

На правах рукописи

ПАВЛОВ ЯРОСЛАВ ДМИТРИЕВИЧ

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ТРАКТОРА TERRION ATM 4200**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Девянин Сергей Николаевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Неговора Андрей Владимирович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мобильных энергетических и транспортных средств ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»;

Катаев Юрий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Техническое обслуживание, ремонт и рециклинг сельскохозяйственной техники» ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Защита состоится «30» июня 2025 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Известно, что общий объем потерь продукции растениеводства с ее недобором достигает 25...30% валового производства. Основная часть потерь вызвана несвоевременностью полевых работ. Каждый день задержки при уборке ведет к потерям урожая зерна 3...5%. Особенно важна в этот период высокая безотказность работы техники. Одним из способов ее повышения является предиктивное или прогнозное обслуживание сельхозтехники на основе информации о ее техническом состоянии, полученной в процессе ее эксплуатации.

Разработка методов непрерывного контроля технического состояния техники в процессе ее эксплуатации и своевременного принятия решения о необходимости проведения технического обслуживания позволяют ускорить решение этой проблемы.

Степень разработанности. Вопросами диагностирования тракторных дизелей занимались многие ученые как в России, так и за рубежом. Значительный вклад в развитие средств и методов диагностирования ДВС в России внесли Алексеев, О.А., Бельских В.И., Варнаков В.В., Волков А. В., Габитов И.И., Девянин С.Н., Дидманидзе О.Н., Ждановский Н.С., Катаев Ю.В., Михлин В.М., Неговора А.В., Черноиванов В.И., Шубин В.М. и многие другие. За рубежом развитием методов диагностирования ДВС занимались Ashley, S, Caban J., Jay K., Janota M.S., Kordos P., Pompoli F., Quintero H.F, Romero C.A., Watson N., Weaving J.H., Xiao G.F., Yassine M.K., Zahdeh A.R. и др.

В настоящее время диагностирование сельскохозяйственной техники с ДВС осуществляется как правило на специализированных станциях технического обслуживания и ремонта с применением различного оборудования. Эти методы диагностирования используются при наличии явной неисправности, т.к. трудоемкость процессов поиска неисправности достаточно высока и требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

Современные двигатели оснащены системой бортовой диагностики, которая позволяет диагностировать неисправность электронных компонентов машины и ДВС в процессе эксплуатации. Неисправности обычно выявляются, когда дальнейшая эксплуатация техники невозможна и требуется срочное вмешательство. Это приводит к срыву проведения сельскохозяйственных работ, что может приводить к большим потерям урожая.

Цель работы. Разработка методики оценки технического состояния двигателя по показателям системы наддува, полученным по данным CAN-шины в процессе работы машины.

Объект исследования. Техническое состояние тракторного дизеля с наддувом.

Предмет исследования. Методика оценки технического состояния двигателя по данным давления наддува, передаваемым по CAN-шине в процессе эксплуатации техники.

Научная новизна.

1. Методика получения базовой многопараметровой характеристики двигателя по данным CAN-шины в процессе эксплуатации машины;

2. Вид и переменные уравнений регрессии для статистического анализа данных по получению диагностических показателей для оценки технического состояния двигателя;

3. Методика оценки технического состояния двигателя по данным базовой характеристики и значением диагностического показателя в процессе эксплуатации техники.

Практическая значимость

1. Методика получения базовой многопараметровой характеристики двигателя по данным CAN-шины в процессе эксплуатации машины для процессоров малой производительности;

2. Возможность использования разработанных методов обработки данных CAN-шины в процессе эксплуатации машины на современных сельскохозяйственных машинах с целью анализа их технического состояния.

Методы исследований Расчетно-теоретические методы исследования, основанные на методах математического моделирования рабочих процессов ДВС с использованием компьютерного программного обеспечения. Методологические и теоретические проблемы решены на основе общей теории системного анализа с применением методов математической статистики и статистической обработки данных, использования методов экспериментальных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика сбора и предварительной обработки данных CAN-шины в процессе эксплуатации трактора.

2. Методика получения базовой многопараметровой характеристики двигателя по данным CAN-шины.

3. Вид и переменные уравнений регрессии для статистического анализа данных по получению диагностических показателей для оценки технического состояния двигателя.

4. Методика оценки технического состояния двигателя по данным базовой характеристики и значением диагностического показателя в процессе эксплуатации техники.

5. Результаты экспериментальной проверки оценки технического состояния двигателя по разработанным методикам.

Личный вклад автора в решение поставленных задач. Личный вклад соискателя заключается в формулировании задач исследования, разработке методики сбора и предварительной обработки данных CAN-шины, проведении экспериментальных исследований, методики получения многопараметровых характеристик двигателя по данным CAN-шины. Написание статей и выступления на конференциях и семинарах по материалам диссертационных исследований, создание и оформление диссертационной работы.

Апробация результатов исследований. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и российских научных конференциях, научных семинарах, круглых столах (2022...2025 гг.).

Публикации.

По теме опубликовано 5 печатных научных работ, в том числе 2 работы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Российской Федерации, 2 работы в прочих изданиях и свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 127 источников и 6-ти приложений. Работа содержит 148 страниц, 32 рисунка, 26 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформирована цель и задачи исследований, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ состояния вопроса по теме диссертации» Проведен анализ влияния технического состояния двигателя на его мощностные и экономические показатели. Показано, что оценка технического состояния и правильность установленных регулировок двигателя требует исключения на этот период техники от работы и не позволяет оперативно выполнять этот процесс, и требует высоких трудозатрат и времени отчуждения техники от технологического процесса. Оперативное получение характеристик двигателя в процессе эксплуатации и их сравнение с базовыми значениями может сократить такие затраты.

Современная техника оснащается двигателями с электронным управлением, использующим для управления шину данных. Использование этой информации для получения диагностического показателя в процессе эксплуатации на различных режимах работы и сравнение этого показателя со значениями по базовой характеристике рассмотрено недостаточно и этому посвящена данная работа. На основании проведенного анализа сформулированы задачи исследований.

Во второй главе «Использование диагностического разъема для оценки технического состояния ДВС и его агрегатов» рассмотрены структура и особенности CAN-шины, рассмотрен протокол передачи данных. Основными протоколами являются SAE J1979 для легкового транспорта и SAE J1939 для грузового транспорта, сельскохозяйственной и специализированной техники.

Проведенные исследования показали необходимость для считывания данных информационной шины учета, что передача данных осуществляется по протоколу SAE J1939 и данный протокол в качестве канального уровня использует коммуникационную шину CAN стандарта CAN 2.0b. Используются только расширенные идентификаторы (29 бит). Данные передаются кадрами строго определённого формата и размера.

Для считывания и предварительной обработки данных разработана «Программа для декодирования протокола SAE J1939 CAN-шины», которая позволяет декодировать получаемый с CAN-шины поток данных от электронных

блоков управления по протоколу SAE J1939, которая в дальнейшем использовалась в работе.

В процессе считывания данных и их преобразования можно получать массивы данных, включающих:

- время регистрации передаваемого показателя,
- частоту вращения коленчатого вала на данном режиме работы,
- нагрузку двигателя на данном режиме в %,
- часовой расход топлива двигателем на данном режиме работы,
- температуру в системе охлаждения двигателя,
- абсолютные значения давления наддува на впуске в цилиндры,
- давление масла в системе смазки двигателя,
- скорость движения машины в данное время и др.

Преобразованные данные представляют собой массивы данных, которые могут быть переданы, например, в электронные таблицы Excel для дальнейшей обработки с целью определения значения диагностического показателя и др. Данные массивы могут быть использованы для получения значений базовой многопараметровой характеристики двигателя и диагностического показателя по полученным данным в процессе эксплуатации техники.

В третьей главе «Методика получения многопараметровой характеристики» разработана методика получения уравнения регрессии для всей области рабочих режимов двигателя, изложены теоретические основы обработки данных для получения уравнения регрессии, определен вид частных уравнений регрессии и уравнения для всей области.

Методика получения многопараметровой характеристики для часового расхода топлива дизельного двигателя по результатам анализа данных системы управления тракторного двигателя в процессе его эксплуатации, включает:

- разбивку области рабочих режимов на зоны (не менее 8);
- получения частных уравнений регрессии для каждой зоны;
- получение уравнения регрессии для всей области рабочих режимов на основании частных уравнений для каждой зоны.

Пример разбивки области рабочих режимов двигателя Deutz BF 6M 2012 C на зоны по частоте вращения и нагрузке показан на рисунке 1.

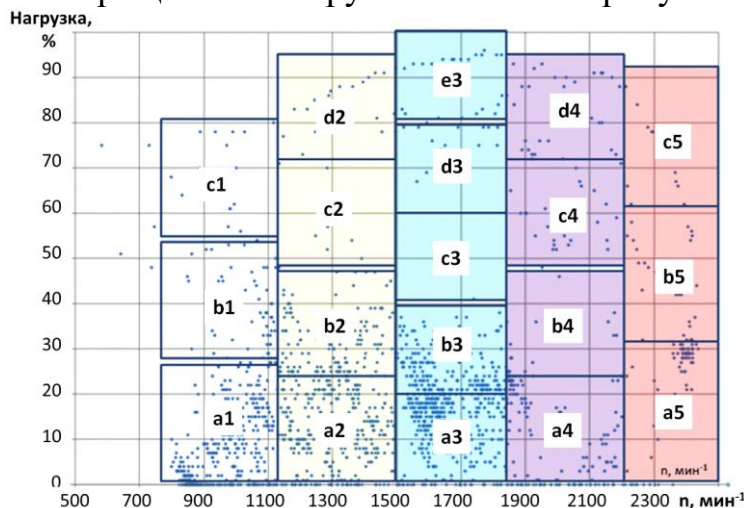


Рисунок 1 – Область зарегистрированных режимов с разбивкой на зоны

Для каждой из полученных зон проведен анализ данных с целью получения вида уравнения регрессии для часового расхода топлива в соответствии с известной методикой регрессионного анализа данных, отвечающая наибольшей достоверности по коэффициенту детерминации R^2 и критерию Фишера F , значение которого сравнивалось с табличным F_T . Получение уравнений регрессии на процессоре при работе трактора предполагает использование одинаковых видов уравнения для каждой зоны, поэтому в результате анализа полученных уравнений регрессии наилучший результат по виду уравнений выбран в виде:

$$G_T = b_0 + b_1 \cdot n + b_2 \cdot M + b_{12} \cdot n \cdot M + b_{11} \cdot n^2 + b_{22} \cdot M^2, \quad (1)$$

где: n – частота вращения, мин^{-1} ; M – нагрузка двигателя, %.

Результаты регрессионного анализа для отмеченных зон области рабочих режимов двигателя для доверительной вероятности 0,95 показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа зон рабочей области

Зона	R^2	F	F_T	$n_{cp}, \text{мин}^{-1}$	$M_{cp}, \%$	$G_{тоi}, \text{л/ч}$
a1	0,9862	3462	1,32	925	14	3,95
a2	0,9718	1910	1,19	1275	13	5,18
a3	0,9885	4195	1,32	1625	10	5,79
a4	0,993	3578	1,19	1975	13	8,03
a5	0,9985	9448	2,19	2325	15	10,41
b1	0,9827	431	2,32	925	41	8,33
b2	0,9908	2274	2,28	1275	37	10,54
b3	0,9636	917	2,2	1625	30	11,46
b4	0,9967	546	3,33	1975	37	17,08
b5	0,9985	46334	2,33	2325	45	22,53
c1	0,9912	336	2,85	925	68	12,71
c2	0,951	11,6	6,26	1275	61	16,14
c4	0,9916	402	2,81	1975	61	24,80
c5	0,9984	1697	2,9	2325	75	34,82
d2	0,9943	313	4,39	1275	84	21,10
d3	0,9973	583	3,97	1625	70	22,90
d4	0,996	1337	2,72	1975	84	32,77
e3	0,998	1660	2,81	1625	90	29,05

Анализ данных показывал, что выбранный вид уравнений регрессии достоверно описывает изменение часового расхода топлива G_T от двух факторов: частоты вращения n и нагрузки M , и данный вид уравнения может быть использован в дальнейшем анализе.

Получение общего уравнения регрессии для всей области рабочих проводилось следующим образом:

а) Для каждой зоны определялась режимная точка. В качестве такой точки принято значение её центра (центр диапазона по частоте вращения и нагрузке для данной зоны). Значения этих факторов для центров зон приведены в таблице 2, n_{cp} – для частоты вращения и M_{cp} – для нагрузки двигателя.

б) Используя полученные уравнения регрессии для каждой зоны, определялись расчетные значения часового расхода топлива $G_{тоi}$ на каждом из режимов для каждой зоны, значения которых также представлены в таблице 2.

с) Используя полученную матрицу из 18 значений целевой функции и влияющих факторов для всей области рабочих режимов, представленных в табл.2, в результате регрессионного анализа найдены коэффициенты для уравнения вида по аналогии с изложенной ранее методике.

д) С помощью офисного приложения Excel, получено итоговое уравнение регрессии для всей области рабочих режимов для часового расхода топлива, которое выглядит следующим образом:

$$G_{то} = - 0,7219 + 2,6123 \cdot 10^{-3} \cdot n + 4,93 \cdot 10^{-3} \cdot M + 1,743 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot M - 2,092 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot M^2, \text{ л/ч} \quad (2)$$

где: n – частота вращения, мин^{-1} ; M – нагрузка двигателя, %.

Достоверность полученного уравнения регрессии с доверительной вероятностью 0,95 подтверждается коэффициентом детерминации $R^2 \approx 1,0$ и коэффициент Фишера $F = 7059$ при $F_T = 2,6$, т.е. условие $F > F_T$ выполняется, что подтверждает статистическую значимость связи расхода топлива во всей области рабочих режимов от выбранных параметров.

Предложенный подход получения многопараметровой характеристики может быть реализован по другим показателям двигателя, что позволит анализировать значения этих показателей и их изменение в процессе эксплуатации. Результатом такого анализа может быть оценка технического состояния отдельных узлов и агрегатов машины и своевременное проведение их технического обслуживания.

В четвертой главе «Построение многопараметровых характеристик двигателя Deutz BF 6M 2012 C» приведена методика построения многопараметровой характеристики двигателя для удельного эффективного расхода топлива.

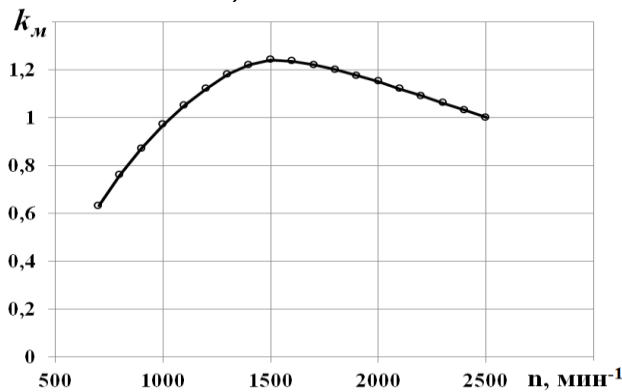
Передаваемые по системе управления двигателя данные нагрузки приводятся в процентах для каждой частоты вращения двигателя и перевод их в размерность крутящего момента ($\text{Н} \cdot \text{м}$) возможен при известном значении максимального крутящего момента на каждой частоте вращения M_k . Эти значения могут быть получены, если известно изменение коэффициента приспособляемости двигателя по внешней скоростной характеристике k_m и значение крутящего момента при номинальной частоте вращения M_n .

$$M_k = M_n \cdot k_m \quad (3)$$

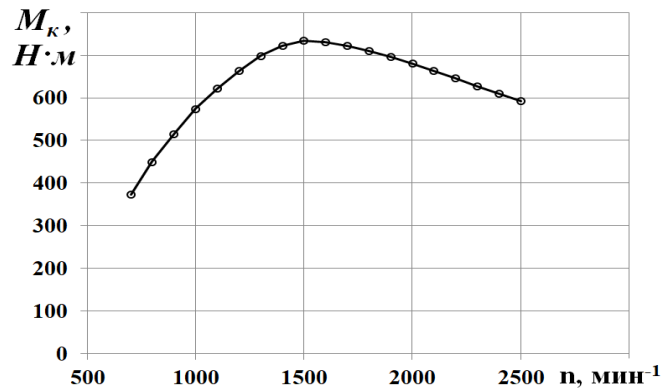
Характер изменения коэффициента приспособляемости k_m двигателя Deutz BF 6M 2012 C по внешней скоростной характеристике показан на рисунке 2,а. Номинальное значение крутящего момента двигателя $M_n = 592 \text{ Н} \cdot \text{м}$, и получаемое изменение крутящего момента по внешней скоростной характеристике показано на рисунке 2,б.

Для каждого режима работы двигателя при частоте вращения n (мин^{-1}) и нагрузке M (%) значение эффективной мощности Ne (кВт) может быть найдено по уравнению:

$$Ne = \frac{M_H \cdot k_M \cdot M}{9,55 \cdot 10^5} \quad (4)$$



а)



б)

Рисунок 2 – Изменение коэффициента k_M и крутящего момента M_K по внешней скоростной характеристике

Удельный эффективный расход топлива g_e для каждого режима работы двигателя находится с учетом зависимости (2) для часового расхода топлива $G_{то}$ с учетом плотности топлива ρ_T (кг/л) по выражению:

$$g_e = \frac{G_{то} \cdot \rho_T}{Ne}, \text{ г/(кВт·ч)} \quad (5)$$

Для любой частоты вращения n (мин⁻¹) и нагрузки M (%) в области рабочих режимов работы двигателя по изложенной методике могут быть получены значения крутящего момента M_K (Н·м), часового расхода топлива $G_{то}$ (л/ч), эффективной мощности Ne (кВт) и удельного эффективного расхода топлива g_e (г/кВт·ч). Для удельного эффективного расхода топлива g_e на рисунке 3 показана полученная многопараметровая характеристика двигателя Deutz BF 6M 2012 C.

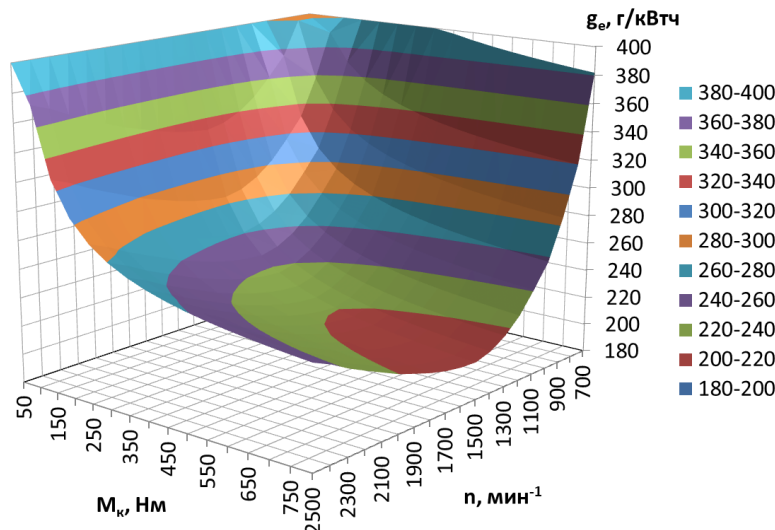


Рисунок 3 – Многопараметровая характеристика удельного эффективного расхода топлива двигателя Deutz BF 6M 2012 C

Полученное расчетное значение минимального удельного расхода топлива 207 г/кВт·ч по многопараметровой характеристике отличаются от значения по данным фирмы Deutz (202 г/кВт·ч) на 5 г/кВт·ч или на 2,5%, что подтверждает хорошую достоверность разработанной методики.

Таким образом, изложенные материалы и приведенные данные подтверждают правомерность применения разработанной методики, которая позволила получить при доверительной вероятности 0,95 в диапазоне изменения частоты вращения 700...2500 мин⁻¹ и нагрузки – 0...100% уравнение регрессии для часового расхода топлива и многопараметровую характеристику удельного эффективного расхода топлива двигателя Deutz BF 6М 2012 С.

В пятой главе «Использование давления наддува в качестве оценки технического состояния двигателя» проведен расчетный анализ влияния давления наддува на показатели двигателя Deutz BF 6М 2012 С и на тяговые характеристики трактора Terrior АТМ 4200. Сделана экономическая оценка потерь от снижения производительности и экономичности работы трактора при нарушении его технического состояния и показана возможность выявления нарушения технического состояния трактора по контролю давления наддува в процессе эксплуатации без отрыва от технологического процесса.

Как известно, в процессе эксплуатации мобильной техники с надувными двигателями существует множество факторов нарушения нормальной работы систем двигателя, приводящим к снижению давления наддува и ухудшению показателей двигателя, которые могут быть обнаружены только при очередном техническом обслуживании или серьезной поломке двигателя.

Проведенный расчетный анализ снижения абсолютного давления наддува двигателя Deutz BF 6М 2012 С с 280 до 180 кПа показал снижение мощности и удельного эффективного расхода топлива на номинальном режиме работы при сохранении часового расхода топлива $G_T = 39,2$ кг/ч, как показано на рисунке 4.

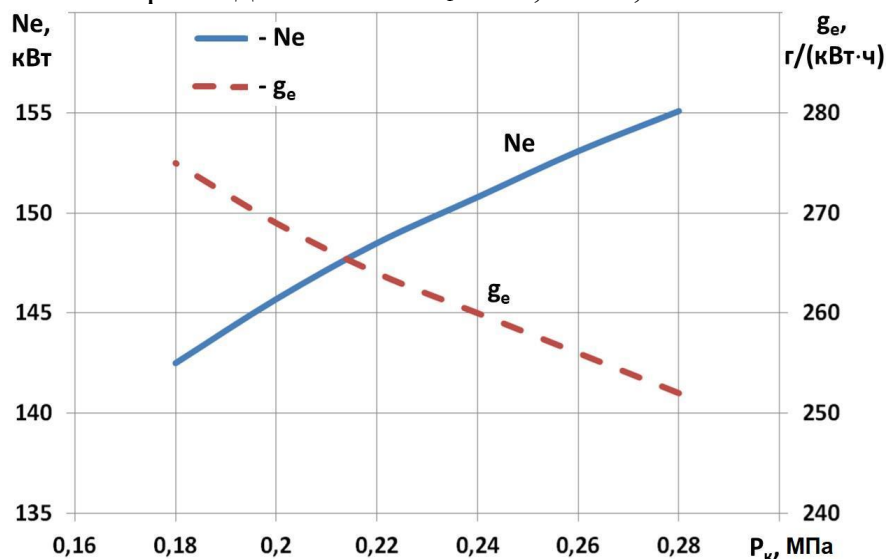


Рисунок 4 – Влияние давления наддува на показатели работы дизеля Deutz BF 6М 2012 С при изменении давления наддува P_k для $G_T = 39,2$ кг/ч

Изменение мощности и экономичности работы двигателя сказывается на производительности и топливной экономичности работы трактора Terrior АТМ 4200. Оценка этих изменений показателей двигателя показала, что при снижении давления наддува на 36% (с 280 до 180 кПа) приводит к снижению мощности двигателя на 8% и увеличению удельного эффективного расхода топлива на 9%. Анализ изменения тяговых характеристик трактора показал при номинальном

тяговом усилии 40 кН показал, что такое изменение параметров двигателя приводит при работе трактора к снижению действительной скорости выполнения операции v_d с 2,3 до 2,06 м/с и крюковой мощности $N_{кр}$ с 92 до 82,5 кВт, т.е. на 9,5 кВт или на 10,3%, как показано на рисунке 5. Удельный крюковой расход топлива $g_{кр}$ вырос с 414 до 431 г/кВт·ч или на 4%.

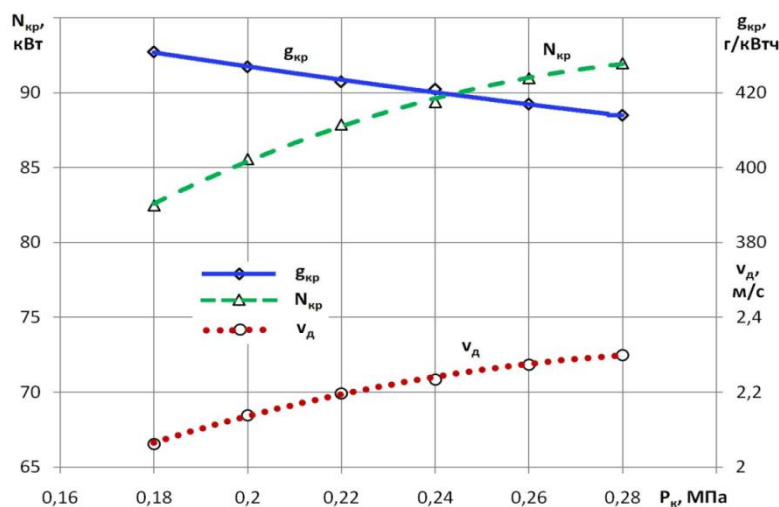


Рисунок 5 – Влияние давления наддува двигателя на показатели работы трактора Terrion ATM 4200 при номинальном тяговом усилии $P_{кр} = 40$ кН

Проведенный экономический анализ получаемых потерь от снижения крюковой мощности и топливной экономичности показал целесообразность контроля давления наддува двигателя и своевременное проведение обслуживания. Так при ухудшении технического состояния двигателя приводящего к снижению давления наддува и снижающие действительную скорость, и производительность трактора снижают сменную производительность и увеличивают трудоемкость операции. А увеличение погектарного расхода топлива, приводит к росту расхода топлива на вспашку и растут затраты на топливо при вспашке.

Анализ полученных данных показывает, что снижение давления наддува с 280 до 180 кПа приводит к снижению производительности выполнения операции с 2,07 до 1,85 га/ч – на 10,43%. В свою очередь это приводит к увеличению удельного расхода топлива с 18,4 до 19,18 кг/га или на 4,2%. Снижение производительности трактора приводит к росту времени на выполнение технологической операции, который достигает 11,7%, и приводит к увеличению затрат на заработную плату, и возможному снижению урожайности, так как работы будут выполнены не в оптимальные сроки, а с задержками.

Результаты проведенного экономического анализа представлены на рисунке 6 в виде относительного изменения удельных трудозатрат $\Delta\tau_{об}$ и затрат на топливо $\Delta Z_{ТВ}$ при вспашке от снижения давления наддува ΔP_k , которые показывают при снижении давления наддува на 30 % удельные трудозатраты $\Delta\tau_{об}$ увеличиваются на 11,7 %, а затрат на топливо $\Delta Z_{ТВ}$ – на 4,2%.

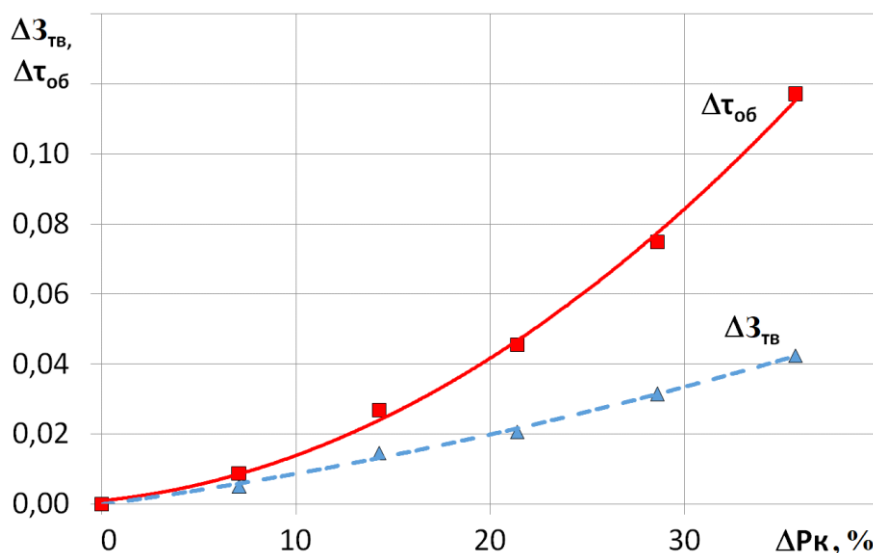


Рисунок 6 – Изменение удельных трудозатрат $\Delta\tau_{об}$ и затрат на топливо $\Delta Z_{тв}$ при вспашке от снижения давления наддува ΔP_k

Снижение производительности трактора приводит к росту времени на выполнение технологической операции, который достигает 11,7%, и приводит к увеличению затрат на заработную плату. Например, на обработку полей площадью 1000 га потребуется дополнительно 56,28 чел.ч, что составляет около 8 рабочих смен.

Своевременное устранение неисправности с помощью мониторинга давления наддува в процессе эксплуатации трактора на уровне снижения давления наддува на 10-15% относительно нормы позволит ограничить уровень потерь от снижения производительности до 1,5...3% вместо 10...12% и по расходу топлива 1...1,5% вместо 4%.

Проведенный экономический анализ влияния технического состояния двигателя трактора Terrioп АТМ 4200, проявляющийся в уменьшении давления наддува, показал целесообразность своевременного устранения неисправности двигателя для восстановления нормального давления наддува.

Получение многопараметровой характеристики для давления наддува дизельного двигателя по результатам анализа данных системы управления тракторного двигателя в процессе его эксплуатации осуществлялось по ранее разработанной методике включающей:

- разбивку области рабочих режимов на зоны;
- получения частных уравнений регрессии для каждой зоны;
- получение уравнения регрессии для всей области рабочих режимов на основании частных уравнений для каждой зоны.

Для каждой из полученных зон проведен анализ данных с целью получения вида уравнения регрессии для давления наддува в соответствии с известной методикой регрессионного анализа данных, отвечающая наибольшей достоверности по коэффициенту детерминации R^2 и критерию Фишера F , значение которого сравнивалось с табличным F_t . Получение уравнений регрессии на процессоре при работе трактора предполагает использование одинаковых видов уравнения для каждой зоны, поэтому в результате анализа

полученных уравнений регрессии наилучший результат по виду уравнений выбран в виде:

$$P_{ki} = b_0 + b_1 \cdot n \cdot M \cdot 10^{-4} + b_2 \cdot dn/dt \cdot 10^{-3} + b_3 \cdot dM/dt \cdot 10^{-3} + b_4 \cdot n^2 \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где: b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 - коэффициенты уравнения;

n – частота вращения, мин⁻¹;

M – нагрузка двигателя, %;

t – время.

При исследовании давления наддува для получения уравнения регрессии по многопараметровой характеристике необходимо учитывать не только частоту вращения и нагрузку, но и их изменение по времени dn/dt и dM/dt .

Использование разработанной и проверенной на расходе топлива методики позволило по полученным частным уравнениям регрессии для избыточного давления наддува для 18-ти зон и стационарного режима работы ($dn/dt=0$ и $dM/dt=0$) получить регрессионную уравнение в виде экспоненциальной зависимости от двух переменных: квадрата частоты вращения n^2 и квадрата нагрузки M^2 .

$$P_k = e^{1,031} \cdot e^{0,498 \cdot n^2 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{1,617 \cdot M^2 \cdot 10^{-4}} + 100, \text{ кПа} \quad (7)$$

где: n – частота вращения, мин⁻¹;

M – нагрузка двигателя, %;

Получаемое уравнение регрессии для всей области рабочих режимов имеет коэффициент детерминации $R^2=0,97$ и критерий Фишера $F = 225$, что подтверждает хорошую достоверность полученной зависимости и возможность ее использования в качестве базовой многопараметровой характеристики при диагностировании двигателя. Проверка достоверности полученной зависимости для предсказания давления наддува показала расхождение полученных результатов от предсказанных не более 3 кПа или 2% и выявлять расхождение измеренного давления наддува при эксплуатации техники от базовой многопараметровой характеристики по давлению наддува до 10%.

Полученная многопараметровая характеристика давления наддува двигателя Deutz BF 6M 2012 C по полученному уравнению (7) приведена на рисунке 7 и использовалась в качестве базовой характеристики для оценки отклонений давления наддува при нарушении нормальной работы двигателя.

Для оценки достоверности получаемых данных при использовании такого подхода была сделана тестовая проверка. В процессе проверки были выбраны пять тестовых зон из которых случайным образом выбирались 150 зарегистрированных значений и производилась их обработка по разработанной методике. Для центра каждой зоны определялось давление наддува, которое сравнивалось со значением по базовой характеристике (уравнение 7). Оценивалось расхождение в значениях полученных давлений наддува по базовой характеристике и по значению, полученному по выборке. Полученные результаты показали, что абсолютное значение отклонения не превышало 3 кПа или 1,5%, что можно считать достаточно хорошей достоверностью предложенной методики оценки давления наддува по выборке из 150 режимов работы двигателя.

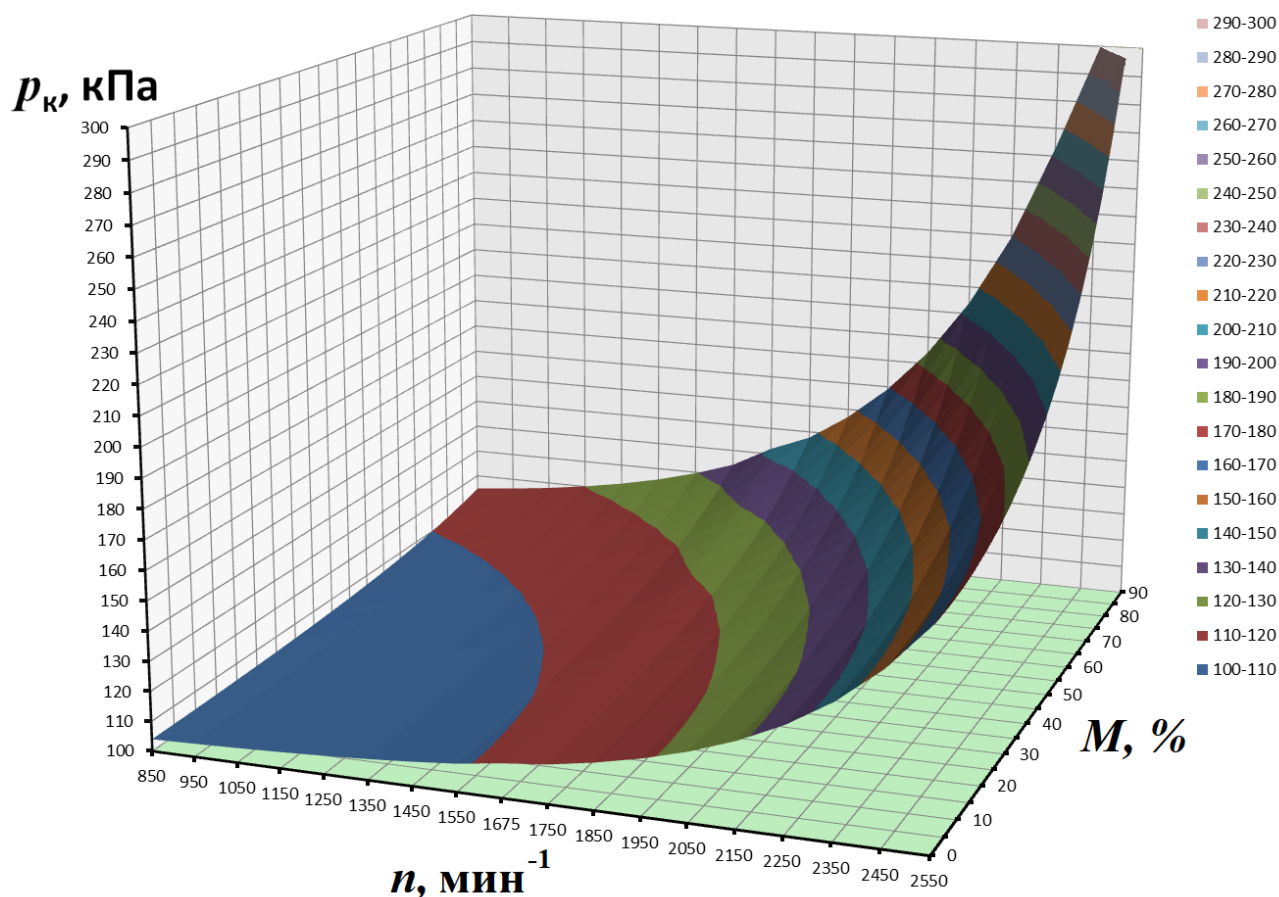


Рисунок 7 – Многопараметровая характеристика по давлению наддува двигателя Deutz BF 6M 2012 C

Полученные результаты исследований показали возможность получения многопараметровой характеристики дизеля Deutz BF 6M 2012 C по разработанной методике и оценку его технического состояния по снижению давления наддува более 10 % и контролю значения давления наддува в эксплуатации без подключения дополнительных устройств и преднамеренного отрыва трактора Terrior ATM 4200 от технологического процесса.

Проверка возможности оценки неисправности двигателя по давлению наддува, зарегистрированному в процессе эксплуатации трактора выполнялась с помощью преднамеренного введения неисправности в системы двигателя.

В процессе эксплуатации техники неисправность одной из форсунок многоцилиндрового двигателя является достаточно частым событием в сравнении с другими неисправностями. Для 6-ти цилиндрового двигателя, которым является двигатель Deutz BF 6M 2012 C, выход из строя форсунки может быть не сразу замечен и техника будет далее эксплуатироваться, пока при очередной проверке технического состояния двигателя она не будет обнаружена.

Неработающая форсунка одного из цилиндров многоцилиндрового двигателя приводит к изменению энергии отработавших газов двигателя, а, следовательно, и к давлению наддува от турбокомпрессора. Поэтому оценка изменения давления наддува при эксплуатации машины с одной неработающей форсункой представляется актуальной.

Для проведения такого исследования была отключена 3-я форсунка дизеля Deutz BF 6M 2012 C и в процессе работы трактора производилась регистрация

данных системы управления через диагностический разъем. Зарегистрированные данные обрабатывались по описанной ранее методике, и полученные результаты сравнивались с базовой многопараметровой характеристикой. Полученные результаты представлены для нагрузки 5 % на рисунке 8,а.

Для проведения исследования с негерметичным впускным трактом дизеля Deutz BF 6М 2012 С была сделана небольшая щель на участке между компрессором и радиатором охладителя наддувочного воздуха. Полученные результаты представлены для нагрузки 7,5 % на рисунке 8,б.

Исследования нарушений нормальной работы двигателя при выходе из строя одной форсунки дизеля Deutz BF 6М 2012 С и нарушения герметичности впускного тракта не фиксировались встроенной системой диагностики трактора Terrior ATM 4200. Полученные результаты показали возможность определения неисправности по снижению давления наддува:

- для одной неработающей форсунки на 16 кПа или 12%;
- для негерметичной впускной системе на 38 кПа или 24%.

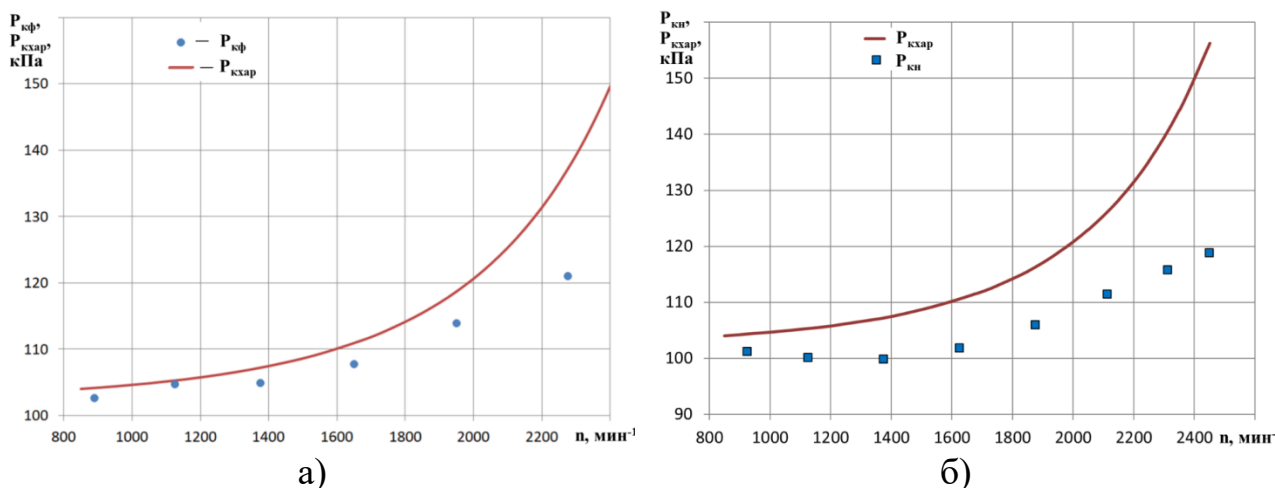
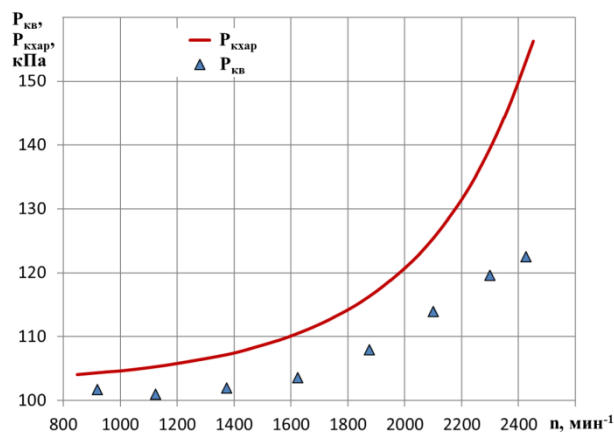


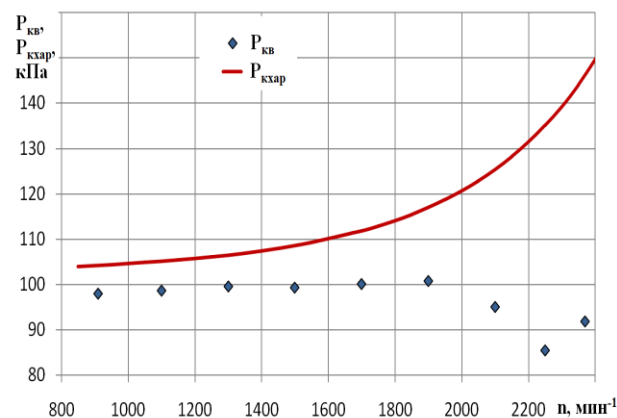
Рисунок 8 – Регистрируемое давление наддува при наличии неисправности и по базовой характеристике $P_{\text{кхар}}$: а) – при неисправной форсунке $P_{\text{кф}}$; б) – при негерметичном впускном тракте $P_{\text{кн}}$

Для проведения исследования с частично засоренным воздушным фильтром дизеля Deutz BF 6М 2012 С установлена ширма в корпусе воздушного фильтра частично перекрывающая поверхность фильтр-патрона. В процессе работы трактора с таким фильтром производилась регистрация данных системы управления через диагностический разъем.

Данные регистрации обрабатывались по описанной ранее методике, и полученные результаты сравнивались с базовой многопараметровой характеристикой, как и при предыдущих исследованиях с неисправностями двигателя. Исследовались две степени «засоренности» фильтра, результаты обработки которых приведены на рисунке 9,а для нагрузки 7,5 % и незначительной засоренности, которая не фиксировалась штатной системой диагностирования. На рисунке 9,б приведены результаты для нагрузки 5 % по степени засорения фильтра, которые определялись штатной системой диагностирования и выдавалась ошибка по коду неисправности.



а)



б)

Рисунок 9 – Регистрируемое давление наддува при засоренном воздушном фильтре $P_{кв}$ и по базовой характеристике $P_{кхар}$: а) – при неопределяемой засоренности; б) – при определяемой засоренности

Исследования нарушений нормальной работы двигателя при «засоренном» воздушном фильтре дизеля Deutz BF 6M 2012 C без определения неисправности встроенной системой диагностики трактора Tertron ATM 4200 показали возможность определения неисправности по снижению давления наддува на 30 кПа или 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработанная методика сбора и предварительной обработки данных CAN-шины в процессе эксплуатации трактора позволяет с помощью разработанной и зарегистрированной программы для декодирования протокола SAE J1939 CAN-шины получать массивы данных включающие: время регистрации, расход топлива, температуру охлаждающей жидкости, абсолютное давление наддува, давление масла, частоту вращения, нагрузку двигателя, скорости движения и др.

2. Разработана методика получения многопараметровой характеристики дизельного двигателя по результатам анализа данных системы управления тракторного двигателя в процессе его эксплуатации, включающая:

- разбивку области рабочих режимов на зоны;
- получения частных уравнений регрессии для каждой зоны;
- получение уравнения регрессии для всей области рабочих режимов

на основании частных уравнений для каждой зоны.

По разработанной методике получены уравнения регрессии для всей области многопараметровой характеристики дизеля Deutz BF 6M 2012 C по удельному расходу топлива с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 1,0$ и критерием Фишера $F = 7059$ и по давлению наддува имеет коэффициент детерминации $R^2 = 0,97$ и критерий Фишера $F = 225$, что подтверждает хорошую достоверность полученных зависимостей и возможность их использования в качестве базовых многопараметровых характеристики при диагностировании двигателя.

3. Проведенный экономический анализ влияния давления наддува на работу трактора Tertron ATM 4200 показал, что при снижении давления наддува на 36% приводит из-за снижения мощности двигателя к снижению

производительности на 10,4% и повышению затрат на топливо на 4,2%. Своевременное устранение неисправности с помощью мониторинга давления наддува в процессе эксплуатации трактора на уровне снижения давления наддува не более 10-15% относительно нормы позволит ограничить уровень потерь от снижения производительности до 1,5...3% вместо 10...12% и по расходу топлива до 1...1,5% вместо 4%.

4. Разработанная методика получения контрольных значений давления наддува в процессе эксплуатации техники и их использования для оценки технического состояния двигателя показала необходимость учета скорости изменения частоты вращения и нагрузки в процессе регрессионного анализа зарегистрированных данных, которые необходимы при получении частных уравнений регрессии для каждой зоны и исключаются для получения базовой многопараметровой характеристики и сравнения контрольных значений со значениями по базовой характеристике. Проверка достоверности полученной зависимости для предсказания давления наддува показала расхождение полученных результатов от предсказанных не более 3 кПа или 2% и выявлять расхождение измеренного давления наддува при эксплуатации техники от базовой многопараметровой характеристики по давлению наддува до 10%.

5. Экспериментальная проверка оценки технического состояния двигателя Deutz BF 6M 2012 C с помощью разработанного метода показала возможность выявления неисправностей, которые не фиксировались встроенной системой диагностики трактора Tertron ATM 4200 по снижению давления наддува:

- для одной неработающей форсунки на 16 кПа или 12%;
- для негерметичной впускной системе на 38 кПа или 24%;
- для частично засоренного воздушного фильтра на 30 кПа или 20%.

6. Разработанные методики получения базовых многопараметровых характеристик и контрольных значений диагностических параметров позволяют получать достоверные результаты отклонений при их сравнении до 10 % и заблаговременно принимать решение о необходимости проведения технического обслуживания для снижения эксплуатационных затрат.

Рекомендации производству

Для определения неисправностей на ранних этапах заложить в блок управления двигателем алгоритм оценки отклонения текущих параметров работы двигателя от базовых характеристик, при превышении критического значения отклонения выводить сообщение о необходимости проверки агрегата.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные диссертационные исследования могут служить основой для дальнейшего развития и совершенствования методов диагностирования технического состояния других систем двигателя и трактора, и локализацию неисправности по характеру изменения диагностируемого параметра в области рабочих режимов машины.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Девянин, С. Н. Параметрическая характеристика двигателя трактора по удельному расходу топлива / С. Н. Девянин, А. В. Бижаев, Я. Д. Павлов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 68-74. – DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-4-68-74.
2. Павлов, Я. Д. Оценка эффективности работы трактора при снижении давления наддува/ Я. Д. Павлов // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 4(334). – С. 12-15. – DOI: 10.33267/2072-9642-2025-4-12-15.

Программа на ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025621326 Российская Федерация. «Параметры наддува двигателя DEUTZ BF6M2012C трактора Terrio в процессе эксплуатации» : № 2025620881: заявл. 14.03.2025 : опубл. 24.03.2025 / Я. Д. Павлов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Прочие издания:

- **в изданиях, включенных в РИНЦ и материалах международных конференций**

1. Павлов, Я. Д. Использование давления наддува для оценки технического состояния ДВС / Я. Д. Павлов // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича : Сборник статей, Москва, 03-05 июня 2024 года. – М. : Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2024. – С. 625-627.
3. Павлов, Я. Д. Способы получения данных о работе трактора через диагностический разъем / Я. Д. Павлов // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25-26 января 2022 года. Часть 2. – М. : ООО «Сам полиграфист», 2022. – С. 172-181.