

хроматограмм моторного масла, полученных методом капельной пробы / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Агропанорама. – 2025. – № 6. – С. 20-27.

7. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 6. Альтернативная бесприборная методика оценки свойств моторного масла согласно ASTM D7899 / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Агропанорама. – 2026. – № 1. – С. 28-33.

8. Ferreira, T. *ImageJ user guide / Fiji 1.46* / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.

9. Barthel, K.U. 3D-Data Representation with *ImageJ* / K.U. Barthel // *ImageJ Conference, 2006.* – Luxembourg: Luxembourg Institute of Science and Technology, 2006. – 215458973.

10. Muljosumarto, C.A Case Study Color as a Visual Language: Focused on TV Commercial / C.A. Muljosumarto // NIRMANA. – 2017. – Vol. 17, № 1 (Januari). – P. 1-9.

11. Medina, J.J. A rapid and cost-effective pipeline for digitization of museum specimens with 3D photogrammetry / J.J. Medina [et al.] // PLoS ONE. – 2020. – № 15 (8). – P. 1-14.

12. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 1. Колориметрические методы / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Агропанорама. – 2024. – № 6. – С. 29-36.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 23.03.2026

УДК 621.436

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-174-2-25-30>

АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ И ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В 6-КОНТАКТНЫХ ИНЖЕКТОРАХ *DENSO G4S* С ТЕХНОЛОГИЕЙ *I-ART*

О.О. Мухля,

аспирант каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ

Д.А. Жданко,

начальник отдела ЗАО «Струнные технологии» (*Unitsky String Technologies Inc*), канд. техн. наук, доцент

В статье представлен всесторонний анализ топливного инжектора DENSO G4S с технологией i-ART (intelligent-Accuracy Refinement Technology) и системным давлением, рассчитанным более чем на 250 МПа. На основе оригинальных исследований, включающих разбор инжектора, анализ пульсаций давления и снятие сигнала с датчика, рассматривается эволюция топливоподающей аппаратуры от механических систем к интеллектуальным устройствам с обратной связью. Особое внимание уделяется физическому принципу работы i-ART, внутреннему устройству компонентов и корреляции между сигналами давления и производительностью инжектора.

Ключевые слова: дизельный инжектор, технология i-ART, замкнутый цикл, анализ пульсаций, сигнал датчика давления, давление топлива более 250 МПа.

The article presents a comprehensive analysis of the DENSO fuel injector with i-ART (intelligent-Accuracy Refinement Technology) technology and a system pressure of more than 250 Mpa. Based on original research, including injector disassembly, pressure pulsation analysis, and sensor signal acquisition, the evolution of fuel injection systems from mechanical systems to intelligent feedback devices is examined. Special attention is given to the physical operating principle of i-ART, the internal structure of components, and the correlation between pressure signals and injector performance.

Keywords: diesel injector, i-ART technology, closed cycle, pulsation analysis, pressure sensor signal, fuel pressure of more than 250 MPa.

Введение

С момента появления системы *Common Rail* в 1995 году компания *DENSO* постоянно стремилась к повышению точности впрыска топлива. Первое поколение систем полагалось на жесткие калибровки по впрыску топлива в цилиндры, заложенные в электронный блок управления (ЭБУ). Они работали по принципу разомкнутого контура (*open-loop*), но ужесточение экологи-

ческих норм *Euro 5* и *Euro 6* потребовало принципиально нового подхода [1].

Таким подходом стала технология замкнутого контура (*closed-loop*) – *i-ART* (рис. 1), впервые представленная в 2012 году и ставшая стандартом для четвертого поколения инжекторов *G4S Common Rail*.

Главное отличие *i-ART* от предыдущих систем – наличие миниатюрного датчика давления и температуры (комбинированный сенсор) с микропроцес-



Рисунок 1. Инжектор DENSO G4S с технологией i-ART

соров, интегрированным непосредственно в корпус инжектора. Перемещение главного элемента управления (электромагнита или пьезопакета) в нижнюю часть инжектора (рис. 2) привело к еще большему быстродействию инжектора за счет уменьшенного расстояния между главными компонентами.

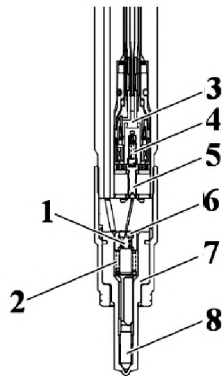


Рисунок 2. Устройство гидравлической части инжектора:

- 1 – возвратная пружина иглы распылителя;
- 2 – направляющая втулка иглы распылителя;
- 3 – электромагнит; 4 – возвратная пружина управляющего клапана; 5 – управляющий клапан;
- 6 – управляющая пластина; 7 – корпус распылителя;
- 8 – игла распылителя

В традиционной системе (без *i-ART*) ЭБУ подает команду на открытие инжектора, рассчитывая время впрыска на основе теоретической модели и показаний одного общего датчика давления в топливном рейле. Однако реальность всегда отличается от модели из-за износа, допусков изготовления или изменения характеристик топлива.

Физической основой работы любого инжектора является истечение жидкости через отверстия распылителя. Объемный расход топлива (мм³/с) описывается уравнением:

$$\dot{V} = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода (учитывает гидравлические потери);

A – суммарная площадь проходных сечений распылителя, мм²;

ΔP – перепад давления на игле, МПа;

ρ – плотность топлива, кг/м³.

Технология *i-ART* превращает инжектор из пассивного исполнительного устройства в активный элемент с собственной системой сбора данных (рис. 3).

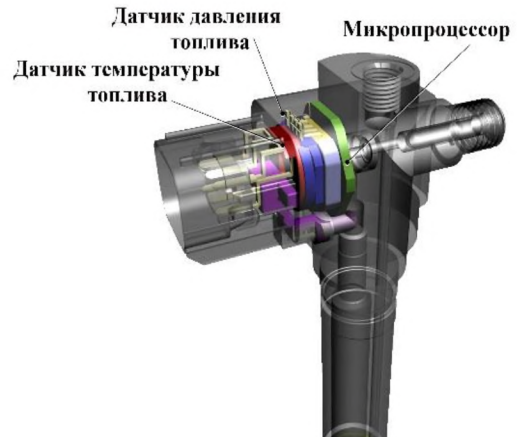


Рисунок 3. Устройство инжектора

В момент впрыска топлива датчик измеряет реальное падение давления и передает эти данные в микропроцессор, который по сети *LIN* поддерживает постоянный обмен данными с ЭБУ (рис. 4). Система сравнивает фактическую «характеристику впрыска» с эталонной и корректирует управляющий сигнал для последующих циклов. Это позволяет компенсировать износ и обеспечивать стабильную дозировку топлива на протяжении всего срока службы с точностью коррекции момента впрыска до 10 микросекунд.

Вопросы проектирования, расчета и методы иссле-



Рисунок 4. Технология работы инжектора с замкнутым циклом

дования процессов топливоподачи современных аккумуляторных систем рассматривались в научных трудах ученых МГТУ им. Баумана, МАДИ, МАМИ, БНТУ, БГАТУ, БашГАУ, Южно-Уральского ГУ, Владимирского ГУ, ХНАДУ, концернами «ЯЗДА», «АЗПИ», Bosch, Denso, Delphi, Siemens, Caterpillar и многих других. Это нашло отражение в работах Р.М. Баширова, А.Н. Врублевского, И.И. Габитова, Л.В. Грехова, Л.Н. Голубкова, П.В. Душкина, М.В. Мазинга, А.В. Неговора, Ф.И. Пинского, Ю.Д. Погуляева, Г.Г. Тер-Мкртчяна, А.А. Прохоренко, П.В. Курманова, N. Cavina, P. Beirer, L. Guzzella, F. Payri, J. Wang, A. Takamura, S. Fukushima, Yong-Kwam Kim, Y. Hayakawa и других [1-9].

Цель данной статьи – анализ пульсаций давления и обратной связи в 6-контактных инжекторах *DENSO G4S* с технологией *i-ART*.

Объектом исследования является топливная система *COMMON RAIL* дизельного двигателя с инжектором *DENSO G4S*.

Основная часть

В рамках нашей работы был разобран инжектор *DENSO G4S i-ART* четвертого поколения. Визуальный и структурный анализ позволил выделить ключевые зоны, отвечающие за «интеллектуальность» системы.

В верхней части инжектора обнаружен миниатюрный блок (рис. 5), объединяющий сенсор давления и микропроцессор (*memory IC*). Наличие памяти критически важно, так как именно туда записываются данные о корректировках, что делает инжектор уникальным устройством, которое может быть переустановлено на другой цилиндр без потери калибровочных данных.

Конструкция гидравлической части сохраняет классические элементы: управляющий элемент (соленоидный или пьезоэлектрический), гидравлический клапан, проставки и распылитель с иглой (рис. 6). Однако геометрия каналов, подвода топлива к датчику оптимизированы для минимизации демпфирования сигнала.

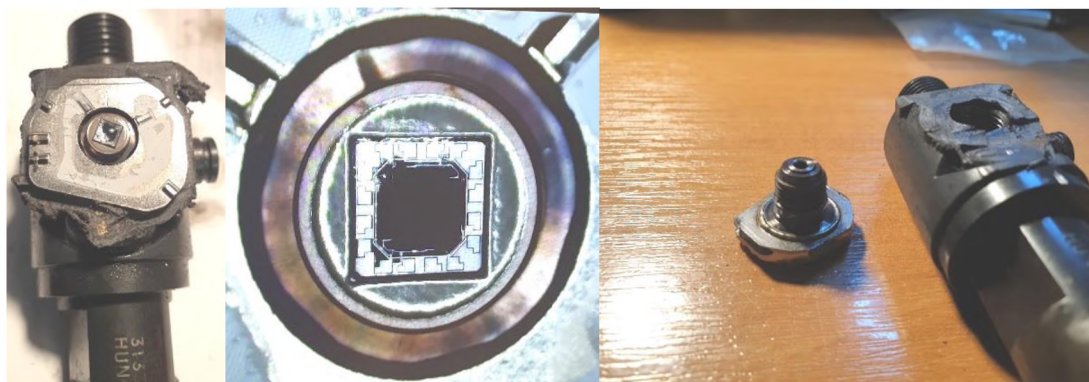
На рисунке 7 приведено устройство нижней части инжектора, в том числе с 200-кратным увеличением под микроскопом, элементы износа



Рисунок 6. Элементная база инжектора

подвижных сопрягаемых деталей, шарик запорного клапана с изношенным посадочным местом.

Так как основная цель исследования заключалась в получении экспериментальных данных на диагностическом стенде, исследования инжектора были проведены в динамике. Для анализа использовались осциллограммы, снятые с датчиков давления, расположенных в рейле и в инжекторе. Измерения проводились при системном давлении – 170 МПа и длительности управляющего импульса – 1080 мкс.



а

б

в

Рисунок 5. Устройство верхней части инжектора:
а – общий вид; б – 200-кратное увеличение под микроскопом микропроцессора;
в – резьбовое соединение датчика в корпусе для высокого давления

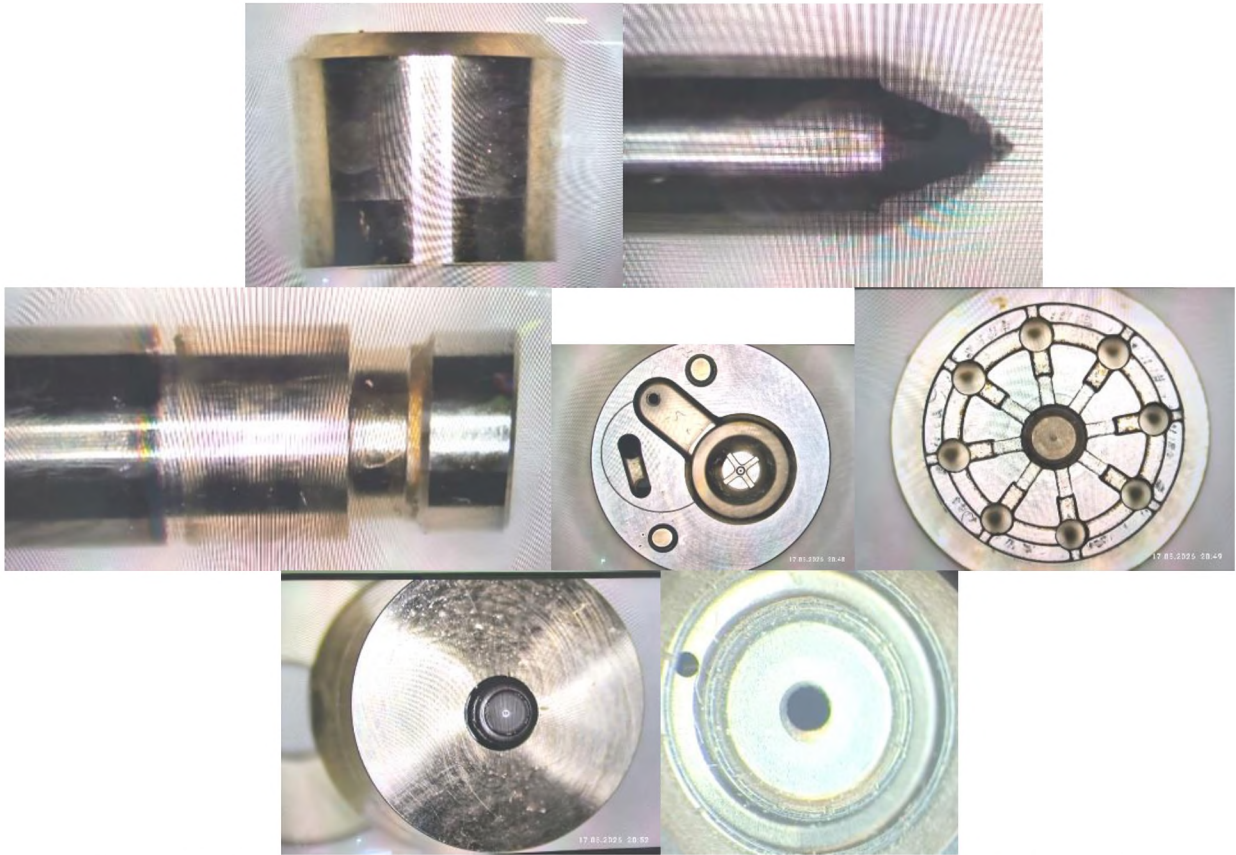


Рисунок 7. Устройство нижней части инжектора, в том числе с 200-кратным увеличением под микроскопом

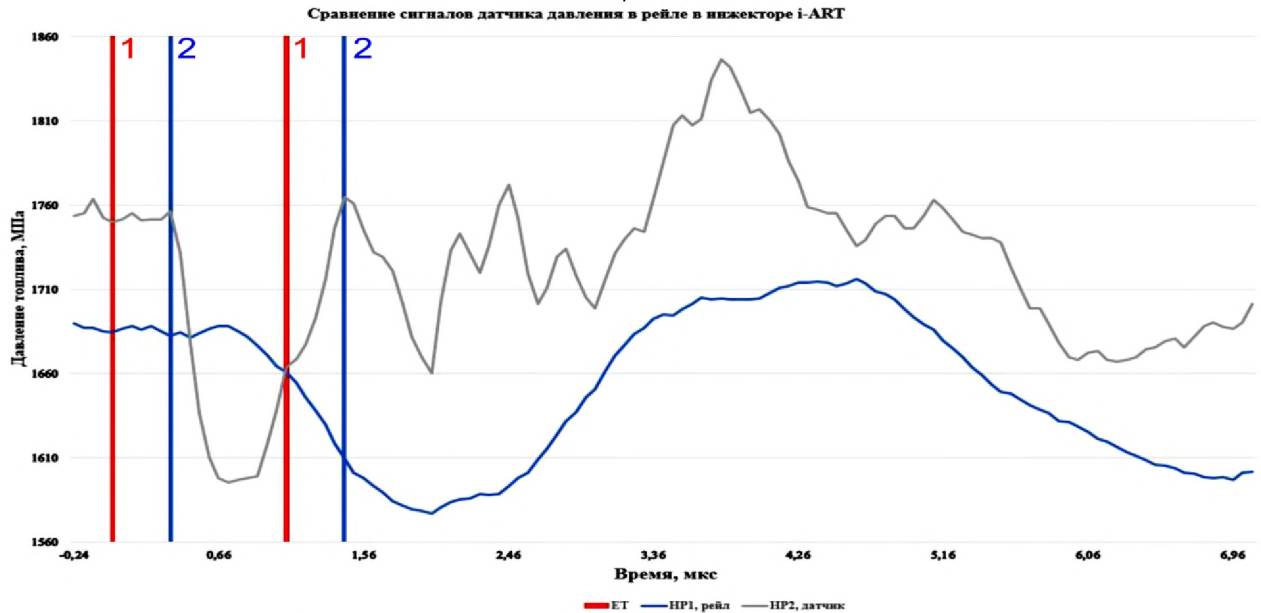


Рисунок 8. Осциллограммы давления в рейле и в датчике:
 ET – время впрыска; NP1 – давление в рейле; NP2 – давление в датчике; 1-1 – начало и окончание впрыска;
 2-2 – начало и окончание физического впрыска в топливopриемную камеру стенда

На рисунке 8 приведены сравнительные осциллограммы с датчика давления в рейле и с датчика давления в инжекторе. Длительность впрыска (ET)

составляет 1080 мкс, системное давление – 170 МПа. Начало впрыска определялось по сработке датчика впрыска (RT) стенда.

Как видно из осциллограмм, датчик давления впрыска в инжекторе показывает просадку давления, обусловленную поднятием иглы распылителя, гораздо быстрее, чем датчик, размещенный в топливном рейле. По его показаниям можно не только определить начало и окончание впрыска, но и рассчитать количество топлива практически для каждого впрыска. Имея микропроцессор в инжекторе, можно вносить корректировки в режиме реального времени (в следующем цикле впрыска) в длительность и момент впрыска. Это позволяет более быстро и точно оптимизировать работу инжектора.

Цикловая подача топлива инжектором ($\text{мм}^3/\text{такт}$) рассчитывается по формуле:

$$V_{inj} = \frac{V_0}{E} \Delta P_{drop} \sqrt{\frac{P_{rail}}{P_0}}, \quad (2)$$

где V_0 – объем полости высокого давления в инжекторе, мм^3 ;

E – модуль объемной упругости топлива, МПа;

ΔP_{drop} – амплитуда провала давления, МПа;

P_{rail} – давление в рейле, МПа;

P_0 – эталонное давление (обычно 100 МПа).

Также была получена кривая характеристики впрыска инжектора на давлении 200 МПа, изменяя длительность впрыска от 50 до 1250 мкс. Показания датчика быстродействия впрыска RT , установленного в приемной камере инжектора на стенде, фиксировались. Построена линия тренда линейной функции с формулой и определен коэффициент детерминации (рис. 9) [10].

Построенная кривая впрыска почти не имеет отклонений согласно линии тренда. Коэффициент детерминации $R^2=0,9977$. Уравнение линии тренда $y=4,4915x-4,8792$.

Так как кривая впрыска практически не имеет отклонений, то это дает возможность более точно оценивать состояние инжектора в текущем моменте и прогнозировать состояние с учетом дальнейшего износа.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9977$ свидетельствует о высокой степени линейности характеристики впрыска во всем исследованном диапазоне, что подтверждает эффективность замкнутого контура управления инжектора.

Коэффициент детерминации рассчитывается по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

где y_i – экспериментальные значения цикловой подачи;

\hat{y}_i – расчетные значения по линии тренда ($y = 4,4915x - 4,8792$);

\bar{y} – среднее арифметическое экспериментальных значений;

n – количество измерений.

Понимание физики работы технологии *i-ART* крайне важно для специалистов по ремонту дизельной аппаратуры. Хотя компания *DENSO* заявляет о неремонтопригодности инжекторов четвертого поко-

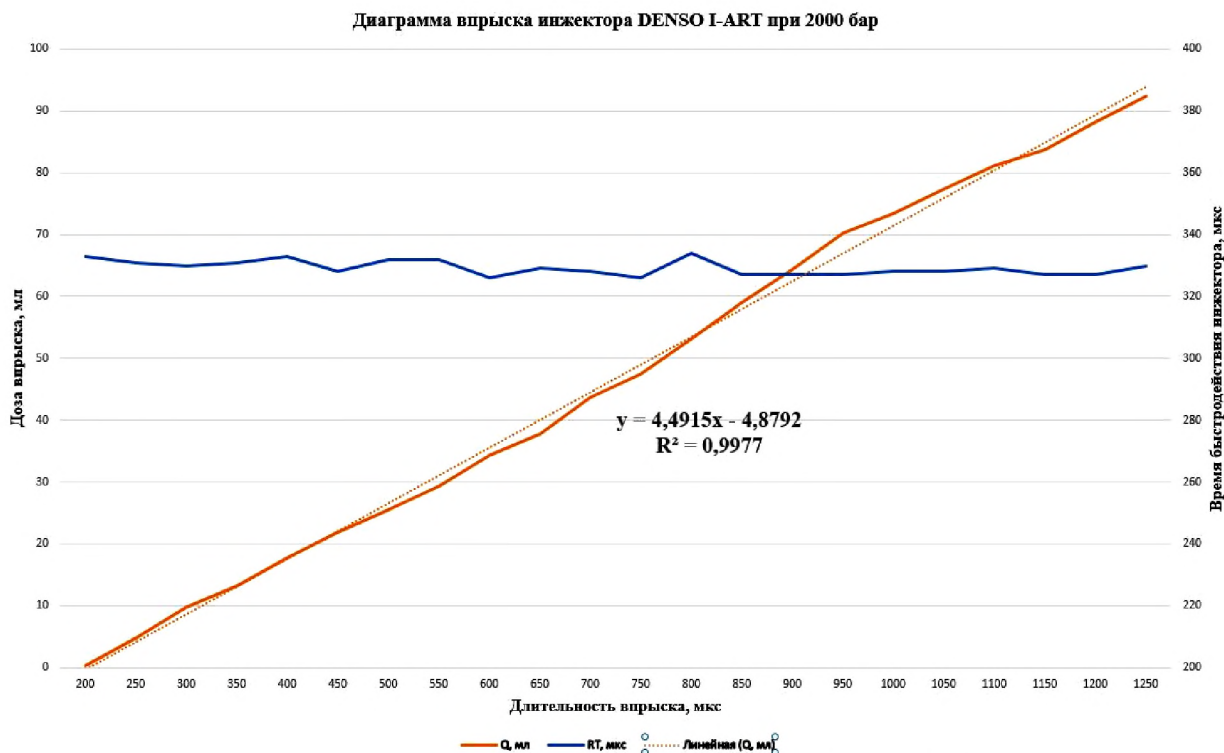


Рисунок 9. Диаграмма впрыска инжектора при давлении – 2000 бар

ления, однако на рынке появляются решения для их восстановления.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что при замене механических частей (распылитель, управляющий клапан) критически важно сохранить исходные данные в памяти датчика или иметь возможность их перезаписи. Игнорирование этого приводит к рассогласованию между реальной механикой и «прошитыми» в память характеристиками, что сводит на нет преимущества замкнутого цикла.

Инжектор является сложной мехатронной системой, превращающей двигатель внутреннего сгорания в объект с функциями самодиагностики. Исследования пульсаций и производительности наглядно демонстрируют, что сигнал давления несет в себе исчерпывающую информацию о происходящих в нем микропроцессах.

Дальнейшее развитие данных систем будет идти по пути увеличения скорости обработки данных и использования алгоритмов машинного обучения для предиктивной аналитики, что позволит прогнозировать отказ элементов топливной системы задолго до появления первых симптомов неисправностей.

Полученные результаты могут использоваться при разработке методики прогнозирования остаточного ресурса инжекторов и технологии их восстановления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Common Rail System (CRS) Service Manual / Issued: April 2015. – Service Division, DENSO CORPORATION 1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi-ken, 448-8661, Japan. – 63 с.
2. SERVICE BULLETIN, FUEL INJECTION PUMP NEW PRODUCT, TOYOTA 4th Generation i-ART Common Rail System / Issued: April 2015, – Ser-

vice Division, DENSO CORPORATION 1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi-ken, 448-8661, Japan. – 63 P.

3. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: ЗАО «Легион-Автодата», 2004. – С. 44

4. Тышкевич, Л.Н. Анализ методов и средств для диагностирования форсунок системы питания «COMMON RAIL» / Л.Н. Тышкевич, Б.В. Журавский // NovaInfo.Ru. – 2017. – № 65. – С. 22-26.

5. Электронное управление дизельными двигателями: учеб. пособие. (перевод с английского). – ЗАО «Легион-Автодата». М.: 2010. – 96 с.

6. Хаширов, Ю.М. Улучшение показателей работы дизелей сельскохозяйственного назначения путем создания и внедрения системы эталонирования дизельной топливной аппаратуры в ремонтно-обслуживающем производстве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Хаширов Юрий Мусарбиевич. – Нальчик, 1998. – 350 с.

7. Bosch Dianostics Soft. ESI [tronic] Automotive. Diagnosis and Technics: A, C, D, E, F, K, M, P, W. – Robert Bosch GmbH. Bosch Automotive Aftermarket. D-76225 Karlsruhe, 2005.

8. Жданко, Д.А. Оценка технического состояния форсунок топливной системы COMMON RAIL на примере трактора «БЕЛАРУС» с двигателем Д-243.5S3V / Д.А. Жданко, О.О. Мухля // Агропанорама. – 2021. – № 5 (147). – С. 34-39.

9. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники: монография / В.П. Миклуш [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – 392 с.

10. Курицкий, Б.Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0. / Б.Я. Курицкий. – СПб.: BHV, 1997. – 384 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 08.04.2026

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 1-е полугодие 2026 года: для индивидуальных подписчиков - 61,68 руб., ведомственная подписка - 63,63 руб.