ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Балабанова Виктора Ивановича
на диссертацию **Григорьева Евгения Александровича**
«Разработка цифрового двойника процесса деградации моторного масла в двигателе сельскохозяйственного трактора», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

1. Актуальность темы диссертации

Одной из важнейших задач в области технической эксплуатации тракторов является определение фактического состояния моторного масла и своевременное назначение сроков его замены. На практике замена моторного масла в двигателе трактора назначается по нормативной наработке в моточасах, но такой подход не в полной мере учитывает реальные условия работы техники, в которых интенсивность деградации смазочного материала может существенно различаться. В результате возникают ситуации, когда масло либо заменяется преждевременно, что неоправданно увеличивает затраты, либо продолжает эксплуатироваться при уже исчерпанном его ресурсе, создавая риск отказа двигателя. В связи с этим актуальной становится задача разработки методов, позволяющих определять фактическое состояние моторного масла в процессе эксплуатации.

В представленной диссертационной работе Григорьева Е.А. предлагается решение этой задачи путем создания цифрового двойника процесса деградации моторного масла. Цифровой двойник позволяет на основе учета эксплуатационных факторов прогнозировать изменение щелочного числа. Предложенный подход соответствует современным тенденциям перехода к техническому обслуживанию «по фактическому состоянию» и имеет практическую значимость для сельскохозяйственных предприятий.

В соответствии с этим кандидатская диссертация **Григорьева Евгения Александровича** на тему «Разработка цифрового двойника процесса деградации моторного масла в двигателе сельскохозяйственного трактора» является своевременной и актуальной.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений и выводов работы определяется применением комплекса методов: системного анализа, математического моделирования, планирования эксперимента и параметрической идентификации. Теоретические исследования выполнены на основе фундаментальных положений физико-химической кинетики, экспериментальные данные получены с использованием современного измерительного оборудования и стандартизированных методик лабораторного анализа. Значимость полученных

результатов подтверждается актами внедрения в производство и зарегистрированными результатами интеллектуальной деятельности.

По результатам диссертационной работы сформулированы десять основных выводов.

Первый вывод получен по результатам проведенного анализа литературных источников и констатирует выбор щелочного числа как наиболее информативного показателя состояния масла. Из числа эксплуатационных факторов в качестве ключевых выделены нагрузка и частота вращения коленчатого вала, что согласуется с результатами исследований других авторов.

Второй вывод демонстрирует установленную закономерность деградации масла на основе экспоненциального закона, позволяющую определять текущее значение щелочного числа при заданной наработке. Вывод достоверен, так как имеет теоретическое обоснование, подтвержденное анализом литературных данных.

Третий вывод достоверен, так как содержит аналитические зависимости скорости изменения щелочного числа с учетом скоростного и нагрузочного режимов, а также утечки, угара и доливки масла.

Четвертый вывод посвящен разработке алгоритма определения параметров модели цифрового двойника на основе имитационного моделирования. Практическая ценность и достоверность вывода подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2026617913 и № 2026619413 РФ).

Пятый вывод раскрывает функционал разработанной модели цифрового двойника. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных, полученных в ходе стендовых испытаний и мониторинга, подтверждает достоверность и адекватность предложенной модели.

Шестой вывод достоверен, так как получен на основе частотного анализа режимов работы двигателей сельскохозяйственных тракторов по данным, полученным системой мониторинга в реальных условиях эксплуатации сельскохозяйственного предприятия. В тоже время, анализ выполнен только для двух моделей тракторов в рамках одного предприятия и для большей обоснованности выводов целесообразно располагать данными по более широкой номенклатуре тракторов.

Седьмой вывод содержит результаты прогнозирования ресурса масла цифровым двойником. Вместе с тем, прогноз получен только для рассмотренных в работе моделей тракторов и типов масел и может отличаться при расширении области применения цифрового двойника.

Восьмой вывод достоверен, так как основывается на экономических расчетах, представленных в пятом разделе.

Девятый вывод содержит научно-обоснованные рекомендации по применению цифрового двойника процесса деградации моторного масла: предлагается использовать модель в системе мониторинга для определения срока замены, а при ее отсутствии – применять мобильную систему сбора данных с устройством для определения положения рейки топливного насоса. Достоверность вывода подтверждается патентом № 243901 РФ.

Десятый вывод определяет перспективные направления дальнейших исследований, в числе которых – расширение области применения цифровых двойников на другие типы машин, накопление данных для различных двигателей и масел, а также разработка автономного устройства для прогнозирования сроков замены масла.

Заключение логически вытекает из содержания работы, аргументировано и подкреплено результатами теоретических и экспериментальных исследований, полностью отражает результаты диссертационной работы, содержит практические рекомендации по их использованию и направления для дальнейших исследований.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных методов исследования: системного анализа, математического и имитационного моделирования, планирования эксперимента, а также использованием стандартизированных методов лабораторного анализа. Эмпирическая база исследования сформирована на основе данных стендовых испытаний и мониторинга реальной эксплуатации тракторов, что подтверждает практическую значимость работы. Результаты работы внедрения в ООО НПКФ «Агротех-Гарант Березовский», ООО «Транскодер» и подтверждают практическую применимость разработок.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выявлена закономерность деградации моторного масла на основе экспоненциального закона, отличающаяся учетом изменения щелочного числа в зависимости от скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя;
- получены аналитические зависимости скорости изменения щелочного числа, отличающиеся учетом влияния режимов работы двигателя, а также утечки, угара и доливки моторного масла;
- разработана модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла, отличающаяся тем, что использует данные мониторинга эксплуатационных показателей двигателей сельскохозяйственных тракторов или результаты стендовых экспериментов;
- установлены экспериментальные зависимости изменения щелочного числа от наработки, отличающиеся учетом работы двигателя при разных режимах в типичных условиях эксплуатации сельскохозяйственных тракторов.

Практическую значимость работы имеют:

- компьютерная программа, реализующая модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617913 РФ), предназначенная для прогнозирования остаточного ресурса моторного масла;
- компьютерная программа подготовки данных мониторинга эксплуатационных показателей двигателя внутреннего сгорания сельскохозяйственного трактора (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026619413 РФ);

- алгоритм определения параметров модели цифрового двойника;

- компьютерная программа планирования поэтапного стендового эксперимента, обеспечивающая равномерное насыщение опытами факторного пространства (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024684264 РФ);

- устройство для определения положения рейки топливного насоса высокого давления (патент № 243901 РФ), позволяющее определять нагрузку на двигатель в моделях с топливным насосом высокого давления и механическим регулятором без электронного блока управления.

Научная новизна и практическая значимость диссертации подтверждается научными публикациями и широкой апробацией работы на научных конференциях и конкурсах.

4. Оценка содержания диссертации в целом

Диссертация изложена на 190 страницах и состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 182 наименований, двух приложений, а также включает в себя 38 рисунков и 11 таблиц.

Во введении автор обосновывает актуальность темы, формулирует цели и задачи, определяет объект и предмет исследования, а также представляет основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературных источников, посвященных процессу старения моторных масел, влиянию эксплуатационных факторов и существующим способам диагностики. Обосновывается выбор щелочного числа как критерия оценки состояния масла и делается вывод о недостаточной изученности влияния режимных факторов на процесс деградации.

Во второй главе представлены теоретические исследования, в ходе которых выведены аналитические зависимости изменения щелочного числа. Автором разработана имитационная модель цифрового двойника и алгоритм идентификации ее параметров. Внимания также заслуживает учет в модели таких процессов, как угар и доливка масла.

В третьей главе изложены программа и методика экспериментальных исследований. Подробно описана разработанная автором система автоматизированного сбора данных и оригинальное устройство для определения положения рейки топливного насоса (патент РФ № 243901). Представляет интерес методика планирования эксперимента на основе алгоритма латинских гиперкубов, обеспечивающая равномерное заполнение факторного пространства.

Четвертая глава содержит основные результаты. Проведенный частотный анализ режимов работы тракторов в реальных условиях подтверждает гипотезу о том, что трактор работает в широком диапазоне нагрузочных и скоростных режимов. Полученные параметры модели и результаты прогнозирования показывают, что применение цифрового двойника позволяет увеличить межсервисный интервал в 1,4…2,3 раза по сравнению с регламентным способом. Адекватность модели подтверждена сходимостью расчетных и экспериментальных данных.

Пятая глава посвящена экономическому обоснованию применения цифрового двойника процесса деградации моторного масла. Расчеты показывают, что внедрение разработки подтверждает экономическую эффективность предложенных решений.

В заключении сформулированы основные выводы, которые в полной мере отражают содержание работы и соответствуют поставленным задачам.

Автореферат представлен на 16 страницах и включает в себя общую характеристику работы, содержание, заключение и список основных работ, опубликованных по теме диссертационной работы. Структура, содержание, научные результаты, выводы и автореферата соответствуют содержанию и направленности диссертационной работы.

5. Замечания по диссертационной работе

1. Разработанная модель цифрового двойника учитывает два основных эксплуатационных фактора – нагрузку и частоту вращения коленчатого вала. Вместе с тем в модели не учитываются другие факторы, оказывающие влияние на скорость старения масла.

2. В подразделе 1.5 целесообразно представить результирующий вывод, который определяет направление последующих исследований.

3. В подразделе 2.2 автор переходит от щелочного числа к массе щелочных компонентов. Однако в тексте не поясняется, почему этот переход необходим именно для учета изменения объема масла.

4. В работе используются два способа определения нагрузки на двигатель: по показаниям весового устройства и по положению рейки топливного насоса высокого давления, но не указывается параметр, характеризующий нагрузку и степень их корреляции.

5. В подразделе 3.2 при описании сбора данных мониторинга указано, что запись показаний датчиков осуществлялась с периодичностью 30 секунд, но не указано влияние дискретности данных на точность прогнозирования.

6. При обсуждении коэффициентов модели (b_3, b_4, b_5) в выводах к главе 4 указывается большое влияние нагрузочного режима (b_5). Однако, учитывая, что коэффициенты имеют разный физический смысл, прямое сравнение модулей их величин является не совсем корректным без учета фактических диапазонов изменения этих переменных.

7. В разделе 5 при расчете экономической эффективности учтены затраты на модуль цифрового двойника, включающие отбор проб масла и их лабораторный анализ, но не уточняется периодичность проведения таких анализов для поддержания точности модели и затраты на них в случае выполнения работ сторонней организацией.

Несмотря на высказанные замечания, диссертационная работа обладает основными квалификационными признаками, содержит новые научные представления и имеют практическую ценность.

Следует отметить, что указанные замечания и результаты исследований автора модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла с

использованием данных мониторинга эксплуатационных показателей двигателей сельскохозяйственных тракторов и результатов стендовых испытаний могут являться направлением дальнейших изысканий в рамках докторской диссертационной работы.

6. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа на тему «Разработка цифрового двойника процесса деградации моторного масла в двигателе сельскохозяйственного трактора» является завершенной самостоятельной научно-квалификационной работой.

По своей актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов работа полностью соответствует критериям, установленным пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, содержание соответствует паспорту специальности 4.3.1. – «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса», а ее автор ***Григорьев Евгений Александрович*** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Официальный оппонент:
заведующий кафедрой
сельскохозяйственного строительства
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,
профессор, доктор технических наук
по специальности 05.20.03 – Технологии и средства
технического обслуживания в сельском хозяйстве

_____ Виктор Иванович Балабанов

(подпись) 28.09.2026

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева). Почтовый адрес: 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, тел.: 8(499) 976-04-80, 8(499) 976-20-50. E-mail: info@rgau-msha.ru.

Отдел по организации и координации диссертационных советов

Подпись сотрудника Сотрудника Т.С.

№ 491-09/26 от 28.09.2026