

УДК 621.43
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>
 EDN: WWGTJJ
 Научная статья



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ФОРСУНОК С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

А. П. Жигадло, Ю. П. Макушев*

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)
 г. Омск, Россия

ap_zhigadlo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8883-3167>

makushev321@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6043-8624>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время часть дизельных двигателей автомобилей КамАЗ-740 работают с топливной аппаратурой, у которой форсунки имеют гидромеханическое управление. Основным их недостатком является низкое давление топлива перед сопловыми отверстиями (менее 60 МПа) и отсутствие управления подачей топлива.

Применение форсунок с электрогидравлическим управлением (ЭГУ) позволяет повысить давление в полости форсунки до 250 МПа и управлять процессом впрыска топлива. Недостатком форсунок с ЭГУ является сложность конструкции клапана управления, трудность его регулирования и кодирования. Объектом исследования являются форсунки дизеля КамАЗ -740 с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителя.

Целью данной работы является выполнение теоретических исследований и совершенствование методики технического обслуживания форсунок с электрогидравлическим управлением (регулирование клапана управления и кодирование), что позволит повысить их надежность, долговечность и обеспечит снижение расхода топлива дизелей.

Методика исследования. Исследования клапана управления форсункой являются теоретическими, расчетными. В работе предложена методика расчета и выполнены теоретические исследования влияния давления (50–250 МПа) на величину эффективного проходного сечения и диаметра сопловых отверстий распылителя.

Для форсунок с ЭГУ уточнена методика регулирования клапана управления, которая заключается в том, что в начале регулирования выполняется расчет главной силы, действующий на шарик со стороны максимального давления в камере управления (например, 200 МПа), равной 76 Н (рисунок 4). Затем определяется необходимая сила пружины 100 Н (больше на 20–40%, рисунок 5). Далее оценивается сила электромагнита 140 Н (больше на 20–40% силы пружины, рисунок 6).

Результаты теоретических исследований. Представлены результаты расчетных (теоретических) исследований эффективного проходного сечения распылителя и диаметра сопловых отверстий в зависимости от величины давления P перед сопловыми отверстиями.

В работе определены. 1. Силы, действующие на шарик (57–105 Н) в зависимости от величины давления в камере управления (150–275 МПа). 2. Силы пружины (40–140 Н) жесткостью 40 Н/мм в зависимости от ее сжатия до 3,5 мм. 3. Силы электромагнита (140–20 Н) в зависимости от зазора между якорем и сердечником (0,2–0,5 мм).

Рассмотрен способ восстановления требуемой (паспортной) цикловой подачи топлива при ее изменении в результате замены клапана управления или его регулировки. Приведены расчетные значения подачи топлива за цикл (мм³/цикл) от времени активации.

Заключение. Результаты исследования предназначены для организаций и предприятий, занимающихся диагностикой, восстановлением, регулировкой и кодированием форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителей.

Результаты расчетных исследований могут быть использованы для уточнения методики технического обслуживания топливных систем с электронным управлением (Common Rail).

© Жигадло А. П., Макушев Ю. П., 2022



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теоретические исследования, форсунка с электрогидравлическим управлением, методика, техническое обслуживание, регулирование, давление, герметичность, клапан управления, электромагнит, кодирование.

Статья поступила в редакцию 02.11.2022; одобрена после рецензирования 08.12.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Жигadlo А. П., Макушев Ю. П. Теоретические исследования и техническое обслуживание форсунок с электрогидравлическим управлением // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 842-857. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>

EDN: WWGTJJ

THEORETICAL RESEARCH AND MAINTENANCE OF ELECTRO HYDRAULICALLY CONTROLLED INJECTORS

Aleksandr P. Zhigadlo, Yuri P. Makushev*

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Omsk, Russia

ap_zhigadlo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8883-3167>

makushev321@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6043-8624>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. Nowadays the part of the diesel engines for KamAZ-740 cars are operated with fuel equipment, in which the injectors have hydro mechanical control. Their main disadvantage is the low fuel pressure in front of the injector openings (less than 60 MPa) and the lack of fuel supply control.

The use of injectors with electro hydraulic control (EHC) increases the pressure in the injector cavity up to 250 MPa and control the fuel injection process. The disadvantage of the injectors with EHC is a structural complexity of a control valve, the difficulty of its regulation and coding. The object of the study is the injectors of KamAZ-740 diesel engine with electro hydraulic control of the atomizer needle stroke.

The purpose of this work is to carry out theoretical research and improve the methods of maintenance of injectors with electro hydraulic control (control valve regulation and coding), which will increase their reliability, durability and ensure a reduction in diesel fuel consumption.

Research methods. The study of the nozzle control valve is theoretical and calculated. The paper proposes a calculation method and performs theoretical studies for the influence of pressure (50 – 250 MPa) on the value of the effective flow section and the diameter of the nozzle holes of the sprayer.

For the injectors with EHC, the control valve regulation procedure has been clarified, which consists in the fact that at the beginning of regulation, the main force acting on the ball from the side of the maximum pressure in the control chamber (for example, 200 MPa) equal to 76 N is calculated (see Figure 4). Then the required spring force of 100 N is determined (20-40% more, see Figure 5). Next, the strength of the electromagnet is estimated at 140 N (20 – 40% more of the spring force, see Figure 6).

The results of theoretical research. The results of computational (theoretical) studies for the effective flow section of the sprayer and the diameter of the nozzle holes, depending on the pressure P in front of the nozzle holes, are presented.

The paper defines. 1. The forces acting on the ball (57 – 105 N) depending on the pressure in the control chamber (150 – 275 MPa). 2. Spring forces (40 – 140 N) with a stiffness of 40 N/mm, depending on its compression up to 3.5 mm. 3. The forces of the electromagnet (140 – 20 N) depending on the gap between the anchor and the core (0.2 – 0.5 mm).

The method of restoring the required (rated) cyclic fuel supply when it changes as a result of replacing the control valve or adjusting is considered. The calculated values of fuel supply per cycle (mm³/cycle) from the activation time are given.

© Zhigadlo A. P., Makushev Y. P., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Conclusion. The results of the study are intended for organizations and enterprises engaged in diagnostics, restoration, adjustment and coding of injectors with electro hydraulic control for the needle stroke of sprayers. The results of computational studies can be used to refine the methodology of maintenance of fuel systems with electronic control (Common Rail).

KEYWORDS: theoretical research, electro hydraulic controlled injectors, methodology, maintenance, regulation, pressure, tightness, control valve, electromagnet, coding.

The article was submitted 02.11.2022; approved after reviewing 08.12.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Aleksandr P. Zhigadlo, Yuri P. Makushev. Theoretical research and maintenance of electro hydraulically controlled injectors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 842-857. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>

ВВЕДЕНИЕ

Система питания дизельного двигателя топливом является главной, от ее технического состояния зависит надежность, долговечность, экономичность и токсичность отработавших газов. Техничко-экономические показатели дизеля, токсичность отработавших газов зависят в основном от способа смесеобразования, совершенства топливной аппаратуры, ее состояния и регулировки¹.

Система питания дизеля топливом в общем случае состоит из подкачивающего насоса, насоса высокого давления, трубопроводов и форсунок. К топливным системам предъявляются высокие требования, которые заключаются в следующем:

- дозировать порции топлива в соответствии с нагрузочными и скоростными режимами работы дизеля;
- обеспечивать равное количество дизельного топлива по отдельным цилиндрам;
- обеспечивать высокое давление дизельного топлива, необходимую мелкоствольность распыливания и дальноточность;
- соотношение распыленного топлива и поступившего воздуха в цилиндр двигателя должно быть оптимальным, при котором обеспечивается его полное сгорание при минимальной токсичности отработавших газов;
- обеспечивать стабильность регулировочных и конструктивных параметров насоса и форсунок в течение длительного периода эксплуатации.

Эффективность эксплуатации, надежности и долговечности работы топливной аппаратуры зависит от качества диагностирования, технического обслуживания, восстановления, регулировки и ремонта.

По конструктивному исполнению форсунки могут быть с механическим и электронным управлением. В настоящее время часть дизельных двигателей автомобилей КамАЗ-740 работают с топливной аппаратурой, у которой форсунки имеют гидромеханическое управление.

На рисунке 1 показан разрез форсунки дизеля КамАЗ-740 с гидромеханическим управлением хода иглы. Преимуществом данных форсунок является простота конструкции. Основным недостатком их является низкое давление топлива перед сопловыми отверстиями (менее 60 МПа) и отсутствие управления подачей топлива. Повысить давление топлива возможно путем увеличения силы пружины форсунки, но это приведет к росту контактных напряжений и разрушению посадочного конуса иглы и запорного конуса корпуса распылителя² [1]. Применение в насосах высокого давления кулачков вогнутого профиля увеличивает скорость толкателя плунжера на 50% [2] по сравнению с кулачками выпуклого и тангенциального профиля, но это не позволит существенно повысить давление топлива.

Главным регулировочным параметром форсунки с механическим управлением является давление начала открытия иглы, величина

¹ Макушев Ю. П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигadlo, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

² Расчёт контактных напряжений в посадочном конусе распылителей форсунок дизелей /Л. Ю. Волкова, Ю. П. Макушев, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы XI-й Международной научно-технической конференции, Омск, 24–27 февраля 2021 года / Редколлегия: В. А. Лихолобов [и др.]. Омск: Омский государственный технический университет, 2021. С. 194–195.

ну которого устанавливают на специальном стенде.

В процессе длительной эксплуатации дизеля давление открытия иглы уменьшается в результате износа контактных поверхностей, что ухудшает его технико-экономические параметры и требует регулярного контроля, регулирования и восстановления распылителей³ [3].

Все распылители для конкретного двигателя должны иметь одинаковое давление начала открытия иглы, эффективное проходное сечение, ход иглы и необходимую гидравлическую плотность посадочного конуса распылителя. Углы расположения сопловых отверстий в плане и шатре должны соответствовать техническим условиям. Если комплект распылителей для двигателя будет иметь различные параметры, то подача топлива по отдельным цилиндрам будет неравномерной [4] и это может привести к ухудшению его технико-экономических показателей.

При замене форсунок с механическим управлением на электрогидравлическое управление повышается давление впрыскиваемого топлива (до 250 МПа), впрыск топлива становится управляемым (например, двухфазным), неравномерность подачи топлива резко снижается. Поэтому в настоящее время применяют системы подачи топлива с электронным управлением, которые способны обеспечить высокое давление и управлять процессом впрыска топлива.

Техническое обслуживание форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы требует сложное электронное оборудование и квалифицированных специалистов. На рисунке 2 показан разрез форсунки с электрогидравлическим управлением^{4,5} [5, 6].

Сила пружины 17 через якорь 13 действует на клапан (шарик) 12, закрывая жиклёр 11 диаметром 0,2–0,3 мм. Максимальный ход шарика диаметром, равным 1,3–1,6 мм, зависит от конструкции форсунок, может быть равен от 0,04 до 0,06 мм.

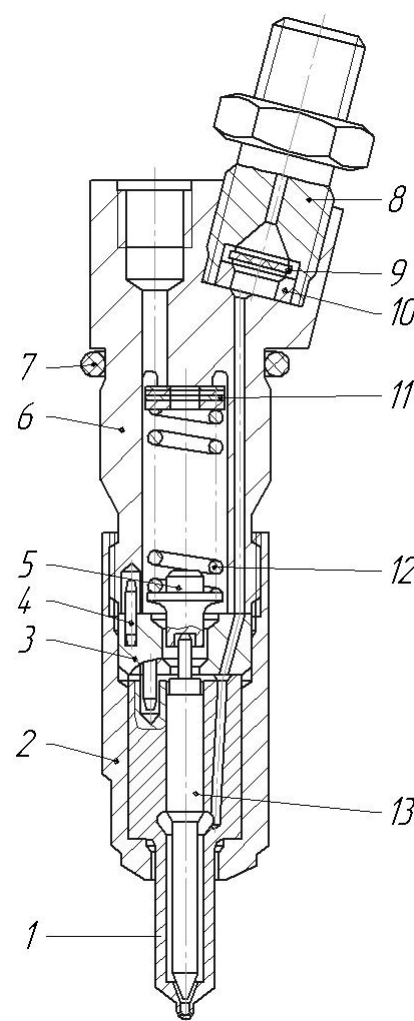


Рисунок 1 – Форсунка дизеля КамАЗ-740:

- 1 – корпус распылителя;
- 2 – гайка; 3 – проставка; 4 – штифт установочный;
- 5 – штанга укороченная; 6 – корпус форсунки;
- 7 – кольцо уплотнительное; 8 – штуцер;
- 9 – фильтр сетчатый;
- 10 – прокладка уплотнительная;
- 11 – регулировочные прокладки;
- 12 – пружина; 13 – игла диаметром 5 мм

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – KamAZ-740 diesel nozzle: 1 – spray body; 2 – nut; 3 – spacer; 4 – mounting pin; 5 – shortened rod; 6 – nozzle body; 7 – sealing ring; 8 – fitting; 9 – mesh filter; 10 – sealing gasket; 11 – adjusting gaskets; 12 – spring; 13 – needle with a diameter of 5 mm

Source: compiled by the authors.

³ Макушев Ю. П. Диагностика форсунок дизелей, их регулировка и восстановление / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Михайлова // Актуальные проблемы создания, проектирования и эксплуатации современных двигателей внутреннего сгорания: сб. науч. тр. / под ред. проф. В. А. Лашко. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. Вып. 5. С. 125–132.

⁴ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигadlo, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

⁵ Якимов И. В. Метод диагностики электрогидравлических форсунок автомобилей с дизельными двигателями по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.10 / Якимов Игорь Владимирович. Иркутск, 2020. 20 с.

Рассмотрим принцип действия клапана управления⁶ [7], когда сливное отверстие 11 закрыто шариком 12. Из аккумулятора через штуцер 22 топливо входит в форсунку под давлением, например, 200 МПа. Через каналы 23 и 24 топливо под одинаковым давлением поступает в камеру управления и в полость под иглой 2. Диаметр управляющего поршня 10 больше на 0,2–0,4 мм, чем диаметр иглы 2. Сила, возникающая на торце поршня, будет больше, чем со стороны дифференциальной площадки иглы 2, и она, двигаясь к запорному конусу, закроет сопловые отверстия распылителя.

При подаче напряжения в катушке электромагнита в ней создается магнитное поле, под действием которого якорь 13 притянется к сердечнику 18. Шариковый клапан 12 откроется под действием давления топлива, и через сливное отверстие 11 из объема камеры управления будет вытекать топливо, резко снижая давление над поршнем 10. Сила над поршнем станет меньше, чем сила со стороны иглы.

Игла распылителя 2 под действием высокого постоянного давления (200 МПа) переместится вверх, откроет сопловые отверстия и начнется подача топлива. Продолжительность подачи топлива и цикловая подача зависят от длительности сигнала (напряжения), подаваемого на катушку 16. При отключении напряжения магнитное поле катушки убывает, а пружина якоря 17, разжимаясь, переместит клапан 12, закрывая сливное отверстие 11.

В процессе длительной эксплуатации топливной аппаратуры дизелей параметры распылителей изменяются и могут достичь значений, при которых их техническое состояние считается «допустимым» или «отказом». При техническом обслуживании (диагностирование, регулирование) важно знать, что параметр распылителя может находиться в исправном, предельном, неисправном состоянии или в состоянии отказа. Максимальный ход иглы и эффективное проходное сечение распылителя определяется при помощи специального устройства и стенда, описание которых дано в работе⁷. Распылитель с потерей подвижности иглы (заклиниванием) считается аварийным и заменяется новым. Заземление иглы 2 может быть в результате температурной деформации

корпуса распылителя 1 или наличия в зазоре между иглой корпусом распылителя (2–4 мкм) твердых частиц. Образование кокса в сопловых отверстиях распылителя может произойти в результате потери подвижности иглы и проникновения в его полость горячих газов из цилиндра. Закоксовывание сопловых отверстий приводит к уменьшению их проходного сечения и нарушению процесса подачи топлива. Если эффективное проходное сечение распылителя в результате образования кокса или износа уменьшилось или увеличилось на 15%, то его необходимо заменить.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ

Разделим конструкцию форсунки условно на две основные части. Первой частью является зона распылителя, в которой давление постоянно и равно давлению в аккумуляторе (например, 200 МПа), а второй – клапан управления. Для распылителя важным является расчетное или экспериментальное определение эффективного проходного сечения и диаметра сопловых отверстий.

Определим расчетным путем суммарное значение проходного сечения сопловых отверстий распылителя, их число и диаметр для подачи топлива в КС дизеля КамАЗ-740. 60-360 мощностью 360 л с или 265 кВт при частоте вращения вала двигателя 1900 мин⁻¹. Среднее давление перед сопловыми отверстиями принимаем 200 МПа, а плотность топлива – 850 кг/м³.

1. В начале расчета определим цикловую подачу топлива (см³/цикл) для режима номинальной мощности из выражения

$$q_{ц} = \frac{G_{ц}}{i \cdot n_{н} \cdot 60 \cdot \rho_{т}}, \quad (1)$$

где $G_{ц}$ – часовой расход топлива, г/ч, равный $q_{е} \cdot N_{е}$; $q_{е}$ – удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч); $N_{е}$ – эффективная номинальная мощность, кВт; i – число цилиндров; $n_{н}$ – частота вращения вала насоса, мин⁻¹; $\rho_{т}$ – плотность топлива.

⁶ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие. Там же.

⁷ Макушев Ю.П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю.П. Макушев, А.П. Жигадло, Л.Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

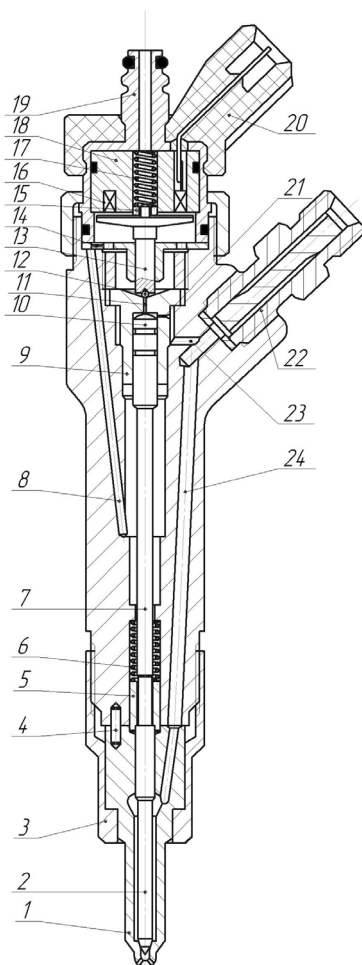


Рисунок 2 – Форсунка с электрогидравлическим управлением:

- 1 – корпус распылителя; 2 – игла распылителя диаметром 4 мм; 3 – гайка;
4 – штифт; 5 – втулка направляющая; 6 – пружина;
7 – шток; 8 – канал отвода утечек;
9 – втулка с посадочным седлом; 10 – поршень управляющий; 11 – сливное отверстие ($d_2 = 0,26$ мм);
12 – шариковый запорный клапан;
13 – якорь электромагнита;
14 – отверстие для отвода утечек топлива;
15 – втулка; 16 – катушка электромагнита;
17 – пружина якоря; 18 – сердечник электромагнита;
19 – штуцер для отвода утечек;
20 – разъем питания катушки электромагнита;
21 – жиклёр впускной; 22 – штуцер с фильтром;
23 и 24 – каналы

Источник: составлено авторами.

- Figure 2 – Electro hydraulically controlled injector:
1 – spray body; 2 – spray needle with a diameter of 4 mm;
3 – nut; 4 – pin; 5 – guide bushing; 6 – spring; 7 – stock;
8 – leakage drain channel; 9 – bushing with landing seat;
10 – control piston; 11 – drain hole ($d_2 = 0.26$ mm);
12 – ball locking valve; 13 – armature of the electromagnet;
14 – fuel leak outlet; 15 – bushing; 16 – electromagnet coil;
17 – anchor spring; 18 – electromagnet core;
19 – drain fitting;
20 – the power connector of the electromagnet coil;
21 – intake jet; 22 – fitting with filter; 23 and 24 – channels

Source: compiled by the authors.

Для дизеля КамАЗ-740. 60-360 при $q_e = 220$ г/(кВт·ч), $N_e = 265$ кВт, $i = 8$, $n_n = 950$ мин $\rho_t = 0,85$ г/см³, расчетная величина $q_{ц} = 0,150$ см³/цикл или 150 мм³/цикл.

2. Для оценки расчетного значения μF определим действительную скорость истечения дизельного топлива через сопловые отверстия

$$g_d = \varphi \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho_t} \quad \text{м/с}, \quad (2)$$

где ΔP – средний перепад давления топлива перед сопловыми отверстиями, Н/м²; φ – коэффициент скорости, 0,8–0,9.

$$g_d = 0,85 \sqrt{2 \cdot 2000 \cdot 10^5 / 850} = 580 \text{ м/с}.$$

3. Расход топлива объемный Q , м³/с, определяется по формуле

$$Q = \mu F \cdot g_d, \quad (3)$$

где μF – эффективное проходное сечение распылителя, м².

4. Расход топлива объемный за цикл, мм³/с, можем определить и по величине цикловой подачи $q_{ц}$, поданной в КС за время впрыска t :

$$Q = q_{ц} / t. \quad (4)$$

5. Зная продолжительность впрыска φ_v в градусах (например, 10°), частоту вращения вала насоса n_n в мин⁻¹, время впрыска топлива через сопловые отверстия распылителя определим по формуле

$$\tau = \frac{\varphi_v}{6 \cdot n_n} = \frac{10}{6 \cdot 950} = 0,00175 \text{ с}. \quad (5)$$

6. Значение объемного расхода топлива через распылитель составит $Q = 150 / 0,00175 = 85714$ мм³/с = 0,000857 м³/с, откуда

$$\mu F = 0,000857 / 580 = 0,0000026 \text{ м}^2 = 0,15 \text{ мм}^2. \quad (6)$$

7. При коэффициенте расхода, равном 0,8, суммарная площадь сопловых отверстий составит 0,187 мм². При числе сопловых отверстий 5 площадь сечения одного сопла F_c составит 0,0375 мм². По площади соплового отверстия определим его диаметр [8]

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot F_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0375}{3,14}} = 0,22 \text{ мм}. \quad (7)$$

Результаты расчета показали, что величина эффективного проходного сечения распылителя не отличается от действительного значения $\mu F = 0,15 \text{ мм}^2$ форсунки КамАЗ -740⁸.

Экспериментальное определение эффективного проходного сечения распылителя выполняют на стенде с постоянным давлением⁹. Если эффективное проходное сечение распылителя в результате образования кокса уменьшилось на 15%, то его необходимо заменить.

В таблице 1 представлены результаты расчетных (теоретических) исследований эффективного проходного сечения распылителя μF и диаметра соплового отверстия d_c (их 5) в зависимости от величины давления P перед сопловыми отверстиями. Расчеты выполнены для постоянного времени впрыска топлива $0,00175 \text{ с}$ (10^0) и одинаковой цикловой подачи топлива, равной $150 \text{ мм}^3/\text{цикл}$.

Анализ результатов исследования, приведенных в таблице 1, показывает, что для постоянного времени впрыска топлива $0,00175 \text{ с}$ (10^0) и одинаковой цикловой подачи топлива $150 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ с увеличением давления топлива от 50 до 250 МПа можно уменьшить величину μF распылителя от 0,3 до 0,13 мм^2 и диаметр d_c от 0,3 до 0,2 мм. Уменьшение диаметра сопловых отверстий при высоком давлении впрыска улучшит процесс распыливания топлива, что снизит расход топлива и уменьшит токсичность отработавших газов.

2. МЕТОДИКА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КЛАПАНА УПРАВЛЕНИЯ ФОРСУНКОЙ

На рисунке 3 показан разрез электрогидравлического клапана управления иглой распылителя форсунки. Сила электромагнита 11 открывает запорный клапан, а сила пружины 13 – закрывает. Рассмотрим основные неисправности (отказы) в работе клапана типа «шарик – седло втулки» и его методику регулирования и исследования¹⁰ [7, 9, 10]. Неисправность клапана управления или отказ может произойти в результате короткого замыкания катушки электромагнита 10, поломки пружины 13, увеличения зазора между тарелкой 9 и сердечником электромагнита 11, утечек топлива между шариком 4 и седлом втулки 3, увеличения хода шарика.

Процесс регулирования клапана управления целесообразно проводить после проверки герметичности шарика 4. Герметичность шарика 4 и посадочной поверхности втулки 3 определяется по допустимой величине объема сливаемого топлива управления клапаном всех форсунок на режиме холостого хода за одну минуту (например, 70 см^3)¹¹ [11, 12]. В случае потери герметичности в зоне шарика и втулки (например, утечки топлива одной форсункой более 100 см^3), изношенную втулку восстанавливают или заменяют.

Таблица 1

Зависимость эффективного проходного сечения распылителя и диаметра соплового отверстия от давления
Источник: составлено авторами.

Table 1

Dependence of the effective flow section for the sprayer and the diameter of the nozzle opening on pressure
Source: compiled by the by authors.

Давление P , МПа	50	100	150	200	250
Величина μF , мм^2	0,3	0,2	0,17	0,15	0,13
Диаметр d_c , мм	0,3	0,25	0,23	0,215	0,2

⁸ Макушев Ю. П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

⁹ Там же.

¹⁰ Макушев Ю. П. Техническое обслуживание клапанов форсунки с электрогидравлическим управлением хода иглы / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» 03 – 04 декабря 2020 г. Электрон. дан. Омск, СибАДИ 2021. С. 175–180. URL: http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe.

¹¹ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

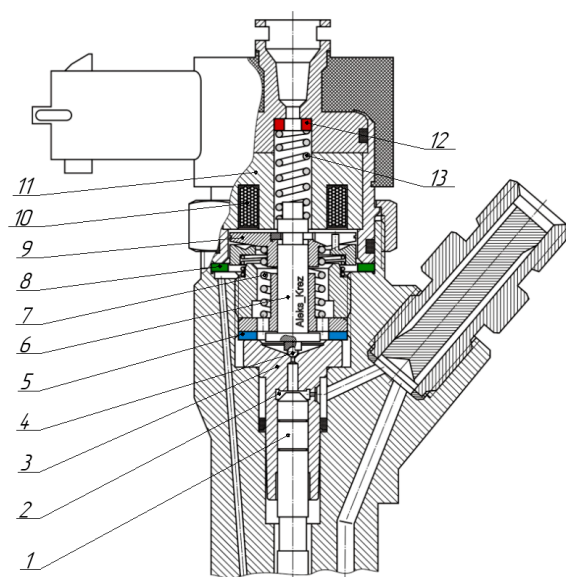


Рисунок 3 – Клапан управления: 1 – поршень; 2 – камера управления; 3 – втулка; 4 – шарик; 5 – нижняя шайба для регулирования хода шарика; 6 – якорь с тарелкой 9; 7 – пружина вспомогательная; 8 – средняя шайба для регулирования зазора между тарелкой 9 и сердечником электромагнита 11, где расположена катушка 10; 12 – верхняя регулировочная шайба, изменяющая усилие на главной пружине 13 и усилие на шарике 4
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Control valve: 1 – piston; 2 – control chamber; 3 – bushing; 4 – ball; 5 – lower washer for regulating the ball stroke; 6 – anchor with plate 9; 7 – auxiliary spring; 8 – middle washer for regulating the gap between plate 9 and the core of the electromagnet 11, where the coil 10 is located; 12 is the upper adjusting washer that changes the force on the main spring 13 and the force on the ball 4
Source: compiled by the by authors.

Для нормальной работы клапана управления необходимо соблюдать требуемое соотношение сил, действующих на его детали. Определение сил, действующих на запорный орган (шарик) 4 со стороны высокого давления в камере управления (150–250 МПа) и со стороны пружины 13 с жесткостью $C = 40$ Н/мм и их соотношение, необходимо знать для точной регулировки клапана. Втягивающая сила электромагнита 11 ($N_{эл}$) должна быть больше

силы сжатой пружины 13 ($N_{пр}$), а сила пружины должна быть больше силы от давления топлива, действующего на поверхность шарика 4 ($N_{ш}$). Определим силы, действующие на детали клапана управления.

1. Сила $N_{ш}$, действующая на шарик 4 диаметром 1,6 мм, который контактирует с посадочной конической поверхностью втулки 3 по диаметру 0,7 мм (площадь контакта $S_{ш} = 0,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$) определяется из выражения

$$N_{ш} = S_{ш} \times P = 0,38 \cdot 10^{-6} \times 200 \cdot 10^6 = 76 \text{ Н.} \quad (8)$$

2. Сила пружины, при её предварительном сжатии Δu на величину 2,0 мм, равна

$$N_{пр} = \Delta u \times C = 2,5 \times 40 = 100 \text{ Н.} \quad (9)$$

Из анализа формул (8) и (9) видно, что $N_{пр} > N_{ш}$ и клапан будет закрыт до того времени, пока электромагнит не притянет якорь 6 и не устранил действие силы пружины 13 на шарик 4. Сила электромагнита должна быть на 20–40% больше силы со стороны сжатой пружины.

3. Силу электромагнита определим из выражения^{12, 13}

$$N_{эл} = \mu_0 \times S_c \times (I \times n)^2 / 2x^2, \quad (10)$$

где μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, $4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; S_c – активная площадь сердечника, $0,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; I – сила тока, 19 А; n – число витков катушки, 19; x – зазор между якорем и сердечником, м (при зазоре 0,2 мм $x = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

$$N_{эл} = 4 \pi \cdot 10^{-7} \times 0,7 \cdot 10^{-4} \times (19 \cdot 19)^2 / 2 (0,2 \cdot 10^{-3})^2 = 140 \text{ Н.} \quad (11)$$

Сила электромагнита $N_{эл} > N_{пр}$, что обеспечит надёжную работу клапана управления.

Для регулировки клапана управления используют набор шайб различной толщины. Начальный ход шарика клапана должен быть равен 0,04–0,05 мм, регулируется толщиной прокладок (шайб) 5 (см. рисунок 3) [10].

¹² Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

¹³ Макушев Ю. П. Расчетные исследования и диагностирование форсунок с электрогидравлическим управлением / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» 03 – 04 декабря 2020 г. Электрон. дан. Омск, СибАДИ 2021. С.175–180. URL: http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe.

Увеличение толщины шайбы 5 приводит к уменьшению давления шарика 4 на седло втулки 3 и увеличению хода шарика. Если увеличить толщину шайбы 8, то это уменьшит прижатие шарика 4 на седло втулки 3 и увеличит зазор между тарелкой 9 и сердечником электромагнита 11. При увеличении толщины шайбы 12 происходит увеличение силы главной пружины 13 на шарик 4 и на седло втулки 3.

В настоящее время системы питания дизелей выпускаются с электрогидравлическим управлением форсунок с давлением впрыска топлива от 160 до 250 МПа. Давление в аккумуляторе (рампе), например, 200 МПа, является начальным для расчета, диагностирования и технического обслуживания форсунок. Открытие или закрытие сопловых отверстий распылителей форсунки происходит в результате изменения давления в камере над управляющим поршнем, диаметр которого больше диаметра иглы распылителя. Максимальное давление в камере управления достигает давления топлива в аккумуляторе.

При расчете и техническом обслуживании форсунок с ЭГУ надо знать максимальную силу давления на закрытый орган управления (шарик) $N_{ш}$. Затем определяется сила пружины $N_{пр} = (1,2-1,4) N_{ш}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{ш}$. Далее определяют силу электромагнита $N_{эл} = (1,2-1,4) N_{пр}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{пр}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 4 показано изменение силы $N_{ш}$, действующей на запорный клапан типа «шарик» диаметром 1,6 мм (с диаметром контакта 0,7 мм и площадью $S_{ш} = 0,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$), в зависимости от величины максимального давления топлива в камере управления ($P_{уп}$). Из анализа рисунка 4 следует, что сила $N_{ш}$ прямо пропорциональна давлению топлива в камере управления $P_{уп}$. Следует отметить, что системы подачи топлива Common Rail (общий путь) могут иметь максимальное давление топлива в аккумуляторе 160, 200, 250 МПа.

На рисунке 5 показан график изменения силы $N_{пр}$ в зависимости от величины её предварительного сжатия Δu при жесткости пружины, равной 40 Н/мм. Из анализа рисунка 5 следует, что сила $N_{пр}$ прямо пропорциональна её сжатию и представляет собой уравнение прямой линии.

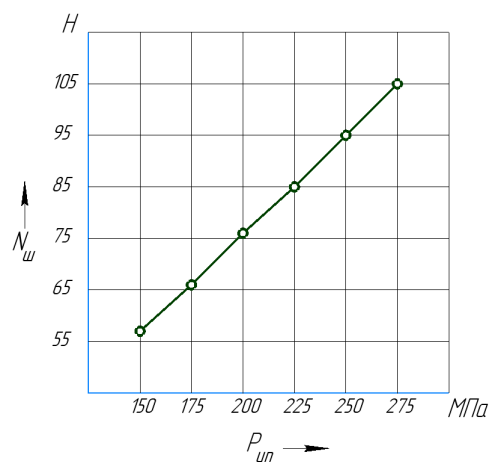


Рисунок 4 – Изменение силы на поверхности шарика ($N_{ш}$) от давления топлива в камере управления ($P_{уп}$)
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Change in force on the surface of the ball ($N_{ш}$) from the fuel pressure in the control chamber ($P_{уп}$)
Source: compiled by the by authors.

Воздушный зазор между якорем и сердечником электромагнита (0,1–0,2 мм) регулируют толщиной средней шайбы 8 (см. рисунок 3). Для контроля хода шарика и воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита применяют специальные приборы и оборудование (индикаторную головку и импульсный генератор) или выполняют необходимые измерения и расчеты.

Для определения воздушного зазора между электромагнитом и якорем возможно измерение деталей клапана с дальнейшим расчётом размерной цепи. Для этого откручивают верхнюю часть клапана (электромагнит) и измеряют при помощи точного прибора с индикаторной головкой глубину от торцевой поверхности до электромагнита (см. рисунок 3). Например, среднее значение шести измерений в различных точках по окружности (через 60°) равно 10,9 мм. Затем измеряем высоту от шайбы 8 до наружной поверхности тарелки якоря. Например, среднее значение шести измерений равно 10,8 мм. В собранном состоянии воздушный зазор между якорем и электромагнитом клапана будет равен 0,1 мм (10,9–10,8). При увеличении воздушного зазора между якорем и электромагнитом клапана уменьшается его втягивающая сила (формула 10), что может быть причиной его неисправности.

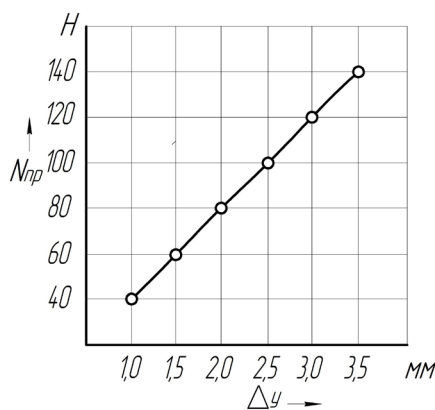


Рисунок 5 – Изменение силы пружины от её предварительного сжатия
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Change in spring force from its pre-compression
Source: compiled by the by authors.

На рисунке 6 показан график изменения силы электромагнита $N_{эл}$ в зависимости от воздушного зазора между якорем и сердечником Δx . При увеличении воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита его втягивающая сила уменьшается (см. формулу 10), что может быть одной из причин его неисправности.

При расчете и техническом обслуживании форсунок с ЭГУ надо знать максимальную силу давления на закрытый орган управления (шарик) $N_{ш}$. Затем определяется сила пружины $N_{пр} = (1,2-1,4) \cdot N_{ш}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{ш}$. Далее определяют силу электромагнита $N_{эл} = (1,2-1,4) \cdot N_{пр}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{пр}$.

Например, возьмем систему впрыска топлива с давлением в аккумуляторе 200 МПа с диаметром шарика 1,6 мм. Данное давление действует на поверхность шарика и с учетом рисунка 4 создает силу $N_{ш} = 76$ Н. Для обеспечения плотного закрытия шарика сила пружины $N_{пр}$ должна быть больше на 20–40% силы $N_{ш}$. Из рисунка 5 следует, что эта сила должна быть примерно равна 100 Н. При выбранной жесткости пружины в 40 Н/мм ее сжатие должно быть 2,5 мм. Сила электромагнита $N_{эл} = 1,4 \cdot 100 = 140$ Н (см. рисунок 6) достигает данного значения при воздушном зазоре 0,2 мм.

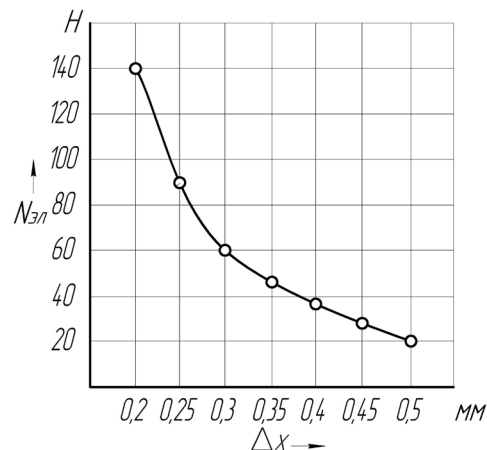


Рисунок 6 – Изменение силы электромагнита в зависимости от воздушного зазора между якорем и сердечником
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Change in the force of the electromagnet depending on the air gap between the anchor and the core
Source: compiled by the by authors.

На рисунках 4, 5 и 6 представлены графики изменения сил, действующих на шарик ($N_{ш}$) от давления топлива в камере управления ($P_{уп}$), силы пружины $N_{пр}$ в зависимости от её сжатия, силы электромагнита $N_{эл}$ в зависимости от величины зазора между якорем и сердечником. Полученные зависимости (зависимость функции от аргумента) проведенных теоретических исследований можно представить в виде $N_{ш} = \psi \cdot (P_{уп})$; $N_{пр} = \psi \cdot (\Delta y)$; $N_{эл} = \psi \cdot (\Delta x)$. Данные графики (зависимости) необходимы для расчета новых (модернизированных) систем питания дизелей с электрогидравлическим управлением форсунок и для проведения их технического обслуживания.

КОДИРОВКА ФОРСУНОК С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

После регулировки или ремонта форсунки с электронным управлением необходима ее кодировка (прошивка) с целью изменения ее параметров (в основном времени активации). Измененное время активации (время впрыска топлива), при котором обеспечивается требуемая цикловая подача топлива, вносится в электронный блок управления (ЭБУ).

Цикловую подачу топлива из распылителя форсунки дизеля за впрыск в м³ можно вычислить из выражения^{14, 15}

$$q_u = \mu F \cdot \vartheta_T \cdot t_{впр} = \mu F \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_T}} \cdot t_{впр}, \quad (12)$$

где μF – эффективное сечение распылителя, м²; ϑ_T – теоретическая скорость, с которой вытекает топливо из распылителя, м/с; ΔP – давление топлива перед сопловыми отверстиями, Н/м²; ρ_T – плотность топлива, кг/м³; $t_{впр}$ – время впрыска, с.

При $\Delta P = 160 \cdot 10^6$ Н/м² и $\rho_T = 850$ кг/м³ величина $\vartheta_T = 613$ м/с. Для $\mu F = 0,15 \cdot 10^{-6}$ м² и времени впрыска 0,001 с (1 мс) количество поданного топлива в КС за впрыск будет примерно равно $90 \cdot 10^{-9}$ м³, или 90 мм³.

Для дизельного двигателя КамАЗ 740-65-240 мощностью 240 л.с. (176 кВт) при частоте вращения коленчатого вала 1900 мин⁻¹ цикловая подача должна быть равна 95 мм³. Анализ формулы (12) показывает, что при постоянных значениях μF , ΔP , ρ_T подача q_u зависит от времени впрыска, $t_{впр}$ (времени активации).

Для кодировки форсунок применяют специальный стенд (рисунок 7, а), который оборудован компьютером с программным обеспечением (например, Diesel Ebsy olution для устройств Common Rail версии 11) [13]. Дополнительно стенд позволяет определять ход клапана (приспособление с индикатором видно на фото). Данное приспособление можно выполнить самостоятельно, используя чертежи устройства для определения хода иглы, представленного в работе [14]. Изменяется только конструкция штока. Выходная часть штока должна быть сплошной, диаметром 3 мм, длиной 70 мм.

Каждая форсунка Delphi Common Rail, новая или отремонтированная, должна иметь свой код. При установке форсунки на двигатель необходимо перепрограммировать ЭБУ, введя в него этот код. Это обеспечит надлежащую корректировку длительности и периодичности импульсов и подачу требуемого количества топлива.

Код форсунки – это условное обозначение допусков на требуемую подачу топлива (например, 95 ± 1 мм³/цикл) при работе форсунки на различных скоростных и нагрузочных режимах двигателя.



Рисунок 7 – Стенд для регулировки и кодировки (калибровки) форсунок: а – Common Rail; б – верхняя часть форсунки с заводским номером 0 445 110 110

Figure 7 – Stand for adjustment and coding (calibration) of Common Rail injectors (a), upper part of the nozzle with 0 445 110 110 factory number (b)

¹⁴ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигadlo, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

¹⁵ Макушев Ю. П. Расчетные исследования и диагностирование форсунок с электрогидравлическим управлением / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» 03 – 04 декабря 2020 г. Электрон. дан. Омск, СибАДИ 2021. С. 175–180. URL: http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe.

Электронный блок управления подачей топлива считывает данный код, проверяет, попадает ли значение цикловая подача топлива, которое выдает форсунка в указанный диапазон кода. Если да, то система подачи топлива будет хорошо работать, если нет, то ЭБУ может даже прекратить подачу топлива к данной форсунке.

На рисунке 7, б показана верхняя часть электрогидравлической форсунки с заводским номером 0 445 110 110. По данному номеру форсунки определяют ее характеристики.

Первые четыре цифры обозначают способ управления форсункой (электронный). В следующих трех цифрах закодирован тип ДВС (грузового или легкового автомобиля) и принцип действия исполнительного механизма форсунки (электромагнитный или пьезоэлектрический). Последние три цифры характеризуют исполнение форсунки, ее модель. По этим цифрам также можно определить производительность и рабочее давление форсунки.

Расшифруем форсунки БОШ на примерах:

0445 110 430 – с электромагнитным управлением, для легковых автомобилей;

0445 120 142 – для грузовых автомобилей, электромагнитная;

0445 115 077 – для легковых автомобилей с пьезоэлектрическим управлением (если вместо цифры 115 будет указана цифра 116, 117 или 118 – это форсунки 2, 3, 4-го поколений).

Количество впрыскиваемого форсункой топлива пропорционально времени впрыска (активации) и давлению в топливной системе.

В таблице 2 приведены результаты расчетного исследования (формула (12) изменения подачи топлива за цикл ($\text{мм}^3/\text{цикл}$) от времени активации (времени впрыска топлива). Расчеты выполнены для распылителя с $\mu F = 0,15 \text{ мм}^2$, $\Delta P = 160 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ и $\rho_T = 850 \text{ кг/м}^3$. Для семейства дизелей КамАЗ-740 с мощностью от

176 до 309 кВт на режиме номинальной мощности подача топлива за цикл лежит в пределах 95–167 мм^3 .

Анализ таблицы 2 показывает, что подача топлива за цикл пропорциональна времени активации, которое можно уточнить на контрольно-испытательном стенде или по формуле (12). Относительная погрешность расчетных и экспериментальных значений не превышает 5%.

Код форсунки с электрогидравлическим управлением вырабатывается с учетом результатов измерения цикловой подачи на характерных скоростных и нагрузочных режимах при давлении топлива от 20 до 160 МПа. Полученные результаты измерения подачи топлива корректируются до требуемых значений путем изменения длительности и периодичности подачи импульса (тока) на катушку электромагнита.

После испытания на стенде форсунки для двигателя конкретной марки и мощности проверяется и корректируется необходимая цикловая подача топлива для различных давлений в аккумуляторе с допустимым отклонением от среднего паспортного значения. Цикловая подача топлива корректируется (если она не соответствует заданному значению) длительностью подачи сигнала (тока) на катушку электромагнита. При достижении требуемой цикловой подачи через распылитель при различных давлениях на входе в форсунку составляется тест форсунки.

Результаты кодировки записываются в тест форсунки, уточняется ее шифр и данные заносятся в ЭБУ с использованием программного обеспечения. С этого момента присутствует вся информация, необходимая для корректировки управления отрегулированной или отремонтированной форсунки.

Таблица 2

Зависимость подачи топлива за цикл от времени активации

Источник: составлено авторами.

Table 2

Dependence of fuel supply per cycle on activation time

Source: compiled by the by authors

Подача топлива, $\text{мм}^3/\text{цикл}$	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Время активации, мс	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

Таблица 3
Тест форсунки с электрогидравлическим управлением и положительными результатами
Источник: составлено авторами.

Table 3
The nozzle test with electro hydraulic control and positive results
Source: compiled by the by authors

Форсунка Common Rail, номер 0445120142. КамАЗ-740. 65-240								
Этап проверки	Продолж. активации, мкс	Давл., МПа	Время измер. сек	Количество впрыскиваемого топлива, мм ³ /цикл		Количество возвращаемого топлива, мм ³ /цикл		Анализ
				задан. значение	фактич. значен.	задан. значен.	факт. значен.	
Leak test	0	160	200	-- ± --	----	40,0±40,0	7,16	+
VL	900	160	90	105,0±2,0	104,54	44,0±26,0	30,28	+
EM	600	120	40	95,0±2,0	96,56	-- ± --	----	+
LL	630	20	40	20,0±3,0	20,50	-- ± --	----	+
VE	275	60	40	12,0 ± 1,6	12,96	-- ± --	----	+

Этап проверки (режим работы двигателя, для которого диагностируется и регулируется форсунка) может быть таким^{16,17}:

LL – режим холостого хода (минимальная подача топлива); VL – режим максимальной нагрузки (наибольшая подача топлива при максимальном крутящем моменте); EM – режим средних нагрузок (это может быть режим, близкий к номинальному); VE – подвпрыск или дополнительный впрыск; LT – утечки топлива (подача – обратка); Leak test – тест на герметичность (утечки) форсунки.

Для любого режима проверки форсунки обязательным является указание величины давления топлива, в МПа; ширины (длительности) управляющего импульса (продолжительности активации, в мкс); времени измерения, в с; количества впрыскиваемого топлива распылителем форсунки (фактическое и заданное, в мм³/Н или мм³/цикл); количества возвращаемого фактического и заданного топлива, в мм³/Н, (мм³/цикл).

В таблице 3 приведен пример теста форсунки с электрогидравлическим управлением дизеля КамАЗ-740. 65-240 и положительными результатами.

Рассмотрим часть другого теста форсунки дизеля КамАЗ-740. 65-240 мощностью 240 л с (176 кВт) с частотой вращения коленчатого вала 1900 мин⁻¹, но с нарушенной подачей топлива на режиме номинальной мощности (EM).

Время активации равно 1000 мкс (0,001 с). Давление топлива перед распылителем форсунки 160 МПа. Время измерения пропускной способности распылителя форсунки примем равным 40 с. За один цикл под действием перепада давления 160 МПа из распылителя при заданной температуре вытекло объемное количество топлива 82 мм³/цикл (требуется 95±2 мм³/цикл¹⁸).

Чтобы повысить цикловую подачу топлива нужно увеличить время впрыска (время активации). Время активации со 1000 мкс необходимо увеличить до 1022 мкс и внести его в ЭБУ. Для внесения данных о форсунках в память ЭБУ необходим диагностический прибор HI-SCAN Pro.

Каждый производитель использует свой формат кодов коррекции: у BOSCH это IMA, у DENSO это QR, у DELPHI код C2I и C3I.

¹⁶ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020.

¹⁷ Диагностирование, восстановление, регулирование и кодирование клапана управления форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы XII-й Международной научно-технической конференции, Омск, 16–19 февраля 2022 года / Редколлегия: В. А. Лихолобов [и др.]. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 192–193. EDN BUVOFI. Режим доступа: <http://oge.omgtu.ru/2022/files/OGE2022.pdf>.

¹⁸ Макушев Ю. П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены недостатки форсунок дизеля КамАЗ-740 с механическим управлением хода иглы распылителя. Основным недостатком форсунок является низкое давление топлива перед сопловыми отверстиями (менее 60 МПа) и отсутствие управления подачи топлива.

Применение форсунок с электромеханическим управлением позволит повысить давление впрыскиваемого топлива (до 250 МПа), организовать управляемый впрыск топлива (например, двухфазным), снизить неравномерность подачи топлива по отдельным цилиндрам.

Представлены значения эффективного проходного сечения распылителя и диаметра сопловых отверстий в зависимости от величины давления топлива в распылителе. Анализ результатов расчета показывает, что для постоянного времени впрыска топлива 0,00175 с и одинаковой цикловой подачи топлива 150 мм³/цикл с увеличением давления топлива от 50 до 250 МПа можно уменьшить величину эффективного проходного сечения распылителя от 0,3 до 0,13 мм² и диаметр соплового отверстия от 0,3 до 0,2 мм. Уменьшение диаметра сопловых отверстий высоким давлением впрыска улучшит процесс распыливания топлива, что снизит расход топлива.

Рассмотрено устройство и принцип действия клапана с электрогидравлическим управлением хода иглы форсунки, выполнен его расчёт. Указаны неисправности в работе клапана управления, приведена методика его регулирования. Для регулирования клапана управления по предлагаемой методике в начале расчётным или экспериментальным путем определяют величины и соотношение сил, действующих на подвижные детали клапана, а далее проверяют и при необходимости при помощи прокладок различной толщины устанавливают в определенном порядке требуемый ход шарика, необходимое усилие пружины, зазор между якорем и сердечником.

Для эффективной работы клапана управления нужно соблюдать требуемое соотношение сил, действующих на его детали. Определение сил, действующих на запорный орган (шарик) со стороны высокого давления в камере управления (150–250 МПа) и со стороны пружины с жесткостью $C = 40$ Н/мм и их соотношение необходимо знать для точной регулировки клапана. Втягивающая сила электромагнита должна быть больше силы сжатой

пружины на 20–40%, а сила пружины должна быть больше силы от давления топлива, действующего на поверхность шарика на 20–40%.

Рассмотрен способ восстановления требуемой (паспортной) цикловой подачи топлива при ее изменении в результате замены клапана управления форсункой или его регулировки. Приведен пример теста форсунки с электрогидравлическим управлением. Установлено, что подача топлива за цикл пропорциональна времени активации, которое можно уточнить на контрольно-испытательном стенде или расчетным путем. Выполнены теоретические исследования влияния времени активации (продолжительности впрыска) на изменение подачи топлива за цикл. Относительная погрешность расчетных и экспериментальных результатов исследования не превышает 5%.

Результаты расчетных исследований могут быть использованы для уточнения методики технического обслуживания топливных систем с электронным управлением (Common Rail). Таблицы с расчетными данными сил от величины давления на орган управления (шарик), силы пружины от ее сжатия, силы электромагнита от зазора между якорем и сердечником могут быть использованы при совершенствовании методики технического обслуживания форсунок с электрогидравлическим управлением и сделать более эффективной работу специалистов по техническому обслуживанию данных форсунок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Calculation of contact stresses in the seating cone of diesel injectors sprayers /Y. P. Makushev, R. F. Salikhov, T. A. Polyakova, L. Y. Volkova // AIP Conference Proceedings, Omsk, 24–27 февраля 2021 года. Omsk, 2021. P. 060012. (1-9 с). DOI 10.1063/5.0075035.
2. Жигadlo А. П., Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Рындин В. В. Выбор кулачковых механизмов для привода плунжера насоса высокого давления дизельных двигателей с применением программы MATHCAD // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 18–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-18-24.
3. Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP. R. F. Salikhov, Y. P. Makushev, G. N. Musagitova, L. U. Volkova, and R. S. Suleymanov Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP Conference Proceedings 2141, 050009 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122152>
4. Жигadlo А. П., Иванов А. Л., Саенко М. М. Влияние различных факторов на величину и равномерность подачи топлива в цилиндры дизеля // Вестник СибАДИ. Вып. 4 (32). 2013. С. 29–35.

5. Leonhard, R. Solenoid Common Rail Injector for 1800 Bar / R. Leonhard, J. Warga, T. Pauer, M. Ruckle, M. Schnell // *MTZ worldwide*. 2010. Vol. 71. № 2. P. 10-15.

6. Matsumoto S. The new Denso Common Rail diesel electromagnetic injector / S. Matsumoto, K. Date, T. Taguchi, O.E. Hermann // *MTZ worldwide*. 2013. Vol. 74. No.2. pp. 44-48. 136. R. Pairi, F.D.

7. Макушев Ю. П. Расчет электрогидравлического клапана управления ходом иглы форсунки и его диагностирование // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2015. № 3 (143). С. 74–77.

8. Макушев Ю. П., Волкова Л. Ю. Выбор эффективного проходного сечения распылителей и дифференциальной характеристики впрыска топлива для дизелей с цилиндровой мощностью до 250 кВт // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2015. № 2 (140). С. 76–79.

9. EP 2 453 1 24 A1 Frankl, Jason. A method for determining injection parameters for the injector. Publication date: 16.05.2012 Bulletin 2012/20 126. F. Yang, J. Wang Common rail fuel injection system Iterative control based on training calibration of parameters for precise control of the amount of fuel injection International Journal of Automotive Technology April 2011, volume 12, Warga // *MTZ worldwide*. 2012. Vol. 69. No. 10. P. 26-31.

10. Common Rail System (CRS) Service Manual: General Edition. Denso Corporation Service Department. Showa-cho, Kariya, Aichi Prefecture, 2018. 185 pp.

11. 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 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 632 (2019) 012058 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/632/1/012058.

12. US 7,937,988 B2 Method and device for checking for leakage in a fuel injection valve of an internal combustion engine. 10, 2011.

13. Diesel Easy Solutions software for Common Rail devices, version 11. User Manual version 2016.2. DIESEL EASY SOLUTIONS Diesel Easy Solutions ttp://easydiesel.club 2. 40 p.

14. Волкова Л. Ю. Разработка универсального приспособления для определения хода иглы распылителей тепловозных и судовых дизелей // Омский научный вестник. 2022. № 1(181). С. 13–18. DOI 10.25206/1813-8225-2022-181 – 13–18.

REFERENCES

1. Calculation of contact stresses in the seating cone of diesel injectors sprayers /Y. P. Makushev, R. F. Salikhov, T. A. Polyakova, L. Y. Volkova. AIP Conference Proceedings, Omsk, Omsk, 2021. P. 060012. (1-9 p). DOI 10.1063/5.0075035.

2. Zhigadlo A. P., Makushev Ju. P., Poljakova T. A., Ryndin V. V. Vybor kulachkovykh mekhanizmov dlja pri-voda plunzhera nasosa vysokogo davlenija dizel'nyh dvigatelej s primeneniem programmy MATHCAD [Selecting the Cam Mechanisms to Drive the

High Pressure Pump Plunger of Diesel Engines Using MATHCAD]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2022; 4 (184): 18–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-18-24. (in Russ.)

3. Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP. R. F. Salikhov, Y. P. Makushev, G. N. Musagitova, L. U. Volkova, and R. S. Suleymanov Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP Conference Proceedings 2141, 050009 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122152>

4. Zhigadlo A. P., Ivanov A. L., Saenko M. M. Vli-janie razlichnykh faktorov na velichinu i ravnomernost' podachi topliva v cilindry di-zelja [Influence of various factors on the value and uniformity of fuel supply to diesel cylinders]. *Vestnik SibADI*. 2013; 4 (32). 2013: 29 – 35. (in Russ.)

5. Leonhard, R. Solenoid Common Rail Injector for 1800 Bar / R. Leonhard, J. Warga, T. Pauer, M. Ruckle, M. Schnell. *MTZ worldwide*. 2010; Vol. 71. No 2:10-15.

6. Matsumoto S. The new Denso Common Rail diesel electromagnetic injector / S. Matsumoto, K. Date, T. Taguchi, O.E. Hermann. *MTZ worldwide*. 2013; Vol. 74. No.2: 44-48. 136. R. Pairi, F.D.

7. Makushev Ju. P. Raschet jelektrogidravli-cheskogo klapana upravlenija hodom igly forsunki i ego diagnosti-rovanie [Calculation of electrohydraulic valve of nozzle needle travel control and its diagnostics]. *Omskij nauchnyj vestnik. Serija «Pribyry, mashiny i tehnologii»*. 2015; 3 (143). 2015: 74 – 77. (in Russ.)

8. Makushev Ju. P., Volkova L. Ju. Vybor jef-fektivnogo prohodnogo sechenija raspylitelej i dif-feren-cial'noj harakteristiki vpryska topliva dlja dizelej s cilindrovoj moshhnost'ju do 250 kVt [Selection of effective spray section and differential fuel injection characteristics for diesel engines with cylinder power up to 250 kW]. *Omskij nauchnyj vestnik. Serija «Pribyry, mashiny i tehnologii»*. 2015; no 2 (140). 2015^ 76 – 79. (in Russ.)

9. EP 2 453 1 24 A1 Frankl, Jason. A method for determining injection parameters for the injector. Publication date: 16.05.2012 Bulletin 2012/20 126. F. Yang, J. Wang Common rail fuel injection system Iterative control based on train-ing calibration of parameters for precise control of the amount of fuel in-jection International Journal of Automotive Technology April 2011, volume 12, Warga // *MTZ worldwide*. 2012. Vol. 69. No. 10. P. 26-31.

10. Common Rail System (CRS) Service Manual: General Edition. Denso Corporation Service Department. Showa-cho, Kariya, Aichi Prefecture, 2018. 185 pp.

11. 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 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 632 (2019) 012058 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/632/1/012058.

12. US 7,937,988 B2 Method and device for checking for leakage in a fuel injection valve of an internal combustion engine. 10, 2011.

13. Diesel Easy Solutions software for Common Rail devices, version 11. User Manual version 2016.2. DIESEL EASY SOLUTIONS Diesel Easy Solutions <http://easydiesel.club> 2. 40 p.

14. Volkova L. Ju. Razrabotka universal'nogo prispособlenija dlja opredelenija hoda igly raspylitatej tep-lovoznih i sudovyh dizelej [Development of a universal device for determining the needle travel of diesel and marine diesel engines]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2022; 1(181): 13-18. DOI 10.25206/1813-8225-2022-181-13-18.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Жига́дло А. П. Формулировка направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Разработка теоретических исследований (50%).

Макушев Ю. П. Расчетные (теоретические) исследования и кодировка форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителя. Анализ результатов исследования, формулирование выводов (50%).

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Aleksandr P. Zhigadlo. Research direction and topic formulation. Research objectives statement. Theoretical studies development (50%).

Makushev Yu. P. Calculated (theoretical) studies and coding of nozzles with electro-hydraulic control of the sprayer needle operation. Study results and formulation of conclusions analysis (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жига́дло Александр Петрович – канд. техн. наук, д-р пед. наук, доц., ректор.

Макушев Юрий Петрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr P. Zhigadlo – Cand. of Sci., Dr. of Sci., Associate Professor, Rector.

Yuri P. Makushev – Cand. of Sci., Associate Professor, Automation and Energy Engineering Department.