

На правах рукописи



ГРИГОРЬЕВ Евгений Александрович

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ
МОТОРНОГО МАСЛА В ДВИГАТЕЛЕ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель: **Химченко Аркадий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Балабанов Виктор Иванович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева), и.о. заведующего кафедрой сельскохозяйственного строительства;
Александров Антон Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ), доцент кафедры теплотехники и автотракторных двигателей.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ).

Защита состоится 29 октября 2026 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 35.2.008.01, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Диссертационные советы» – «Защиты» – «35.2.008.01»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=13700>.

Автореферат разослан 04 сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Совершенствование системы технического обслуживания автотракторной техники требует перехода от фиксированных сроков замены моторного масла к обслуживанию по фактическому состоянию. Как показывает анализ, наиболее информативным и обобщённым показателем остаточного ресурса масла выступает щелочное число, снижение которого зависит прежде всего от нагрузочных и скоростных режимов работы двигателя. Однако реализация такого подхода сдерживается отсутствием простых и достоверных методов бортового контроля: лабораторный анализ трудоёмок, а известные экспресс-методы страдают субъективностью, что смещает акцент в сторону прогнозирования по эксплуатационным факторам.

Современные системы мониторинга тракторов позволяют реализовать это в форме цифрового двойника, объединяющего статистическую модель изменения щелочного числа с фактическими данными о режимах работы двигателя. Предлагаемый расчётный модуль интегрируется в существующую систему удалённого мониторинга и без усложнения конструкции выполняет прогноз остаточного ресурса масла на сервере, информируя оператора о необходимости замены. Разработка математической модели и алгоритма такого цифрового двойника является актуальной научной задачей, решение которой даст возможность научно обоснованно корректировать межсервисные интервалы, минимизируя риски отказов и эксплуатационные расходы.

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы (НИР) агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Инновационные направления совершенствования мобильных энергетических средств», утвержденной ученым советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Проведенный анализ показал, что этим направлением занималось большое количество учёных, которые разрабатывали и развивали: методы лабораторной диагностики, экспресс-анализа и методы прогнозирования влияния внешних факторов на ресурс моторного масла.

Значительный вклад в изучение процессов старения моторных масел в условиях работы ДВС, определением степени влияния различных факторов на интенсивность старения и остаточного ресурса масла, внесли исследователи: В.В. Остриков, С.В. Венцель, А.В. Кузнецов, М.А. Григорьев, Л.С. Васильева, Д.В. Агровиченко, Д.И. Данилогорский, А.П. Уханов, В.В. Салмин, А.В. Кошелев, А.П. Картошкин, М.А. Серебряков, В.Е. Колпаков, Д.С. Голубев, Е.А. Ефремова и др. Также направление развивали и зарубежные авторы: T. Omiya, E. Hu, M. Yu, J. Zhang, J.E. Mc Donald, T. Sawatari, M. Nakamura, T. Sugiura и др.

Исследования в области определения состояния масел по фактическим значениям физико-химических показателей, а также методов экспресс-диагностики отражены в работах: В.А. Аметова, А.А. Семёнова, Н.М. Алейникова, А.С. Яровенко, Р.Б. Ахметкалиева, В.В. Острикова, Ю.А. Гурьянова, Г.Д. Матыцина, А.Б. Алхимова, А.Ю. Корнева и др.

Впервые концепцию цифровых двойников представил профессор М. Grieves. В дальнейшем развитием данного направления занимались такие зарубежные учёные, как S. Cesco, P. Sambo, A. Subeesh, M. Kallenberg, A. Jose. Также вопросом занимались и отечественные исследователи: А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, А.А. Гамзикова, Е.Н. Ракутько, А.С. Дорохов и др.

Несмотря на значительное количество работ, посвящённых диагностике состояния моторных масел, остаются недостаточно изученными вопросы комплексного учёта влияния режимов работы двигателя на остаточный ресурс моторного масла для прогнозирования его старения и эффективного использования, в том числе с применением цифровых двойников. В связи с этим тема диссертационной работы является актуальной.

Объект исследования: процесс деградации моторного масла двигателя внутреннего сгорания сельскохозяйственного трактора при эксплуатации.

Предмет исследования: закономерности изменения щелочного числа моторного масла двигателя внутреннего сгорания сельскохозяйственного трактора при эксплуатации.

Цель исследования: повышение эффективности использования моторных масел при эксплуатации сельскохозяйственных тракторов применением цифрового двойника процесса деградации моторного масла.

Задачи исследований:

- установить закономерность деградации моторного масла на основе изменения его щелочного числа, которая позволит определять текущее значение щелочного числа при заданной наработке;
- выявить зависимости скорости изменения щелочного числа моторного масла для оценки его фактического состояния в конкретные моменты времени;
- разработать модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла и алгоритм для определения ее параметров;
- экспериментально установить режимы работы двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственных тракторов в типичных условиях эксплуатации и получить данные по изменению щелочного числа моторного масла при работе двигателей на разных режимах.

Научная новизна:

- выявлена закономерность деградации моторного масла на основе экспоненциального закона, отличающаяся тем, что учитывает изменение щелочного числа в зависимости от режимов работы двигателя внутреннего сгорания при эксплуатации;
- получены аналитические зависимости скорости изменения щелочного числа моторного масла от продолжительности работы двигателя, отличающиеся тем, что учитывают влияние режимов работы двигателя, а также утечку, угар и доливку 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;
- получены зависимости изменения щелочного числа моторного масла от наработки, отличающиеся тем, что учитывают работу двигателя внутреннего сгорания при разных режимах в типичных условиях эксплуатации сельскохозяйственных тракторов.

Теоретическую значимость имеют закономерность деградации моторного масла на основе экспоненциального закона; зависимости скорости изменения щелочного числа моторного масла от наработки, режимов работы двигателя, влияния утечки, угара и доливки моторного масла; модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла, дополняющие теоретические положения оценки состояния моторных масел в процессе эксплуатации двигателей внутреннего сгорания.

Практическую значимость представляют компьютерная программа, реализующая модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла, (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026617913 РФ) 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, позволяющее определять нагрузку на двигатель в моделях двигателей с топливным насосом высокого давления и механическим регулятором без электронного блока управления (патент №243901 РФ).

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в соответствии с требованиями действующих стандартов и разработанными частными методиками. Лабораторный анализ моторного масла проводился в лаборатории Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

(ФГБНУ ВНИИТиН). При теоретических исследованиях использовались системный анализ и методы математического моделирования, в том числе компьютерного и имитационного. Экспериментальные исследования включали стендовые испытания на основе планирования эксперимента с регистрацией динамически изменяющихся сигналов, методы сглаживания экспериментальных данных и мониторинг реальных режимов эксплуатации сельскохозяйственных тракторов. При обработке результатов экспериментов использовались статистические методы, методы лабораторного анализа моторного масла. Для определения параметров цифрового двойника применялась параметрическая идентификация модели на основе вычислительных экспериментов и методов оптимизации. Моделирование, планирование, регистрация и обработка результатов экспериментов выполнены с использованием программных средств L-Card, Excel, Matlab и Simulink.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерность деградации моторного масла на основе экспоненциального закона, позволяющая определять его текущее значение при заданной наработке;
- зависимости скорости изменения щелочного числа моторного масла, позволяющие определять его фактическое состояние в конкретные моменты времени;
- модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла, позволяющая определять его текущее состояние, прогнозировать ресурс и срок замены масла в заданных условиях;
- зависимости изменения щелочного числа моторного масла от наработки, необходимые для уточнения сроков замены масла.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты исследования получены с применением современных теоретических подходов, методов математического моделирования, планирования эксперимента и методов оптимизации, апробированных методик выполнения экспериментальных исследований и автоматизированного сбора данных. Эмпирическая база работы сформирована на основе опытных данных, полученных в ходе проведения стендовых экспериментов, данных мониторинга сельскохозяйственных тракторов в эксплуатации, а также проведения лабораторных анализов моторных масел.

Достоверность результатов подтверждается методологической базой исследований, применением апробированных методов и методик исследований, поверенных измерительных средств, а также результатами внедрения в производство.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО НПКФ «Агротех-Гарант Березовский», где используются при проведении технического обслуживания сельскохозяйственных тракторов, и в системе мониторинга автотранспортной техники ООО «Транскодер» для фактической оценки сроков замены масла, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ при подготовке обучающихся по направлению подготовки 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались в период с 2023 по 2026 г. на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, а также на международных, всероссийских и национальных научных конференциях.

Личный вклад заключается в постановке цели, задач, выборе методов исследований, анализе состояния степени разработанности темы, получении аналитических зависимостей и проведении расчетов, проведении стендовых испытаний и мониторинга работы сельскохозяйственных тракторов, выполненных лично автором; разработке модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла и компьютерных программ, разработке и отладке оборудования для проведения стендовых испытаний, обработке результатов эксперимента и мониторинга работы сельскохозяйственных тракторов, разработке устройства для определения положения рейки топливного насоса, выполненных при участии автора, подготовке научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе три статьи – в российских журналах, включенных в перечень ВАК, два патента РФ на полезные модели и четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и приложений; изложена на 190 страницах, содержит 38 рисунков, 10 таблиц и два приложения. Список литературы включает 182 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведена степень её разработанности, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, отражены личный вклад соискателя, количество публикаций, структура и объем диссертации.

В первом разделе «Анализ исследований по прогнозированию срока службы моторного масла» рассмотрены процессы старения моторных масел, а также существующие способы оценки их состояния и остаточного ресурса. Установлено, что процесс деградации моторного масла в двигателе внутреннего сгорания сопровождается изменением его физико-химических параметров, среди которых наиболее информативным и обобщённым показателем, отражающим состояние и остаточный ресурс масла, является щелочное число. Закономерность его изменения в процессе наработки хорошо поддаётся прогнозированию. Выявлены основные факторы, влияющие на изменение щелочного числа: конструктивные особенности двигателя, климатические условия, техническое состояние двигателя, режимы эксплуатации и качество применяемого масла. Наибольшее влияние оказывают частота вращения коленчатого вала и нагрузка на двигатель. Перспективными для практической реализации являются способы, основанные на учёте влияния факторов и последующем прогнозировании. Для их реализации могут быть использованы цифровые двойники, которые на данный момент успешно применяются в различных отраслях.

Во втором разделе «Теоретические исследования влияния эксплуатационных факторов на скорость изменения состояния моторных масел» выполнен анализ характера изменения основных физико-химических показателей состояния моторного масла, получены аналитические зависимости динамики щелочного числа, а также разработан алгоритм определения параметров модели цифрового двойника. Было установлено, что изменение щелочного числа в процессе эксплуатации происходит по экспоненциальной зависимости. Анализ характера изменения щелочного числа показал: влияние таких факторов, как нагрузка на двигатель и скоростной режим работы двигателя достаточно сильно выражено, и, вероятно, описывается линейной функцией от базовой зависимости. На рисунке 1 показано влияние нагрузочного режима на снижение щелочного числа в процессе наработки двигателя.

Для прогнозирования щелочного числа с учётом скоростного и нагрузочного режимов предложена модель:

$$CH = a_1 + a_2 e^{\frac{nt \left(a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)}{n_H}}, \quad (1)$$

где CH – щелочное число, мг КОН/г; n и n_H – текущая и номинальная частота вращения, мин⁻¹; t – время, с; u – относительная нагрузка, %; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – коэффициенты.

Согласно ГОСТ 11362-96, щелочное число определяется как отношение массы щелочных компонентов к массе пробы:

$$CH = \frac{m_{\text{КОН}}}{m_{\text{обр}}}, \quad (2)$$

где m_{KOH} – масса щелочи (условного KOH) в образце масла, мг; $m_{\text{обр}}$ – масса исследуемого образца моторного масла, г.

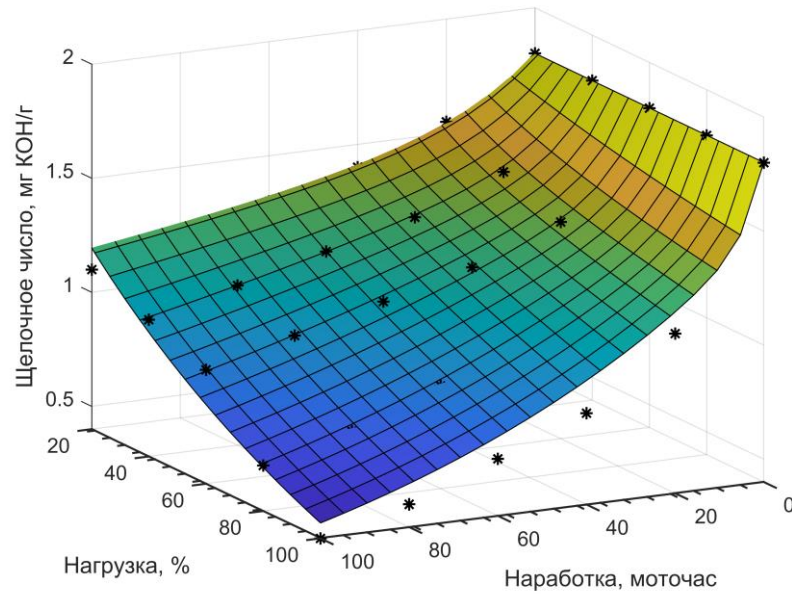


Рисунок 1 – Изменение щелочного числа моторного масла в зависимости от наработки и нагрузки двигателя по данным

Поскольку в процессе эксплуатации объём масла в двигателе может изменяться из-за утечек, угара или доливок, а щелочное число при этом зависит не только от деградации, но и от изменения объёма, целесообразно перейти к массе щелочных компонентов как к величине, которая при отсутствии утечек и доливок изменяется только за счёт расходования присадок. Тогда выражение для массы щелочных компонентов принимает вид, аналогичный (1):

$$m_{\text{KOH}} = b_1 + b_2 e^{\frac{tn \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}}, \quad (3)$$

где b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 – коэффициенты уравнения.

Между коэффициентами a_i и b_i установлено соответствие:

$$b_1 = a_1 V_{\text{обр}} \rho, \quad b_2 = a_2 V_{\text{обр}} \rho, \quad b_3 = a_3, \quad b_4 = a_4, \quad b_5 = a_5, \quad (4)$$

где $V_{\text{обр}}$ – объём масла в картере, см^3 ; ρ – плотность масла, $\text{г}/\text{см}^3$.

Дифференцирование этого уравнения по времени дает формулу для определения скорости изменения щелочного числа в случае отсутствия утечек и доливок:

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{b_2 n e^{\frac{nt \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n_H}{n_H} \right)}{n_H}} \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n_H}{n_H} \right)}{V_{\text{обр}0} n_H \rho}, \quad (5)$$

где $V_{\text{обр}0}$ – начальный объём масла в картере, см^3 .

При смешивании двух образцов масла одной марки, но с разной степенью наработки и, соответственно, с различными эксплуатационными показателями, щелочное число получаемой смеси $CH_{\text{смеси}}$ будет определяться как:

$$CH_{смеси} = \frac{CH_1 V_{обр1} \rho + CH_2 V_{обр2} \rho}{V_{обр1} \rho + V_{обр2} \rho} = \frac{CH_1 V_{обр1} + CH_2 V_{обр2}}{V_{обр1} + V_{обр2}}, \quad (6)$$

где $V_{обр1}$ – объем первого образца масла, $см^3$; $V_{обр2}$ – объем второго образца масла, $см^3$.

В случае утечки масла масса щелочных компонентов и масса базового масла уменьшаются пропорционально, поэтому щелочное число не должно изменяться. Процесс идет с одинаковой скоростью. Динамика щелочного числа описывается уравнением:

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{b_2 n e^{\frac{nt \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}}}{n_H \rho V_{обр}} \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right) - \frac{\left(b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}}{n_H} \right) \frac{dV_{обр}}{dt}}{\rho V_{обр}^2}. \quad (7)$$

На практике скорость утечки $v_{ут}$ часто неизвестна. Но ее можно определить, зная объем ΔV долитого масла и время работы в моточасах, в течении которого происходил угар. В этом случае скорость утечки

$$v_{ym} = \frac{dV_{обр}}{dt} = \frac{\Delta V}{t} \frac{n}{n_H}. \quad (8)$$

В результате получаем формулу для расчета текущего объема масла в двигателе:

$$V_{обр} = \frac{\Delta V e^{\frac{nt \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}}}{b_2 t \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)} \left(b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left(b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}}{n_H} \right). \quad (9)$$

Разработанные зависимости легли в основу имитационной модели цифрового двойника, позволяющей прогнозировать изменение состояния масла в реальном времени. Модель зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ (свидетельство № 2026617913).

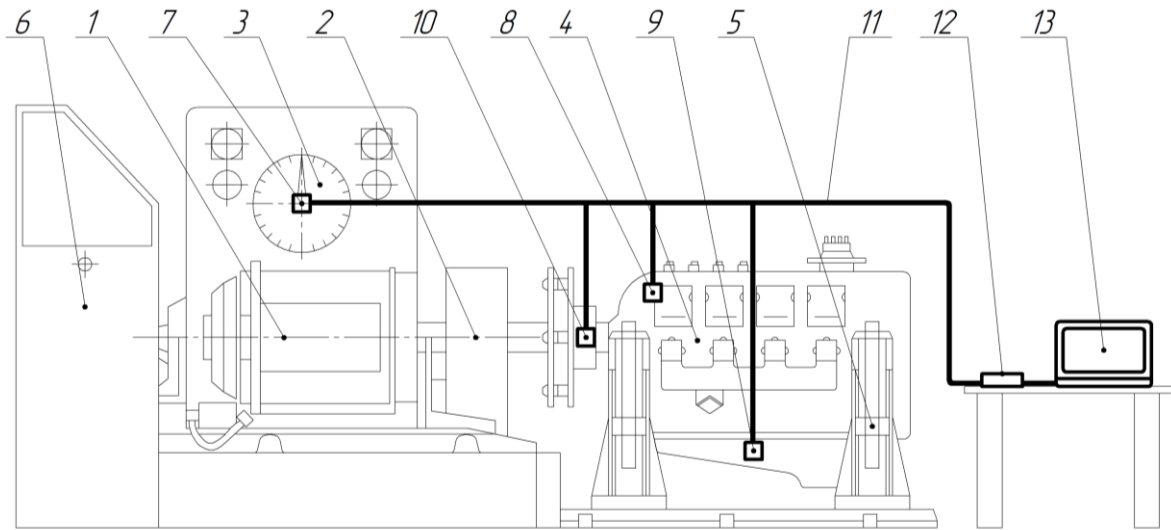
Определены диапазоны изменения параметров модели: коэффициенты b_3 , b_4 , b_5 , имеют отрицательные значения, порядок их суммы составляет от 10^{-6} до 10^{-8} .

Таким образом, предложенный алгоритм параметрической идентификации модели с использованием метода нелинейных квадратов, позволяет адаптировать модель для любых тракторных двигателей и масел, уточняя ее коэффициенты при наличии соответствующих эксплуатационных данных за определенный промежуток времени.

В третьем разделе «Методика экспериментальных исследований» представлены программа и методика проведения экспериментальных исследований, которые включали стендовые испытания, а также сбор и обработку данных мониторинга параметров работы тракторов в условиях реальной эксплуатации.

Стендовые испытания проводились на двигателе Д-241 с маслом G-Profi MSI Plus 15W-40. Использовался тормозной стенд ГОСНИТИ. Для регистрации параметров работы двигателя разработана автоматизированная система сбора данных на базе АЦП L-CARD E14-440 (заявка № 2026101511/09(003018)). Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

Планирование эксперимента осуществлялось как двухфакторного с равномерным заполнением факторного пространства. Поскольку заранее не было известно, при какой нагрузке щелочное число достигнет браковочного значения, план эксперимента строился таким образом, чтобы каждая из четырёх последовательных серий опытов была достаточной для охвата всех исследуемых режимов работы двигателя.



1 – электрический тормоз переменного тока с фазным ротором; 2 – редуктор; 3 – измеритель крутящего момента; 4 – двигатель; 5 – опора двигателя; 6 – жидкостный реостат; 7 – датчик нагрузки; 8 – датчик определения положения рейки ТНВД; 9 – датчик температуры; 10 – датчик частоты вращения коленчатого вала двигателя; 11 – экранированный кабель; 12 – аналого-цифровой преобразователь; 13 – персональный компьютер

Рисунок 2 – Экспериментальная установка

Для равномерного покрытия факторного пространства нагрузка и частота вращения задавались с помощью разработанного алгоритма, основанного на латинском гиперкубе. Факторное пространство, было разбито на 16 зон в соответствии с количеством серий опытов и факторов.

Четвёртая серия завершалась при наработке 250 моточасов. При необходимости, эксперимент мог быть продолжен дополнительными сериями. План эксперимента в долевой кодировке представлен в таблице 1.

Матричная диаграмма (рис. 3) подтверждает равномерное заполнение факторного пространства каждой серией опытов.

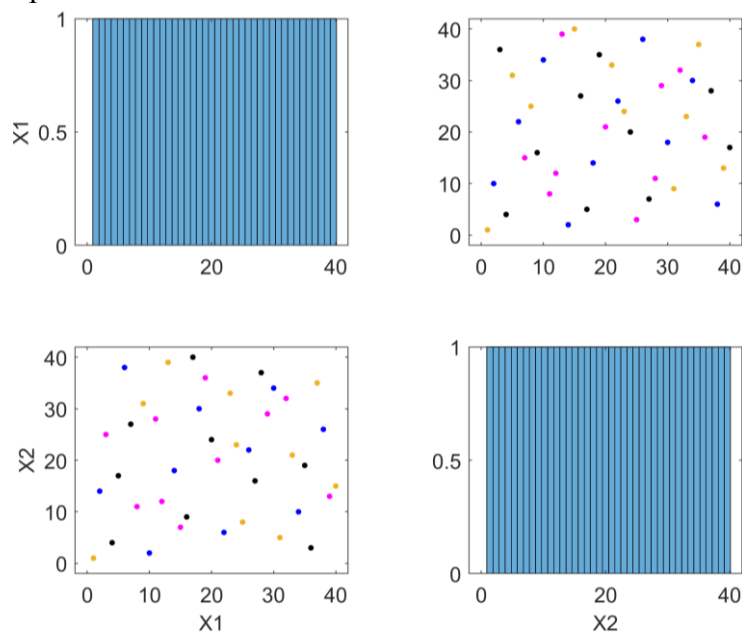


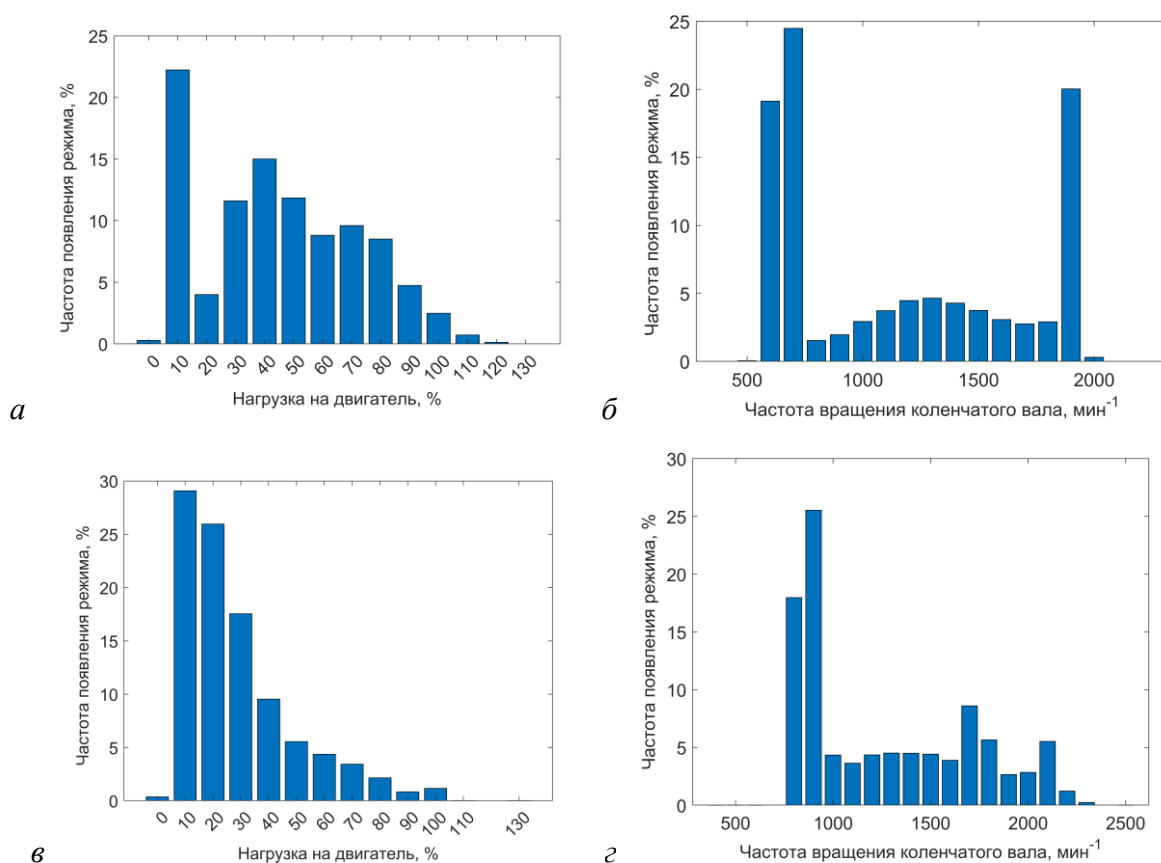
Рисунок 3 – Матричная диаграмма факторного пространства по планам 1–4 серий опытов

Таблица 1 – План эксперимента. Режимы работы двигателя в доленой кодировке

Серия опытов							
№1		№2		№3		№4	
n	Me	n	Me	n	Me	n	Me
0,75	0,85	0,075	0,625	0,025	0,025	0,1	0,1
0,45	0,75	0,375	0,175	0,225	0,775	0,175	0,675
0,25	0,05	0,475	0,9	0,625	0,2	0,5	0,6
0,05	0,35	0,525	0,5	0,575	0,825	0,875	0,475
0,35	0,45	0,975	0,325	0,775	0,125	0,425	1
0,55	0,15	0,8	0,8	0,825	0,525	0,9	0,075
0,95	0,65	0,3	0,3	1	0,375	0,7	0,925
0,15	0,95	0,725	0,725	0,325	0,975	0,125	0,425
0,85	0,25	0,2	0,275	0,6	0,575	0,4	0,225
0,65	0,55	0,275	0,7	0,925	0,875	0,675	0,4

Сбор и обработка данных мониторинга проводились на тракторах в условиях реальной эксплуатации. Была разработана программа для ЭВМ (свидетельство №2026619413), автоматизирующая подготовку численных данных мониторинга.

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных и теоретических исследований» представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований: анализ режимов работы тракторов, параметры модели цифрового двойника и прогнозы остаточного ресурса масла. Был проведён частотный анализ режимов работы двигателя для тракторов Кировец К-742М (рис. 4а, б) и John Deere 6В (рис. 4в, г) в течение года. Установлено, что для трактора Кировец К-742М номинальная частота вращения (1900 об/мин.) фиксируется лишь в 20 %



а – частота появления нагрузочных режимов Кировец К-742М; б – частота появления скоростных режимов Кировец К-742М; в – частота появления нагрузочных режимов John Deere 6В; г – частота появления скоростных режимов John Deere 6В

Рисунок 4 – Частота появления режимов при работе тракторов Кировец К-742М и John Deere 6В за год

времени, а для John Deere 6В (2200 об/мин) — только в 1 % времени. Преобладающими являются менее напряжённые режимы: нагрузка 10–30 %, частота вращения 600–900 об/мин. По-

лученные результаты подтверждают, что реальные условия эксплуатации существенно отличаются от номинальных, что обосновывает актуальность применения цифрового двойника для учёта фактических режимов работы.

Определены параметры модели цифрового двойника по данным стендового эксперимента, которые составили: $b_1 = -3,5$; $b_2 = 101,8252$; $b_3 = -5,2601 \cdot 10^{-7}$; $b_4 = -4,6159 \cdot 10^{-7}$; $b_5 = -6,2209 \cdot 10^{-7}$. Наибольшее влияние на скорость изменения щелочного числа оказывает нагрузочный режим, поскольку коэффициент b_5 имеет максимальное значение по модулю.

В процессе идентификации параметров были опробованы различные начальные значения коэффициентов в пределах диапазонов возможных значений. Результаты получаются близкими в пределах заданной погрешности оптимизации (рис. 5).

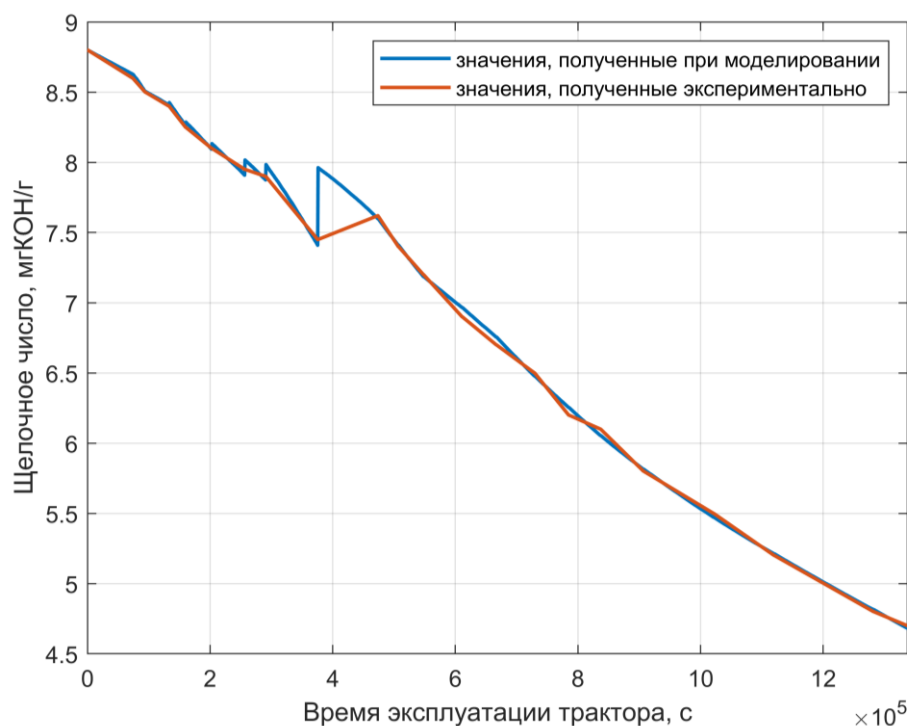
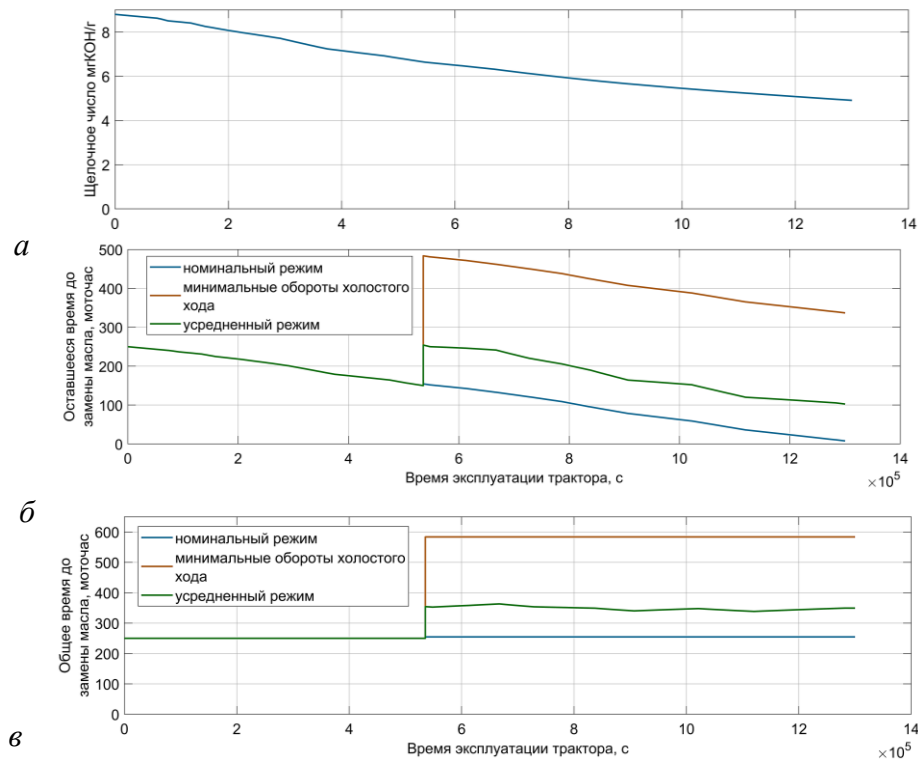


Рисунок 5 – Сопоставление результатов моделирования после идентификации параметров модели цифрового двойника с экспериментальными данным, полученными в ходе стендового эксперимента

На рисунке 6 представлены результаты моделирования и прогнозирования при проведении стендовых экспериментов: показано изменение щелочного числа в процессе эксплуатации, а также прогноз оставшегося времени до замены масла и общего ресурса. Прогноз показал, что при работе на номинальном режиме ресурс масла составляет 255 моточасов, что близко к регламентному сроку и подтверждает адекватность модели. При работе на холостом ходу ресурс может быть продлён до 590 моточасов, а при эксплуатации на усреднённых режимах – до 360 моточасов.

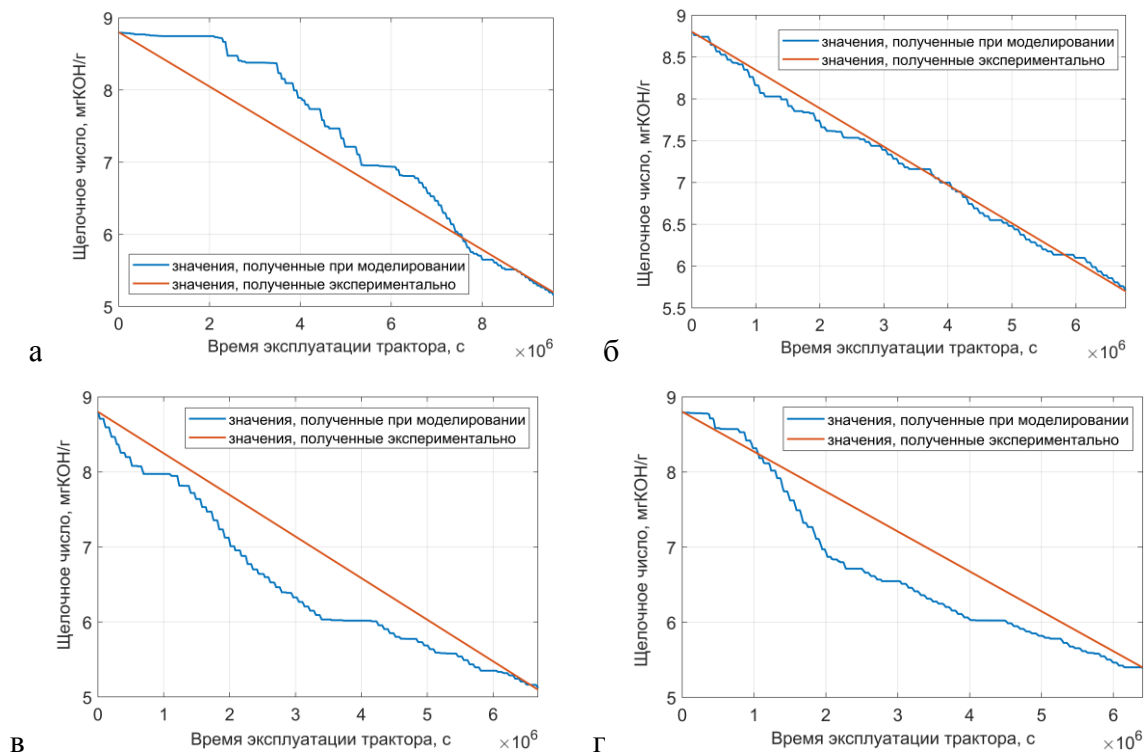
Идентификация параметров модели по данным эксплуатации выполнена для трактора John Deere 6B с маслом John Deere Torq-Gard 15W-40. На рисунке 7 (а, б, в) представлено сопоставление расчётных кривых с экспериментальными точками. В результате получены коэффициенты: $b_1 = -2,4581$; $b_2 = 111,8271$; $b_3 = -9,9180 \cdot 10^{-8}$; $b_4 = -7,9837 \cdot 10^{-7}$; $b_5 = -9,9644 \cdot 10^{-7}$.

Адекватность модели проверена путём валидации на другом тракторе той же марки (рис. 7г). Расхождения между расчётными и экспериментальными значениями не превышают погрешности лабораторного анализа, что подтверждает корректность модели.



а – моделирование изменения щелочного числа моторного масла; *б* – прогнозирование цифровым двойником оставшегося времени до замены моторного масла; *в* – прогноз общего времени работы двигателя до замены моторного масла

Рисунок 6 – Прогнозирование цифровым двойником времени до замены моторного масла для двигателя Д-240 в стендовых экспериментах



а – для первого периода работы трактора; *б* – для второго периода работы трактора; *в* – для третьего периода работы трактора; *г* – валидация модели

Рисунок 7 – Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными с трактора John Deere 6B

Прогнозирование ресурса масла для трактора John Deere 6B показало, что при эксплуатации двигателя на оборотах холостого хода время использования масла может быть продлено до 1150 моточасов. На номинальной частоте цифровой двойник прогнозирует достижение браковочного показателя примерно к 250 моточасам. Прогноз по усредненным показателям дал результат, согласно которому ресурс масла будет исчерпан к 580 моточасам. Как и в случае стендовых испытаний, при прогнозировании для номинального режима получены значения, близкие к 250 моточасам. Все рассмотренные случаи свидетельствуют о том, что применение цифрового двойника позволяет увеличить срок эксплуатации моторного масла, причем разница в продолжительности его использования является достаточно значимой.

В пятом разделе «Экономическое обоснование способа контроля остаточного ресурса моторного масла в двигателе трактора за счёт применения цифрового двойника» выполнен расчёт экономической эффективности для парка из 5 тракторов МТЗ-80 и 3 тракторов John Deere 6B. Использование цифрового двойника позволяет увеличить межсервисный интервал замены масла в среднем с 250 до 360 моточасов для МТЗ-80 и до 550 моточасов для John Deere 6B. Годовая экономия эксплуатационных издержек до вычета платы за модуль и связь составила 148 040 руб. Для реализации данного подхода необходимы дополнительные капитальные вложения в размере 48 000 руб. Ежемесячные расходы на использование цифрового двойника складываются из платы за модуль (100 руб. на один трактор) и оплаты интернет-трафика (500 руб. на один трактор). Чистая годовая экономия с учётом всех эксплуатационных затрат достигла 90 440 руб., срок окупаемости капитальных вложений составил 0,53 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что процесс деградации моторного масла в двигателе внутреннего сгорания сопровождается изменением его физикохимических параметров, среди которых наиболее информативным и обобщенным показателем, отражающим состояние и остаточный ресурс масла, является щелочное число, изменение которого обусловлено влиянием режимов работы двигателя, происходит монотонно и поддается прогнозированию.

2. Выявленная закономерность деградации моторного масла на основе экспоненциального закона учитывает изменение щелочного числа в зависимости от режимов работы двигателя внутреннего сгорания при эксплуатации сельскохозяйственных тракторов и позволяет определять текущее значение щелочного числа при заданной наработке.

3. Полученные аналитические зависимости скорости изменения щелочного числа моторного масла учитывают влияние скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя, а также утечку, угар и доливку моторного масла, что дает возможность оценивать его фактическое состояние.

4. Разработанный алгоритм на основе имитационного моделирования (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617913 РФ) при использовании реальных данных мониторинга эксплуатационных показателей двигателя сельскохозяйственного трактора (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026619413 РФ) и результатов стендовых экспериментов позволяет определить параметры модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла.

5. Модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла с параметрами, установленными при проведении стендовых экспериментов с двигателями или мониторинга работы тракторов, позволяет определить текущее состояние моторного масла, прогнозировать его фактический ресурс и срок замены в различных условиях эксплуатации сельскохозяйственных тракторов.

6. Проведенный частотный анализ режимов работы двигателей сельскохозяйственных тракторов показал, что их эксплуатация на режимах, близких к номинальным в реальных условиях сельскохозяйственного производства, встречается редко и составляет от 1 до 20 % от рабочего времени. Характерными (до 80 % от рабочего времени) являются менее напря-

женные режимы: коэффициент использования нагрузки — 10. . . 30 %, частота вращения коленчатого вала – 600. . . 900 об/мин.

7. Срок замены моторного масла двигателя внутреннего сгорания сельскохозяйственного трактора должен устанавливаться по реальным условиям эксплуатации, что позволяет определить текущее состояние масла, которое в типичных условиях сельскохозяйственного производства достигает браковочных значений щелочного числа 1,5 мг КОН/г позже, увеличивая фактический ресурс в 1,4. . . 2,3 раза по сравнению с работой двигателя на номинальном режиме.

8. Экономический эффект от применения цифрового двойника процесса деградации моторного масла достигается за счет увеличения межсервисного интервала замены масла на основе прогнозирования его остаточного ресурса, что позволяет снизить затраты на моторное масло, работы по замене и потери от простоев техники. Чистая годовая экономия для парка из восьми тракторов – 90 440 руб., срок окупаемости капитальных вложений – 0,53 года.

9. Проведенные исследования позволяют рекомендовать использование на сельскохозяйственных тракторах цифрового двойника процесса деградации моторного масла на основе системы мониторинга для определения срока замены. В случае отсутствия системы мониторинга, рекомендуется подключение к одной из подобных систем или установка мобильной системы автоматизированного сбора данных с устройством для определения нагрузки по фактическому положению рейки топливного насоса высокого давления (патент № 243901 РФ).

10. Перспективой дальнейшей разработки темы являются: исследование целесообразности применения цифровых двойников процесса деградации моторного масла для самоходных машин различного назначения, автомобилей и дизель-генераторов; сбор данных для моделей двигателей внутреннего сгорания и типов моторных масел, не рассмотренных в настоящей работе; разработка автономного устройства для прогнозирования сроков замены моторного масла.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в Российских журналах, включенных в перечень ВАК

1. Методика определения параметров модели ресурса масла в двигателе трактора / **Е. А. Григорьев**, А. В. Химченко, В. И. Оробинский, Н. И. Мищенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2026. – № 217. – С. 143–154. – DOI 10.21515/1990-4665-217-015.

2. Планирование эксперимента для определения зависимости изменения щелочного числа моторного масла от эксплуатационных факторов в пределах одного срока замены / А. В. Химченко, В. И. Оробинский, В. В. Остриков, **Е. А. Григорьев** // Наука в центральной России. – 2024. – № 5(71). – С. 94–104. – DOI 10.35887/2305-2538-2024-5-94-104.

3. Предпосылки применения цифрового двойника для определения предельного состояния моторного масла или прогнозирования его остаточного ресурса / А. В. Химченко, В. И. Оробинский, В. В. Остриков, **Е. А. Григорьев** [и др.] // Наука в центральной России. – 2024. – № 3(69). – С. 148–160. – DOI 10.35887/2305-2538-2024-3-148-160.

Патент на полезную модель

4. Патент на полезную модель № 243901 U1 РФ, МПК G01B 7/00. Устройство для определения положения рейки топливного насоса высокого давления / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев** ; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2026101511 ; заявл. 23.01.2026 ; опубл. 04.06.2026, Бюл. № 16. – 4 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614490 Российская Федерация. Имитационная модель для испытания трактора МТЗ-80 «Беларус» :

№ 2024613614 : заявл. 26.02.2024 : опубл. 26.02.2024 / **Е. А. Григорьев**, А. В. Химченко, М. Ю. Пенькова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684264 Российская Федерация. Планирование поэтапного стендового эксперимента с двигателем внутреннего сгорания и равномерным насыщением опытами факторного пространства: № 2024683770 : заявл. 16.10.2024 : опубл. 16.10.2024 / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев**, Н. И. Мищенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617913 Российская Федерация. Модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла : заявл. 23.03.2026 : опубл. 23.03.2026 / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев**, Н. И. Мищенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026619413 Российская Федерация. Подготовка численных данных результатов мониторинга работы двигателя трактора для прогнозирования ресурса моторного масла : заявл. 02.04.2026 : опубл. 02.04.2026 / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

Публикации в материалах конференций, научных журналах и сборниках научных трудов

9. **Григорьев Е. А.** Методика экспериментальных исследований влияния режимных факторов на ресурс моторного масла автотракторных двигателей / **Е. А. Григорьев**, А. В. Химченко, Н. И. Мищенко // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 29 января 2026 го-да. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2026. – С. 157–163.

10. **Григорьев Е. А.** О регламентации срока замены моторных масел в существующих стандартах / **Е. А. Григорьев**, А. В. Химченко // Теория и практика инновационных технологий в АПК : материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 01 апреля – 31 2025 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2025. – С. 142–147.

11. **Григорьев Е. А.** Современный подход к определению периодичности замены моторного масла двигателей тракторов / **Е. А. Григорьев**, А. В. Химченко // Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Воронеж, 09–10 ноября 2023 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2023. – С. 63–67.

12. Оптимизация плана стендового эксперимента при определении ресурса моторного масла / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев**, Н. И. Мищенко, А. А. Заболотная // Актуальные вопросы физико-математических и технических наук в свете современных исследований АПК : материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 23 октября 2024 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2024. – С. 407–412.

13. Химченко А. В. Анализ данных мониторинга режимов работы трактора при выполнении сельскохозяйственных операций / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев** // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 26 сентября 2025 года. – Во-

ронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2025. – С. 145–151.

14. Химченко А. В. К вопросу о необходимости определения срока замены моторного масла в зависимости от внешних факторов / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев**, Д. В. Юшко // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06 июня 2024 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2024. – С. 359–364.

15. Химченко А. В. Отладка системы автоматизированного сбора данных перед проведением экспериментальных исследований / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев** // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 25 сентября 2024 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2024. – С. 190–195.

16. Химченко А. В. Система автоматизированного сбора данных для проведения испытаний на автотракторном двигателе / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев**, Д. В. Юшко // Теория и практика инновационных технологий в АПК : материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 01 апреля – 31 2024 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2024. – С. 408–413.

17. Частотный анализ режимов работы двигателя трактора «John Deere 6B» в условиях реальной эксплуатации / А. В. Химченко, **Е. А. Григорьев** // Теория и практика инновационных технологий в АПК : материалы национальной научно-практической конференции (24 марта – 19 мая 2026 г.). – Ч. I. – Секция «Инновационные направления механизации и электрификации сельскохозяйственного производства» (14–19 мая 2026 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2026. – С. 420–424.

Просим принять участие в работе диссертационного совета 35.2.008.01 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю Д.Н. Афоничеву Телефон (473) 224-39-39 (доб. 3320); e-mail: et@agroeng.vsau.ru.