ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук
Александрова Антона Вячеславовича
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 исследования

Повышение надежности и экономической эффективности эксплуатации автотракторной техники является важной практической и научной задачей агропромышленного комплекса. В настоящее время регламентирование интервалов технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания тракторов преимущественно опирается на фиксированную наработку. Однако тракторная техника эксплуатируется в условиях переменности нагрузочных и скоростных режимов, что обусловливает неравномерную интенсивность процессов старения в моторном масле.

Замена смазочного материала по наработке двигателя приводит либо к недоиспользованию его ресурса (при легких режимах работы), либо к эксплуатации техники на масле с утерянными эксплуатационными свойствами (при тяжелых режимах), что увеличивает риск износа узлов ДВС. В связи с этим переход к оценке и прогнозированию остаточного ресурса моторного масла по фактическому состоянию на основе учета воздействующих эксплуатационных факторов с применением цифровых технологий является весьма актуальным.

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

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, обеспечивается комплексным применением теоретических и экспериментальных методов исследования. Автор использует системный анализ, математическое и имитационное моделирование, теорию планирования эксперимента, методы параметрической идентификации и оптимизации, а также стандартные методики лабораторного анализа моторных масел. Полученные результаты прошли апробацию на научных конференциях и внедрены в производственную деятельность и учебный процесс.

Первый вывод касается выбора щелочного числа в качестве показателя, отражающего состояние и остаточный ресурс моторного масла. Данный вывод аргументирован на основе анализа различных литературных источников. Выделение нагрузки на двигатель и частоты вращения

коленчатого вала в качестве основных эксплуатационных факторов не противоречит результатам других исследований.

Второй вывод содержит закономерность деградации моторного масла на основе экспоненциального закона. Обоснованность этого вывода базируется на теоретическом анализе процесса старения масла, представленного в литературе, а также на собственных испытаниях. Автор показывает, что модель позволяет определять текущее значение щелочного числа при заданной наработке с достаточной точностью.

Третий вывод посвящён аналитическим зависимостям скорости изменения щелочного числа. Эти зависимости получены на основе дифференциальных уравнений, учитывающих скоростной и нагрузочный режимы работы двигателя, а также процессы утечки, угара и доливки масла. Принятые допущения соответствуют физической картине процесса.

Четвертый вывод относится к алгоритму определения параметров модели цифрового двойника. Алгоритм основан на имитационном моделировании и последующей параметрической идентификации с использованием методов оптимизации. Автором обоснованы диапазоны изменения коэффициентов модели. Работоспособность алгоритма подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Пятый вывод раскрывает функциональные возможности модели цифрового двойника. Модель позволяет определять текущее состояние масла, прогнозировать его ресурс и срок замены в различных условиях эксплуатации. Адекватность модели подтверждена сопоставлением расчётных и экспериментальных данных, полученных в ходе проведения стендовых испытаний и мониторинга реальной эксплуатации сельскохозяйственных тракторов.

Шестой вывод основан на результатах частотного анализа режимов работы двигателей сельскохозяйственных тракторов. Автор показывает, что эксплуатация на режимах, близких к номинальным, встречается редко, а преобладают менее напряжённые режимы. Вывод получен на основе обработки значительного массива данных мониторинга и согласуется с известными представлениями о работе тракторов.

Седьмой вывод касается прогнозирования ресурса масла с помощью цифрового двойника. Автор показывает, что фактический ресурс масла в типичных условиях эксплуатации может быть существенно увеличен в сравнении с работой двигателя на номинальном режиме. Вывод подтверждён результатами моделирования и данными, полученными для конкретных тракторов и марок масел.

Восьмой вывод содержит экономическое обоснование применения цифрового двойника процесса деградации моторного масла. Расчёты выполнены по общепринятым методикам, что подтверждает обоснованность вывода. Чистая годовая экономия для парка из восьми тракторов составляет 90 440 руб., а срок окупаемости капитальных вложений — 0,53 года.

Девятый вывод формулирует рекомендации по практическому использованию цифрового двойника. Предлагается интегрировать модель в уже установленную систему мониторинга тракторов, а при её отсутствии — применять разработанную систему сбора данных. Рекомендации подкреплены патентом на полезную модель и результатами внедрения в производство и в учебный процесс.

Десятый вывод определяет перспективные направления дальнейших исследований. К ним отнесены 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. Вывод логически вытекает из содержания работы и отражает нерешённые задачи в данной предметной области.

Обоснованность выводов подтверждается не только логикой исследования, но и согласованностью с результатами, полученными другими исследователями. Экспоненциальный характер изменения щелочного числа отмечается в работах ряда авторов, а вывод о непостоянстве режимов работы двигателя при эксплуатации сельскохозяйственных тракторов согласуется с известными данными о реальных условиях работы техники в АПК. Это свидетельствует о том, что полученные в диссертации результаты не противоречат накопленному научному заделу, а развивают и уточняют его.

Таким образом, все десять выводов диссертационной работы являются обоснованными, логически связанными с содержанием исследования и подтверждёнными теоретическими и экспериментальными результатами.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается несколькими обстоятельствами. Теоретические положения базируются на анализе процесса деградации моторного масла и фундаментальных закономерностях физико-химической кинетики. При выполнении работы использовались системный анализ, методы математического и имитационного моделирования, планирование эксперимента, параметрическая идентификация на основе методов оптимизации. Предложенная экспоненциальная модель изменения щелочного числа согласуется с экспериментальными данными, полученными как в ходе стендовых испытаний, так и при обработке литературных источников.

Прогностическая способность модели проверялась на данных, не участвовавших в идентификации параметров цифрового двойника. Расхождения между прогнозными и лабораторными значениями щелочного числа не превышают погрешности лабораторного анализа.

Применение разработок в организациях разного профиля подтверждает достоверность получаемых результатов на практике.

Основные научные результаты, обладающие новизной:

1. Закономерность деградации моторного масла, базирующаяся на экспоненциальном законе и учитывающая динамику изменения щелочного числа в зависимости от скоростного и нагрузочного режимов работы ДВС.

2. Аналитические зависимости скорости изменения щелочного числа, позволяющие производить расчет текущего состояния масла с учетом не только режимов работы двигателя, но и эксплуатационных факторов расхода масла (угар, утечки, долив свежего масла).

3. Модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла и алгоритм идентификации ее параметров, функционирующие на основе данных телеметрического мониторинга тракторов или результатов стендовых испытаний.

4. Зависимости изменения щелочного числа от наработки, отражающие специфику работы ДВС сельскохозяйственных тракторов в типичных условиях эксплуатации.

4. Практическая значимость работы

Практическую ценность представляют:

1. Разработка алгоритма и программного обеспечения для ЭВМ, реализующих модель цифрового двойника и первичную обработку данных мониторинга;

2. Разработка конструктивного решения устройства для определения положения рейки топливного насоса высокого давления, позволяющего оценивать нагрузку ДВС с механическим регулятором;

3. Внедрение результатов исследования в ООО НПКФ «Агротех-Гарант Березовский» и в систему мониторинга ООО «Транскодер», а также использование материалов работы в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ.

5. Оценка содержания диссертации и полноты опубликования результатов

Диссертация изложена на 190 страницах, содержит 38 рисунков, 11 таблиц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (182 источника) и приложений.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен подробный анализ существующих методов диагностики и прогнозирования срока службы моторных масел, обоснован выбор щелочного числа в качестве ключевого индикатора остаточного ресурса.

Во второй главе представлено теоретическое обоснование экспоненциального характера деградации масла, получены математические зависимости изменения щелочного числа и описан алгоритм идентификации параметров модели цифрового двойника.

В третьей главе описаны методики стендовых экспериментов и сбора данных с эксплуатируемых тракторов, планирование эксперимента и методы обработки результатов.

В четвертой главе приведены результаты анализа режимов работы тракторов Кировец К-742М и John Deere 6B, сопоставлены экспериментальные данные и результаты прогнозирования ресурса масла моделью цифрового двойника.

В пятой главе дано экономическое обоснование применения цифрового двойника для оптимизации интервалов замены моторного масла.

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, включая 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент на полезную модель и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Опубликованные работы в полной мере отражают основное содержание диссертационного исследования.

6. Замечания и дискуссионные положения

При общей положительной оценке работы по тексту диссертации имеется ряд замечаний и вопросов дискуссионного характера:

1. В работе постоянно используется термин «моточасы», но нет четкого определения, как происходит их расчет. Горизонтальная ось графиков «Время эксплуатации» также воспринимается неоднозначно из-за большого различия в приводимых значениях.

2. В теоретической части автор делает вывод об экспоненциальном законе изменения щелочного числа, однако данное утверждение является допущением, так как реальная кинетика старения масла не является строго экспоненциальной. Также в модели старения масла не учитывается его температура, которая в значительной степени зависит от температуры окружающей среды.

3. Из текста работы не вполне ясно, каким образом модель цифрового двойника учитывает возможные различия в качестве используемого дизельного топлива. Также нет указаний, контролировалось ли качество топлива при выполнении стендовых испытаний. Целесообразно, было бы раскрыть этот аспект более подробно.

4. Автором не указаны критерии выбора конкретных марок моторных масел (G-Profi MSI Plus 15W-40 и John Deere Torq-Gard 15W-40) для проведения экспериментальных исследований, что не позволяет оценить, насколько полученные результаты применимы к маслам других производителей с аналогичными характеристиками.

5. В разделе 3.1.2 при планировании стендового эксперимента не обоснован выбор нижней границы частоты вращения коленчатого вала (1100 $мин^{-1}$), тогда как в реальных условиях эксплуатации тракторы часто работают на более низких оборотах, включая режим холостого хода.

6. В модели цифрового двойника не учитывается влияние технического состояния двигателя (степень износа цилиндропоршневой группы, состояние

масляного насоса) на скорость старения масла, что снижает точность прогноза для двигателей с различной наработкой.

7. В разделе 4.4 «Выводы» выводы 3 и 5 имеют сильно различные значения для усредненного режима и режима холостого хода и близкие для номинального режима. Объясните это, пожалуйста.

Указанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационного исследования и носят рекомендательный и дискуссионный характер.

7. Заключение

Диссертационная работа Григорьева Евгения Александровича на тему «Разработка цифрового двойника процесса деградации моторного масла в двигателе сельскохозяйственного трактора» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-практической задачи по повышению эффективности использования моторных масел при эксплуатации сельскохозяйственных тракторов.

Работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, 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:
доцент кафедры
теплотехники и автотракторных двигателей
ФГБОУ ВО МАДИ,
кандидат технических наук
(по специальности
05.04.02 – Тепловые двигатели)
доцент, _____ Антон Вячеславович Александров

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (ФГБОУ ВО МАДИ).
125319, г. Москва, ул. Ленинградский проспект, д. 64.
Телефон: 89031581957
E-mail: medilab@mail.ru

«10» сентября 2026 г.

Подпись Александрова А.В. удостоверяю
документовед о/к _____ Данилова Т. Д.

ОТДЕЛ КАДРОВ