерительном модуле, что позволило обосновать пути расширения диапазона измеряемых стендом цикловых подач с одновременным повышением точности. Увеличение диапазона измерения цикловых подач до 120 мм³/цикл обеспечивалось изменением температуры тестовой жидкости с 40 до 90 °С, а повышение точности измерения цикловых подач величиной менее 5 мм³ на режиме предварительного впрыска – за счет увеличения

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

остаточного давления в адаптере форсунки до 2,5 МПа.

5. Разработанный алгоритм автоматизации процесса измерения характеристики топливopодачи зарегистрирован в виде программы для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019663873).

Перспективным направлением дальнейшей разработки темы является исследование влияния каждого структурного параметра форсунки на параметры топливopодачи с целью формирования алгоритмов для автоматического распознавания дефектных элементов форсунки

в процессе диагностирования. Применение разработанной методики и измерительного модуля за счет увеличения полноты диагностирования позволяет преждевременно выявлять конкретные неисправности форсунок, снижать трудоемкость диагностирования и ремонта.

Разработанный авторами подход позволяет приблизиться к решению задачи безразборного диагностирования любого компонента топливной аппаратуры с точной оценкой технического состояния отдельных деталей, что предполагается осуществить в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грехов, Л. В. Выбор и обоснование типа и параметров топливopодрующей аппаратуры перспективных дизелей / Л. В. Грехов, А. А. Денисов, Е. Е. Старков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – № 18. – С. 11–14. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22621658> (дата обращения: 18.02.2021).

2. Баширов, Р. М. Совершенствование методики регулирования топливной аппаратуры тракторных дизелей / Р. М. Баширов, Ф. Р. Сафин, С. З. Инсафудинов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3 (31). – С. 60–64. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22479459> (дата обращения: 18.02.2021). – Рез. англ.

3. Тырловой, С. И. Учет волновых явлений в канале электрогидравлической форсунки при моделировании процесса впрыска в аккумуляторной системе питания / С. И. Тырловой // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 25–29. – URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/83> (дата обращения: 18.02.2021).

4. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System / L. V. Grekhov, Yu. E. Dragan, A. A. Denisov, E. E. Starkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, Issue 5. – Pp. 3979–3986. – URL: https://www.researchgate.net/publication/304306489_Injection_Rate_Shaping_with_Possibilities_of_Conventional_Design_Common_Rail_System (дата обращения: 18.02.2021).

5. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems / M. T. Jovanović, V. V. Karanović, D. M. Knežević, M. D. Orošnjak. – DOI 10.5937/vojtehg65-11577 // Military Technical Courier. – 2017. – Vol. 65, Issue 4. – Pp. 968–993. – URL: <http://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=0042-84691704968J> (дата обращения: 18.02.2021).

6. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector / J. Zhao, P. Yue, L. Grekhov [et al.]. – DOI 10.3233/JAE-180022 // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2019. – Vol. 60, no. 2. – Pp. 173–185. – URL: <https://content.iospress.com/articles/international-journal-of-applied-electromagnetics-and-mechanics/jae180022> (дата обращения: 18.02.2021).

7. Kuleshov, A. S. Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NOx Formation Model / A. S. Kuleshov, L. V. Grekhov. – DOI 10.4271/2013-01-0882. – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2013. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2013-01-0882/> (дата обращения: 18.02.2021).

8. **Belchev, S. G.** Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors / S. G. Belchev. – DOI [10.1088/1757-899X/614/1/012003](https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 614. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/614/1/012003> (дата обращения: 18.02.2021).

9. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles / M. S. Graham, S. Crossley, T. Harcombe [et al.]. – DOI [10.4271/2014-01-1435](https://doi.org/10.4271/2014-01-1435). – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2014. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2014-01-1435/> (дата обращения: 18.02.2021).

10. **Баширов, Р. М.** Совершенствование способа регулирования топливной аппаратуры дизелей / Р. М. Баширов, Ф. Р. Сафин, Р. Ж. Магафуров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 6 (152). – С. 158–163. – URL: <http://www.asau.ru/vestnik/2017/6/158-163.pdf> (дата обращения: 18.02.2021). – Рез. англ.

11. **Козеев, А. А.** Повышение эффективности диагностирования электрогидроуправляемых форсунок / А. А. Козеев, Ш. Ф. Нигматуллин // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 2. – С. 50–54. – URL: https://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/45/2016_2 (дата обращения: 18.02.2021). – Рез. англ.

12. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel- und Ottomotoren / R. Henzinger, H. Kammerstetter, F. B. Radke, M. Werner. – DOI [10.1007/BF03225407](https://doi.org/10.1007/BF03225407) // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. – 2006. – Vol. 67. – Pp. 524–529. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03225407#citeas> (дата обращения: 20.02.2021).

13. **Seebode, J.** Dieselmotorische Einspritzratenformung unter dem Einfluss von Druckmodulation und Nadelstößdrosselung / J. Seebode. – DOI [10.15488/6452](https://doi.org/10.15488/6452). – Hannover : Universität, Diss., 2004. – 124 p. – URL: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6504> (дата обращения: 20.02.2021).

14. **Merker, G. P.** Dieselmotorische Einspritzverlaufsformung mit Hilfe optischer Messsysteme / G. P. Merker, T. Delebinski. – DOI [10.1007/BF03227435](https://doi.org/10.1007/BF03227435) // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. – 2007. – Vol. 68. – Pp. 726–733. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03227435> (дата обращения: 20.02.2021).

15. **Нигматуллин, Ш. Ф.** Исследование влияния температуры технологической жидкости на цикловую подачу электрогидроуправляемой форсунки / Ш. Ф. Нигматуллин, К. В. Костарев, Б. Ш. Карачурин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (35). – С. 69–71. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24305109> (дата обращения: 20.02.2021). – Рез. англ.

16. **Bosch, W.** The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection / W. Bosch. – DOI [10.4271/660749](https://doi.org/10.4271/660749). – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 1966. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/660749/> (дата обращения: 20.02.2021).

17. Патент № 190615 Российская Федерация, МПК F02M 65/00. Устройство для определения характеристики впрыскивания : № 2019109349 : заявл. 29.03.2019 : опубл. 04.07.2019 / Габитов И. И., Неговора А. В., Магафуров Р. Ж., Самиков Р. Ф. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ». – Текст : электронный. – URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_service?DB=RUPM&DocNumber=190615&TypeFile=html (дата обращения: 20.02.2021).

18. **Bosch, W.** Der Einspritzgesetz-Indikator, ein neues Meßgerät zur Direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzeleinspritzungen / W. Bosch. – Текст : непосредственный // Motortechn. – 1964. – № 7. – Pp. 268–282.

19. Patent No. 1954938 Germany, F02 M65/00. Method And Device For Measuring the Injection Quantity and the Injection Rate of an Injection Valve for Liquids : No. 06807073 : appl. 09.10.2006 : publ. 13.08.2006 / Abt J., Kuhn U., Marx K. [et al.]. – Текст : электронный. – URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=EP14978973&tab=NATIONALBIBLIO> (дата обращения: 20.02.2021).

20. Patent No. 5801308 USA. Measuring Apparatus for Measuring an Injected Quantity of Liquid : No. 08/923270 : appl 09.04.1997 : publ. 09.01.1998 / Hideaki H. – 13 p. – URL: <https://www.freepatentsonline.com/5801308.pdf> (дата обращения: 20.02.2021).

21. **Grekhov, L.** Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software / L. Grekhov, K. Mahkamov, A. Kuleshov. – DOI [10.4271/2015-01-1859](https://doi.org/10.4271/2015-01-1859). – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2015. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2015-01-1859/> (дата обращения: 20.02.2021).

22. **Неговора, А. В.** Обоснование температуры рабочей жидкости при испытании дизельных инжекторов / А. В. Неговора, Р. Ж. Магафуров, А. И. Низамутдинов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2019. – № 3 (51). – С. 99–106. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41152309> (дата обращения: 20.02.2021). – Рез. англ.

23. The Modern Concept of Thermal Preparation of Automotive Equipment and Tools for Its Implementation / I. I. Gabitov, A. V. Negovora, M. M. Razyapov [et al.]. – DOI [10.1088/1757-899X/632/1/012048](https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012048). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/632/1/012048>

Поступила 04.03.2021; одобрена после рецензирования 08.04.2021; принята к публикации 14.04.2021

Об авторах:

Габитов Илдар Исмагилович, ректор ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4443-3126>, gabitov@bsau.ru

Неговора Андрей Владимирович, профессор кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negovora@bsau.ru

Сафин Филлюс Раилевич, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>

Магафуров Руслан Жамилевич, старший преподаватель кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8821-2769>, magafurov@bsau.ru

Раков Николай Викторович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. И. Габитов – научное руководство, анализ и доработка текста.

А. В. Неговора – формирование структуры статьи, доработка начального текста, составление выводов и заключения.

Ф. Р. Сафин – анализ литературных данных, описание экспериментальных и расчетных исследований, обработка полученных данных, апробация разработанной методики, редактирование текста.

Р. Ж. Магафуров – анализ литературных данных, описание экспериментальных и расчетных исследований, обработка полученных данных, апробация разработанной методики, редактирование текста.

Н. В. Раков – анализ литературных данных, описание экспериментальных и расчетных исследований, обработка полученных данных, апробация разработанной методики, редактирование текста.

Благодарности: авторы благодарят руководителя центра по ремонту топливной аппаратуры Bosch Diesel Service ООО «Башдизель» за предоставленные образцы электроуправляемых форсунок и оборудование для испытания. Авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Grekhov L.V., Denisov A.A., Starkov Ye.Ye. [Selection and Justification of Type and Parameters of Fuel Supplying Equipment of Perspective Diesel Engines]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Volgograd State Technical University Bulletin. 2014; (18):11-14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22621658> (accessed 18.02.2021). (In Russ.)
2. Bashirov R.M., Safin F.R., Insafuldinov S.Z. Improving Methods of Regulation Fuel Equipment Tractor Diesel. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bashkir State Agrarian University Bulletin. 2014; (3):60-64. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22479459> (accessed 18.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Tyrlovoy S.I. [Consideration of Wave Phenomena in the Electrohydraulic Injector Channel in the Simulation of the Injection Process in the Accumulator Feeding System]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* = Internal Combustion Engines. 2012; (2):25-29. Available at: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/83> (accessed 18.02.2021). (In Russ.)
4. Grekhov L.V., Dragan Yu.E., Denisov A.A., Starkov E.E. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(5):3979-3986. Available at: https://www.researchgate.net/publication/304306489_Injection_Rate_Shaping_with_Possibilities_of_Conventional_Design_Common_Rail_System (accessed 18.02.2021). (In Eng.)
5. Jocanović M.T., Karanović V.V., Knežević D.M., Orošnjak M.D. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems. *Military Technical Courier*. 2017; 65(4):968-993. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5937/vojtehg65-11577>
6. Zhao J., Yue P., Grekhov L., et al. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2019; 60(2):173-185. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3233/JAE-180022>
7. Kuleshov A.S., Grekhov L.V. Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NOx Formation Model. *SAE Technical Paper*. 2013. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>
8. Belchev S.G. Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 614. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003>
9. Graham M.S., Crossley S., Harcombe T., et al. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles. *SAE Technical Paper*. 2014. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1435>
10. Bashirov R.M., Safin F.R., Magafurov R.Zh. Improvement of Diesel Engine Fuel Equipment Adjustment Technique. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Altai State Agrarian University. 2017; (6):158-163. Available at: <http://www.asau.ru/vestnik/2017/6/158-163.pdf> (accessed 18.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Kozeev A.A., Nigmatullin S.F. Improving the Efficiency of Diagnosis of Injectors. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2016; (2):50-54. Available at: https://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/45/2016_2 (accessed 18.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Henzinger R., Kammerstetter H., Radke F.B., Werner M. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel- und Ottomotoren. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*. 2006; 67:524-529. (In Germ.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03225407>
13. Seebode J. Dieselmotorische Einspritzratenformung unter dem Einfluss von Druckmodulation und Nadelsitzdrosselung. Hannover: Universität, Diss.; 2004. 124 p. (In Germ.) DOI: <https://doi.org/10.15488/6452>
14. Merker G.P., Delebinski T. Dieselmotorische Einspritzverlaufsformung mit Hilfe optischer Messsysteme. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*. 2007. 68:726-733. (In Germ.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03227435>
15. Nigmatullin Sh.F., Kostarev K.V., Karachurin B.Sh. Effect of Process Liquid Temperature on Cyclic Supply of the Electric Hydrodynamic Nozzle. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bashkir State Agrarian University Bulletin*. 2015; (3):69-71. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24305109> (accessed 20.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Bosch W. The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection. *SAE Technical Paper*. 1966. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/660749>
17. Gabitov I.I., Negovora A.V., Magafurov R.Zh., Samikov R.F. [Device for Determining the Injection Characteristic]. Patent 190,615 Russian Federation. 2019 July 04. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=190615&TypeFile=html (accessed 20.02.2021). (In Russ.)
18. Bosch W. Der Einspritzgesetz-Indikator, ein neues Meßgerät zur direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzeleinspritzungen. *Motortechn*. 1964; (7):268-282. (In Germ.)
19. Abt J., Kuhn U., Marx K., et al. Method and Device For Measuring the Injection Quantity and the Injection Rate of an Injection Valve for Liquids. Patent 1,954,938 Germany. 2006 August 13. Available at: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=EP14978973&tab=NATIONALBIBLIO> (accessed 20.02.2021). (In Eng.)
20. Hideaki H. Measuring Apparatus for Measuring an Injected Quantity of Liquid. Patent 5,801,308 USA. 1998 January 09. Available at: <https://www.freepatentsonline.com/5801308.pdf> (accessed 20.02.2021). (In Eng.)
21. Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software. *SAE Technical Paper*. 2015. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>
22. Negovora A.V., Magafurov R.Zh., Nizamutdinov A.I. Substation of the Working Fluid Temperature When Testing Diesel Injectors. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bashkir State Agrarian University Bulletin*. 2019; (3):99-106. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41152309> (accessed 20.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Gabitov I.I., Negovora A.V., Razyapov M.M., et al. The Modern Concept of Thermal Preparation of Automotive Equipment and Tools for Its Implementation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 632. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012048>

Submitted 04.03.2021; approved after reviewing 08.04.2021; accepted for publication 14.04.2021

About the authors:

Idar I. Gabitov, Rector of Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4443-3126>, gabitov@bsau.ru

Andrey V. Negovora, Professor of the Chair of Automobiles and Tractor Systems, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negovora@bsau.ru

Filyus R. Safin, Associate Professor of the Chair of Automobiles and Tractor Systems, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>

Ruslan Zh. Magafurov, Senior Lecturer of the Chair of Automobiles and Tractor Systems, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8821-2769>, magafurov@bsau.ru

Nikolay V. Rakov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Contribution of the authors:

I. I. Gabitov – scientific guidance, analysis and revision of the text.

A. V. Negovora – forming the structure of the article, finalizing the initial text, drawing conclusions.

F. R. Safin – analysis of literature data, description of experimental and computational studies, processing the data obtained, approbation of the developed methodology, editing the text.

R. Zh. Magafurov – analysis of literature data, description of experimental and computational studies, processing the data obtained, approbation of the developed methodology, editing the text.

N. V. Rakov – analysis of literature data, description of experimental and computational studies, processing the data obtained, approbation of the developed methodology, editing the text.

Acknowledgments: The authors would like to thank the head of the Bosch Diesel Service LLC “Bash-diesel” center for providing samples of electrically controlled injectors and equipment for testing. The authors express their gratitude to the anonymous reviewers

All authors have read and approved the final manuscript.