

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК CRIN2 ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.Е. Тарасенко,

зав. каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

О.О. Мухля,

аспирант каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ

А.В. Михолап,

студент факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ

В работе исследованы статистические данные по отказам топливных форсунок дизельных двигателей и закономерности процесса изнашивания наиболее ответственных деталей топливных форсунок ведущих мировых производителей. Выполнен анализ характера повреждений значительной выборки составляющих компонентов топливных форсунок, управляемых электромагнитным клапаном или пьезоэлектрическим элементом. Представлены результаты дефектации и диагностирования форсунки CRIN2 дизеля трактора «Беларус-3522.5» на специализированном диагностическом стенде.

Ключевые слова: система питания, форсунка, давление, топливо, распылитель, клапан, изнашивание, работоспособность.

The paper examines statistical data on failures of diesel engine fuel injectors, patterns of wear of the most critical parts of fuel injectors from leading global manufacturers. Analysis of the nature of damage to a significant sample of fuel injector components controlled by an electromagnetic valve or a piezoelectric element is carried out. The results of defect detection and diagnostics of the CRIN2 injector of the BELARUS-3522.5 tractor diesel engine on a specialized diagnostic stand are presented.

Key words: fuel system, injector, pressure, fuel, atomizer, valve, wear, performance.

Введение

В настоящее время наибольшее распространение в автотракторных дизелях получили аккумуляторные системы питания топливом с электронным управлением типа Common Rail (CR), которые обеспечивают высокое давление впрыска топлива (160 МПа и выше). Современные системы питания CR представляют собой высокотехнологичные продукты и состоят из контуров низкого и высокого давления. Одним из основных элементов контура высокого давления системы питания CR автотракторных двигателей является форсунка (инжектор) – точное дозирующее устройство, подверженное различным видам изнашивания в процессе эксплуатации [1]. Форсунка самым непосредственным образом влияет на процесс сгорания в дизельном двигателе. В зависимости от системы впрыска различают форсунки со штифтовыми распылителями, применяемыми в форкамерных двигателях, и с дырчатыми распылителями, применяемыми в двигателях с непосредственным впрыском топлива (DI – direct injection) [2]. В зависимости от способа управления открытием распылителя различают стандартные форсунки (с одной пружиной), форсунки двухпружинные, форсунки с датчиком положения иглы распылителя и форсунки, управляемые

электромагнитным клапаном или пьезоэлектрическим элементом. В форсунках с электромагнитным управлением (CRIN2 и другие) топливо впрыскивается через распылитель, являющийся прецизионным, неразделимым узлом форсунки. Это свидетельствует о том, что детали распылителя, в частности игла и корпус, изготовлены с высочайшей точностью (зазор между иглой и корпусом в зависимости от типа распылителя составляет от 0,002 мм до 0,004 мм) [2].

Рядом весомых преимуществ обладают пьезоэлектрические форсунки. У них высокая скорость срабатывания клапана, что позволяет совершать многократный впрыск за один цикл подачи топлива в цилиндр (к примеру, у насос-форсунок модели PPD 1.1 с пьезоэлектрическим клапаном, которые устанавливаются на дизельные двигатели компании Volkswagen [3], различают запальную дозу, основную и две дополнительные дозы при необходимости). В результате качество смеси топлива и воздуха улучшается, растет мощность и эффективность работы двигателя. Так, разработанная совместно с фирмой Siemens VDO Automotive AG (Штольберг, Саксония) вместо насос-форсунки с электромагнитным клапаном (PDE-P2) новая насос-форсунка с пьезоэлектрическим клапаном (модель PPD 1.1) позволила повысить быстродействие клапана приблизительно в четыре раза [3].

При этом значительно были улучшены управляемость и смесеобразование, повышен КПД привода форсунки, а также снижен шум, производимый при работе топливной аппаратуры.

Целью настоящей работы является исследование состояния топливных форсунок CRIN2 и определение характера повреждений наиболее ответственных их деталей по результатам дефектации и тестирования форсунки на специализированном диагностическом стенде.

Основная часть

Работоспособность форсунок в значительной мере определяется состоянием их прецизионных узлов [4], которые работают при высоких давлениях в достаточно тяжелых условиях. Так, при попадании частицы абразива различного происхождения и твердости в зону контакта шарикового запорного клапана форсунки велика вероятность образования борозды (риски) на седле клапана, по которой сможет перетекать топливо (яркий пример гидроабразивного изнашивания). Так как седло запорного клапана со стороны аккумулятора (рейла) постоянно находится под рабочим давлением, то в дальнейшем это приводит к росту интенсивности перетекания топлива и увеличению зазора в прецизионной паре.

Практика использования современных форсунок, управляемых электромагнитным клапаном или пьезоэлектрическим элементом, а также комплекс выполненных исследований по определению их технического состояния свидетельствуют о том, что определяющими факторами обеспечения работоспособности форсунок являются – влияние условий эксплуатации, концентрация абразивных частиц и воды в топливе.

Как известно, конструкция сопряжения оказывает влияние на распределение износа по поверхности трения и на характер взаимодействия изношенных поверхностей. Во многих случаях влияние конструктивных факторов на форму изношенной поверхности проявляется в большей степени, чем влияние закономерностей изнашивания материалов [5, 6].

Достаточно содержательный перечень наиболее

частых повреждений составляющих элементов форсунок содержится в каталоге повреждений Bosch [7], который включает описание 48 случаев повреждений наиболее ответственных элементов конструкции форсунок. Материал содержит иллюстрации к каждому случаю описываемых повреждений, а также перечень возможных причин перехода элементов форсунок в неработоспособное состояние (рис. 1-3). Описаны случаи повреждения встроенного топливного фильтра (его коррозия), износ уплотнительного кольца высокого давления (HD), а также наличие чужеродных частиц во внутренних полостях форсунок. Нарушение процесса смесеобразования, наличие примесей в топливе в итоге приводят к отложению алюминия на корпусе распылителя. Преобладающими видами повреждений, вызванными наличием абразивных частиц в топливе и в целом недостаточным уровнем фильтрации топлива, согласно данному каталогу, являются: неравномерный односторонний износ иглы распылителя, тепловые деформации корпуса распылителя вследствие термических перегрузок, а также износ седла шарикового клапана (рис. 1, 2).

В работах [4; 8] приведено сравнение статистических данных по отказам электрогидравлических форсунок системы CR фирмы R. Bosch. В разрезе данных компании «Carwood motors units limited» (г. Бирмингем, Великобритания), Отдела качества Дизель Центра компании Bosch (г. Хомбург, Германия), а также ООО «Башдизель» (г. Уфа, Россия) выделены восемь наиболее распространенных групп повреждений элементов топливных форсунок. При этом наибольшее число отказов приходится на четыре вида повреждений: нарушение гидроплотности запорного клапана (свыше 45 %), нарушение гидроплотности распылителя или заклинивание иглы (в среднем 40 %), прорыв уплотнения шайбы (в среднем 23 %) и износ штока управляющего клапана (5-10 %). Значительно реже встречаются случаи выхода из строя электромагнита форсунки, повреждения корпуса и другие. Наши дальнейшие исследования состояния топливных форсунок различной наработки в целом подтвердили характер интенсивности поврежде-

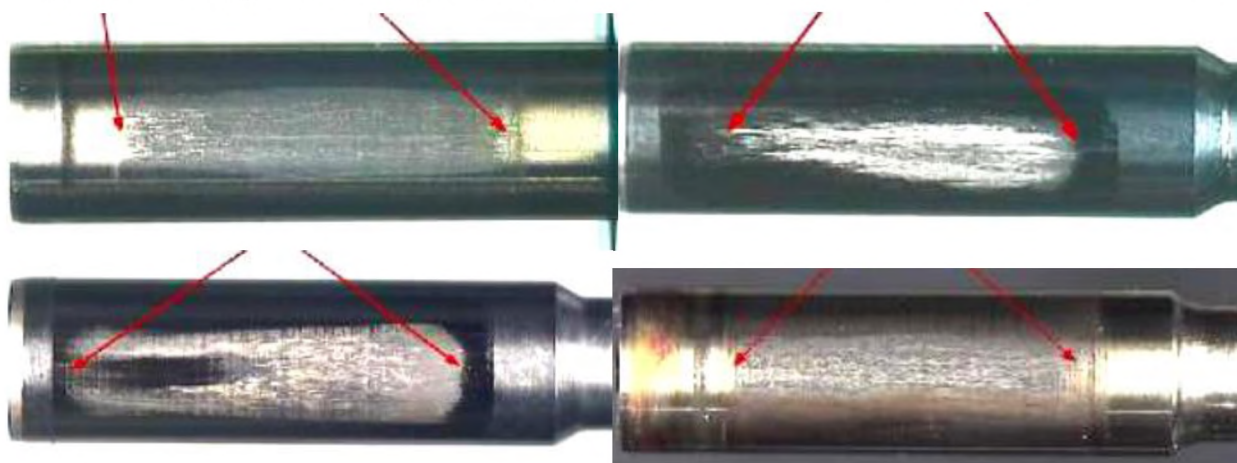


Рисунок 1. Локальные зоны неравномерного одностороннего износа корпуса иглы распылителя

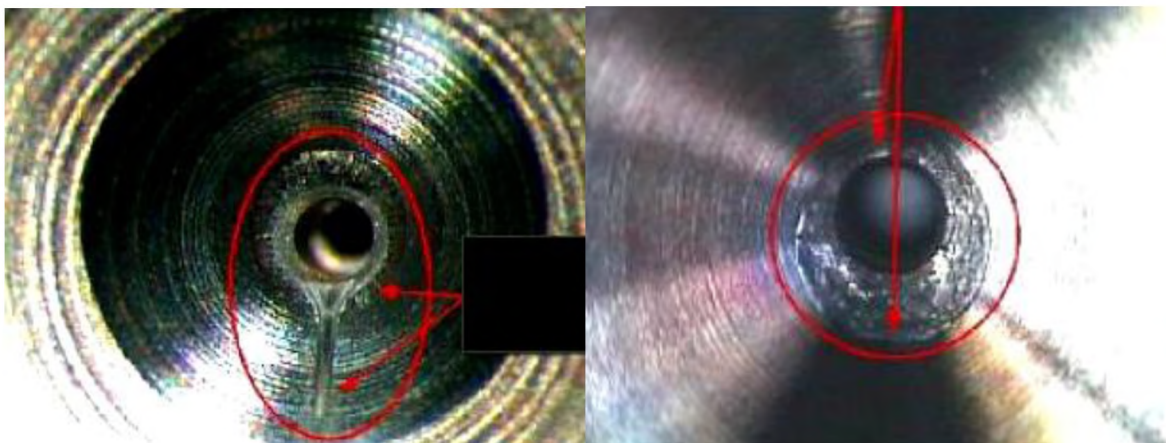


Рисунок 2. Последствия гидроабразивного, эрозионного и кавитационного изнашивания седла шарикового клапана форсунки

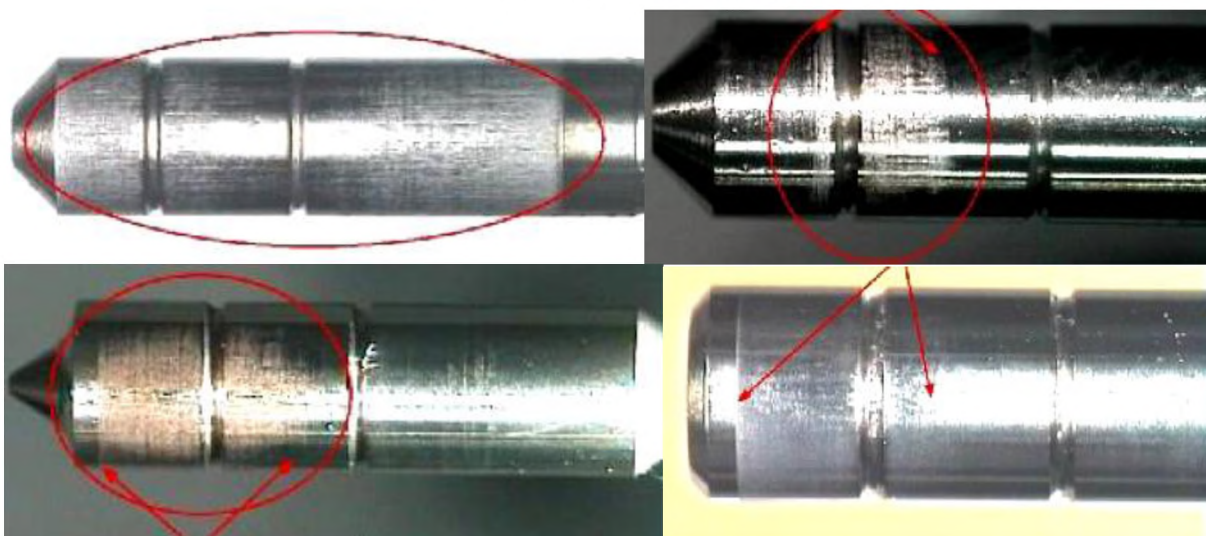


Рисунок 3. Круговой износ на штоке управляющего клапана форсунки

ний составляющих их компонентов.

Анализ характера повреждений значительной выборки составляющих компонентов форсунок, управляемых электромагнитным клапаном или пьезоэлектрическим элементом, выполненный в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем Белорусского государственного аграрного технического университета, и анализ литературных данных, а также каталога повреждений компании Bosch, позволили сформировать перечень основных повреждений и дефектов электромагнитных форсунок [6]:

- износ и засорение управляющего клапана;
- износ запорного конуса и корпуса распылителя;
- заклинивание (зависание) иглы распылителя;
- гидроабразивное, эрозионное и кавитационное изнашивание запорного шарикового клапана и его седла (глубина каверн не более 0,01 мм), в результате чего увеличивается ход клапана, нарушается герметичность;
- закоксовывание сопловых отверстий распылителя, вследствие чего наблюдается большая неравно-

мерность подачи топлива, образуется нагар на корпусе распылителя;

- задиры и заклинивание якоря форсунки (анкера);
- деформация резьбы и износ торцевой поверхности гайки распылителя, вследствие чего происходит нарушение герметичности по торцевой поверхности распылителя и корпуса;
- замыкание витков, короткое замыкание или обрыв обмотки электромагнитов управления клапанами (может быть межвитковое замыкание), вследствие чего наблюдается нестабильная работа соленоида электромагнитного клапана;
- изменение формы уплотнительных колец.

Серьезную проблему представляет сохранение характеристик и свойств распылителя форсунки в эксплуатации, так как из-за его износа может измениться диаметр запорного конуса, подъем иглы и произойдет снижение давления открытия, что приведет к появлению крупных капель [6; 10]. Изменение площади запорного конуса иглы приводит к уменьшению быстродействия распылителя.

Результаты диагностирования форсунки CRIN2 дизеля трактора «Беларус-3522.5»

Для исследования взята топливная форсунка CRIN2 (каталожный номер 0445120074, заводской – 04902525) с электромагнитным управлением (рис. 4) дизеля «Deutz» TCD 7,8 L06, который устанавливался на отечественные колесные тракторы общего назначения с колесной формулой 4К4 «Беларус-3522.5». В качестве объекта настоящего исследования данная форсунка выбрана по причине продолжительной неустойчивой работы дизеля и ряда замечаний оператора трактора «Беларус-3522.5», который имел общую наработку порядка 1000 ч и находился на гарантийном обслуживании в эксплуатации под наблюдением специалистов ГУ «Белорусская МИС».

С целью определения технического состояния компонентов топливной форсунки CRIN2 с электромагнитным управлением (рис. 5) выполнены операции дефектации отдельных, наиболее ответственных ее деталей, и непосредственно тестирование данной форсунки на специализированном стендовом оборудовании с использованием тестов проверки ее работоспособности.

Основными диагностическими (ресурсными) параметрами топливных форсунок являются значения расхода тестовой жидкости на подаче и обратном сливе ($\text{см}^3/\text{импульс}$), которые определяются при работе специализированного диагностического стенда не менее чем на пяти режимах нагружения. Таковыми режимами выступают – режим работы форсунки при максимальной нагрузке и давлении 160 МПа (1600 бар), режим предварительного впрыска топлива и холостого хода и проверка соответствия экологическим нормам.

Для определения технического состояния форсунки CRIN2 (0445120074) системы CR выполнено ее диагностирование на специализированном стендовом оборудовании (модернизированный стенд NTS845 в комплекте с приборами CR-2v1.0 и 4-х канальным FM-8). Использовались тесты проверки работоспособности форсунки при статическом и динамическом (изменяемом) давлении топлива. Результаты диагностирования представлены на рисунке 6.

Анализ результатов тестирования показал:

– тест-план Leak test (P – 160 МПа, проверка на герметичность, n – 0 мин^{-1} , режим статического давления): расход топлива через клапан обратного слива (мультипликатор) составляет $276,5 \text{ см}^3$ при норме не более 70 см^3 (на 1000 импульсов);

– тест-план VL1 (P – 160 МПа, проверка при максимальной нагрузке, n – 400 мин^{-1} , режим динамического давления): подача топлива в магистраль высокого давления составляет $242,5 \text{ см}^3$ (на 1000 импульсов) при норме 178,5-198,9, слив топлива в магистраль обратного слива составляет $756,0 \text{ см}^3$ при норме не более 80 см^3 ;

– тест-план VL2 (P – 120 МПа, проверка при измененной нагрузке, n – 400 мин^{-1} , режим динамического давления): подача топлива в магистраль высокого давления составляет $243,3 \text{ см}^3$ (на 1000 импульсов) при норме 185,8-206,6 см^3 . При этом функция отображения обратного слива при тестировании не включена;

– тест-план EM (P – 70 МПа, проверка при средней нагрузке, n – 1000 мин^{-1} , режим динамического давления): подача топлива в магистраль высокого давления составляет $9,30 \text{ см}^3$ (на 1000 импульсов) при норме не более $11,5 \text{ см}^3$ (функция отображения обратного слива при тестировании не включена);



Рисунок. 4 Составляющие компоненты топливной форсунки CRIN2 (0445120074)

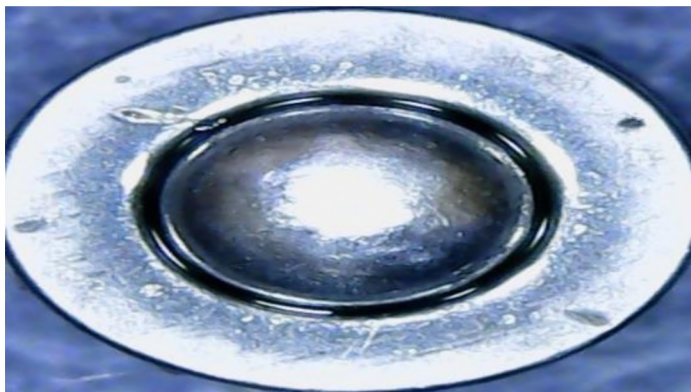


Рисунок 7. Поверхность шарика клапана форсунки (нормальное состояние)

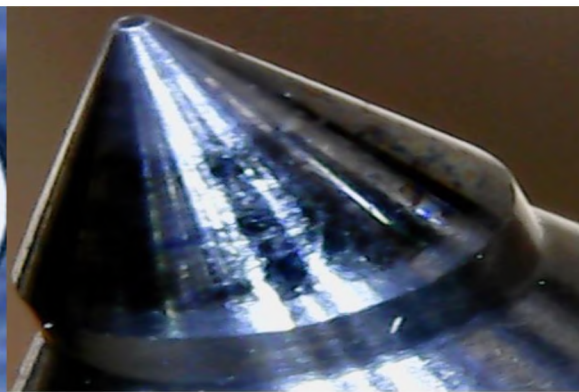


Рисунок 8. Конус иглы форсунки с участками различных оттенков (нормальное состояние)

2. Седло шарика управляющего клапана (рис. 2) имеет небольшие раковины (выемки), которые не могут обеспечить герметичность при прилегании шарика. Возможная причина их появления – кавитационное и гидроабразивное изнашивание.

3. На фаске (заплетнике) иглы распылителя (рис. 8) имеются участки поверхности различных оттенков. Предположительная причина этого – локальное кавитационное и гидроабразивное изнашивание DLC покрытия. Количество следов изнашивания, их размеры не являются критическими и пара (игла и корпус распылителя) может быть допущена к эксплуатации.

Указанные повреждения и дефекты элементов форсунки могут являться причиной повышенного расхода топлива и увеличения дымности отработавших газов. Значение расхода топлива в магистрали обратного слива, равное $756,0 \text{ см}^3$, и зафиксированное при тестировании форсунки, является критическим, запуск дизеля при этом становится невозможным.

На основании проведенных работ, анализа и оценки технического состояния форсунки CRIN2 (типовой номер 0445120074) системы CR с целью восстановления требуемой работоспособности осуществлена замена управляющего клапана и шарика, а также ремонтного комплекта (резиновых и уплотнительных колец), выполнены регулировочные работы.

Следует считать обязательным комплекс работ, выполняемых при каждом выходе из строя форсунки подобного уровня:

- проведение замены напорного штуцера (F 00R J01457) подвода топлива от топливного рейла к форсунке;
- проведение внеочередной замены топливного фильтра (с мойкой корпуса топливного фильтра);
- выполнение мойки топливного бака с продувкой всех топливных магистралей сжатым воздухом.

Работающие узлы и агрегаты топливной аппаратуры дизеля эмитируют широкий спектр сигналов, в котором необходимо выделить сигнал каждой ответственной пары трения, определить закономерности формирования каждого из них. Для достижения высокой достоверности данных по определению технического состояния составляющих компонентов топ-

ливных форсунок CRIN2 (форсунка 0445120074) в дальнейшем определен вибрационный метод диагностирования.

Заключение

Проведены исследования статистических данных по отказам топливных форсунок дизельных двигателей и закономерностей процесса изнашивания наиболее ответственных деталей топливных форсунок ведущих мировых производителей (Bosch, Siemens и др.). Выполнен анализ характера повреждений значительной выборки составляющих компонентов (иглы распылителя, седла шарикового клапана, штока управляющего клапана) топливных форсунок, управляемых электромагнитным клапаном.

Детально исследовано состояние форсунки CRIN2 с электромагнитным управлением дизеля «Deutz» TCD 7,8 L06.

Установлено, что технические характеристики рассматриваемой форсунки отличаются от регламентированных предприятием-изготовителем. На определенных режимах она является неработоспособной. Основная причина этого заключается в неисправности управляющего клапана (мультипликатора).

Результаты расширенного исследования составляющих компонентов форсунки CRIN2 с использованием электронного микроскопа и специализированного диагностического стенда NTS845 в комплекте с приборами CR-2v1.0 и 4-канальным FM-8 позволили определить фактическое состояние наиболее ответственных деталей форсунки и выполнить мероприятия по обеспечению ее работоспособности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасенко, В.Е. Исследование электромагнитного инжектора поколения CRI 2-25NC с меньшими токами управления / В.Е. Тарасенко, О.О. Мухля, А.А. Жешко, А.П. Сырбаков // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 1. – URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/1/st_131.pdf.

2. Рекомендации для дизель-сервисов. Обслуживание форсунок дизельных двигателей / Под редакцией Тадеуша Янишевского. – WUZETEM, Warszawa. – 48 с.

3. Пособие по программе самообразования 352. Насос-форсунка с пьезоэлектрическим клапаном. Конструкция и принцип действия / Service Training. – 23 с.

4. Габитов, И.И. Анализ неисправностей электрогидравлических форсунок типа Common Rail / И.И. Габитов, А.Р. Валиев, Р.А. Вахитов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – Вып. 11. – С. 41-43.

5. Щурин, К.В. Надежность мобильных машин: учебник для вузов / К.В. Щурин, В.Е. Тарасенко. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 400 с.

6. Тарасенко, В.Е. Результаты диагностирования форсунки CRIN2 дизеля трактора «Беларус-3522.5» / В.Е. Тарасенко, О.О. Мухля, М.Д. Бобриков, Д.Д. Попека // Проблемы и перспективы развития инженерной науки в АПК : материалы Междунар. науч.-практич. конф., посвященной 65-летию работы кафедры эксплуатации и ремонта машин инженерного факультета и 90-летию д.т.н., профессора, почетного работника высшего профессионального образо-

вания Российской Федерации Зорина Александра Ивановича, Ижевск, 13–15 февраля 2024 г. – Ижевск: УдГАУ, 2024. – С. 47-53.

7. Каталог поврежденных электромагнитных форсунок CR Bosch. – URL: https://cdi36.ru/sale/katalog_povrezhdeniy_elektromagnitnykh_forsunok_cr_bosch. – (дата обращения: 31.01.2024).

8. Валиев, А.Р. Повышение эффективности ремонта электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливных систем автотракторных дизелей: дисс.... канд. техн. наук: 05.20.03 / А.Р. Валиев. – Уфа, 2012. – 163 с.

9. Diesel Catalog. – URL: http://dieselscatalog.online/ru/bosch/list_for_index/common_rail_injector_bosch.html. – (дата обращения: 31.01.2024).

10. Якубович, А.И. Экономия топлива на тракторах: монография / А.И. Якубович, Г.М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. – Минск: БНТУ, 2009. – 229 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 06.12.2024

“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).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 1-е полугодие 2025 года: для индивидуальных подписчиков - 48,39 руб., ведомственная подписка - 50,91 руб.