

ВЛАСОВ Дмитрий Борисович



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕСТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ
АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства
технического обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Троицк – 2020

Работа выполнена на кафедре «Эксплуатация машинно-тракторного парка, и технология и механизация животноводства» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Гриценко Александр Владимирович

Официальные оппоненты: **Габдрафиков Фаниль Закариевич,**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Теплоэнергетика и физика»
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
аграрный университет»

Ольшевский Сергей Николаевич,
доктор технических наук, директор
ООО «Редсистемс»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Казанский государственный
аграрный университет»

Защита состоится 29 декабря 2020 г., в 9.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.066.02 на базе ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет».

Автореферат разослан 9 ноября 2020 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <http://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ: <http://юургау.рф>.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Запевалов
Михаил Вениаминович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электрический топливный насос (ЭТН) – это один из возможных источников неисправностей конструкции топливной системы. На топливную систему по разным данным приходится 25...50 % всех неисправностей. Наиболее частой причиной ухудшения работоспособности топливной системы и, в частности, отказа топливного насоса является загрязнение крупными или мелкими частицами топлива, а также износ конструктивных элементов ЭТН. До 50 % отказов системы питания (СП) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) происходят в результате загрязненного или смешанного с водой топлива. Они предопределили следствие: загрязнение фильтров, снижение объема подачи, повышение уровня шума, работа насоса при отсутствии топлива в баке, подклинивание ротора. Наиболее слабым узлом в ЭТН является насосная секция, для которой не определен ресурс в условиях эксплуатации автотракторных двигателей в сельском хозяйстве. Определение ресурса возможно с использованием методов тестового диагностирования. Разделяются технологические отказы ЭТН на два типа: механические и электрические. Именно механической частью создается давление в топливной системе. Если необходимое давление не обеспечивается, то возникают неполадки в процессе движения машины, вплоть до остановки энергосредства. Основными признаками ухудшения параметров работоспособности топливного насоса являются: неустойчивая работа двигателя, перебои подачи топлива, повышенные утечки в насосной части ЭТН, медленный набор скорости по причине нарушения подачи топлива, запаздывание ускорения ДВС при воздействии на педаль акселератора, неравномерность подачи топлива во время движения, а также сопутствующие неисправности насоса – повышенный шум при работе насоса, хлопки в глушителе. Все это в совокупности ухудшает работу ДВС вплоть до его остановки.

Степень разработанности темы исследования

Существующие методы диагностирования технического состояния элементов топливной системы, как правило, имеют относительно низкую степень достоверности получаемой при диагностировании информации, высокую трудоемкость, являются дорогостоящими. Кроме того, отсутствуют станции технического обслуживания в малодоступных населенных пунктах, как правило, они имеют очень низкую техническую оснащенность. Отсутствие высокоточных средств диагностирования вызывает ухудшение работоспособности автотракторных двигателей, в частности это происходит по причине снижения работоспособности электрических топливных насосов. Все перечисленное выше предопределило актуальность разработки необходимых технологий периодического

диагностирования ЭТН. Возможность непосредственного измерения структурных параметров ЭТН (износов, зазоров, загрязнений) без их разборки весьма ограничена, поэтому при диагностировании используются функциональные параметры, отражающие техническое состояние ЭТН (сила тока, давление, утечки, подача, частота вращения ротора). Выполненная работа направлена на повышение эффективности функционирования топливной системы на основе повышения эффективности функционирования ЭТН.

Работа выполнена в соответствии с приказом № 1734-р от 22 ноября 2008 года «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года», в котором говорится о важности транспорта в области развития экономики страны, социальной инфраструктуры, мобильности населения, которые в свою очередь зависят от уровня качества транспорта, своевременного прогнозирования неисправностей, технического обслуживания и т. д.

Цель исследования – определение технического состояния электрических топливных насосов автотракторных двигателей на основе использования технологий тестового диагностирования.

Объект исследования: процессы функционирования и диагностирования параметров ЭТН на различных режимах работы.

Гипотеза исследования – увеличение или уменьшение величины тока вследствие засоренности (увеличение сопротивления элементов топливоподачи) или в результате износа насосной секции (увеличение утечек) может быть принято за диагностический параметр его технического состояния при тестовом диагностировании ЭТН.

Предмет исследования: взаимосвязь засоренности элементов системы топливоподачи (увеличение сопротивления) и износа элементов насосной секции (величина утечек топлива) с величиной тока потребления ЭТН при тестовом диагностировании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Установить взаимосвязи между величинами подачи топлива и его давления при ухудшении технического состояния ЭТН, элементов линии топливоподачи (увеличение засоренности или утечек) с величиной силы тока при тестовом диагностировании ЭТН.

2. Обосновать технологию тестового диагностирования и диагностический параметр технического состояния ЭТН, элементов линии топливоподачи.

3. Разработать методику, провести экспериментальные исследования и дать оценку эффективности технологии тестового диагностирования ЭТН, элементов линии топливоподачи.

Научная новизна

- дано аналитическое описание взаимосвязи величины тока (I) с давлением и подачей топлива (P , Q) ЭТН в зависимости от технического состояния его элементов, что позволяет исследовать и обосновывать режимы диагностирования и предельные значения диагностических параметров;
- установлены закономерности изменения силы тока потребления от засоренности и утечек в топливной системе на тестовых режимах работы ЭТН, обоснован диагностический параметр;
- разработана технология тестового диагностирования ЭТН, позволяющая задавать тестовые режимы работы и фиксировать изменения его параметров;
- получены результаты экспериментальных исследований работы ЭТН.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Результаты теоретических исследований разработки технологий тестового диагностирования электрических топливных насосов автотракторных двигателей, в которых рассматриваются основные элементы системы и поэтапное исследование процесса топливоподачи, позволили установить математические зависимости, уравнения, описывающие движение жидкости через элементы топливной системы, степень влияния их технического состояния на силу тока потребления насосом, сигнал давления в топливной магистрали, подачи. Практическая значимость работы заключается в определении новых методов диагностирования ЭТН автотракторных двигателей, основанных на реализации тестовых воздействий. Применение предлагаемых технологий тестового диагностирования ЭТН позволит снизить издержки на устранение последствий отказов до 15 %, поддерживать мощность ДВС в допустимых пределах, повысить уровень исправного состояния автотракторных ДВС в среднем на 5–12 %. Результаты внедрения исследований используются в учебном процессе кафедр «Эксплуатация машинно-тракторного парка, и технология и механизация животноводства» и «Технический сервис машин, оборудования и безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского ГАУ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация посвящена повышению работоспособности и правильности функционирования ЭТН за счет его функционального диагностирования на тестовых режимах, что соответствует формуле специальности 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве, а именно пункту «Разработка технологий и средств выполнения отдельных операций технического обслуживания и ремонта машин».

Методология и методы исследования. Теоретическая часть исследования выполнена с использованием методов и методик, применяемых в электротехнике, физике, математике, гидравлике. Экспериментальные исследования

и их обработка проводились в лабораторных условиях с использованием известных, отработанных методов, современных поверенных приборов и оборудования, а также основных положений теории вероятности и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитическое описание взаимосвязей функциональных параметров ЭТН (величины тока потребления, давления, подачи топлива, оборотов ротора (I, P, Q, n) со структурными параметрами их технического состояния – засоренностью фильтров ($\varepsilon_{фго}, \varepsilon_{фто}$) и износом элементов насосной части ЭТН (i), обоснование диагностического параметра работоспособности ЭТН.

2. Поэтапное исследование процесса подачи топлива основных элементов системы питания (ФГО, ФТО, насосная секция) и степень влияния их технического состояния на сигнал давления и подачи в топливной магистрали, их взаимосвязь с засоренностью, утечками, силой тока, напряжением.

3. Технология тестового диагностирования ЭТН.

4. Результаты экспериментальных исследований, позволяющие определить техническое состояние ЭТН по его силе тока потребления.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации в работе обоснованы и подтверждаются высокой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на заседаниях кафедр «Эксплуатация машинно-тракторного парка, и технология и механизация животноводства» и «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского ГАУ (ЮУрГАУ), на Международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному производству» г. Челябинска, Тюмени, Воронежа, в ЮУрГУ в периоды с 2014-го по 2020 гг.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 27 статей, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в наукометрическую базу Scopus, 10 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка использованной литературы, включающего в себя 172 наименования, и 6 приложений. Основное содержание работы изложено на 153 страницах текста, содержит 62 рисунка и 35 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение в соответствие с ГОСТ Р 7.0.11-2011 включает: актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи, гипотезу исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

Первая глава «Состояние вопроса и задачи исследования» посвящена анализу использования автотракторной техники в сельском хозяйстве, техническому состоянию ДВС и их ЭТН, условиям их эксплуатации. Проведен анализ типовых конструкций ЭТН, их достоинств и недостатков, принципа работы, рассмотрены неисправности насосов.

В ходе анализа работоспособности ЭТН было выявлено, что ухудшение их технического состояния происходит в основном по причине загрязненного или смешанного с водой топлива. О неисправном насосе можно судить только при его вскрытии, а также по недостаточному уровню подачи и давления.

Конструктивная особенность ЭТН заключается в том, что насосная станция топливного насоса размещена непосредственно на валу электродвигателя, и при протекании через нее топлива обеспечивается одновременное охлаждение и смазка. Поэтому в случае затрудненного прохождения топлива на всасывании, например, засорился топливный фильтр грубой очистки, не обеспечивается достаточное охлаждение ротора, в результате топливный насос может перегреваться и подклинивать.

Анализ показал, что до 80 % автотракторных двигателей имеют топливные насосы с насосной секцией роликового типа. Исследованиями установлено, что износ роликов по торцу и диаметру приводит к увеличению утечек топлива между корпусом и роликами, что в свою очередь снижает давление и подачу в топливной системе.

Из вышеперечисленного следует, что ухудшение работоспособности топливного насоса снижает необходимую подачу топлива в рампу с форсунками, из-за чего происходит неустойчивая работа двигателя при высоких нагрузочных и скоростных режимах. Может произойти полная остановка двигателя, что нежелательно при напряженных полевых условиях в сельском хозяйстве. Разработка тестового функционального диагностирования топливных насосов позволяет превентивно определить техническое состояние ЭТН.

Определением способов диагностирования топливной системы и достоверного ее уровня технического состояния занимались такие ученые, как В.М. Михлин, А.А. Гончаров, А.Ю. Вереютин, Г.В. Овчинников, Ю.И. Будыко,

В.Ф. Яковлев, Д.А. Соснин, В.И. Ерохов, Б.А. Данов, С.С. Куков, Н.А. Баганов, С.Н. Ольшевский, Ф.З. Габдрафиков и др., а также институты ГОСНИТИ, ЛСХИ, СИБИМэ, ЮУрГУ, ЮУрГАУ, БашГАУ. Все внесли значительный вклад в работу, но исследования не позволяют достоверно определить техническое состояние ЭТН.

В работах А.В. Гриценко, Д.Д. Бакайкина, С.С. Кукова установлена тесная взаимосвязь частоты вращения коленчатого вала двигателя с производительностью ЭТН в топливной системе, поэтому частоту вращения коленчатого вала при тестовом диагностировании возможно использовать для определения технического состояния ЭТН.

Также оценочными показателями служат комплексные диагностические параметры, такие как среднее давление в топливной рампе, расход топлива, но эти показатели не позволяют определить техническое состояние ЭТН.

С учетом изложенного и в соответствии с поставленной целью были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе «Теоретическое исследование процесса подачи топлива» рассматривается поэтапное исследование процесса подачи топлива, представлены математические зависимости процесса формирования давления, подачи топлива, аналитическое описание движения жидкости через элементы топливной системы, установлено влияние их технического состояния на величину давления и подачи топлива, силу тока.

Вся топливная система имеет элементы с сопротивлением, например, фильтр грубой и тонкой очистки (ФГО, ФТО), угол изгиба и длина топливопровода, утечки в насосной секции. Следует, что полные потери давления, подачи топлива равны сумме потерь давления, подачи его на всех последовательно расположенных элементах сопротивления.

Движение топлива рассмотрено на двух участках: всасывании и нагнетании и описывается уравнением Бернулли. Оно позволяет раскрыть взаимосвязи показателей давления P , кПа, и подачи Q , л/ч, топлива; сечения S_t , мм², эквивалентное сопротивлению ε :

$$Z_1 + \frac{P_{\text{атм}}}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \cdot h_i = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} \cdot \varepsilon_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где Z_1, Z_2 – высоты расположения сечений, м;

$P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление на уровне заправленного топлива, Па;

ρ – плотность топлива (бензиновое 750 кг/м³, дизельное 860 кг/м³);

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$P_2 = P_{\text{вс}}^{\text{н}}$ – давление всасывания насосом, Па;

$\varepsilon_{\text{ф}}$ – коэффициент сопротивления на сетке ФГО, ФТО;

h_i – потери напора по длине топливного фильтра, м;

α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии;

v_1, v_2 – скорость топлива перед сечениями, м/с.

Преобразование выражения (1) позволило нам представить его в следующем виде:

$$\frac{P_{\text{атм}}}{\rho \cdot g} = H + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S_{\text{т}}^2} + \lambda \cdot \frac{l \cdot Q^2}{d \cdot 2 \cdot g \cdot S_{\text{т}}^2} + \varepsilon_{\text{ф}} \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S_{\text{т}}^2}, \quad (2)$$

где Q – расход топлива через ФГО, ФТО (подача), м³/с;

H – высота подъема топлива насосом, м;

l – длина топливопровода на участке, м;

$S_{\text{т}}$ – площадь сечения топливопровода (чем меньше сечение, тем больше сопротивление и наоборот), м²;

d – диаметр топливопровода, м;

λ – коэффициент Дарси для топливопровода.

Конечная формула, определяющая подачу топлива Q , представлена в следующем виде:

$$Q = \sqrt{\frac{(H_{\text{вак}} - H) \cdot 2 \cdot g \cdot S_{\text{т}}^2}{1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \varepsilon_{\text{ф}}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

где $H_{\text{вак}}$ – вакуумметрическая высота всасывания, м, а также давления P :

$$P = \frac{Q^2 \cdot \rho}{(\mu^2 \cdot S_{\text{т}}^2) \cdot 2}, \text{ Па}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода топлива, 0,8.

При изменении структурных параметров (величины зазоров между роликами насосной секции и корпусом ЭТН, а также величины проходного сечения фильтрующих элементов, которое связано соответственно с утечками, сопротивлением в топливной системе) будут изменяться электрические параметры насоса: сила тока I , напряжение питания U и сопротивление на обмотке ротора

R . Они влияют на функциональные параметры ЭТН: давления в топливной системе P и подачи топлива Q . Для раскрытия математической взаимосвязи этих параметров используется уравнение баланса энергии источника тока ЭТН ($E_{\text{подв}}$) с энергией по перемещению жидкости в топливной магистрали ($E_{\text{перед}}$):

$$E_{\text{подв}} = E_{\text{перед}}, \text{ Дж}, \quad (5)$$

где $E_{\text{подв}}$ – подведенная энергия к ЭТН (всасывание), Дж;

$E_{\text{перед}}$ – переданная энергия в топливопровод (нагнетание), Дж.

Общая площадь последовательных соединений элементов топливной системы $S_{\text{общ}}$ представляется в следующем виде:

$$\mu \cdot S_{\text{общ}} = \mu \cdot S_1 + \mu \cdot S_2, \text{ м}^2, \quad (6)$$

где S_1 – площадь проходного сечения в сечении фильтра, м^2 ;

S_2 – площадь зазоров между роликами и корпусом ЭТН, м^2 .

Общая площадь параллельного соединения элементов топливной системы $S_{\text{общ}}$ представляется:

$$\frac{1}{\mu \cdot S_{\text{общ}}} = \frac{1}{\mu \cdot S_1} + \frac{1}{\mu \cdot S_2}, \text{ м}^2. \quad (7)$$

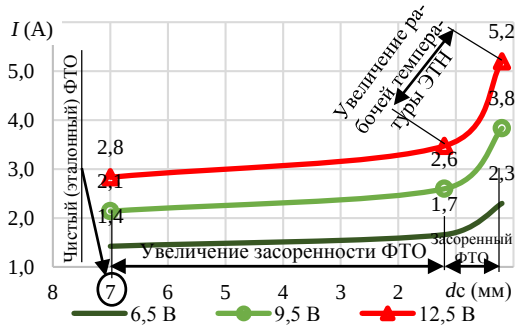
После всех преобразований получим формулу (8) в развернутом виде, А:

$$I = U \cdot \left(\left(\frac{1}{R} + \frac{(\Delta P - \Delta P_{\text{пер}})}{\rho \cdot g} \right) + \mu \cdot S_{\text{общ}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P - \Delta P_{\text{пер}})^3}{\rho}} \cdot t \right), \text{ А}. \quad (8)$$

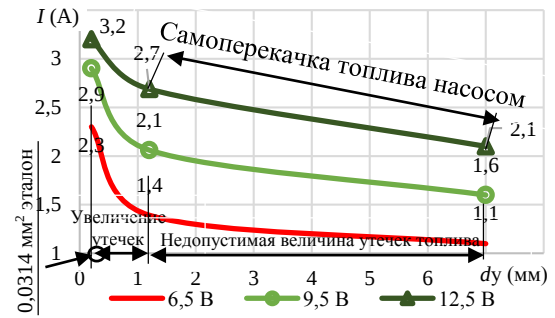
Таким образом, установлена зависимость силы тока ЭТН, А, от электрических параметров приводного двигателя (U , R) и структурных ($\mu \cdot S$, ΔP , Q).

Баланс энергии (8) позволяет рассмотреть нарушение работы ЭТН путем моделирования технического состояния различных элементов (сопротивление, утечки).

Увеличение и снижение силы тока потребления связано с повышением (рисунок 1, а) или снижением (рисунок 1, б) гидравлического сопротивления в топливной системе, из-за чего ротор ЭТН вращается под нагрузкой либо без нагрузки, что ведет к увеличению или снижению мощности потребления ЭТН.



а



б

а – 7 мм – эталонное сечение, чистый топливный фильтр;
 1,2 мм – диаметр проходного сечения, меньше эталонного (увеличение засоренности);
 0,2 мм – очень маленькое проходное сечение, равное засоренному ФТО;
 б – 0,2 мм = 0,0314 мм² – эталонная величина зазоров; 1,2 мм = 1,1304 мм² – увеличение
 величины зазоров; 7 мм = 38,465 мм² – предельная величина зазоров

Рисунок 1 – Закономерности изменения силы тока I от: а – диаметра сечения
 топливопровода d_c (моделирование засоренности фильтрующего элемента $I = f(\epsilon)$);
 б – диаметра утечек топливопровода d_y (утечек в корпусе ЭТН $I = f(y)$)

На основе моделирования сопротивления и утечек представим в трехмерной системе координат эту зависимость (рисунок 3).

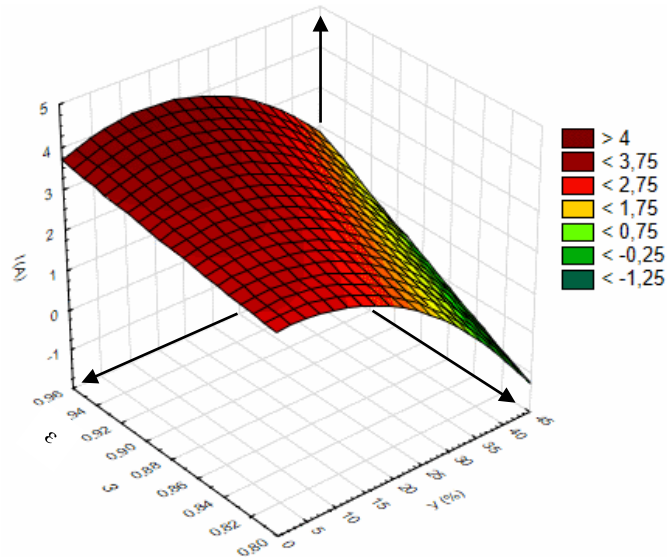


Рисунок 2 – Зависимость изменения силы тока потребления ЭТН I
 при одновременном изменении утечек y и засоренности (коэффициента сопротивления ϵ)

Теоретические исследования показали, что ток может быть принят за диагностический параметр, величина которого определяется взаимосвязью с утечками (износ роликов ЭТН) и сопротивлением (засоренность ФГО, ФТО).

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» была разработана общая методика экспериментальных исследований по определению технического состояния ЭТН.

Испытания проводились в аграрном университете (ЮУрГАУ). Объектом испытания являлась система топливоподачи двигателя ЗМЗ-406.2 – бензиновый 4-цилиндровый 16-клапанный с порядком работы цилиндров 1-3-4-2 и электронной системой управления двигателем (рисунок 3).

Для создания тестовых режимов диагностирования ЭТН использовался внешний блок управления «Вымпел-50»-4, при помощи которого регулировалось напряжение питания насоса от 5,5 до 14,1 В с шагом 0,2 В, что позволяло протестировать его на различных режимах работы, отслеживая потребляемый ток и создаваемое им давление в топливной системе. Подача топлива осуществлялась ЭТН, установленным в магистраль (*In-Line*), роликовой насосной секцией, с заводскими (эталонными) характеристиками: $Q = 130$ л/ч, $I = 3,1$ А, $n_{н.с} = 2800$ об/мин.

В разрез топливного шланга устанавливались жиклеры 2, 3 с диаметром проходного сечения от 0,2 до 1,2 мм. Жиклеры – это калиброванные отверстия, обеспечивающие дозировку при подаче жидкого топлива.

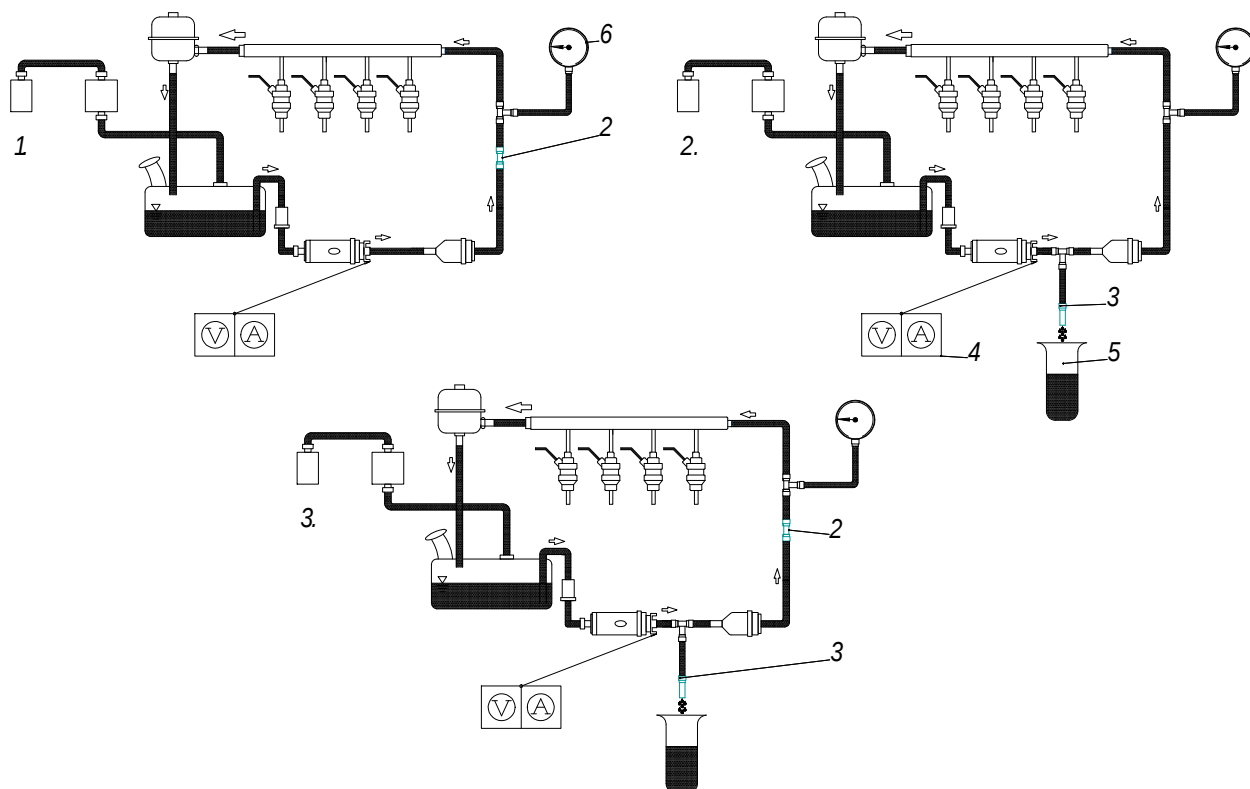


- 1 – провод питания блока управления, подключенного к реле ЭТН;
- 2 – жиклер, установленный в разрез топливного шланга в качестве элемента сопротивления;
- 3 – жиклер, установленный на слив (элемент утечек);
- 4 – внешний блок управления «Вымпел-50»; 5 – мензурка; 6 – манометр МТА-2

Рисунок 3 – Экспериментальная установка

Для замера давления после жиклеров устанавливался манометр 6 топливной системы МТА-2. Работа устройства заключается в измерении давления в топливной системе путем непосредственного подключения прибора к топливной рампе или в разрыв топливного шланга. Во время проведения опытов также использовался секундомер и мензурка для замера объема утечек топлива. Каждый опыт проводился в течение 1 минуты, а результаты фиксировались в конце времени.

Представлены схемы проведения экспериментов в лаборатории на рисунке 4. По схеме № 1 проводился эксперимент с имитацией засоренности топливной системы; по схеме № 2 – эксперимент с имитацией утечек; по схеме № 3 – одновременное их действие (суммарная имитация засоренности и утечек топливной системы).



1 – при имитации засоренности топливной системы; 2 – при имитации утечек в корпусе топливного насоса; 3 – суммарная имитация засоренности и утечек

Рисунок 4 – Схемы имитации: 1 – засоренности, 2 – утечек;
3 – при одновременном их действии

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» изложены результаты разработанной методики проведения диагностирования ЭТН, которые предоставляют более широкий объем информации о техническом состоянии ЭТН и его элементов по сравнению с существующими аналогами.

В ходе первых экспериментальных исследований при последовательном соединении жиклеров (имитация засоренности системы питания) были получены зависимости, которые представлены в виде изменения силы тока от напряжения питания ЭТН (рисунок 5), а также изменения давления от напряжения питания ЭТН (рисунок 6).

В ходе вторых экспериментальных исследований при параллельном соединении жиклеров (имитация утечек в корпусе ЭТН) были получены следующие зависимости (рисунки 7 и 8).

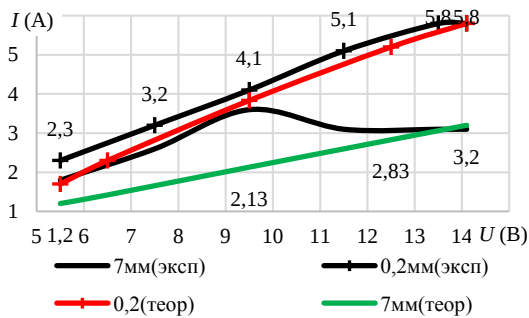


Рисунок 5 – Теоретические и экспериментальные зависимости изменения силы тока потребления ЭТН от напряжения питания

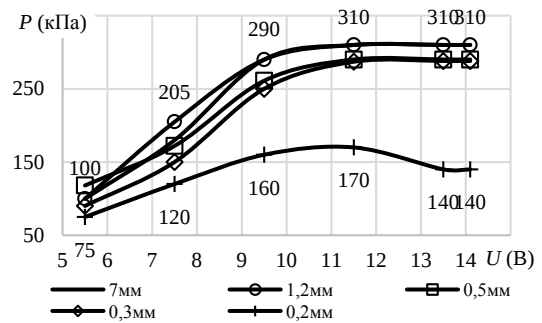


Рисунок 6 – Зависимость изменения давления в топливной системе от напряжения питания ЭТН

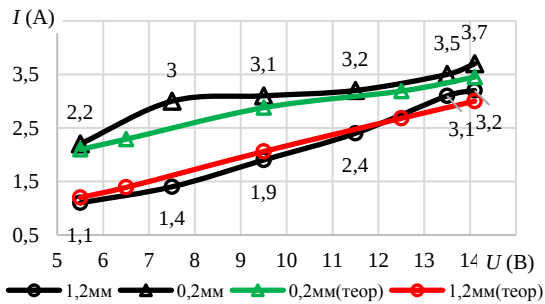


Рисунок 7 – Теоретические и экспериментальные зависимости изменения силы тока потребления ЭТН от напряжения питания

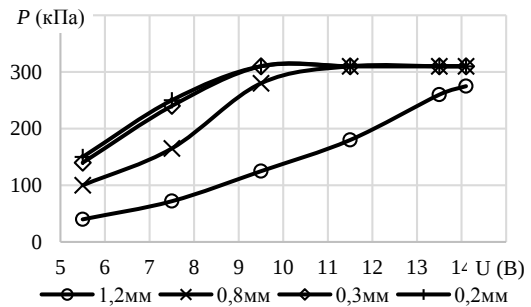


Рисунок 8 – Зависимость изменения давления в топливной системе от напряжения питания ЭТН

Третий эксперимент проводился по схеме 3 на рисунке 4, т.е. суммарная имитация засоренности и утечек.

Представлен график, выполненный в программе STATISTICA-12 по результатам экспериментальных данных, изменения силы тока потребления ЭТН в зависимости от диаметров калиброванных жиклеров (рисунок 9).

С уменьшением сечения последовательного и параллельного жиклеров увеличивается сила тока потребления электрическим насосом.

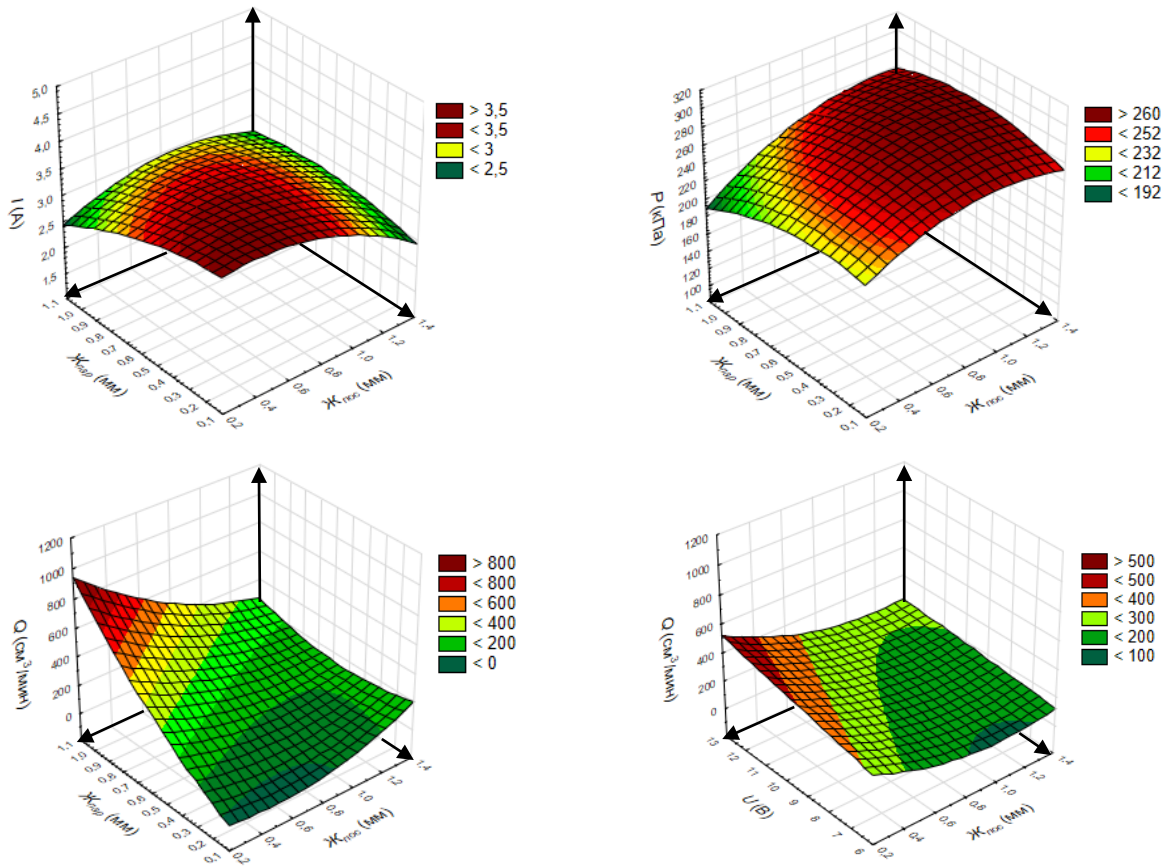


Рисунок 9 – Изменение I , P и Q ЭТН при суммарной имитации утечек и засоренности

Наибольшая сила тока стала равной 3,5 А при $Ж_{\text{пос}} = 0,2$ мм и $Ж_{\text{пар}} = 0,1$ мм, увеличивается давление при росте $Ж_{\text{пос}}$ с 232 до 260 кПа и выше, утечки возрастают с увеличением $Ж_{\text{пар}}$ с 0 до 950 см³/мин. На данных рисунках отражены результаты трехфакторного эксперимента.

$$I(Ж_{\text{пар}}, Ж_{\text{пос}}) = 3,44 - 0,36 \cdot Ж_{\text{пар}} + 0,76 \cdot Ж_{\text{пос}} - 0,8 \cdot Ж_{\text{пар}}^2 + 1,1 \cdot Ж_{\text{пар}} \cdot Ж_{\text{пос}} - 1,1 \cdot Ж_{\text{пос}}^2, \text{ А}; \quad (9)$$

$$P(Ж_{\text{пар}}, Ж_{\text{пос}}) = 202,7 + 37,5 \cdot Ж_{\text{пос}} + 116,8 \cdot Ж_{\text{пар}} - 69,4 \cdot Ж_{\text{пос}}^2 + 37 \cdot Ж_{\text{пос}} \cdot Ж_{\text{пар}} - 63,1 \cdot Ж_{\text{пар}}^2, \text{ кПа}; \quad (10)$$

$$Q(Ж_{\text{пос}}, Ж_{\text{пар}}) = 48,8 - 206,9 \cdot Ж_{\text{пос}} + 666,1 \cdot Ж_{\text{пар}} + 291,6 \cdot Ж_{\text{пос}}^2 - 748,15 \cdot Ж_{\text{пос}} \cdot Ж_{\text{пар}} + 371,18 \cdot Ж_{\text{пар}}^2. \quad (11)$$

Представлены формулы, выведенные в программе STATISTICA-12 по результатам экспериментальных данных, описывающие изменения I , P и Q в зависимости от установленных калиброванных отверстий.

Оценка технико-экономической эффективности тестового диагностирования электронасоса автотракторных ДВС осуществлялась в соответствии с принятыми нормативами и расчетами по ГОСТ 34393-2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача, заключающаяся в определении технического состояния ЭТН с электронной системой управления за счет тестового диагностирования. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. На основе анализа и синтеза результатов научных работ, практики использования автотракторных ДВС с электронной системой управления подачей топлива электронасосами установлена первичность ухудшения их работоспособности из-за засоренности элементов топливоподдачи (фильтры, топливопроводы), а при увеличении наработки ЭТН и из-за износа механических элементов их насосных частей. Это определило необходимость разработки методов и средств диагностирования технического состояния ЭТН и в целом всех элементов топливной магистрали.

2. Теоретическими исследованиями установлено:

– аналитическое описание взаимосвязи подачи и давления топлива ЭТН в процессе тестового диагностирования зависит от величин засоренности и утечек топлива, элементов топливной магистрали (топливный бак-рампа), что адекватно отражает физические процессы функционирования ЭТН при эксплуатации автотракторных ДВС. Это позволяет исследовать влияние различных конструктивно-технологических схем элементов топливных магистралей при их проектировании на эффективность эксплуатации ДВС, разрабатывать новые технологии и средства тестового диагностирования элементов системы топливоподдачи;

– разработанный тестовый режим диагностирования ЭТН на основе аналитического описания взаимосвязи функциональных (P , Q , n) и электрических (I , U , R) параметров ЭТН, структурных показателей технического состояния элементов топливной магистрали (ϵ , $S_{\text{общ}}$, y) позволил установить закономерности изменения силы тока потребления ЭТН от их величины, принять его величину в качестве тестового диагностического параметра.

3. Впервые разработанная методика и технология дифференцированного тестового диагностирования ЭТН на основе физического моделирования применением жиклеров и схем их встраивания в топливную магистраль позволяет локализовать выявление засоренности элементов линии топливоподачи, величины износа роликов насосной секции ЭТН.

4. В результате реализации плана трехфакторного эксперимента при тестовом диагностировании ЭТН и элементов линии топливоподачи установлено следующее.

а) Закономерности изменения давления и подачи топлива при:

– последовательной установке жиклера (имитация засоренности элементов топливной магистрали) при вариации сечения жиклера от 7 до 0,3 мм давление топлива снижается с 310 до 290 кПа, что находится в пределах допуска. Но при установке жиклера с сечением 0,2 мм и менее давление топлива снижается со 170 до 140 кПа, что находится за пределами работоспособного состояния.

Подача топлива при сечении жиклера 1,2 мм составляет около 100 см³/мин. (практически в 20 раз меньше номинальной подачи), а при сечении жиклера 0,2 мм подача топлива уменьшается до 10 см³/мин.;

– параллельной установке жиклера (имитация утечек) с сечением 0,8 мм давление топлива снижается на 10–15 % от его номинальной величины, а при жиклере с сечением 1,2 мм величина давления топлива составляет меньше 40–60 % его номинальной величины. Подача топлива при сечении жиклера 0,8 мм составляет около 1600 см³/мин., т.е. утечка составляет 30–35 % от номинальной подачи топлива. Но при сечении жиклера 1,2 мм утечка топлива увеличивается до 1000 см³/мин. и составляет около 45 % от номинальной величины подачи топлива.

б) Закономерности изменения тока питания ЭТН при:

– последовательной установке жиклера (имитация засоренности элементов топливной магистрали) при штатном сечении топливопровода 7 мм и напряжении 9,5 В обусловило увеличение тока до 3,6 А и при дальнейшем варьировании величины напряжения при тестовом диагностировании величина тока нелинейно снижается до 3,2 А, тогда как теоретическая зависимость изменения тока в функции величины подачи на ЭТН имеет линейный вид. При сечении жиклера 0,2 мм величина тока при последовательном изменении напряжения практически линейно возрастает, достигая максимального значения 5,8 А, что на 40 % превышает его номинальную величину;

– при параллельной установке жиклера с сечением 0,2 мм при варьировании напряжения от 5 до 14 В ток питания ЭТН нелинейно увеличивается до 3,7 А. Установка жиклера с сечением 1,2 мм приводит к снижению тока питания

эквилибриально линии его изменения с жиклером 0,2 мм, определяя максимальную величину тока до 3,2 А.

Расхождение величин давления, подачи топлива и силы тока, полученных экспериментально при тестовом диагностировании и на основе реализации математических моделей, не превышает 4–6 %, что подтверждает корректность результатов теоретических исследований и высокую эффективность тестового диагностирования ЭТН и других элементов топливной магистрали.

5. Разработанная на основе результатов теоретических исследований технология тестового диагностирования электробензонасосов, элементов топливной магистрали (топливный бак – рампа) позволяет реализовать два основных процесса диагностирования их технического состояния: функциональное диагностирование по подаче и давлению топлива ЭТН, которые являются обобщающими диагностическими параметрами технологической работоспособности линии топливоподачи; поэтапное диагностирование каждой составляющей топливной магистрали на основе локализации установления уровня их технологической работоспособности путем применения дифференцированной установки жиклеров с различным диаметром и схем их встраивания в линию топливоподачи. Основным диагностическим параметром при этом процессе диагностирования является величина тока питания ЭТН при варьировании величины напряжения в диапазоне 5,5–14 В.

Научная ценность разработанной технологии тестового диагностирования, средств для ее реализации состоит в возможности повышения эффективности проведения экспериментальных исследований ЭТН, других элементов топливной магистрали для обоснования их технологической способности при эксплуатации автотракторных двигателей.

6. Результаты лабораторных исследований показали снижение трудоемкости подготовительных работ и процесса диагностирования на 104 чел.-мин., увеличение полноты, глубины и достоверности контроля до 0,93–0,95, снижение стоимости диагностического оборудования до 25 раз по сравнению с зарубежными аналогами. Эффективность разработанной технологии составила 780 руб. на 1 автомобиль.

Рекомендации

Результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимосвязи показателей давления и подачи топлива ЭТН с величиной силы тока в зависимости от засоренности и от износа деталей его насосной секции позволяют внедрить технологию периодического диагностирования электронасоса с целью

обеспечения его работоспособности, безотказности при функционировании, а следовательно, ДВС в целом. Технология тестового диагностирования ЭТН, в целом элементов топливной магистрали направлена на повышение качества их функционирования.

Перспективы дальнейшего исследования

Дальнейшие исследования будут направлены на установление эксплуатационных параметров ЭТН и других элементов топливной магистрали при использовании мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в международных изданиях

1. Vozmilov, A. Study of Characteristics of Engine Operation in Stress-Testing Mode of Electric Gasoline Pump [Text] / A. Vozmilov, **D. Vlasov**, K. Glemba // Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2019: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). – 2019. – P. 679–686.
2. **Vlasov, D. B.** Methodological aspects of diagnostics of electric gasoline pumps in operation of automobiles [Text] / **D. B. Vlasov**, A. G. Ignatiev, Z. V. Almetova // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Т. Part F4. – С. 2193–2201.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

3. **Власов, Д. Б.** Повышение эффективности процесса диагностирования систем питания на основе реализации новых методов и средств тестового диагностирования [Текст] / Д. Б. Власов // АПК России. – 2015. – Т. 74. – С. 30–35.
4. **Власов, Д. Б.** Технологии диагностирования технического состояния электрических бензонасосов автомобилей с микропроцессорной системой управления [Текст] / Д. Б. Власов // АПК России. – 2015. – Т. 72. – № 1. – С. 26–28.
5. Гриценко, А. В. Выявление скрытых отказов электрических топливных насосов мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве методом тестового диагностирования [Текст] / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, К. И. Лукомский, **Д. Б. Власов** // АПК России. – 2018. – Т. 25. – № 1. – С. 97–103.
6. Гриценко, А. В. Выявление скрытых отказов электрических топливных насосов мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве методом тестового диагностирования [Текст] / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, **Д. Б. Власов** // АПК России. – 2018. – Т. 25. – № 2. – С. 258–265.

7. Плаксин, А. М. Диагностирование электрических бензиновых насосов по комплексным выходным параметрам [Текст] / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба, Д. Д. Бакайкин, **Д. Б. Власов** [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–12. – С. 2610–2614.

8. Плаксин, А. М. Исследование эксплуатационных параметров электрических бензиновых насосов с разной степенью износа [Текст] / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба, **Д. Б. Власов** [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 12–25.

9. Плаксин, А. М. Поэтапное моделирование процесса подачи топлива электрическим насосом роликового объемного типа [Текст] / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба, **Д. Б. Власов** [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 44–55.

10. Плаксин, А. М. Тестовое диагностирование электрических топливных насосов двигателей [Текст] / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба, **Д. Б. Власов** // Сельский механизатор. – 2019. – № 9. – С. 36–37.

11. **Власов, Д. Б.** Технологии диагностирования электрических бензиновых насосов [Текст] / Д. Б. Власов, Н. Машрабов, А. М. Плаксин, Д. Д. Бакайкин, А. В. Гриценко // АПК России. – 2019. – Т. 26. – № 1. – С. 51–55.

12. Тестовое диагностирование электрических топливных насосов / А. В. Гриценко, К. И. Лукомский, **Д. Б. Власов**, К. В. Глемба // АПК России. 2017. Т. 24. № 5. С. 1161–1167.

Публикации в других изданиях

13. **Власов, Д. Б.** Выявление закономерностей изменения параметров функционирования объемных ЭТН на тестовых режимах его работы [Текст] / Д. Б. Власов // Сервис технических систем – основа безопасного функционирования машин и оборудования предприятий АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. Института агроинженерии, посвящ. 110-летию со дня рожд. д-ра техн. наук, проф. И. Е. Ульмана. – Челябинск : ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2018. – С. 87–95.

14. **Власов, Д. Б.** Диагностирование электрических насосов автомобилей [Текст] / **Д. Б. Власов**, А. В. Гриценко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 4–1 (15–1). – С. 176–180.

15. **Власов, Д. Б.** Прикладная и научная актуальность диагностирования электрического бензонасоса системы топливоподачи с электронным управлением [Текст] / Д. Б. Власов // Достижения науки – агропромышленному производству : матер. LV Междунар. науч.-техн. конференции. – Челябинск, 2016. – С. 31–36.

16. **Власов, Д. Б.** Поэтапное исследование процесса подачи топлива [Текст] / Д. Б. Власов, Н. Машрабов, А. М. Плаксин, К. В. Глемба, Ш. С. Иксанов // Сервис технических систем – агропромышленному комплексу России : матер. Междунар. науч.-практ. конф. Института агроинженерии / под ред. М. Ф. Юдина. – Челябинск : ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2019. – С. 48–55.

17. **Власов, Д. Б.** Разработка метода и средства диагностирования электрических бензиновых насосов при изменении сопротивления в линии топливоподачи [Текст] / Д. Б. Власов // Технологии и средства механизации в АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф. Института агроинженерии, посвящ. 80-летию со дня рожд. акад. РАН, д-ра техн. наук В. В. Бледных. – Челябинск : ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2018. – С. 25–33.

18. **Власов, Д. Б.** Технологии диагностирования технического состояния электрических бензонасосов автомобилей с микропроцессорной системой управления [Текст] / Д. Б. Власов // Достижения науки – агропромышленному производству : матер. LIV Междунар. науч.-техн. конференции / под ред. П. Г. Свечникова. – Челябинск, 2015. – С. 33–38.

19. **Власов, Д. Б.** Теоретические и экспериментальные закономерности изменения параметров бензонасоса при эксплуатации автомобилей [Текст] / Д. Б. Власов // Технические науки – агропромышленному комплексу России : матер. Междунар. науч.-практ. конференции. – Челябинск : ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2017. – С. 56–61.

20. Возмилов, А. Г. Исследование характеристик работы двигателя в режиме стресс-тестирования электрического бензинового насоса [Текст] / А. Г. Возмилов, К. В. Глемба, **Д. Б. Власов** // Пром-Инжиниринг : труды V Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 137–141.

21. Гриценко, А. В. Выявление скрытых отказов электрических топливных насосов мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве методом тестового диагностирования [Текст] / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, К. И. Лукомский, **Д. Б. Власов** // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 11. – С. 50–57.

22. Гриценко, А. В. Исследование закономерности изменения параметров функционирования объемного электрического бензонасоса в тестовых режимах его работы [Текст] / А. В. Гриценко, **Д. Б. Власов**, К. В. Глемба // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса : межвуз. сб. науч. ст. (с международным участием). – Самара, 2018. – С. 23–29.

23. Гриценко, А. В. Исследование изменения параметров работы объемного электрического бензонасоса в режимах имитации сопротивления топливоподачи [Текст] / А. В. Гриценко, **Д. Б. Власов**, К. В. Глемба // Транспортные

и транспортно-технологические системы : матер. Междунар. науч.-техн. конференции / отв. ред. Н. С. Захаров. – 2018. – С. 94–98.

24. Гриценко, А. В. Комплексное диагностирование электрического бензонасоса системы топливоподачи [Текст] / А. В. Гриценко, **Д. Б. Власов**, А. М. Плаксин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т. 4. – № 5–4 (25–4). – С. 239–243.

25. Гриценко, А. В. Определение технического состояния электрических бензонасосов на тестовых режимах его диагностирования [Текст] / А. В. Гриценко, **Д. Б. Власов** // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5. – № 6 (32). – С. 190–196.

26. Глемба, К. В. Диагностирование электрических насосов по силе тока питания при сопротивлении в топливосистеме [Текст] / К. В. Глемба, А. В. Гриценко, К. А. Цыганов, **Д. Б. Власов** // Евразийское Научное Объединение. – 2015. – Т. 1. – № 11 (11). – С. 16–18.

27. Плаксин, А. М. Исследования электрических топливных насосов топливной системы автомобилей [Текст] / А. М. Плаксин, **Д. Б. Власов** // Организация и безопасность дорожного движения : матер. XII нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием / отв. ред. Д. А. Захаров, ред. Е. М. Чикишев, И. А. Анисимов. – 2019. – С. 221–228.

Подписано в печать 26.10.2020. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии «Папирус»
454080, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, д. 2, оф. 19