

DOI: 10.15593/24111678/2018.01.06

УДК 621.436+629.3.083

С.А. Кузнецов¹, В.Н. Катаргин¹, Е.Г. Зеленкова¹, Е.В. Алябьев²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ОАО «Автоколонна 1967», Красноярск, Россия

ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ В РАБОТОСПОСОБНОМ СОСТОЯНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ COMMON RAIL

Дизельные топливные системы за время своего существования претерпели немало изменений. Ужесточение требований к снижению выбросов токсических компонент, а также топливной экономичности и уменьшению шумности двигателей постепенно привели к отказу от полностью механических систем. На смену им пришли более компактные, высокотехнологичные системы с электронным управлением. Речь идет о топливной системе Common Rail (в переводе с английского – «общая магистраль»). Ее характерными особенностями являются наличие аккумулятора давления топлива и независимость закона подачи его форсункой, что позволило системе Common Rail работать при очень высоких давлениях и дало возможность построить определенные характеристики подачи топлива и реализовать более точное дозирование. Однако с повышением рабочего давления и уменьшением размера их компонент топливные системы становятся более чувствительны к качеству используемого топлива, что значительно снижает надежность и приводит к частым отказам.

В статье представлен анализ конструкций дизельных топливных систем с помощью построения иерархических структурных моделей. С применением сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV была получена микроструктура рабочих поверхностей управляющих клапанов с различными пробегами форсунок фирмы BOSCH для детального изучения характера, а также выявления возможных причин их износов. Настоящее исследование проводилось с целью обоснования необходимости дополнительных контрольных и профилактических работ по обслуживанию современных топливных систем Common Rail.

Ключевые слова: форсунка, дизельный двигатель, клапан управления, топливный насос высокого давления, инжектор.

S.A. Kuznetsov¹, V.N. Katargin¹, E.G. Zelenkova¹, E.V. Alyabyev²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

² JSC "Avtokolonna 1967", Krasnoyarsk, Russian Federation

PREVENTIVE STRATEGY OF MAINTENANCE OF ELEMENTS IN WORKING CONDITION OF FUEL SYSTEM COMMON RAIL

Diesel fuel systems have undergone many changes during their existence. More stringent requirements for reducing emissions, exhaust fumes, toxic components, fuel economy and engine noise reduction gradually led to the abandonment of completely mechanical systems. They were replaced by more compact systems with electronic control, capable of operating at very high pressures, which allowed to create certain characteristics of fuel supply and to realize more accurate dosing. However, with increasing working pressure and reducing the size of their components, fuel systems become more sensitive to the quality of the fuel used, which significantly reduces reliability and leads to frequent failures.

This article presents an analysis of diesel fuel system designs using hierarchical structural models. Using JEOL JSM-6490LV scanning electron microscope, high-resolution photographs of the operating surfaces of the control valves with different BOSCH nozzle series were obtained for a detailed study of the nature and possible causes of their wear. This study was conducted to justify the need for additional control and prevention of modern fuel systems Common Rail.

Keywords: injector, diesel engine, control valve, high-pressure fuel pump, injector.

Постоянное увеличение количества двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и применение их во всех сферах народного хозяйства остро ставит вопрос повышения качества двигателей. Важнейшим элементом управления работой ДВС является топливная система. Современными тенденциями развития являются повышение давления впрыска топлива и одновременное уменьшение размеров деталей, поэтому вопрос, связанный с повышением надежности, а также правильным техническим обслуживанием, становится особенно актуальным [1–3].

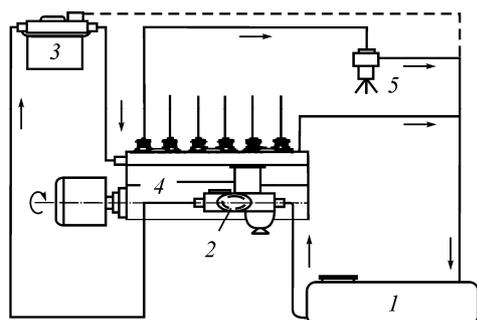


Рис. 1. Общий вид топливной системы с ТНВД многоплунжерного типа: 1 – топливный бак; 2 – топливоподкачивающий насос; 3 – топливный фильтр; 4 – топливный насос высокого давления; 5 – форсунка

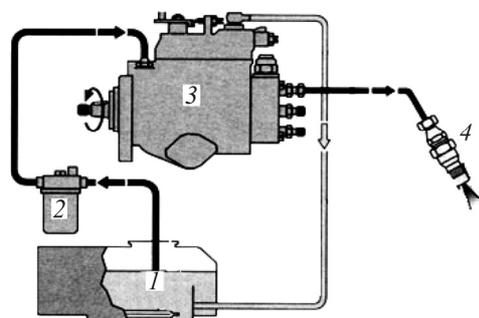


Рис. 2. Общий вид топливной системы с ТНВД распределительного типа: 1 – топливный бак; 2 – топливный фильтр; 3 – топливный насос высокого давления; 4 – форсунка

били, но их надежность значительно уменьшилась, причиной является увеличение нагрузки на плунжерную пару [5].

Следующим шагом в усовершенствовании дизельных топливных систем является создание насос-форсунок. Она объединяет в себе насос и форсунку, которая устанавливается непосредственно в каждый цилиндр (рис. 3)

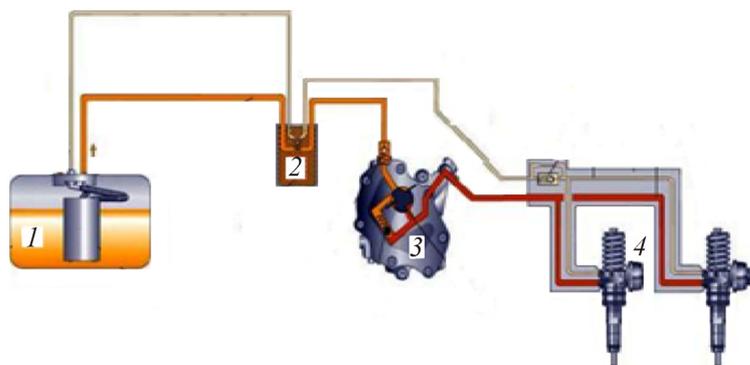


Рис. 3. Общий вид топливной системы с насос-форсунками: 1 – топливный фильтр; 2 – топливный фильтр; 3 – топливоподкачивающий насос; 4 – насос-форсунка

Так же как и в предыдущих системах, форсунки приводятся в действие кулачковым распределительным валом двигателя, через коромысло. За счет отсутствия магистрали высокого

давления насос-форсунка способна работать под давлением до 2200 бар. Процесс впрыска регулируется электромагнитным клапаном. За счет высокого давления впрыска топлива распыл выполняется более качественно, вследствие чего происходит полное его сгорание. Моторы с данной системой в разы мощнее, экономичнее своих предшественников. Но есть и значительные минусы, к которым можно отнести чувствительность к качеству топлива и высокую стоимость насос-форсунки. Ремонт данного узла практически невозможен в «домашних» условиях, поэтому при неисправности их необходимо заменить [6].

Самой совершенной и высокотехнологичной системой является система Common Rail (CR), что в переводе с английского означает «общий путь» (рис. 4).

Особенностью конструкции такой системы является наличие аккумулятора (топливной рампы), где топливо, которое подается в форсунку, находится под высоким давлением, постоянно поддерживаемым ТНВД [7]. В современных автомобилях Common Rail полностью управляется электроникой с помощью блока управления (ЭБУ). За счет такой конструкции система стала «гибкой», что позволило применять ее на всех типах двигателей (паровозный, судовой, автомобильный). В плане конструкции Common Rail, в отличие от предшественников, за счет уменьшения механических элементов стала проще, но технологически – значительно сложнее [6, 8].



Рис. 4. Общий вид системы Common Rail:
1 – ТНВД; 2 – блок управления;
3 – топливная рампка; 4 – пьезофорсунка

Для дальнейшего анализа необходимо представить структуру каждой топливной системы. При исследованиях сложных технических систем структура системы представляется как совокупность элементов, имеющих последовательное, параллельное, последовательно-параллельное или смешанное соединение. Автомобиль и его агрегаты с точки зрения структурной надежности являются сложными системами, поэтому была выбрана иерархическая структурная модель [9].

Для построения иерархических моделей рассмотренные топливные системы были разбиты на элементы, каждому из которых был присвоен номер. Также модель была разбита на зоны в зависимости от давления дизельного топлива на элементы. Иерархические модели представлены на рис. 5–8 соответственно.

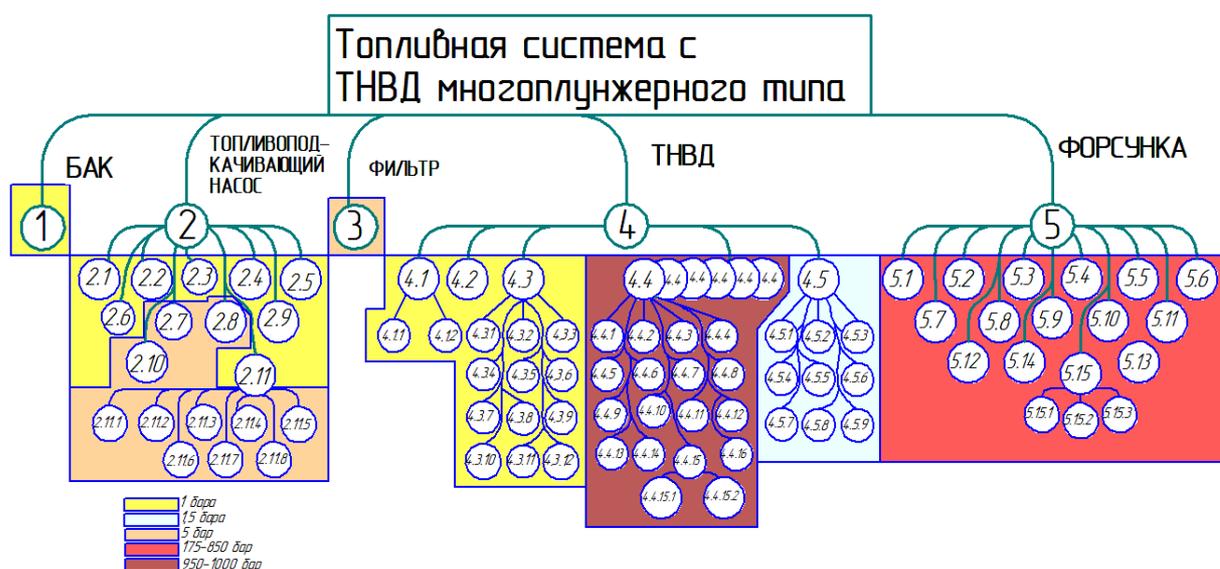


Рис. 5. Иерархическая структурная модель топливной системы с ТНВД многоплунжерного типа

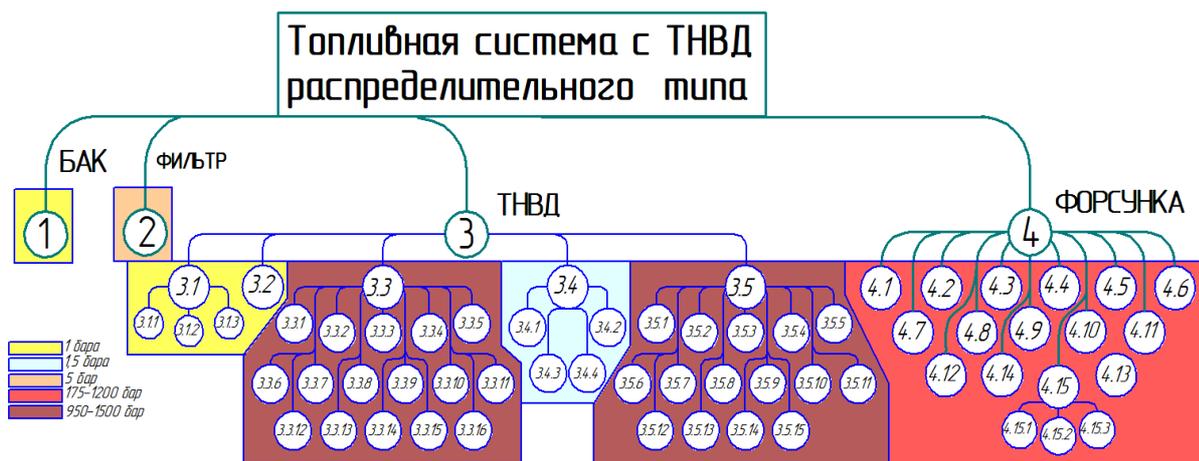


Рис. 6. Иерархическая структурная модель топливной системы с ТИВД распределительного типа

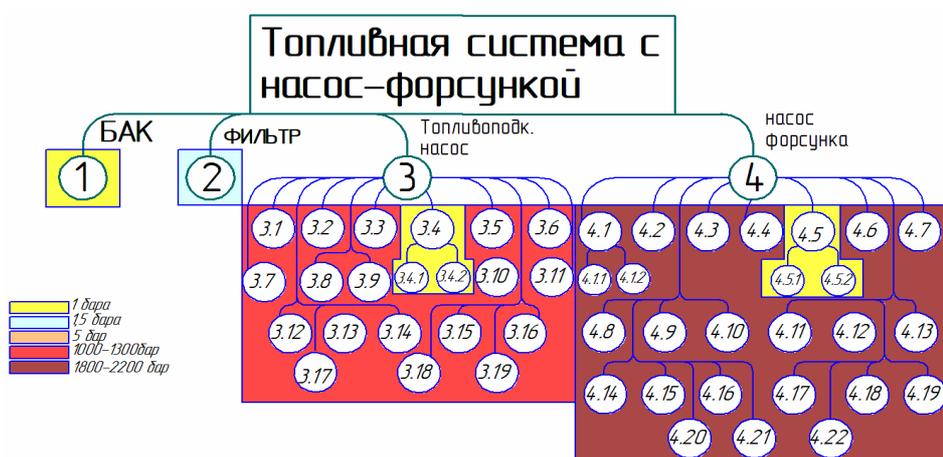


Рис. 7. Иерархическая структурная модель топливной системы оснащенной насос-форсунками

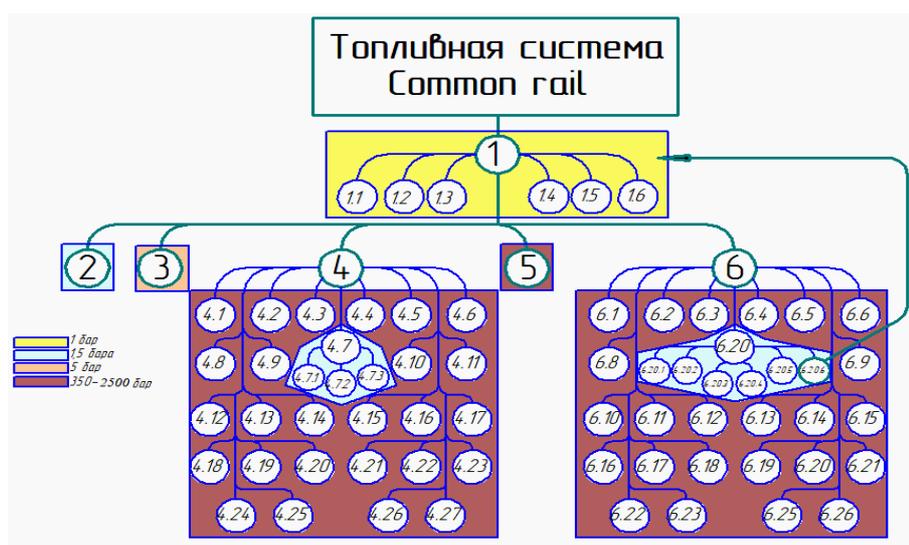


Рис. 8. Иерархическая структурная модель топливной системы Common Rail

Построенные иерархические модели для большей наглядности были переведены в диаграммы (рис. 9, 10)

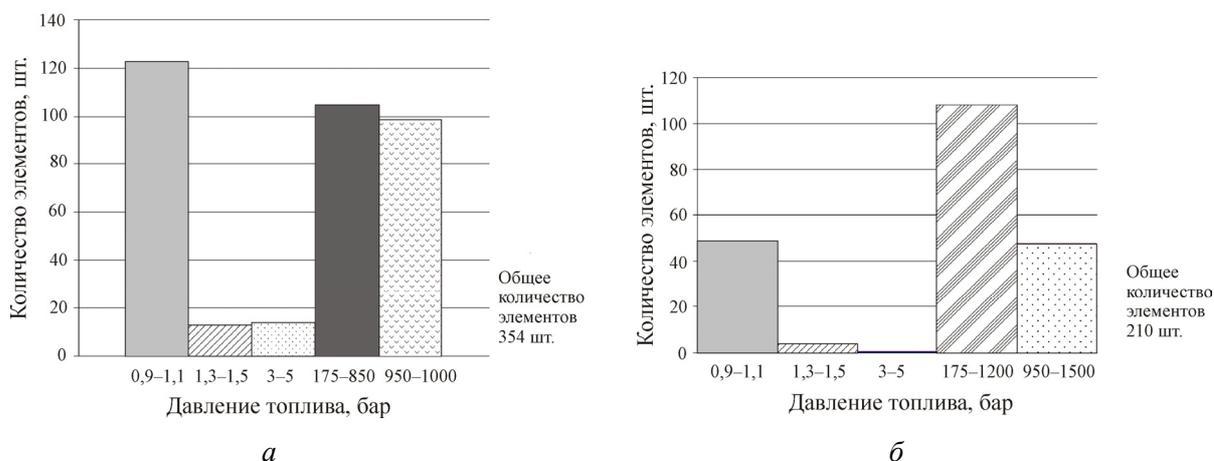


Рис. 9. Рабочее давление топлива на элементы топливных систем: *а* – топливная система с ТНВД многоплунжерного типа; *б* – топливная система с ТНВД распределительного типа

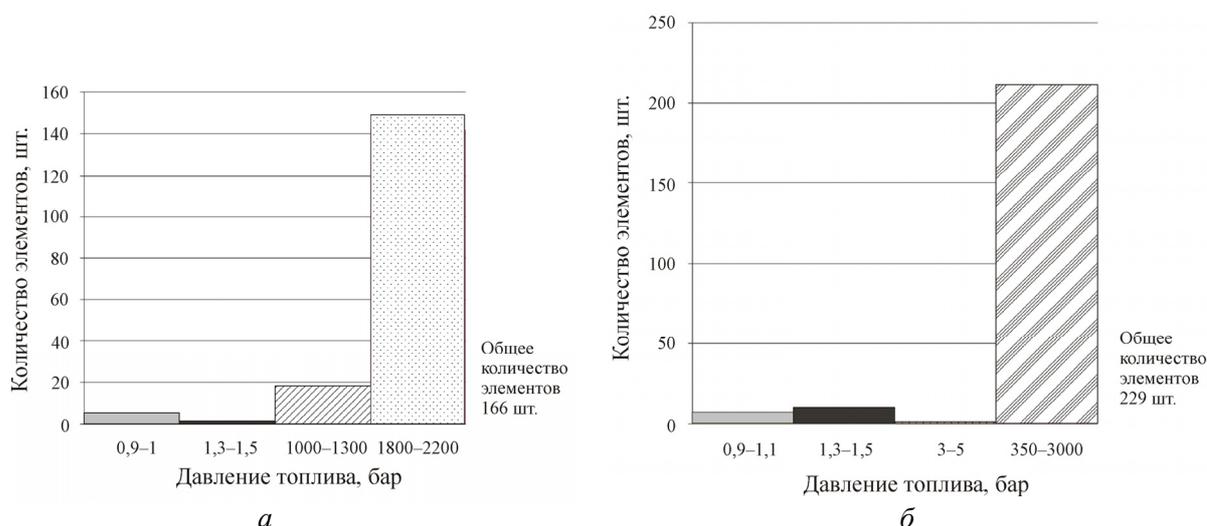


Рис. 10. Рабочее давление топлива на элементы топливных систем: *а* – топливная система оснащения насос-форсунками; *б* – топливная система типа Common Rail

Анализ полученных результатов показал, что современные топливные системы стали компактнее, большинство механических элементов заменили электронные системы, также значительно повысилось рабочее давление дизельного топлива – все это относится к системе Common Rail. В результате в дизельных двигателях с данной системой расход топлива двигателем сокращается примерно на 20 %, а крутящий момент на малых оборотах коленчатого вала возрастает на 25 %. Также уменьшается содержание в отработавших газах сажи и снижается шумность работы мотора. Несмотря на значительные преимущества Common Rail перед другими топливными системами, существует большой перечень отказов основных элементов (рис. 11).

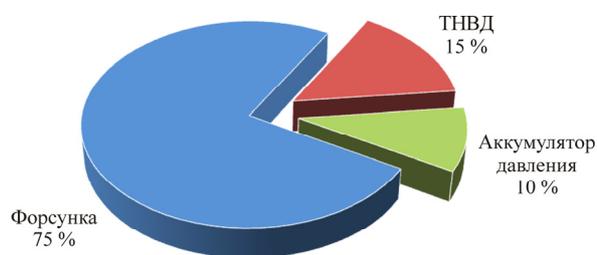


Рис. 11. Доли неисправностей основных элементов системы Common Rail

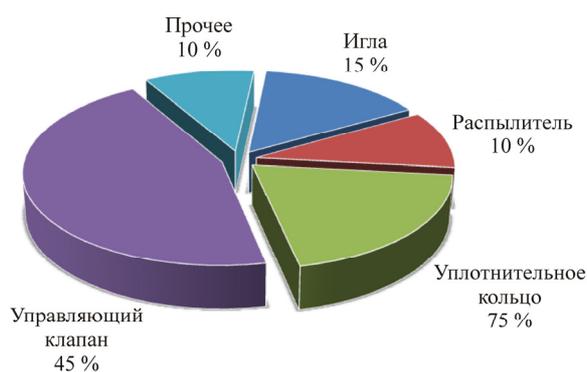


Рис. 12. Статистика отказов элементов форсунок

Более 70 % всех неисправностей приходится на форсунку. Как известно, данная топливная системы устроена с прецизионной точностью. Примером таких элементов могут служить управляющий клапан с гнездом, игла с корпусом распылителя. Поэтому требования к качеству топлива, используемого для работы Common Rail, значительно выше, чем при работе других систем. Даже попадание мелких частиц или воды может привести к раннему отказу системы питания, что чревато дорогостоящим ремонтом или заменой ее элементов. На рис. 12 представлена статистика отказов элементов форсунки.

Электронно-микроскопическое исследование повреждений управляющих клапанов форсунок топливной системы Common Rail было проведено с помощью микроскопа JEOL JSM-6490 LV в лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования Сибирского федерального университета. Для исследования было выбрано 9 клапанов с различными пробегами. После очистки загрязнений в ультразвуковой ванне было получено по 6 изображений структуры каждого клапана с различными увеличениями от $\times 15$ до $\times 1000$.

Анализ показал, что повреждения имеют форму лепестков, направленных от центра (отверстия) (рис. 13 клапан № 1); предположительно, это связано с попаданием абразивных частиц, которые вырывают куски металла с рабочей поверхности клапана под действием большого давления топлива [10–14]. Также есть износ при длительном взаимодействии шарика с седлом клапана (рис. 13, клапан № 3). В клапане № 4 выявлен износ обоих типов, при таких повреждениях восстановление невозможно.

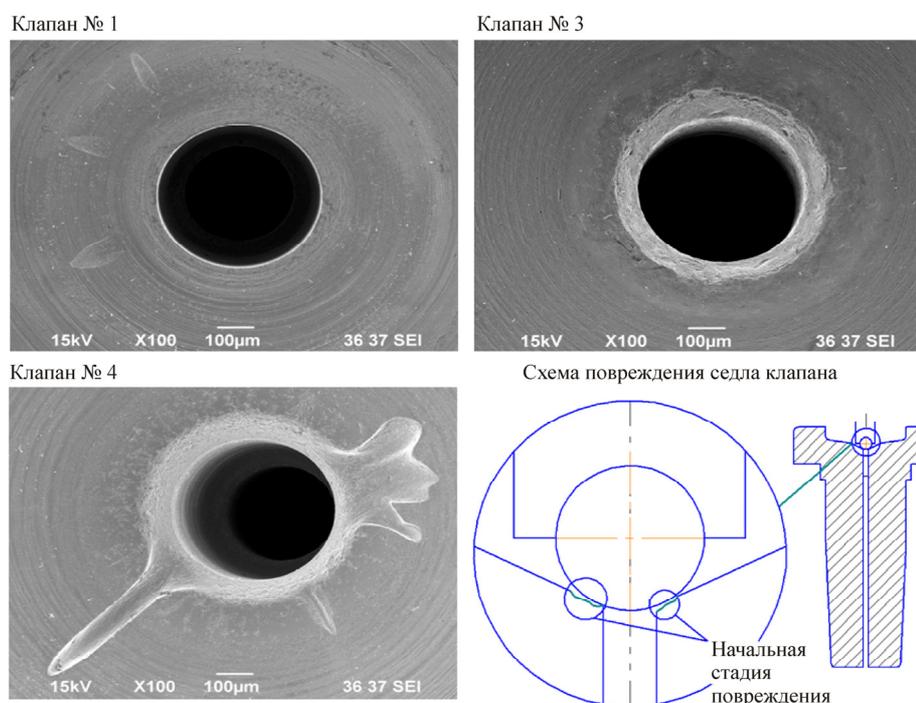


Рис. 13. Электронно-микроскопические изображения повреждений рабочих поверхностей клапанов и схема повреждения клапана

Представленные повреждения приводят к неудовлетворительной работе двигателя, как в процессе движения, так и при запуске. Также появляются существенные вибрации при холостом ходе. В итоге все это может привести к полному отказу топливной системы и дорогостоящему ремонту.

Для поддержания работоспособности топливной системы Common Rail следовало бы провести дополнительные контрольные и профилактические работы по предотвращению или устранению повреждений рабочей поверхности клапана на начальных этапах неисправностей. С целью обоснования дополнительных работ требуется более подробно изучить характер, а также закономерность проявления отказов путем разработки стенда, с помощью которого можно было бы моделировать зависимость такого параметра, как обратный переток топлива (обратка), от площади неисправности рабочей поверхности клапана.

Разработана конструкция стенда, который позволит определить влияние площади износа рабочей поверхности управляющего клапана форсунки на обратный переток топлива, что позволит получить закономерность изменения параметра технического состояния, на базе которого можно будет определить оптимальную периодичность обслуживания системы Common Rail.

Список литературы

1. Веселов Д.А. Численное исследование напряженно-деформированного состояния распылителей форсунок дизелей: дис. ... канд. техн. наук. – Ярославль, 2009. – 145 с.
2. Гребенников С.А. Снижение неравномерности работы дизельных двигателей // Вестник Саратовского государственного технического университета. Машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 71–77.
3. Кривцов С.Н., Зедгенизов В.Г. Методологические основы рационального применения методов диагностирования автомобилей с дизельным двигателем и аккумуляторной топливopодpядующей системой в технологических процессах технического обслуживания и ремонта // Иркутский национальный исследовательский технический университет. Машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 176–187.
4. Топливная аппаратура ЯЗТА: устройство диагностика, ремонт и регулировка // А.Л. Машкин [и др.]. – М.: Легион-Автодата, 2007. – 256 с.
5. Топливные насосы высокого давления распределительного типа: учеб.-практ. пособие // Л.Н. Голубков [и др.]. – М.: ПетерГранд, 2005. – 192 с.
6. Топливные системы дизелей с насос-форсунками и индивидуальными ТНВД: учеб. пособие: пер. с англ. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 48 с.
7. Уханов А.П. Теоретическая оценка влияния дизельного смесового топлива на износ плунжерных пар ТНВД // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. Машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 105–108.
8. Системы управления дизельными двигателями / пер. с нем. Ю.Г. Грудской [и др.]. – М.: Книжно-журнальное издательство «За рулем», 2004. – 480 с.
9. Катаргин В.Н. Разработка методики проектирования режимов технического обслуживания газобаллонных автомобилей, работающих на сжатом природном газе: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1987. – 288 с.
10. Microstructure and Properties of (TiB₂ + NiTi)/Ti Composite Coating Fabricated by Laser Cladding / L. Yinghua, L. Yongping, F. Hanguang, L. Jian // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – Vol. 24, no. 10. – P. 3717–3725. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-015-1668-x>. (дата обращения: 11.10.2017).
11. Osipowicz T., Kowalek S. Evaluation of modern diesel engine fuel injectors // TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2014. – Vol. 14, no. 3. – P. 83–88. – URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-ce8db12a-e7bd-4519-afba-a300ce80adb8> (дата обращения: 18.10.2017).

12. Волкова Л.Ю. Совершенствование диагностирования технического состояния форсунок тепловых дизелей: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2014. – 176 с.
13. Трибологические свойства композиционного покрытия NICRBSI - TIC, полученного лазерной наплавкой, при абразивном воздействии и трении скольжения / А.В. Макаров, Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – № 4. – С. 83–97.
14. Аксенов А.А., Худякова М.В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2015. – № 5–3 (16-3). – С. 7–10.
15. Катаргин В.Н., Кузнецов С.А., Алябьев Е.В. Особенности проявления отказов форсунок Common Rail // *Политранспортные системы. Сибирский государственный университет путей сообщения*. – 2017. – С. 419–422.

References

1. Veselov D.A. Chislennoe issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija raspylitelej forsunok dizelej [Numerical study of stress-strain state of the injector nozzles of diesel engines]. Ph. D. thesis. Jaroslavl', 2009, 145 p.
2. Grebennikov S.A. Snizhenie neravnomernosti raboty dizel'nyh dvigatelej [The reduction of the uneven operation of diesel engines]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Mashinostroenie*, 2013, no 2, pp. 71–77.
3. Krivcov S.N., Zedgenizov V.G. Metodologičeskie osnovy racional'nogo primeneniya metodov diagnostirovaniya avtomobilej s dizel'nyh dvigatelem i akumuljatornoj toplivopodajushhej sistemoj v tehnologičeskix processax tehničeskogo obsluživaniya i remonta [The methodological basis for the rational use of methods of diagnosing vehicles with diesel engine and battery fuel feeding system in the technological processes of technical maintenance and repair]. *Irkutskij nacional'nyj issledovatel'skij tehničeskij universitet. Mashinostroenie*, 2017, no. 4, pp. 176–187.
4. Toplivnaja apparatura JaZTA: ustrojstvo diagnostika, remont i regulirovka [Fuel equipment YAZTA: device diagnostics, repair and adjustment]. Ed. A.L. Mashkin. Moscow, Legion-Avtodata, 2007, 256 p.
5. Toplivnye nasosy vysokogo davlenija raspredeitel'nogo tipa [Fuel pumps of high pressure switchgear type]. Ed. L.N. Golubkov. Moscow, PeterGrand, 2005, 192 p.
6. Toplivnye sistemy dizelej s nasos-forsunkami i individual'nymi TNVD [Fuel system of diesel engines with pump-injector fuel injection pump and individual TNVD]. Moscow, Legion-Avtodata, 2005, 48 p.
7. Uhanov A.P. Teoretičeskaja ocenka vlijanija dizel'nogo smesevogo topliva na iznos plunzhernyh par TNVD [Theoretical estimation of influence of diesel mixed fuel on wear of plunger pairs of fuel injection pump TNVD]. *Vestnik Ul'janovskoj gosudarstvennoj sel'skohoz'jajstvennoj akademii. Mashinostroenie*, 2011, no 3, pp. 105–108.
8. Sistemy upravlenija dizel'nyh dvigateljami [Diesel engine control systems]. Moscow, Za rulem, 2004, 480 p.
9. Katargin V.N. Razrabotka metodiki proektirovaniya rezhimov tehničeskogo obsluživaniya gazobalonnih avtomobilej, rabotajushih na szhatom prirodnom gaze [Development of a design procedure for maintenance modes of gas-cylinder vehicles operating on compressed natural gas]. Ph. D. thesis. Moscow, 1987, 288 p.
10. Yinghua L., Yongping L., Hanguang F., Jian L. Microstructure and properties of (TiB₂ + NiTi)/Ti composite coating fabricated by laser cladding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, vol. 24, no. 10, pp. 3717–3725, available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-015-1668-x>. (accessed 11 October 2017).
11. Osipowicz T., Kowalek S. Evaluation of modern diesel engine fuel injectors. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2014, vol 14, no. 3, pp. 83–88. available at: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agroce8db12a-e7bd-4519-afb-a300ce80adb8>. (accessed 18 October 2017).
12. Volkova L.Ju. Sovershenstvovanie diagnostirovaniya tehničeskogo sostojanija forsunok teplovyh dizelej [Improvement of diagnostics of a technical condition of injectors of thermal diesel engines]. Ph. D. thesis. Omsk, 2014, 176 p.
13. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Ju., Osinceva A.L. Tribologičeskie svojstva kompozicionnogo pokrytija NICRBSI - TIC, poluchennogo lazernoj naplavkoj, pri abrazivnom vozdejstvii i trenii skol'zhenija [Tribological properties of composite coatings NICRBSI - TIC, obtained by laser cladding under abrasive action and sliding friction]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, no 4, pp. 83–97.
14. Aksenov A.A., Hudjakova M.V. Sovremennye podhody k diagnostirovaniyu dizel'nyh dvigatelej vnutrennego sgoranija [Modern approaches to the diagnosis of diesel internal combustion engines]. *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika. Voronezhskij gosudarstvennyj lesotehničeskij universitet im. G.F. Morozova*, 2015, no 5-3 (16-3), pp. 7–10.
15. Katargin V.N., Kuznecov S.A., Aljab'ev E.V. Osobennosti pojavlenija otkazov forsunok Common Rail [The characteristics of the manifestation of the failure of the Common Rail injectors]. *Politransportnye sistemy. Sibirskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija*, 2017, pp. 419–422.

Получено 08.02.2018

Об авторах

Кузнецов Сергей Андреевич (Красноярск, Россия) – аспирант кафедры «Транспорт» Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 20, e-mail: s.kuznecsov.92@mail.ru).

Катаргин Владимир Николаевич (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспорт» Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 20, e-mail: katargin@gmail.com).

Зеленкова Елена Геннадьевна (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Сибирского федерального университета (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, корп. № 3, e-mail: ezelenkova@sfu-kras.ru).

Алябьев Евгений Викторович (Красноярск, Россия) – специалист по дизельным топливным системам ОАО «Автоколонна 1967» (660048, г. Красноярск, ул. Маерчака, 53а, стр. 6, e-mail: poroh78@list.ru).

About the authors

Sergey A. Kuznetsov (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Transportation, Siberian Federal University (20, Borisov st., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation, e-mail: s.kuznecsov.92@mail.ru).

Vladimir N. Katargin (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Department of Transportation, Siberian Federal University (20, Borisova st., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation, e-mail: katargin@gmail.com).

Elena G. Zelenkova (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Design-technology Ensuring Machine-building Productions, Siberian Federal University (79, Building No. 3, Svobody av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: gzeer @ sfu-kras.ru).

Evgeniy V. Alyabyev (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Specialist in Diesel Fuel Systems, JSC "Avtokolonna 1967" (53, Building 6, Maierchak st., Krasnoyarsk, 660048, Russian Federation, e-mail: poroh78@list.ru).