

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный аграрный университет  
имени императора Петра I»**

*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

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент  
Химченко Аркадий Васильевич

Воронеж — 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	5
1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ МОТОРНОГО МАСЛА . . . . .	14
1.1 Изменение состояния моторного масла в процессе эксплуатации	14
1.2 Влияние факторов на основные показатели состояния моторного масла . . . . .	22
1.3 Способы корректировки времени замены моторного масла . . . . .	37
1.3.1 Способы корректировки времени замены моторного масла по показателям фактического состояния моторного масла	38
1.3.2 Способы корректировки времени замены моторного масла по влиянию факторов . . . . .	45
1.4 Применение цифровых двойников . . . . .	50
1.5 Выводы . . . . .	57
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ . . . . .	59
2.1 Анализ характера изменения критических показателей моторного масла в процессе эксплуатации . . . . .	59
2.2 Зависимости изменения щелочного числа от эксплуатационных факторов . . . . .	67
2.3 Алгоритм определения параметров модели цифрового двойника . . . . .	84
2.3.1 Имитационное моделирование процесса деградации масла	85
2.3.2 Идентификация модели на основе подбора параметров . . . . .	89
2.4 Выводы . . . . .	92

3	МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ . . . . .	94
3.1	Методика проведения стендового эксперимента . . . . .	94
3.1.1	Экспериментальное оборудование . . . . .	94
3.1.2	Планирование эксперимента . . . . .	101
3.1.3	Обработка результатов стендового эксперимента . . . . .	114
3.1.4	Результаты стендового эксперимента . . . . .	117
3.2	Сбор и обработка данных на основе мониторинга параметров работы трактора в эксплуатации . . . . .	118
3.2.1	Статистическая оценка режимов работы двигателя трактора в эксплуатации . . . . .	119
3.2.2	Оценка параметров модели цифрового двойника в условиях эксплуатации . . . . .	121
3.3	Выводы . . . . .	123
4	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ . . . . .	125
4.1	Анализ режимов работы двигателя трактора в эксплуатации . . . . .	125
4.1.1	Анализ режимов работы трактора Кировец К-742М . . . . .	125
4.1.2	Анализ режимов работы трактора John Deere 6В . . . . .	129
4.2	Параметры модели цифрового двойника и прогнозирование ресурса масла на основе стендового эксперимента . . . . .	132
4.3	Прогнозирование ресурса масла на основе данных мониторинга, полученных с трактора в эксплуатации . . . . .	137
4.4	Выводы . . . . .	142
5	ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МОТОРНОГО МАСЛА В ДВИГАТЕЛЕ ТРАКТОРА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА . . . . .	144
5.1	Исходные данные для расчета . . . . .	144
5.2	Методика расчета . . . . .	147
5.3	Результаты расчета . . . . .	150

5.4 Выводы . . . . .	152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .	156
Приложение А. Результаты проведения стендового эксперимента . . .	183
Приложение Б. Акты внедрения . . . . .	188

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Повышение надежности и экономической эффективности эксплуатации автотракторной техники — стратегическая задача агропромышленного комплекса. Важным фактором является совершенствование системы технического обслуживания (ТО), в частности переход от жестко регламентированных сроков замены моторного масла к более гибкой системе, учитывающей реальные условия работы. Как показывают современные исследования, традиционный подход, привязывающий срок замены к фиксированной наработке в моточасах, не всегда точно отражает фактическое состояние смазочного материала [1; 2]. Тракторный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) может эксплуатироваться в широком диапазоне нагрузочных и скоростных режимов [3]. Это приводит к неравномерной интенсивности деградации масла. Преждевременная замена ведет к неоправданным экономическим затратам, в то время как поздняя замена масла черевата повышенным износом и возможным выходом из строя узлов двигателя.

Актуальность перехода к замене масла по фактическому состоянию продиктована сложностью и многофакторностью процесса его старения. В ходе эксплуатации масло выполняет комплекс ответственных функций [4; 5]. Под воздействием разных факторов происходят термоокислительные реакции и истощение пакета присадок. Как показывает анализ, наиболее информативным и обобщенным показателем, объективно отражающим остаточный ресурс и запас функциональных свойств масла, является щелочное число [6; 7]. Его монотонное снижение в процессе наработки хорошо поддается прогнозированию.

Реализация концепции замены масла «по состоянию» сдерживается отсутствием простых и надежных методов непрерывного бортового контроля. Лабораторные анализы, обладая высокой точностью, трудоемки и не при-

менимы в полевых условиях. Существующие методы экспресс-диагностики зачастую требуют сложной калибровки, зависят от человеческого фактора или обладают недостаточной достоверностью [8]. Например, известный колориметрический способ определения щелочного числа [9], несмотря на простоту, предполагает визуальную оценку цветовых оттенков, что вносит субъективность, и трудно реализуем в полевых условиях. В связи с этим акцент смещается в сторону методов прогнозирования, основанных на оценке влияния внешних эксплуатационных факторов.

Основное воздействие на интенсивность старения масла, и, в частности, на динамику щелочного числа, оказывают режимы работы двигателя. Такие параметры, как нагрузка и частота вращения коленчатого вала, напрямую определяют тепловое состояние масла и скорость срабатывания присадок [10; 11]. Таким образом, возникает объективная необходимость в разработке подхода, который позволял бы прогнозировать изменение щелочного числа, опираясь на легко регистрируемые в процессе эксплуатации параметры работы двигателя, и обоснованно корректировать межсервисные интервалы.

Особую значимость такая задача приобретает с учетом современных возможностей сбора и анализа данных о режимах работы сельскохозяйственных тракторов. Мониторинг работы трактора открывает возможность создания моделей прогнозирования, адаптированных к реальным условиям эксплуатации.

Перспективным направлением для решения этой задачи является применение цифровых двойников [12; 13]. Концепция цифрового двойника как виртуального образа физического процесса, синхронизированного с ним, позволяет объединить математическую модель деградации масла с данными о фактических режимах работы двигателя. В рамках диссертационной работы предлагается использовать цифровой двойник, базирующийся на статистической модели изменения щелочного числа в зависимости от ско-

ростных и нагрузочных режимов [14; 15]. Практическая реализация такого подхода возможна без значительного усложнения конструкции трактора, путем интеграции расчетного модуля в уже существующие на многих предприятиях системы удаленного мониторинга транспорта. Это позволит осуществлять оперативный прогноз остаточного ресурса масла на удаленном сервере, информируя оператора о необходимости замены и замещая большую часть рутинных лабораторных анализов контрольными замерами.

Таким образом, разработка математической модели и алгоритма функционирования цифрового двойника процесса деградации моторного масла для прогнозирования его остаточного ресурса по эксплуатационным факторам является актуальной научной задачей. Ее решение позволит повысить эффективность использования ресурса масла в двигателях тракторов за счет научно обоснованной корректировки сроков его замены, при этом минимизируются риск 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 литературы подтверждает актуальность темы диссертационного исследования. Этим направлением занималось большое количество ученых, которые разрабатывали и развивали уже известные способы для решения проблемы: 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 внесли исследователи: В.В. Остриков, С.В. Венцель, А.В. Кузнецов, М.А. Григорьев, Л.С. Васильева, Д.В. Агровиченко, Д.И. Да-

нилогорский, А.П. Уханов, В.В. Салмин, А.В. Кошелев, А.П. Картошкин, М.А. Серебряков, В.Е. Колпаков.

Определением степени влияния различных факторов на интенсивность старения масла занимались такие отечественные исследователи, как Д.С. Голубев, Е.А. Ефремова, Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, Л.А. Долгова, А.А. Порожня, Е.М. Пилипенко, Ю.В. Соломахин. Также данную тему развивали и зарубежные авторы: Т. Omiya, E. Hu, M. Yu, J. Zhang.

Разработкой методов экспресс-диагностики моторных масел занимались ученые: В.В. Остриков, Ю.А. Гурьянов, Г.Д. Матыцин, А.Б. Алхимов, А.Ю. Корнев, И.В. Бусин, А.Д. Казмиров, В.Г. Дроков.

Исследования в области определения состояния масел по фактическим значениям физико-химических показателей отражены в работах: В.А. Аметова, А.А. Семенова, Н.М. Алейникова, А.С. Яровенко, Р.Б. Ахметкалиева, Н.М. Маряхина, Ю.Д. Карпиевича, В.С. Барабохина, И.И. Артемова.

Вопрос определения остаточного ресурса масла по учету влияния внешних факторов изучали такие авторы, как А.С. Денисов, А.М. Сычев, А.Б. Алхимов, Р.Б. Ахметкалиев, Н.К. Надиров, А.Ф. Страхов, И.С. Наглюк, а также зарубежные: J.E. Mc Donald, T. Sawatari, M. Nakamura, T. Sugiura.

Впервые концепцию цифровых двойников представил профессор M. Grieves. В дальнейшем его работу продолжили такие зарубежные ученые, 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, А.А. Жиздюк.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных диагностике состояния моторных масел, остаются недостаточно изученными вопросы комплексного учета 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 исследования:**

– 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 работы:**

– 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 работы 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 работы 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 поло-

жения 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 лаборатория 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 используются 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 соискателя** 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, один патент на полезные модели и четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 190 странице, содержит 38 рисунков, 11 таблиц и два приложения. Список литературы включает 182 источника.

# 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ МОТОРНОГО МАСЛА

## 1.1 Изменение состояния моторного масла в процессе эксплуатации

Совершенствование системы технического обслуживания (ТО) автотракторной техники является ключевым фактором повышения ее надежности и экономической эффективности [1; 2]. Сложившаяся система планирования ТО привязывает срок обслуживания к наработке моточасов работы двигателя (для автотракторной техники) или пройденному пробегу. Однако, как показывают исследования, данный подход недостаточно точно отражает фактическое состояние моторного масла в двигателе. Трактор может эксплуатироваться при различных режимах, что приводит к неравномерной интенсивности деградации смазочного материала.

Моторное масло, которое потеряло свои технологические свойства, необходимо своевременно заменять, чтобы не повредить узлы смазочной системы. Однако замена раньше срока экономически нецелесообразна, поскольку увеличивает расходы на эксплуатацию.

Основным назначением моторных масел является снижение механического износа трущихся деталей и минимизация энергетических потерь на преодоление сил трения. Помимо этих функций, современные моторные масла выполняют комплекс других задач: отвод тепла от нагретых поверхностей узлов двигателя, защита от коррозии, очистка внутренних полостей от продуктов износа и механических загрязнений, обеспечение герметичности в зонах сопряжения деталей, а также снижение уровня шума и вибраций при работе силового агрегата [5; 16; 17].

Способность моторного масла обеспечивать надежное и длительное выполнение указанных выше функций определяется совокупностью его

физико-химических свойств. К физико-химическим свойствам, или показателям состояния моторного масла, относятся: вязкость, индекс вязкости, температура вспышки, температура застывания, температура воспламенения, щелочное число, окислительная стабильность, моюще-диспергирующие свойства, проворачиваемость и прокачиваемость [18—21].

Современная промышленность выпускает смазочные материалы на трех типах основ: нефтяной (минеральной), синтетической и полусинтетической (смешанной). Наибольшее распространение в силу экономических причин сохраняют масла на нефтяной основе. Однако им присущ ряд существенных недостатков, к которым относятся неудовлетворительные низкотемпературные свойства, а также недостаточная термическая и окислительная стабильность, приводящие к их интенсивному изменению в жестких условиях эксплуатации [22].

В противоположность этому синтетические базовые масла, к которым относятся полиальфаолефины, сложные эфиры дикарбоновых кислот, эфиры фосфорной кислоты, сложные эфиры неопентиловых спиртов и полиорганосилоксаны, демонстрируют значительно улучшенные показатели по указанным параметрам.

В процессе эксплуатации моторное масло подвергается как качественным, так и количественным изменениям. Причинами количественных изменений масла являются: испарение легких фракций, угар масла в камере сгорания и его утечки вследствие технических неисправностей. Качественные изменения являются следствием процессов окисления и полимеризации, а также химического загрязнения из-за попадания пыли, продуктов износа, воды и несгоревшего топлива [23].

Совокупность процессов, приводящих к изменению химического состава и ухудшению свойств моторного масла, называют «старением» или «деградацией» моторного масла [24; 25]. Интенсификация данных процессов обусловлена комплексным воздействием ряда факторов: высокотемператур-

ного режима, взаимодействия с металлами, продуктами сгорания топлива, а также режимов работы двигателя. Указанные факторы катализируют явления термоокислительной деструкции, способствуют истощению присадок и в конечном итоге приводят к потере маслом своих первоначальных эксплуатационных качеств.

Согласно исследованиям, ключевые зоны протекания деградационных процессов локализованы в камере сгорания, на днище поршня и в области поршневых колец. В условиях экстремальных температур (свыше 1000 °С), характерных для камеры сгорания, преобладают процессы испарения легких фракций, выгорания масла, его термического крекинга и окисления, а также образования высокотемпературных отложений и продуктов неполного сгорания [26; 27].

Окисление углеводородов основы моторного масла представляет собой многостадийный цепной процесс, который приводит к изменению физико-химических свойств смазочного материала: наблюдается рост вязкости и коррозионной активности, происходит расходование щелочного запаса присадок на нейтрализацию образующихся кислотных продуктов, а также истощение антиокислительных присадок [28].

Параллельно протекает процесс термического разложения (крекинга) масла, который происходит без доступа воздуха или при его ограниченном поступлении, например в закрытых полостях масляного охлаждения поршней. Данный механизм старения происходит при контакте масла с перегретыми металлическими поверхностями в условиях недостаточной скорости его циркуляции и отвода тепла.

На изменение свойств масел существенное влияние оказывает температурный режим. Согласно данным исследования, оптимальный температурный диапазон картерного масла составляет 80–90 °С. Отклонение от этого диапазона, в частности снижение температуры стенок цилиндров, приводит

к образованию эмульсии, которая нарушает целостность масляной пленки и ухудшает условия смазывания [29].

В процессе эксплуатации моторное масло подвергается загрязнению, источниками которого являются не только продукты его собственного окисления, но и продукты неполного сгорания углеводородной составляющей топлива, неорганические зольные остатки, абразивные частицы пыли и продукты износа деталей двигателя [30; 31].

В картере работающего двигателя формируется сложная многокомпонентная система, состоящая из базового масла, продуктов его деградации и внешних загрязнителей, которые не могут быть полностью удалены стандартной фильтрацией. Это приводит к накоплению углеродистых частиц [32]. Все загрязняющие примеси могут быть классифицированы на две основные группы: органические (сажа, продукты неполного сгорания топлива, соединения серы, продукты термического крекинга, окисления и полимеризации масла) и неорганические (абразивные частицы пыли, продукты износа металлических деталей, зольные остатки от присадок, технологические загрязнения) [30].

Согласно исследованию [33], доля углеродистых продуктов (карбены, карбоиды, сажа) в общем объеме загрязнений работающего масла составляет 80–85 %, остальная часть приходится на асфальтены и неорганические примеси.

Как отмечено в работе [34], скорость загрязнения имеет прямую зависимость от концентрации сажистых частиц в выхлопных газах. Любые неисправности двигателя, проявляющиеся повышением дымности отработавших газов, интенсифицируют загрязнение масла сажевыми частицами.

Исследованиями в области загрязнения масла углеродными частицами занимались авторы в работе [35]. Исследователи провели комплексный анализ влияния углеродных частиц на деградацию моторного масла марки 10W-40 и его трибологические свойства. В результате проведенных экспе-

риментов было установлено, что введение 5 % углеродных частиц вызывало увеличение кинематической вязкости масла на 15 % при температуре 40 °С. Старение масла при наличии в составе углеродистых частиц сопровождается существенным увеличением концентрации карбонильных групп, что является надежным индикатором интенсивного окисления и образования вторичных продуктов деградации. Таким образом, наличие загрязнений существенно влияет на скорость изменения состояния масла во время его работы.

Высококачественных базовых масел недостаточно для придания смазочным материалам всех необходимых свойств, поэтому применяют специальные присадки. Однако даже лучшие присадки не могут превратить низкокачественную основу в высококлассное масло [36; 37].

Присадки оказывают существенное влияние на интенсивность старения моторного масла. Антиокислительные присадки блокируют каталитический эффект и защищают основу от действия кислорода. После их выработки начинается старение масла.

Моющие присадки, содержащие поверхностно-активные вещества, очищают детали двигателя от лаков, нагара и других отложений, «отрывая» частицы и перенося их в объем масла. Диспергирующие присадки удерживают эти нерастворимые загрязнения во взвешенном состоянии, предотвращая их слипание и выпадение в осадок. Они создают вокруг частиц защитную оболочку.

Противокоррозионные присадки образуют на поверхностях деталей из цветных металлов прочные защитные пленки, предотвращающие прямой контакт с агрессивной средой моторного масла при высоких температурах.

Противоизносные присадки формируют на поверхностях трения тонкие защитные пленки, предотвращающие прямой контакт металлов и их механический износ в условиях граничного режима смазки. Также выделя-

ют противозадирные присадки, которые работают в экстремальных условиях высоких давлений и температур и эффективно предотвращают задиры [38].

Для нейтрализации кислот, вызывающих коррозионный износ, отдельно вводятся щелочные присадки.

На практике применяют не отдельные виды присадок, а готовые сбалансированные пакеты, которые могут содержать до 15 различных компонентов [38; 39].

По мере расходования присадок масло утрачивает заданные эксплуатационные свойства, которые были приданы ему изначально. Критическое снижение эффективности моюще-диспергирующих присадок и уменьшение щелочного числа ниже допустимого порога для конкретных условий эксплуатации инициирует интенсивное образование отложений на деталях двигателя и фильтрующих элементах, а также резкое увеличение износа пар трения цилиндропоршневой группы и других узлов.

Скорость дезактивации присадок зависит от нескольких переменных. Процесс срабатывания присадок непосредственно отражается на ключевых показателях качества масла.

Достаточно распространенная проблема, которая может встречаться при эксплуатации тракторов — это обводнение моторного масла. В технически исправных двигателях возникает преимущественно вследствие двух процессов: конденсации паров воды из картерных газов, прорывающихся из камеры сгорания, и отпотевания внутренних стенок картера или баков вследствие суточных колебаний температуры окружающей среды [40].

Последствиями значительного обводнения масла являются многократное увеличение скорости изнашивания деталей цилиндропоршневой группы и коррозия подшипников скольжения. Водная фаза способствует коагуляции диспергированных загрязнений, что приводит к формированию на фильтрующих элементах характерных глянцевых волнистых отложений, полностью блокирующих процесс очистки масла. Параллельное снижение вязкости,

вызванное разжижением масла топливом, может нарушить формирование стабильного гидродинамического слоя в подшипниках коленчатого вала, что ведет к их локальному перегреву, задирам и термическому разложению масла в зоне контакта [41].

Современные тенденции двигателестроения, характеризующиеся уменьшением объема системы смазки при одновременном повышении производительности масляных насосов и кратности циркуляции, приводят к значительному росту маслонапряженности. В этих условиях активируются процессы окисления масла [23; 42].

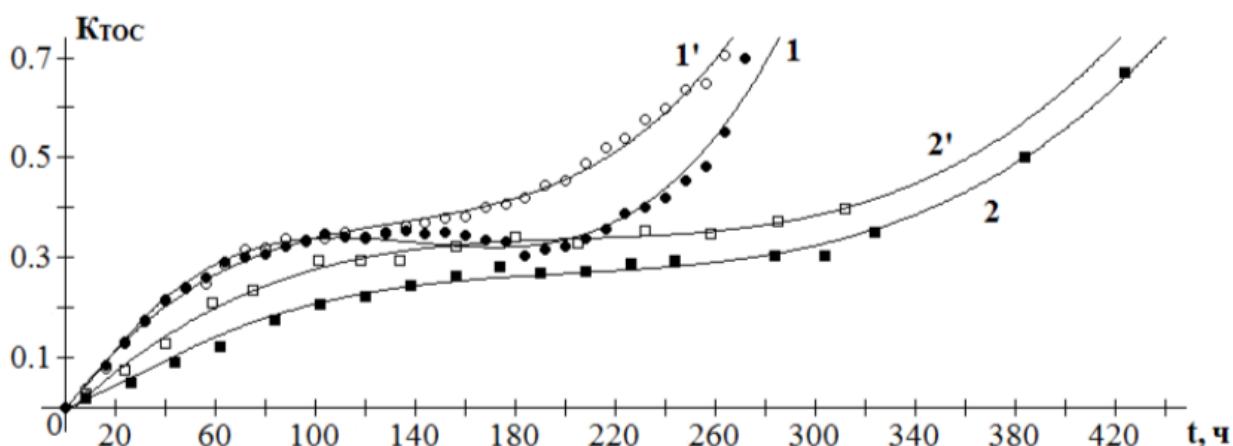
Как показано в работе [28], сама интенсификация подачи масла насосом также может усиливать окисление, что проявляется в росте оптической плотности и падении значения щелочного числа. Поэтому критически важно поддерживать давление в оптимальном диапазоне [5].

В реальной эксплуатации техники возникает необходимость доливки моторного масла, что также влияет на интенсивность его последующего старения. В данной области также ведутся исследования [43—46] и др.

Например, в работе [20] исследовались масла марок Castrol Magnatec 5W-40 SL/CF, Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF и Mannol Elite 5W-40 SL/CF при различных температурах. Испытания проводились в двух вариантах: с доливками масла и без них. Масса доливаемого масла соответствовала массе угоревшего. Масса пробы масла при испытании с доливками составляла  $100 \pm 0,1$  г.

На рисунке 1.1 показаны зависимости коэффициента термоокислительной стабильности  $K_{ТОС}$  от времени  $t$ . В результате 40-часовых испытаний было установлено, что доливка повышает интенсивность процессов окисления и испарения в синтетических маслах на всем исследуемом температурном интервале. Так, при температуре 170 °С скорость термоокислительных процессов в случае испытания масла с доливками увеличилась в сравнении со скоростью термоокислительных процессов в случае испытания масла

без доливов для исследуемых синтетических моторных масел в процентном отношении: Castrol Magnatec 5W-40 SL/CF — на 14,8 %, Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF — на 16,2 %, Mannol Elite 5W-40 SL/CF — на 20,0 %. При температуре 180 °С в условиях испытания масла с доливками также наблюдается небольшое повышение интенсивности процессов окисления и испарения.



*1, 1' — 180 °С; 2, 2' — 170 °С; 1, 2 — без доливок; 1', 2' — с доливками*

Рисунок 1.1 — Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания синтетического моторного масла Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF [20]

Существует и ряд других работ в данном направлении исследования [47].

Таким образом, доливка моторного масла является достаточно значимым фактором, влияющим на скорость протекания процесса старения масла.

Для регламентации межзаменных интервалов моторного масла в двигателях может применяться система, основанная на отслеживании браковочных показателей (показателей состояния масла), достижение которых свидетельствует об окончании эксплуатационного ресурса смазочного материала и необходимости его замены.

На основе проведенного анализа в работе [21] были выделены предельные, браковочные показатели, по которым может оцениваться качество моторного масла. Также браковочные значения некоторых физико-химических характеристик определяются стандартами и руководящими документами,

нормативными документами предприятий-автопроизводителей и предприятий, эксплуатирующих технику.

Согласно результатам исследований, изменение щелочного числа является одним из наиболее информативных критериев, объективно отражающих степень сохранения функциональных и трибологических характеристик моторного масла в процессе эксплуатации [6]. Мониторинг динамики этого показателя позволяет прогнозировать остаточный ресурс масла и оптимизировать сроки его замены.

Таким образом, старение масла представляет собой сложный многостадийный процесс, интенсивность которого зависит от многих причин. Хотя все основные факторы деградации масла уже выявлены и описаны в литературе, оценка степени влияния каждого из них не совсем ясна. Этот достаточно важный момент определяет возможность качественно прогнозировать остаточный ресурс моторного масла, и, следовательно, необходимо выделить наиболее важные факторы, поддающиеся мониторингу в процессе эксплуатации.

Существует множество подходов к определению наиболее значимых факторов, в связи с чем необходим сравнительный анализ существующих точек зрения различных исследователей в рамках данного вопроса.

## **1.2 Влияние факторов на основные показатели состояния моторного масла**

Современный рынок смазочных материалов характеризуется большим количеством различных видов моторных масел, которые различаются по комплексу начальных значений физико-химических характеристик. Это оказывает влияние на нормирование ресурса моторного масла в рамках организации технического обслуживания и обеспечения надежной эксплуатации автотракторных двигателей.

Поэтому обоснованность регламента интервалов замены моторных масел, содержащаяся в нормативной документации заводов-изготовителей, и его изменение в зависимости от применяемого моторного масла и условий эксплуатации вызывает вопросы. Кроме того, важно определить факторы, которые оказывают наибольшее влияние и позволят прогнозировать ресурс в рассматриваемых условиях.

Для начала рассмотрим нормирующие документы.

Отечественный стандарт ГОСТ 17479.1-2015 [48] устанавливает принципы классификации и обозначения моторных масел и предусматривает систематизацию масел по классам и группам в соответствии с их эксплуатационными характеристиками. Классификация по классам осуществляется на основании температурных пределов применения, где ключевым параметром выступает величина кинематической вязкости. Эксплуатация масла за пределами рекомендованных температурных диапазонов является дестабилизирующим фактором, способным интенсифицировать процессы его старения. В экстремальных ситуациях это может привести к ускоренному износу узлов двигателя и даже к их отказам. Стоит отметить, что стандарт также выделяет группу всесезонных масел, для которых характерны расширенные температурные границы применения. Тем не менее их использование сопряжено с рядом специфических особенностей.

Классификация моторных масел по группам в соответствии с рассматриваемым стандартом происходит по области применения. Критериями для отнесения к конкретной группе выступают тип применяемого топлива, степень форсированности двигателя, а также предполагаемые условия эксплуатации.

Важно подчеркнуть, что ГОСТ 17479.1-2015 не регламентирует срок замены масел, а лишь указывает на ключевые причины, оказывающие влияние на данный параметр, под которым подразумеваются условия эксплуатации

не столько двигателя, сколько самого масла. К ним и следует относить тип применяемого топлива, степень форсированности двигателя.

Интерес представляет стандарт, регламентирующий технические требования к маслам, предназначенным для применения в автотракторных двигателях. Согласно ГОСТ 8581–2021 [49], моторные масла, относящиеся к данной категории, должны обладать повышенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с материалами, используемыми в агрегатах иного типа. К числу таких характеристик относятся повышенная вязкость и устойчивость к окислению, а также улучшенные моюще-диспергирующие и противоизносные свойства. Достижение указанных свойств обеспечивается за счет обязательного введения в состав базового масла пакета присадок.

Аналогично ранее рассмотренному стандарту, использование масла в условиях, выходящих за рамки рекомендованных для конкретной марки, является фактором, детерминирующим интенсивность протекания процессов старения масла и, как следствие, сокращение его фактического ресурса.

ГОСТ 10541-2020 [50] регламентирует технические требования к универсальным моторным маслам, область применения которых распространяется как на бензиновые, так и на дизельные двигатели. Масла, соответствующие данному стандарту, разработаны для обеспечения стабильного функционирования в экстремально широком диапазоне температурных и нагрузочных условий. Тем не менее в силу своей универсальности, смазочные материалы данной категории не всегда способны гарантировать достаточный уровень защиты для узлов автотракторных двигателей в сравнении со специализированными маслами, регламентированными по ГОСТ 8581-2021. Кроме того, тяжелые условия работы автотракторной техники, характеризующиеся повышенной запыленностью, постоянными перегрузками и работой на пониженных передачах, способны ускорить окисление универсального масла, провоцируя рост концентрации механических примесей, активное образование нагара и коксовых отложений.

Влияние на интенсивность деградационных процессов моторного масла оказывает состав применяемого топлива. Использование дизельного топлива, соответствующего требованиям ГОСТ 32511-2013 [51], обуславливает необходимость корректировки интервалов службы смазочного материала в сторону их сокращения. Данная необходимость связана с экологическим классом топлива, который предусматривает выпуск продукции следующих классов:

- К3: массовая доля серы не более 350 мг/кг;
- К4: массовая доля серы не более 50 мг/кг;
- К5: массовая доля серы не более 10 мг/кг.

Повышенное содержание серы в топливе приводит к ее проникновению в картер двигателя и образованию агрессивных сернистых кислот, которые нейтрализуются щелочными компонентами моторного масла, вызывая ускоренное снижение его щелочного числа. В настоящее время на отечественном рынке топлива преобладает продукция, соответствующая классам К5, что, однако, не отменяет необходимости учета данного фактора при нормировании срока службы масла.

Согласно указаниям, при применении дизельного топлива по ГОСТ 32511-2013, характеризующегося повышенным содержанием сернистых соединений, необходимо обязательно сократить межсервисные интервалы замены масла и масляного фильтра. Конкретная продолжительность интервала устанавливается в прямой зависимости от массовой доли серы [52]:

- при содержании серы до 5 мг/кг (биодизельное топливо по ГОСТ 33113-2014 [53]) — срок замены масла не более 600 моточасов;
- при содержании серы от 5 мг/кг до 50 мг/кг (топливо классов К5, К4 по ГОСТ 32511-2013) — срок замены масла сокращается до 300 моточасов;
- при содержании серы от 50 мг/кг до 350 мг/кг (топливо класса К3 по ГОСТ 32511-2013) — срок замены масла не более 175 моточасов;

– при содержании серы свыше 350 мг/кг (топливо, не соответствующее ГОСТ 32511-2013) — замена масла требуется каждые 100 моточасов [52].

В случае использования топлива класса К5 [51; 54], допустимого в настоящее время в обращении на территории Российской Федерации, срок замены масла максимальный.

Помимо химического состава, важной эксплуатационной характеристикой топлива является его смазочная способность, определяющая интенсивность изнашивания прецизионных пар топливной аппаратуры, что, в свою очередь, влияет на поступление продуктов износа в моторное масло и может косвенно сказываться на скорости его деградации [55].

Для проведения сравнительного анализа отметим, что международный стандарт ASTM D 6751 [56] также устанавливает жесткое ограничение на содержание серы в биодизельном топливе — не более 5 мг/кг, что согласуется с отечественными нормативами для данного вида топлива.

Руководящий документ РД 37.001.019-84 устанавливает нормативы показателей предельного состояния для моторных масел, находящихся в эксплуатации [57].

Таким образом, действующие стандарты не регламентируют единых фиксированных нормативов межзаменных интервалов моторного масла. Определение оптимальных сроков замены является комплексной задачей, связанной с оценкой влияния множества взаимосвязанных факторов [58]. При этом все нормативные документы обращают внимание на условия эксплуатации моторного масла.

Научными исследованиями по определению степени влияния различных факторов на интенсивность старения масла занималось большое количество ученых. Использовались разносторонние подходы и имеется много результатов, заслуживающих внимания.

Например, в работе [59] установлено, что изменения основных свойств моторных масел обусловлены комплексным воздействием ряда факторов, связанных с условиями эксплуатации и техническим состоянием ДВС.

Утверждается, что значимым фактором, определяющим интенсивность старения масла, является режим эксплуатации двигателя. Так, короткие среднесуточные пробеги, при которых двигатель не успевает выйти на стабильный температурный режим, способствуют образованию конденсата и повышению концентрации воды в масле. Работа при минимальной частоте вращения коленчатого вала на холостом ходу, характеризующаяся пониженным давлением в системе смазки, также приводит к ухудшению условий смазывания трущихся пар.

Существенную роль играют также и климатические условия. Высокие температуры окружающего воздуха ухудшают теплоотвод, вызывая рост коэффициента трения, истончение и разрыв масляной пленки, а также активизацию окислительных процессов. Низкотемпературная эксплуатация сопряжена с трудностями пуска, приводящими к обогащению топливно-воздушной смеси и ее неполному сгоранию. Повышенная влажность способствует попаданию паров воды в картерное пространство, а также формированию обедненной смеси из-за снижения доли кислорода во влажном воздухе. Эксплуатация в запыленных условиях приводит к проникновению абразивных частиц в масло, снижая его защитные свойства [59].

Проведенный в работе [2] анализ позволил идентифицировать восемь факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на старение смазочного материала: фактический пробег, мощность двигателя, сезонность эксплуатации, тип местности, наработка двигателя, стаж вождения, регулярность использования и тип трансмиссии.

Как показало исследование, фактический пробег выступает в качестве интегрального показателя, косвенно характеризующего общее техническое состояние двигателя. Зимний срок эксплуатации был идентифицирован как

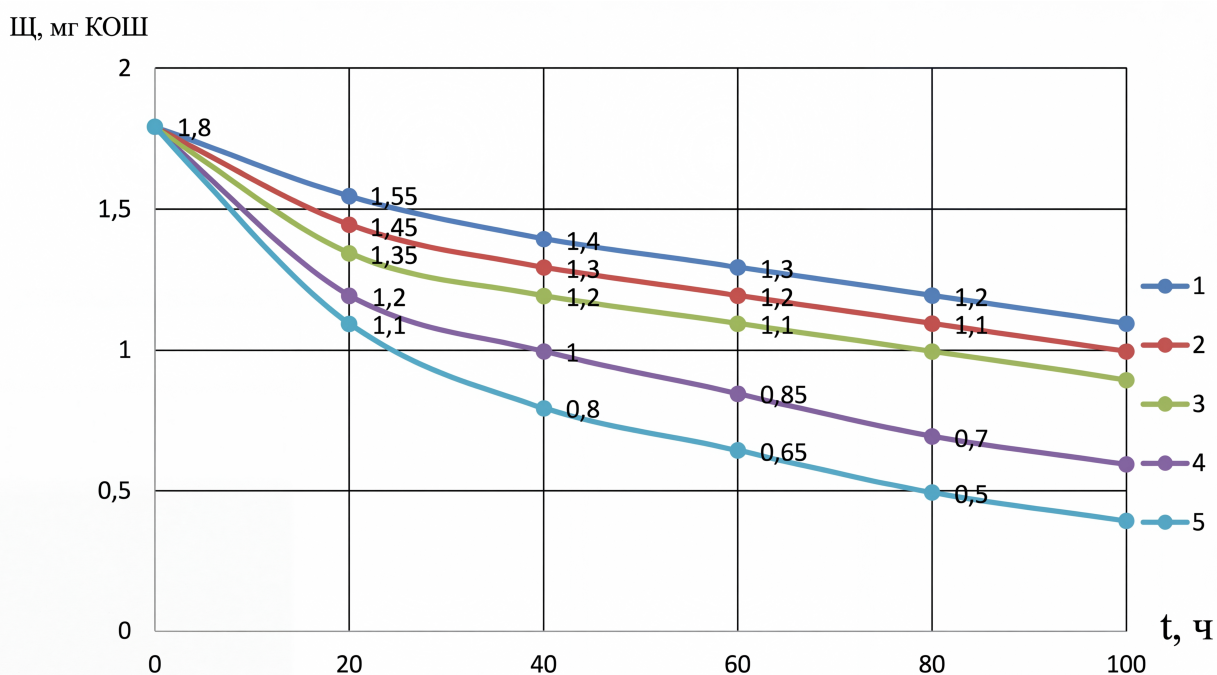
наиболее агрессивный, способныйкратно увеличивать скорость деградации масла. Цикл движения с постоянными остановками является наиболее «тяжелым» для ДВС, интенсифицируя процессы старения смазочного материала. Нарботка двигателя напрямую коррелирует с интенсивностью тепловых и механических нагрузок, приводящих к окислению масла, его загрязнению и истощению пакета присадок.

Схожую точку зрения высказывают авторы работы [60], которые в качестве факторов выделяют: применение низкокачественного топлива, способствующего образованию отложений; кратковременные поездки, не обеспечивающие выход двигателя на стабильный рабочий тепловой режим; эксплуатацию в условиях повышенной запыленности; движение в режиме частых остановок и работы на холостом ходу, провоцирующие повышенные тепловые нагрузки; экстремальные температурные условия, негативно влияющие на вязкостно-температурные свойства и интенсифицирующие окисление масла.

В рассмотренной работе предлагается система мониторинга состояния масла на основе регулярного контроля его физико-химических параметров, включая динамику вязкости, щелочного числа, а также содержание продуктов окисления и воды. Подчеркивается необходимость внедрения подхода учета интервалов замены моторного масла, учитывающего не только климатогеографические особенности, но и весь комплекс перечисленных эксплуатационных факторов.

В исследовании [10] предложена классификация факторов влияния с выделением четырех основных категорий: конструкционных, технических, природных и эксплуатационных. По результатам испытаний авторы выделяют в качестве наиболее значимых эксплуатационные факторы, а именно: скоростной, нагрузочный и тепловой режимы работы двигателя. На рисунке 1.2 показано влияние фактора нагрузки на интенсивность изменения

щелочного числа в авторском представлении. Тем не менее конкретного метода для комплексной оценки их совокупного влияния в работе не предлагается.



1 — при нагрузке двигателя 20 %; 2 — при нагрузке двигателя 40 %;  
3 — при нагрузке двигателя 60 %; 4 — при нагрузке двигателя 80 %;  
5 — при нагрузке двигателя 100 %

Рисунок 1.2 — Изменение щелочного числа моторного масла в зависимости от нагрузки [10]

Аналогичного подхода к классификации придерживаются и авторы работы [61], которые подразделяют все факторы воздействия на три группы: конструкционные, эксплуатационные и климатические. Подчеркивается, что степень влияния каждой из этих групп является вариативной. В результате анализа авторы приходят к выводу, что именно эксплуатационные факторы оказывают наибольшее воздействие на скорость деградации моторного масла.

Встречаются и принципиально иные подходы к описанию влияния факторов. В частности, в работе [62] процесс старения интерпретируется как процесс деградации энергии и накопления энтропии. В качестве ключевых факторов, определяющих скорость данных процессов, автор выделяет дав-

ление в системе смазки, скорость циркуляции масла в магистралях и его температуру в картере двигателя.

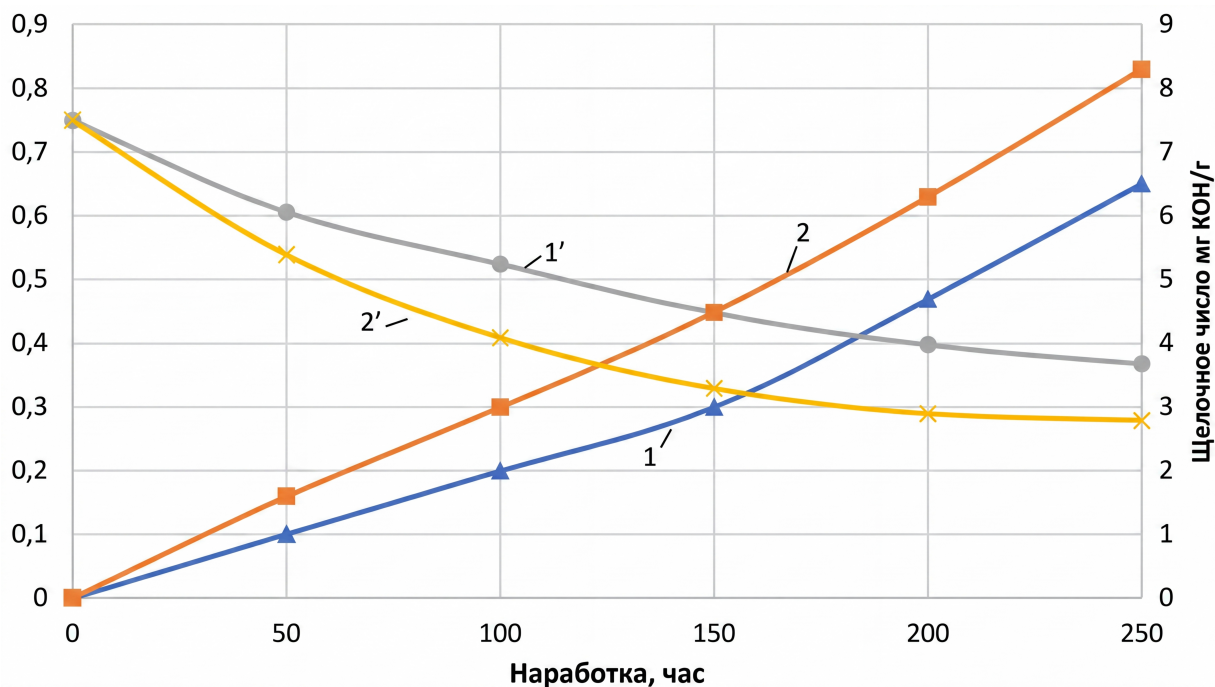
Моделирование, проведенное авторами, показало, что доминирующим фактором является рабочая температура масла в картере. На основе положений теории энтропии была разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать остаточный ресурс моторного масла в моточасах.

Однако, следует отметить, что такие параметры, как давление в системе и скорость движения масла зависят от частоты вращения масляного насоса, которая, в свою очередь, жестко связана с частотой вращения коленчатого вала двигателя. Таким образом, все учитываемые моделью факторы в конечном счете также относятся с точки зрения работы масла к категории эксплуатационных.

Вместе с тем практическая применимость предложенной математической зависимости вызывает сомнения. Основная критика связана с трудностью, а в условиях реальной эксплуатации зачастую и с невозможностью прямого измерения и точного определения ряда переменных величин, входящих в уравнение модели, что существенно ограничивает ее использование для прогнозирования ресурса масла.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в работе [63], демонстрируют влияние технического состояния двигателя на скорость загрязнения и деградации моторного масла.

Установлено, что после наработки 250 моточасов в двигателе первого года эксплуатации содержание механических загрязнений и продуктов износа в масле достигало 0,65 % (рисунок 1.3). При соблюдении идентичных условий эксперимента в двигателе со сроком эксплуатации 5 лет и повышенной степенью износа данный показатель превышал 0,85 %. Также было зафиксировано снижение эффективности присадок: значение щелочного числа в образце масла из нового двигателя составляло 3,5 мг КОН/г, тогда как в образце из двигателя с длительной наработкой оно снизилось до 2,7 мг КОН/г.



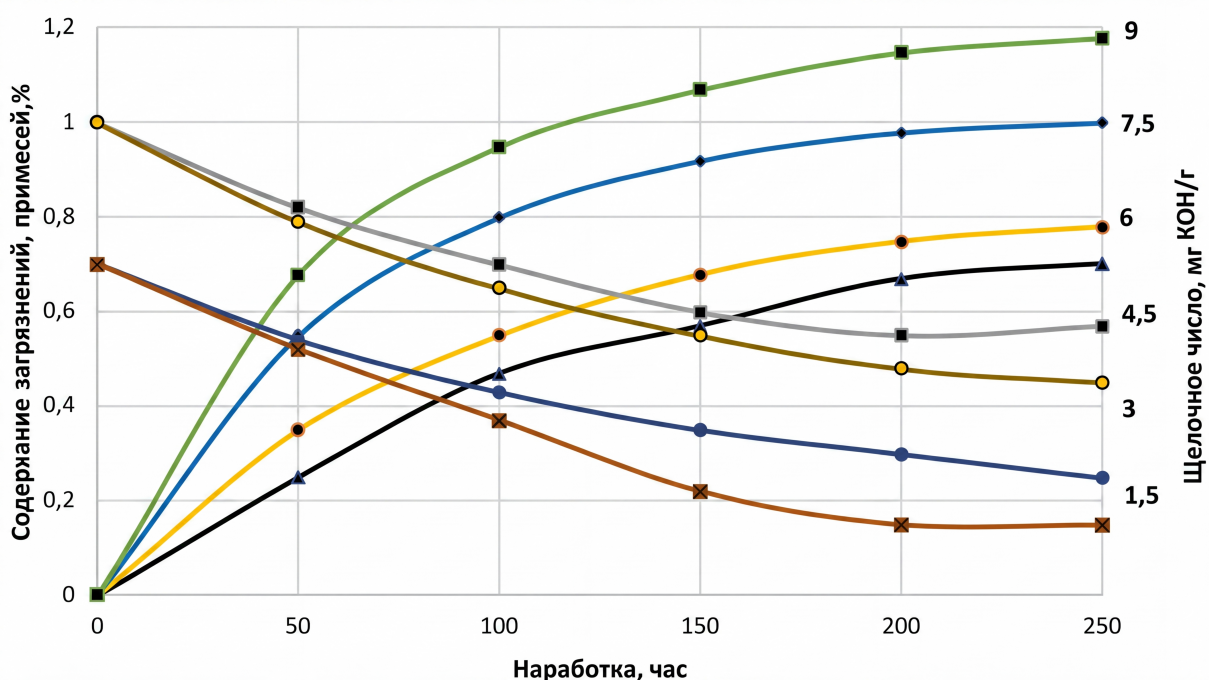
1, 1' — двигатель Д-245 первого года эксплуатации; 2, 2' — двигатель после 5 лет эксплуатации

Рисунок 1.3 — Зависимость изменения содержания загрязненности (1, 2) и щелочного числа моторного масла (1', 2') от наработки [63]

В ходе дальнейшего исследования было установлено, что применение дизельных топлив утяжеленного фракционного состава с повышенными показателями содержания серы и смол, отклоняющимися от требований ГОСТ 32511-2013 на 10–20 %, приводит к увеличению концентрации загрязняющих веществ в моторном масле по сравнению с использованием топлив, полностью соответствующих стандарту.

Тем не менее прогнозирование изменения условий эксплуатации масла в определенной степени трудновыполнимая задача, характеризующаяся возможностью возникновения случайных переменных. Так, например, сложно учесть характер влияния состава и свойств топлива на процесс старения масла, характеристики которого в условиях реальной эксплуатации узнать при каждой заправке довольно проблематично. Однако вышеперечисленные ограничения при организации периодизации ТО способом прогнозирования не уменьшают значимости влияния обозначенных факторов.

В работе [63] также проводился и анализ влияния качества моторного масла на его фактический срок службы. В рамках эксперимента сравнивались изменения эксплуатационных свойств моторного масла марки М-10ДМ с нормальными характеристиками и отличными от требований стандартов. При этом использовались два двигателя: новый (первый год эксплуатации) и двигатель трактора с пятилетним сроком службы, характеризующийся повышенным удельным расходом топлива, пониженным давлением в системе смазки ( $2-2,5 \text{ кгс/см}^2$ ) и снижением компрессии в цилиндрах на 15 % относительно нормативных значений (рисунок 1.4) [63].



1 — изменение щелочного числа масла в двигателе первого года эксплуатации; 2 — изменение щелочного числа масла в двигателе 5 лет эксплуатации; 3 — изменение щелочного числа масла с отклонениями от требований стандартов (новый трактор); 4 — изменение щелочного числа масла с отклонениями от требований стандартов (трактор после 5 лет эксплуатации); 1', 2', 3', 4' — изменения загрязненности моторного масла (при тех же условиях)

Рисунок 1.4 — Зависимости изменения физико-химических характеристик масла от наработки и качества используемого моторного масла [63]

В результате удалось установить, что интенсивность процессов загрязнения и снижения щелочного числа находится в прямой зависимости от

исходного качества моторного масла. Было выявлено, что уже при наработке 150–170 моточасов щелочное число масла достигло браковочного значения как в новом двигателе, так и в двигателе с длительным сроком эксплуатации. Аналогично проходили изменения для показателя содержания механических загрязнений и продуктов износа.

В исследовании [20] температура двигателя предлагается в качестве фактора, оказывающего наибольшее влияние на скорость окисления моторного масла. При этом источники, определяющие температуру, — это другие эксплуатационные факторы. Помимо этого, авторы указывают на существенное влияние доливки свежего масла на процесс деградации масла.

В рамках исследования, представленного в работе [64], был проведен анализ изменения характеристик моторных масел в двигателях зерноуборочных комбайнов на протяжении как срока активной эксплуатации, так и межсезонного хранения. Авторами было установлено, что содержание механических примесей и продуктов износа в большей степени зависело от таких факторов, как наработка двигателя, общее техническое состояние двигателя, соблюдение регламентов технического обслуживания и условия консервации техники.

Экспериментальные данные демонстрируют, что вязкость масел марок М-10Г2 и М-10ДМ в процессе наработки изменяется несущественно, что подтверждает высокую стабильность данного параметра в эксплуатационных условиях. В противоположность этому, щелочное число снижается с исходных 9 мг КОН/г до 3,5–5 мг КОН/г, что свидетельствует о прогрессирующей деградации антиокислительных, противоизносных и антикоррозионных свойств смазочного материала.

Корреляционный анализ подтвердил взаимосвязь между изменением оптических характеристик масла (потемнение) и ростом концентрации смолистых соединений. В период межсезонного хранения зафиксировано

продолжение снижения щелочного числа и выпадение части механических примесей и смол в виде осадка.

Между тем в работе подробно не исследуются причины изменения щелочного числа — наиболее информативного показателя состояния масла, как его характеризуют авторы. Однако установлена прямая зависимость изменения щелочного числа масла от наработки двигателя.

В своем исследовании [65] Б.Н. Перминов провел изучение процессов старения моторного масла в судовых тронковых дизелях. Автором установлено, что на интенсивность деградации моторного масла влияют такие факторы, как качество применяемого топлива, режимы эксплуатации двигателя, техническое состояние и конструктивные параметры.

Режимы эксплуатации двигателя выделяются как самые значимые факторы. Снижение нагрузки сопровождается ухудшением полноты сгорания топливно-воздушной смеси, что увеличивает поступление нерастворимых продуктов в картерное пространство. Одновременно с этим снижение теплового воздействия на масляную пленку замедляет активацию и срабатывание присадок.

Повышение частоты вращения коленчатого вала ухудшает качество рабочего процесса, увеличивая концентрацию нерастворимых продуктов в масле, в то время как рост степени форсировки, улучшая полноту сгорания, одновременно усиливает термическое разложение присадок.

Среди конструктивных параметров двигателя влияние на интенсивность старения масла оказывают диаметр цилиндра и степень форсировки. Увеличение диаметра цилиндра снижает удельные показатели загрязнения и расхода присадок, а площадь масляной пленки, подверженной окислению, увеличивается линейно. Удельная вместимость системы смазки оказывает наименьшее воздействие, однако увеличение ее объема снижает кратность циркуляции масла через зоны трения, что замедляет его старение.

Несмотря на очевидные конструктивные и эксплуатационные различия между двигателями сельскохозяйственных тракторов и судовыми тронковыми дизелями, процессы старения моторного масла обладают общей физико-химической природой. Ключевые факторы остаются неизменными. Аналогичные закономерности подтверждаются и для других видов тяжело-нагруженной техники, в частности анализ факторов деградации моторного масла карьерных самосвалов [66] демонстрирует схожие доминирующие эксплуатационные воздействия. Поэтому выводы, сделанные в исследовании, будут применимы и к процессам, происходящим в двигателях тракторов с учетом поправок на специфику их работы и условий эксплуатации.

В исследованиях [6; 7] проводилось определение предельного значения выработки ресурса моторного масла М14Г2 по комплексному показателю, который учитывал суммарный расход топлива и число пусков двигателя Д-245.5S2. Испытания выполнены на двух тракторах: учебный трактор «Беларус-925М» и трактор «Беларус-952» в реальной эксплуатации.

Пробы масла объемом 80 мл отбирались каждые 85–90 часов работы трактора «Беларус-925М» с одновременной регистрацией наработки, суммарного расхода топлива и количества циклов «пуск–работа–остановка». Для каждой пробы определялись и сравнивались со свежим маслом щелочное и кислотное числа.

Параллельно проводился отбор масла с трактора «Беларус-952», который находился в реальных условиях эксплуатации.

В результате испытаний было установлено, что скорость снижения щелочного числа масла М14Г2 пропорциональна количеству пусков двигателя и суммарному расходу топлива. Согласно разработанной методике, полная выработка ресурса масла наступала после расхода 3240 л топлива, в то время как за регламентные 250 часов работы двигатель потреблял 5785,7 л топлива.

Помимо вышеперечисленных, были рассмотрены и другие работы по вопросу определения влияющих факторов [45; 67—69].

Также интерес представляли и работы зарубежных авторов, таких как Т. Omiya [70], E. Hu [71], M. Yu [72], J. Zhang [73].

Проведенный анализ литературных источников позволяет заключить, что существующие подходы к идентификации факторов, влияющих на интенсивность деградации моторного масла, схожи между собой. Большинство исследователей сходятся во мнении, что именно эксплуатационные факторы оказывают доминирующее воздействие на процессы старения. В других же работах выделенные авторами факторы находятся во взаимосвязи или в зависимости от эксплуатационных факторов. При этом следует заметить, что некоторые конструктивные факторы с точки зрения конструкции двигателя являются эксплуатационными с точки зрения процессов эксплуатации моторного масла.

Основными эксплуатационными факторами следует считать нагрузочный и скоростной режимы работы двигателя [11; 74]. Тепловой режим, который многие авторы выделяют как значимый фактор, не является независимым, так как его величина для конкретного двигателя с заданным техническим состоянием зависит преимущественно от частоты вращения коленчатого вала и от нагрузки, оказываемой на двигатель.

В работах, посвященных исследованию свойств моторных масел, утверждается, что щелочное число может рассматриваться как обобщенный показатель, характеризующий состояние и остаточный ресурс моторного масла [6; 7; 62; 75]. Данный подход обусловлен тем, что щелочное число косвенно отражает запас моющих и нейтрализующих присадок, сопротивляющихся процессам окисления.

При выборе параметра для построения прогностической модели для цифрового двойника важно учитывать не только его информативность, но и предсказуемость изменения во времени. Анализ литературных данных показывает, что щелочное число изменяется достаточно монотонно, что хорошо для описания и прогнозирования. В отличие от него, изменение кинематиче-

ской вязкости, диэлектрической проницаемости или температуры вспышки может зависеть от случайных факторов. В реальных условиях возможно одновременное воздействие нескольких процессов и их взаимное влияние друг на друга: в неисправном двигателе разжижение масла топливом способно снижать вязкость, тогда как одновременное накопление продуктов неполного сгорания (сажи, смол) оказывает противоположное действие, компенсируя снижение значения параметра, что делает прогнозирование этих параметров затруднительным. А такие факторы, как попадание топлива в систему смазки, следует отнести к аварийному случаю и непредсказуемому с точки зрения эксплуатации масла.

В данной работе в качестве основного прогнозного параметра состояния моторного масла принято щелочное число. Переход от регламентной замены масла к замене по фактическому состоянию может осуществляться на основе контроля достижения щелочным числом браковочного значения, установленного для конкретного двигателя и моторного масла.

### **1.3 Способы корректировки времени замены моторного масла**

Как уже было сказано, процесс старения моторного масла неразрывно связан с изменением его физико-химических показателей. Контролируя их, можно определять текущее состояние моторного масла и, как следствие, корректировать сроки его замены. Определяют основные показатели стандартными методами контроля масла [76—81].

Однако применение лабораторных методов, требующее специального оборудования и химических реагентов, сопряжено с практическими трудностями в условиях предприятия. В таком случае более эффективно использовать другие способы, например методы экспресс-анализа.

В целом способы оценки состояния моторного масла можно разделить на две основные группы. Первая основана на фактическом определении

физико-химических показателей масла — к ней относятся лабораторная диагностика, экспресс-анализ, а также разработанные методы анализа состава масла. Ко второй группе относятся способы, связанные с оценкой влияния внешних факторов. Они включает в себя устройства и методы, в основе которых лежат математические модели.

### **1.3.1 Способы корректировки времени замены моторного масла по показателям фактического состояния моторного масла**

Значительный вклад в развитие методов экспресс-диагностики внесли такие исследователи, как В.В. Остриков, Ю.А. Гурьянов, Г.Д. Матыцин, А.Б. Алхимов, А.Ю. Корнев, И.В. Бусин, А.Д. Казмиров, В.Г. Дрюков.

В качестве комплексного решения можно рассматривать методику, изложенную в работе [82]. Авторы предлагают использовать комплекс экспресс-методов для контроля состояния моторного масла.

Содержание охлаждающей жидкости в моторном масле определяется термическим методом и методом бумажной хроматографии, а наличие топливных фракций оценивается по температуре вспышки в закрытом тигле и через сравнение вязкости с эталонным образцом. Присутствие абразивных частиц и продуктов износа фиксируется методом истирания, а изменение кинематической вязкости отслеживается путем сравнения с эталоном. Моющие и диспергирующие свойства вместе со степенью загрязнения механическими примесями анализируются с помощью бумажной хроматографии. Наконец, противоизносные свойства и способность нейтрализовать кислоты оцениваются по величине водородного показателя.

К способам визуальной оценки относится экспресс-метод [9], с помощью которого можно определять щелочное число пробы. Данный подход основан на анализе капельной пробы масла, которая вводится в специально приготовленную смесь с индикатором. В ходе реакции смесь изменяет свою окраску в зависимости от степени химической деградации масла, причем

каждый цветовой оттенок соответствует конкретному значению щелочного числа.

К достоинствам разработки следует отнести простоту исполнения, доступность реагентов и низкую стоимость. Вместе с тем необходимость использования жидких компонентов для создания смеси предполагает их транспортировку в стеклянной таре, что затруднительно в условиях полевой эксплуатации техники. Визуальная оценка цветовых оттенков вносит субъективность и снижает точность измерений. Дополнительными ограничениями являются потребность в предварительной подготовке индикаторной бумаги и значительная зависимость от человеческого фактора.

Подобный вышеописанному колориметрический принцип используется в работе [83]. Его суть состоит в достижении точки нейтральности анализируемого раствора. Щелочное число определяется путем установления минимального объема кислоты, вызвавшего последнее устойчивое изменение окраски индикатора.

Кроме того, в литературе известны другие методики экспресс-контроля качества моторных масел [84—86].

Значительное внимание исследователи уделяют разработке обобщенных показателей и критериев, интегрирующих несколько параметров состояния масла. Ярким примером служит подход, изложенный в работе [28], где вводится обобщенный комплексный показатель, рассчитываемый на основе результатов анализа параметров состояния масла.

Обобщенный комплексный показатель рассчитывается как функция шести единичных параметров: концентрации железа, содержания кремния, количества нерастворимого осадка, значения кинематической вязкости, величины зольности и щелочного числа.

$$\text{ОКП} = \sum_{i=1}^n \frac{K_i - \alpha_i T}{\beta_i}, \quad (1.1)$$

где ОКП — обобщенный комплексный показатель;

$K_i$  — показатель состояния моторного масла, балл;

$n$  — число определяемых показателей ( $n = 6$ );

$\alpha_i$  — коэффициент интенсивности изменения  $i$ -го показателя за 1 час;

$T$  — наработка двигателя, час.

Альтернативный метод формирования обобщенного критерия описан в исследовании [87]. В рамках данного подхода старение моторного масла оценивается по таким параметрам, как кинематическая вязкость, плотность, коррозионная активность на свинцовых пластинках, щелочное число и температура вспышки. Расчет итогового обобщенного критерия производился с применением формулы

$$\mathcal{E}_{об} = \left( \frac{\nu_0}{\nu_M} \right) \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho_M} \right) \cdot \left( \frac{K_0}{K_M} \right) \cdot \left( \frac{PH_0}{PH_M} \right) \cdot \left( \frac{T_{В0}}{T_{ВМ}} \right), \quad (1.2)$$

где  $\nu_0, \nu_M$  — кинематическая вязкость масла при 100 °С свежего и работавшего соответственно, мм<sup>2</sup>/с;

$\rho_0, \rho_M$  — плотность масла свежего и работавшего соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$K_0, K_M$  — коррозионность на пластинках свинца свежего и работавшего масла соответственно, г;

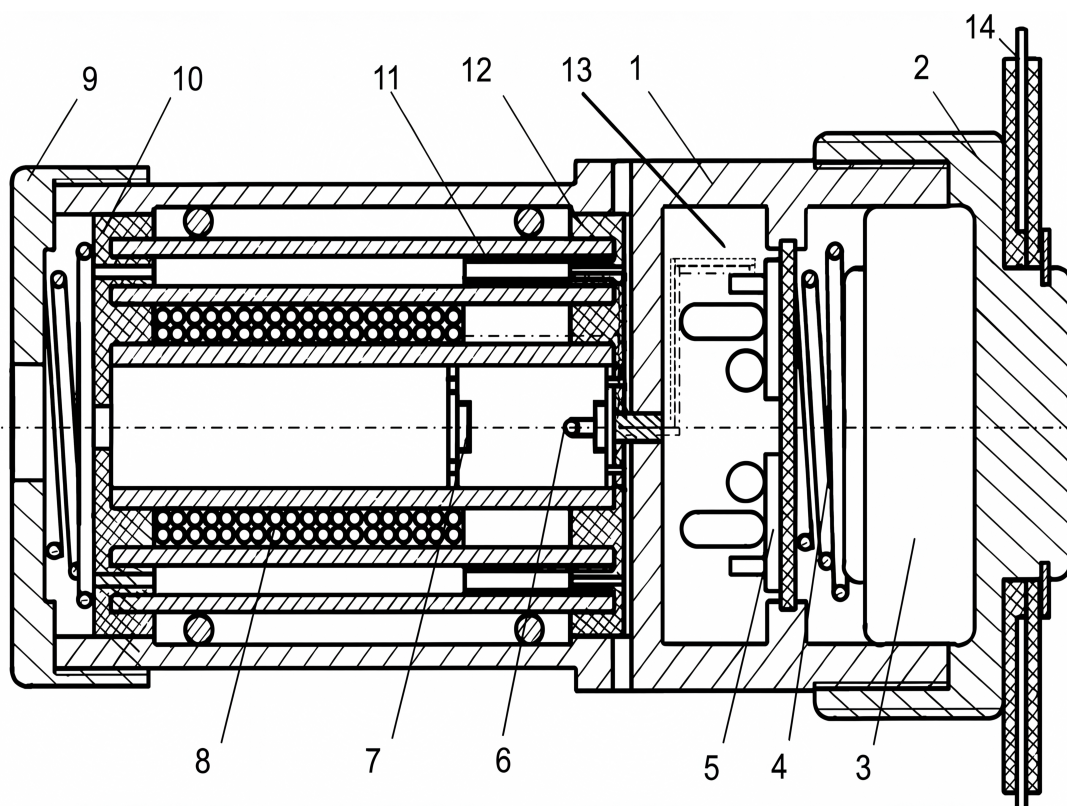
$PH_0, PH_M$  — щелочное число масла свежего и работавшего соответственно, мг КОН/г;

$T_{В0}, T_{ВМ}$  — температура вспышки масла свежего и работавшего соответственно, °С.

Интервал допустимых значений критерия, соответствующий маслам с удовлетворительными эксплуатационными характеристиками, лежит в диапазоне от 0,7 до 1,3.

Развитием данной концепции явилась разработка бортового прибора для измерения диэлектрической проницаемости моторного масла, а также для контроля его уровня и степени загрязнения [88]. Конструкция устройства (рисунок 1.5) включает в себя: индукционный датчик для определения

уровня масла, емкостный датчик для оценки его качества и фотодатчик для анализа загрязненности. Все компоненты устанавливаются в картер двигателя вместо штатной сливной пробки. Приемник, расположенный в салоне автомобиля, принимает сигналы от датчиков, осуществляет их анализ и отображает результаты на информационном дисплее.



- 1 — корпус; 2 — колпачок; 3 — автономная аккумуляторная батарея;  
 4 — контактная пружина; 5 — радиопередатчик; 6 — светодиод;  
 7 — фотозлемент; 8 — индукционный датчик уровня масла;  
 9 — подпружиненная крышка; 10, 12 — фланцевые вставки;  
 11 — емкостной датчик состояния масла; 13 — коммутационный узел;  
 14 — антенна

Рисунок 1.5 — Устройство для контроля масла в двигателе внутреннего сгорания [88]

Многие исследователи данной тематики предлагают осуществлять оценку ресурса масла, основываясь на результатах диэлектрической проницаемости [89—92]. Функционирование системы заключается в периодическом опросе датчика и сравнении текущего показателя диэлектрической проницаемости с заранее установленным пороговым значением. При до-

стижении или превышении критического уровня, соответствующего полной выработке ресурса масла, система формирует сигнал для оператора.

К серийным средствам технического контроля относится электронный датчик ANALEXrs Tribo, предназначенный для непрерывного мониторинга состояния моторного масла. Устройство интегрируется в масляную магистраль и регистрирует изменения таких параметров, как щелочное число, содержание гликоля, наличие нагара и концентрация воды. Информация о фактическом состоянии масла в реальном времени представляется в виде цифровой шкалы в диапазоне от 0 до 100.

Для проверки достоверности показаний данного датчика были проведены испытания [8]. Исследования проводились на тракторе МТЗ-80 с применением масла марки М-10Г<sub>2</sub>. Параллельно с работой датчика отбираемые пробы масла подвергались лабораторному анализу. Сравнение данных выявило существенные расхождения. При наработке в 250 моточасов показания датчика составляли 13 условных единиц, в то время как лабораторный анализ фиксировал 2,8 мг КОН/г, что приближается к браковочному значению. Авторы исследования связывают решение данной проблемы с необходимостью предварительной калибровки и настройки трибодатчика, что значительно осложняет его практическое использование. При этом в исследовании отсутствуют доказательства работоспособности методики расчета остаточного ресурса и адекватности показаний устройства после калибровки.

Для оценки уровня загрязнения моторного масла механическими примесями было разработано ультразвуковое устройство [93]. Оно позволяет не только оценить степень загрязнения, но и идентифицировать природу частиц.

Принцип действия устройства основан на эффекте остаточной вязкости, возникающем при ультразвуковом нагреве. Сравнительный анализ данных исследования пробы масла с использованием калибровочных гра-

фиков позволяет количественно оценить степень загрязненности масла механическими примесями.

Альтернативный подход к диагностике состояния масла предложен в работе [94]. В качестве критерия для оценки ресурса используется коэффициент ( $P_p$ ), рассчитываемый по следующему выражению:

$$P_p = (K_{\text{пог}} \cdot K_{\text{пц}}) \cdot \frac{\mu_0}{\mu}, \quad (1.3)$$

где  $K_{\text{пог}}$ ,  $K_{\text{пц}}$  — коэффициент поглощения светового потока соответственно пробы окисленного и работавшего масла после его центрифугирования;

$\mu_0$ ,  $\mu$  — вязкость окисленной и исходной проб работавшего масла.

Коэффициент  $P_p$  характеризует изменение внутренней энергии смазочного материала при испытании на термоокислительную стабильность в течение 3 часов при температуре 180 °С. Таким образом, чем меньше значение коэффициента, тем больше запас потенциальной энергии материала. Однако необходимость проведения продолжительных испытаний для получения результатов делает данный метод не самым эффективным.

Помимо определения коэффициента работоспособности, авторы методики предлагают оценивать состояние системы фильтрации ДВС и диспергирующую способность масла. Для этого проводится центрифугирование пробы с последующим фотометрическим анализом. Оценка состояния фильтрующих элементов выражается через коэффициент ( $K_f$ ), который рассчитывается по следующему выражению:

$$K_f = K_{\text{п}} - K_{\text{пц}}, \quad (1.4)$$

где  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{пц}}$  — коэффициенты поглощения светового потока исходной пробы отработанного масла и после центрифугирования соответственно.

В работе [95] приведены результаты исследования синтетического моторного масла Mobil 10W-40 SN/CF, целью которого являлась оценка изменения его свойств в процессе эксплуатации двигателя. Методика исследования

включала комплексный анализ: измерение коэффициента поглощения светового потока для оценки степени общего загрязнения, центрифугирование проб с целью разделения растворимых и нерастворимых продуктов старения, определение кинематической вязкости и испытания на трехшариковой машине трения для оценки противоизносных характеристик.

На основании проведенного анализа авторами предложен следующий критерий оценки противоизносных свойств:

$$\Pi = a \cdot K_{\Pi} - b, \quad (1.5)$$

где  $\Pi$  — критерий противоизносных свойств, характеризующий условную концентрацию продуктов старения на номинальной площади фрикционного контакта, безразмерная величина;

$K_{\Pi}$  — коэффициент поглощения светового потока, ед.;

$a, b$  — эмпирические коэффициенты, определяемые для конкретного типа моторного масла экспериментальным путем, безразмерные величины.

На основе полученных результатов авторы предлагают описанную методику как работающий способ определения ресурса масла.

В диссертационном исследовании [96] автором предложена модифицированная методика эмиссионного спектрального анализа, ориентированная на автоматизацию процесса и повышение достоверности получаемых данных путем учета взаимодействий между базовой основой масла и присадочными компонентами.

По итогам работы были разработаны комплексные критерии оценки состояния масла, объединяющие данные спектрального анализа с традиционными физико-химическими параметрами. Данный интегральный подход позволяет не только определять текущее состояние смазочного материала, но и прогнозировать изменение его свойств в процессе дальнейшей эксплуатации.

В литературе описаны и другие способы оценки остаточного ресурса моторных масел [65; 84; 97—101]. Из них можно выделить методы и устрой-

ства для определения щелочного и кислотного чисел моторных масел [9; 102; 103].

Тем не менее способы корректировки времени замены моторного масла по фактическому определению показателей состояния моторного масла не всегда могут быть удобны и применимы в условиях эксплуатации МЭС. В связи с чем актуальность приобретают способы оценки остаточного ресурса моторного масла по влиянию факторов.

### **1.3.2 Способы корректировки времени замены моторного масла по влиянию факторов**

Исследованиями по вопросу корректировки сроков ТО двигателей по учету влияния внешних факторов занималось большое количество авторов, среди которых А.С. Денисова, А.М. Сычева [83; 97; 104—106]

Многие работы по данному вопросу представлены в виде патентной документации. Например, патент [75] компании GM Global Technology Operations LLC описывает метод, предназначенный для дизельных двигателей и учитывающий три ключевых параметра: частоту вращения коленчатого вала, температуру масла и степень его загрязнения. Работа системы предполагает расчет эффективной наработки в оборотах, которая корректируется с учетом влияния деградирующих факторов посредством специальных коэффициентов. Значение допустимой наработки (максимального количества оборотов) записывается в память бортового компьютера после каждой замены масла и уменьшается на величину скорректированных оборотов. Скорректированные обороты определяются как произведение фактических оборотов двигателя, температурного коэффициента и коэффициента загрязнения.

Расчет температурного коэффициента осуществляется в зависимости от режима работы двигателя. В режиме прогрева (температура масла ниже 80 °С) используется линейная зависимость от температуры охлаждающей

жидкости и количества оборотов с момента пуска. В установившемся тепловом режиме применяется усложненная формула, учитывающая температуру охлаждающей жидкости, частоту вращения коленчатого вала, цикловую подачу топлива, температуру воздуха на впуске и скорость трактора.

Коэффициент загрязнения масла вычисляется по эмпирической зависимости, включающей температуру масла, угол опережения впрыска, подачу топлива и частоту вращения, с константами, калибруемыми для конкретной модели двигателя. Представленный метод может быть реализован на стандартном бортовом оборудовании.

Схожий принцип реализован в системе, представленной в научной работе [107]. Расчет скорости старения моторного масла происходит в зависимости от температурных и временных параметров. Степень деградации масла  $A$  рассчитывается по следующей зависимости:

$$A = \int_0^t \alpha(T) dt, \quad (1.6)$$

где  $t$  — время работы двигателя, с;

$T$  — температура масла, °С;

$\alpha$  — скорость износа масла при соответствующей температуре,  $c^{-1}$ .

Параллельно система рассчитывает остаточный ресурс масла  $B$ :

$$B = 12 - \int_0^t 12 \left( \alpha - \frac{1}{200} \right) dt. \quad (1.7)$$

Альтернативный подход к оценке ресурса масла предложен в работе [6]. В данной методике степень выработки ресурса моторного масла  $\Delta$  определяется путем интегрального учета двух факторов: общего количества израсходованного топлива и количества пусков двигателя:

$$\Delta = \left( \frac{\sum_{p=1}^n V_p}{V_0} + m_1 \cdot k_1 + m_2 \cdot k_2 \right) \cdot 100 \%, \quad (1.8)$$

где  $V_p$  — объем израсходованного топлива за цикл «запуск-работа-остановка двигателя»;

$n$  — количество циклов;

$V_0$  — объем израсходованного топлива, соответствующий предельной выработке ресурса;

$m_1, m_2$  — количество циклов пуска двигателя не прогретого (до  $+40$  °С) и прогретого (свыше  $+40$  °С) соответственно;

$k_1, k_2$  — коэффициенты выработки ресурса при пуске.

Предельный объем топлива  $V_0$  рассчитывается как

$$V_0 = \frac{G_t \cdot t}{\rho}, \quad (1.9)$$

где  $G_t$  — часовой расход топлива, кг/ч;

$t$  — установленный заводом-изготовителем срок замены в часах, ч;

$\rho$  — плотность топлива, г/см<sup>3</sup>.

Для подтверждения работоспособности предлагаемой методики авторами были проведены испытания на тракторе Беларус-925М с двигателем Д-245.5S2, который находился в эксплуатации.

В результате испытаний было установлено, что темп изменения щелочного числа масла пропорционален количеству пусков и расходу топлива.

Экспериментальное исследование влияния режимов эксплуатации на процессы старения моторного масла было описано в работе [108]. Анализ данных, полученных в ходе стендовых испытаний, выявил, что при средних и высоких частотах вращения коленчатого вала кинематическая вязкость масла в рабочем диапазоне температур на 8–10 % выше, чем на режимах с низкими частотами. Данное явление объясняется разжижением масла несгоревшим топливом, которое наиболее интенсивно происходит в условиях, близких к режиму холостого хода. Кроме того, установлено, что после определенной наработки интенсифицируются процессы окисления и полимеризации

базовой основы масла, вызванные его контактом с картерными газами и продуктами неполного сгорания топлива.

В результате анализа экспериментальных данных была определена зависимость, аппроксимирующая изменение кинематической вязкости масла в функции от его наработки:

$$v_{100} = a_1 + a_2 t + a_3 t^2, \quad (1.10)$$

где  $t$  — наработка масла, моточасов;

$a_i$  — экспериментальные коэффициенты аппроксимации.

Чем выше значения коэффициентов  $a_2$  и в особенности  $a_3$ , тем более интенсивно протекает процесс старения масла.

В исследовании И.С. Наглюка [109] предлагается использовать показатель интенсивности поступления продуктов изнашивания (железа) в моторное масло от нагрузочного и скоростного режима в качестве браковочного. Испытания проводились на стенде с двигателем КамАЗ-740 и масле М-10Г2к, а также с двигателем ЗиЛ-508.10 на масле М-8В.

В результате были получены математические модели, описывающие остаточный ресурс масел в зависимости от влияния обозначенных факторов. Для КамАЗ-740:

$$L_{\text{ост}} = \frac{(F_{\text{д.к}} - F_{\text{изм}}) \cdot V_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot V_{\text{а}}}{60 \cdot (a_0 + 2,4 \cdot 10^{-7} \cdot Q \cdot V_{\text{а}} - 1,59 \cdot 10^{-3})}. \quad (1.11)$$

Для ЗиЛ-508.10:

$$L_{\text{ост}} = \frac{(F_{\text{д.к}} - F_{\text{изм}}) \cdot V_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot V_{\text{а}}}{60 \cdot (a_0 + 5,03 \cdot 10^{-7} \cdot Q \cdot V_{\text{а}} - 1,16 \cdot 10^{-3})}, \quad (1.12)$$

где  $F_{\text{д.к}}$  и  $F_{\text{изм}}$  — допустимая и измеренная концентрации продуктов износа в масле;

$V_{\text{м}}$  — объем системы смазки двигателя или агрегата;

$\rho_{\text{м}}$  — плотность масла;

$V_a$  — средняя техническая скорость;

$Q$  — расход топлива, л/100 км.

В работе [110] представлен статистический подход, основанный на использовании модели для описания процесса деградации смазочного масла. Данная модель подбирается на основе статистических данных и оперирует тремя состояниями системы: «исправное», «предупреждение» и «отказ», причем непосредственно наблюдаемым является только состояние отказа.

Для сбора экспериментальных данных применялся датчик OLVF (On-line Visual Ferrograph), регистрирующий концентрацию частиц износа в масле. Полученные данные были классифицированы на две группы: записи, завершившиеся отказом (11 случаев), и записи, в которых масло сохраняло работоспособность на момент окончания наблюдений (16 случаев).

В результате были получены численные оценки параметров модели, в том числе матрица интенсивностей переходов состояний. Авторы отмечают, что модель предполагает экспоненциальное распределение времени пребывания в каждом состоянии. Однако для накопления достаточного количества данных для возможности последующего прогнозирования необходимы продолжительные испытания.

Помимо рассмотренных методов, существует значительное количество других решений, предназначенных для контроля параметров работающего моторного масла и диагностики его состояния в зависимости от влияния факторов [111—118].

Проведенный анализ литературных источников демонстрирует, что существующие подходы в значительной степени схожи и сводятся к попытке определить те или иные параметры масла, изменяющиеся в процессе его эксплуатации, для прогнозирования его остаточного ресурса и осуществления замены моторного масла по фактическому состоянию. Систематическая диагностика и техническое обслуживание двигателей признаются необходимой основой для поддержания их работоспособности в эксплуатации [119].

Однако в настоящее время отсутствуют достаточно надежные методы, позволяющие осуществлять непрерывный контроль состояния масла.

Перспективным направлением является разработка более простых способов контроля на основе датчиков. Во многих работах авторы снова выделяют щелочное число как обобщенный показатель состояния масла. Следовательно, интерес представляют экспериментальные зависимости изменения щелочного числа в процессе эксплуатации.

Таким образом, для прогнозирования остаточного ресурса моторного масла можно воспользоваться статистическими моделями. При этом сама реализация концепции оценки по влиянию факторов может быть осуществлена с применением цифровых двойников.

#### **1.4 Применение цифровых двойников**

Концепция цифровых двойников выступает закономерным результатом эволюции методов проектирования и инженерных технологий. Анализ открытых источников позволяет выявить множество определений, относящихся к термину «цифровой двойник». Наличие значительного количества трактовок свидетельствует о текущей стадии активного становления терминологии, а также отражает существование различных научных подходов [12].

Первоначально технология цифровых двойников применялась преимущественно для объектов, уже находящихся в эксплуатации. Современный уровень технологического развития позволяет создавать и использовать цифровые двойники на всех этапах жизненного цикла физического объекта.

Формирование цифрового двойника обеспечивается за счет применения комплекса технологий, таких как компьютерное проектирование и моделирование, методы работы с большими данными, искусственный интеллект, дополненная и виртуальная реальность, беспроводные сети связи и иные передовые решения [120; 121].

Существующие подходы к классификации определений цифрового двойника носят в значительной степени условный характер, что обусловлено продолжающимся процессом терминологического становления [12].

Конкретная трактовка цифрового двойника находится в прямой зависимости от ряда факторов: направленности научных исследований; профессионального опыта, навыков и компетенций автора определения; степени развитости и зрелости технологий; специфики объекта, к которому применяется концепция цифрового двойника, и других аспектов [12].

Определение понятия «цифровой двойник» располагается между двумя разными подходами. С одной стороны находится максимально широкое толкование, при котором к цифровым двойникам относят любые проекты по созданию цифровой копии физического или виртуального объекта, системы или процесса, часто характеризующиеся невысокой степенью адекватности оригиналу. С другой стороны находится строгое, наукоемкое определение, требующее соответствия решения ряду жестких критериев, направленных на достижение высокой степени адекватности цифровой модели.

В работе [122] была поставлена цель — разработать систему типологизаций термина «цифровой двойник». В результате авторы предложили следующие основания для классификации:

- момент возникновения цифрового двойника в жизненном цикле физического объекта или процесса;
- степень адекватности (точности соответствия) цифрового двойника реальному объекту или процессу;
- целевое назначение и функциональные задачи, решаемые с применением цифровых двойников.

В рамках первого варианта типологизации цифровой двойник определяется как «живая» и развивающаяся сущность, которая существует параллельно с реальным изделием на всех этапах его жизненного цикла.

В трактовке ESI Group, соответствующей второму варианту классификации, под цифровым двойником подразумеваются модели, созданные на основе данных, поступающих с датчиков, установленных на реальном объекте.

Разнообразие трактовок цифрового двойника, обусловленное различиями в требуемом уровне адекватности и моменте его создания, в значительной степени детерминировано целевым назначением данной технологии. С учетом этого фактора предлагается следующая классификационная система:

1. «Информационно-диагностические цифровые двойники».
2. «Предиктивные цифровые двойники».
3. «Проектно-качественные цифровые двойники».
4. «Операционные цифровые двойники».

Анализируя представленные выше подходы к типологизации и классификации, специалисты Центра НТИ СПбПУ сформулировали обобщенное определение [123], согласно которому цифровой двойник представляет собой виртуальное отображение физических сущностей и процессов, синхронизированное с ними с заданной частотой и точностью.

Также существует стандарт ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [13].

Помимо этого, анализ открытых источников позволил прийти к выводу, что цифровые двойники нашли применение в различных сферах деятельности, в том числе некоторое распространение они получили и в сфере агропромышленного комплекса.

В статье [124] описано применение цифрового двойника для оценки потери влаги растениями и почвой.

Целью работы являлась разработка модели для расчета суммарного испарения влаги. Для этого был применен метод, учитывающий комплекс климатических параметров.

Согласно концепции, модель может работать в двух режимах: прогнозном, на основе заданных параметров, и оперативном, при обработке непрерывного потока данных с датчиков, установленных на полях. Это позволяет как планировать орошение, так и оперативно управлять им в реальном времени.

Апробация модели была проведена на примере Ростовской области. Анализ данных показал четкую зависимость рассчитанных показателей суммарного испарения от динамики местных погодных условий, что подтвердило адекватность модели и возможность ее использования для прогнозирования [13].

В статье [125] представлена разработка математической модели цифрового двойника растения и ее апробация на растениях перца сладкого. Модель позволяет прогнозировать и оптимизировать рост в рассадный период, оценивая в реальном времени его состояние и влияние внешних факторов.

Для полноценной работы цифрового двойника в режиме реального времени необходима система автоматизированного сбора данных. В эксперименте, проведенном в ходе работы, многие измерения были ручными. Перспективой развития модели является создание программной оболочки, которая должна интегрироваться с датчиками.

В целом интеллектуализация тракторов и машин сельскохозяйственного назначения играет ключевую роль для реализации цифровых двойников в сфере сельского хозяйства, так как обеспечивает необходимую техническую основу — системы телеметрии, мониторинга и сбора данных о работе агрегатов [126].

Существуют и другие примеры применения цифровых двойников в сельском хозяйстве, например в работах таких авторов, как А.С. Дорохов [127], Д.А. Тикки [128], А.И. Жолобова [129], А.А. Жиздюк [130], О.Н. Дидманидзе [131], S. Cesco [132], A. Subeesh [133], M. Kallenberg [134], D. Guo [135], Y. Yin [136].

Достаточно обширный функционал выполняют цифровые двойники в автомобильной промышленности. Они позволяют проводить виртуальные краш-тесты, оптимизировать производственные линии и создавать новые системы [137; 138].

Результаты исследований в этой области отражены в работах следующих авторов: Т.Л. Фомичева [139], А. В. Лихвойнен [140], Д.А. Сосфенов [141], Г.Ф. Габитова [142], S. Robyns [143], С. Feilong [144], G. Barker [145].

Цифровые двойники нашли свое применение и в области развития электроэнергетики. В статье [146] представлена разработка цифрового двойника газопоршневой установки, связанной с локальным синхронным электрогенератором. Основная цель создания такого двойника — настройка системы автоматического управления, в частности ее ПИД-регуляторов. Объектом моделирования служит газопоршневая установка мощностью 350 кВт с двигателем ЯМЗ.

Цифровой двойник в этом случае позиционируется как уточненная модель, способная с точностью до 95 % воспроизводить поведение реальной установки в переходных режимах.

В работе [147] предложен метод использования цифрового двойника мехатронного привода для синхронного электродвигателя. Цифровой двойник строится на основе нелинейной дискретной оптимальной модели управления бесколлекторным двигателем постоянного тока.

Метод, который предлагается в исследовании, использует моделирование с полным перебором значений параметров. Это позволяет адаптировать программу управления приводом в реальном времени. В результате повышается точность движения мехатронного устройства по заданной траектории за счет большего соответствия управляющих сигналов реальному состоянию объекта.

В исследовании [148] представлена разработка цифрового двойника сердечно-сосудистой системы человека. Работа направлена на преодоление

ключевого ограничения существующих моделей — отсутствия в них динамических механизмов регуляции кровообращения.

В основе работы лежит новая математическая модель, которая, в отличие от существующих аналогов, учитывает динамические процессы регуляции кровообращения. Структурно цифровой двойник оперирует 52 выходными координатами и управляется через изменение 53 свойств системы. Верификация модели показала погрешность вычислений, не превышающую 5 %.

В работе [149] рассматривается концепция создания цифрового двойника для многокомпонентных пищевых продуктов, преимущественно мясных. Основная идея работы заключается в переносе процесса разработки рецептур в цифровое пространство. Для этого предлагается перейти от статических баз данных о составе сырья к динамическим имитационным моделям, способным прогнозировать свойства конечного продукта.

На основе данных строится комплексная математическая модель, которая представляет собой систему уравнений, описывающих взаимодействия в многокомпонентной смеси.

Также применение цифровых двойников в различных сферах деятельности представлено в работах А.А. Дуниной [150], И.В. Бреуса [151], R.C. Belo [152], H. Wang [153], F. Dehghan [154], D. Xiao [155], S. Gil [156].

Отдельного внимания заслуживают работы, связанные с прогнозированием состояния моторного масла. Так, в исследовании [14] для прогнозирования остаточного ресурса по данным о концентрации продуктов износа была применена многовыходная регрессия гауссовских процессов. Показано, что данный подход позволяет учитывать нелинейный характер деградации масла и скачкообразные изменения, вызванные доливом.

Другой коллектив авторов [157] использовал регрессию гауссовских процессов для прогнозирования деградации вязкости и кислотного числа с целью обоснованного увеличения интервала замены масла.

В работе [15] на основе анализа более 1020 образцов моторного масла для дизельного двигателя продемонстрирована возможность прогнозирования остаточного ресурса по комплексу физико-химических показателей. Авторами установлено, что отбор наиболее информативных признаков позволяет повысить точность прогнозирования с 49 до 66 %. Полученные результаты подтверждают применимость подхода, основанного на построении прогностической модели как ядра цифрового двойника.

Все три рассмотренные работы не являются цифровыми двойниками в строгом смысле, однако они демонстрируют эффективность применения регрессионных моделей для решения задач прогнозирования ресурса масла, а также, показывают возможность использования регрессионных моделей в качестве моделей цифрового двойника для таких задач.

Таким образом, применение цифрового двойника на базе статистической модели позволит определять остаточный ресурс моторного масла, что актуально в настоящее время с учетом развития математического аппарата и вычислительных технологий.

В настоящей работе концепция цифрового двойника рассматривается для прогнозирования остаточного ресурса моторного масла по влиянию эксплуатационных факторов.

Возможны два варианта реализации такой системы. Первый вариант предполагает выполнение расчетов непосредственно на борту трактора с использованием дополнительного вычислительного модуля, что требует установки соответствующего оборудования и увеличивает стоимость. Второй вариант базируется на уже существующей на многих сельскохозяйственных предприятиях системе мониторинга техники. В этом случае данные о режимах работы двигателя передаются на удаленный сервер, где на основе математической модели производится расчет остаточного ресурса масла. Результат прогноза направляется на мобильное устройство оператора и отображается в интерфейсе существующей системы мониторинга.

Следует отметить, что применение цифрового двойника не позволяет полностью отказаться от лабораторного контроля. Для идентификации параметров модели требуется отбор проб масла и определение щелочного числа лабораторными методами. Однако после настройки модели основная функция прогнозирования выполняется цифровым двойником на основе данных о режимах работы двигателя, что значительно сокращает количество необходимых лабораторных анализов и делает их преимущественно контрольными. Таким образом, предлагаемый подход не заменяет, но сокращает лабораторную диагностику, обеспечивая оперативный мониторинг остаточного ресурса масла.

Для реализации выбранного варианта цифрового двойника в диссертационной работе было необходимо решить следующие задачи: установить аналитические зависимости изменения щелочного числа от скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя и разработать математическую модель процесса деградации масла и алгоритм идентификации ее параметров; экспериментально на основе стендовых испытаний двигателя получить данные, необходимые для настройки и подтверждения модели. Кроме того, требовалось организовать сбор данных о режимах работы двигателя в условиях реальной эксплуатации, что предполагает использование уже существующих систем мониторинга или разработку собственных средств регистрации параметров [158; 159], провести анализ этих режимов и проверить адекватность модели цифрового двойника.

## 1.5 Выводы

1. Установлено, что процесс деградации моторного масла в двигателе внутреннего сгорания сопровождается изменением его физико-химических параметров, среди которых наиболее информативным и обобщенным по-

казателем, отражающим состояние и остаточный ресурс масла, является щелочное число.

2. 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.

3. Совокупное влияние нагрузочного и скоростного режимов работы двигателя на скорость деградации моторного масла в настоящее время изучено недостаточно, так как большинство исследователей рассматривают эти факторы изолированно или ограничиваются качественным описанием их влияния.

4. Ранее выполненные исследования направлены на определение ресурса моторного масла и осуществления замены по фактическому состоянию, однако достаточно надежные методы, позволяющие осуществлять непрерывный контроль состояния масла, пока отсутствуют, что позволяет использовать статистические модели для создания цифровых двойников.

5. Концепция цифровых двойников, успешно применяемая в различных отраслях, к задаче оценки остаточного ресурса моторного масла в двигателях сельскохозяйственных тракторов используется весьма ограниченно и не имеет механизма адаптации к конкретному двигателю и типу моторного масла.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

### 2.1 Анализ характера изменения критических показателей моторного масла в процессе эксплуатации

Как уже было сказано, изменение свойств моторного масла обусловлено комплексом физико-химических процессов, проходящих в ДВС в процессе эксплуатации. Зачастую эти процессы имеют нелинейный характер, в связи с чем можно предположить, что изменение ряда ключевых параметров масла может описываться экспоненциальными зависимостями. Это обосновано тем, что именно таким образом изменяются скорости реакций в зависимости от концентраций веществ в растворах. Для подтверждения данного предположения был проведен анализ данных открытых источников.

Так, были использованы результаты исследования, представленного в работе [8]. На их основе удалось построить математические модели, характеризующие изменение кинематической вязкости и щелочного числа масла в процессе испытаний на двигателе трактора МТЗ 80.

Полученные регрессионные зависимости демонстрируют хорошую сходимость с экспериментальными точками (рисунок 2.1).

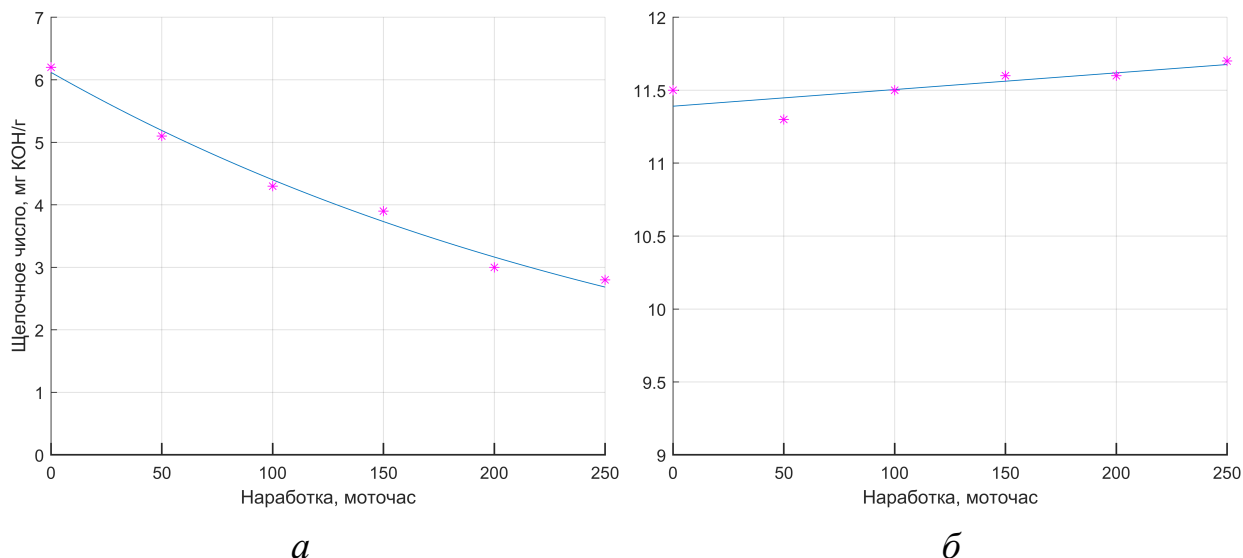
Результаты подбора уравнений регрессии приведены ниже. Модель изменения щелочного числа выражается как

$$CH = a_1 e^{a_2 T_H}, \quad (2.1)$$

где  $CH$  — щелочное число, мг КОН/г;

$T_H$  — наработка, моточас;

$a_1, a_2$  — коэффициенты уравнения (табл 2.1).



*a* — изменение щелочного числа моторного масла; *б* — изменение вязкости моторного масла

Рисунок 2.1 — Изменение щелочного числа и вязкости моторного масла в двигателе трактора МТЗ-80

Таблица 2.1 — Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (2.1)

Коэффициент	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений ( <i>SE</i> )	Критерий Стьюдента ( <i>tStat</i> )	Расчетный уровень значимости ( <i>p</i> )
$a_1$	6,1196	0,12526	48,855	$1,0503 \cdot 10^{-06}$
$a_2$	-0,003297	0,00018378	-17,94	$5,6748 \cdot 10^{-05}$

Количество наблюдений (Number of observations): 6  
 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 4  
 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,153  
 Коэффициент детерминации:  $R^2 = 0,989$   
 Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted):  $R^2 = 0,986$   
 Критерий Фишера (F-statistic vs. zero model):  $F = 2,46 \cdot 10^{+03}$   
 Уровень значимости:  $p = 6,62 \cdot 10^{-07}$

Конечное уравнение изменения щелочного числа принимает вид:

$$CH = 6,1196e^{-0,003297T_H}. \quad (2.2)$$

Согласно данным, представленным в таблице 2.1, подобранные коэффициенты уравнения характеризуются высокими значениями критерия Стьюдента. Это обуславливает низкие уровни значимости нулевой гипотезы

о статистической незначимости данных коэффициентов. На основании этого можно утверждать, что вероятность ошибочного отклонения крайне мала и не превышает  $10^{-4}$ .

Показатель детерминации  $R^2$ , включая его скорректированное значение, достигает 0,986. Полученный вывод дополнительно подтверждается высоким значением критерия Фишера при достигнутом уровне значимости  $p = 6,62 \cdot 10^{-7}$ .

Вместе с тем на графике заметно наличие отклонений экспериментальных точек от теоретической кривой. Причиной расхождения может являться отсутствие учета в модели режимов эксплуатации двигателя.

Иная ситуация наблюдается при анализе динамики кинематической вязкости. Даже линейная модель является достаточно сомнительной:

$$W = k_0 + k_1 \cdot T_H, \quad (2.3)$$

где  $W$  — вязкость кинематическая,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;

$k_0$  — свободный член уравнения;

$k_1$  — коэффициент уравнения (табл. 2.2);

Таблица 2.2 — Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (2.3)

Коэффициент	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента ( $tStat$ )	Расчетный уровень значимости ( $p$ )
$k_0$	11,39	0,068842	165,46	$8,0037 \cdot 10^{-09}$
$k_1$	0,0011429	0,00045476	2,5131	0,065838
Количество наблюдений (Number of observations): 6 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 4 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,0951 Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,612$ Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted): $R^2 = 0,515$ Критерий Фишера (F-statistic vs. zero model): $F = 6,32$ Уровень значимости: $p = 0,0658$				

Расчетное значение критерия Фишера составило 6,32 при уровне значимости  $p = 0,0658$ , что превышает стандартный порог 0,05. Аналогичный уровень значимости у коэффициента, который отвечает за линейную часть уравнения. Результаты свидетельствуют о недостаточной статистической надежности модели — нельзя исключить вероятность того, что вязкость постоянна.

Данные не выявляют закономерности в изменении параметра. Таким образом, прогнозирование изменения кинематической вязкости достаточно проблематично.

К схожим выводам приходят авторы в исследовании [160]. Процессы, происходящие в масле, во многом зависят от его начального состояния и степени загрязнения топливными фракциями. При этом достаточно сложно однозначно определить основополагающие факторы изменения вязкости масла.

Довольно интересные экспериментальные данные представлены в исследовании [10]. В рамках работы испытания были организованы на двух транспортных средствах идентичной марки, обладающих примерно одинаковым техническим состоянием и эксплуатируемых в сходных климатических условиях. Обработка данных, приведенных в источнике, позволила получить зависимость

$$CH = a_1 \cdot e^{a_2 T_H N_e} + a_3 \cdot e^{a_4 T_H N_e}, \quad (2.4)$$

где  $N_e$  — нагрузка, %,

$a_1, a_2, a_3, a_4$  — коэффициенты уравнения.

Статистические параметры рассматриваемой модели приведены в табл. 2.3.

В результате была получена следующая модель:

$$CH = 1,507 \cdot e^{-0,0001171 T_H N_e} + 0,29365 \cdot e^{-0,0025057 T_H N_e}. \quad (2.5)$$

Таблица 2.3 — Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (2.4)

Коэффициент	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента ( <i>tStat</i> )	Расчетный уровень значимости ( <i>p</i> )
$a_1$	1,507	0,059276	25,423	$6,8286 \cdot 10^{-20}$
$a_2$	-0,0001171	$1,0019 \cdot 10^{-05}$	-11,688	$7,4994 \cdot 10^{-12}$
$a_3$	0,29365	0,066765	4,3983	0,0001645
$a_4$	-0,0025057	0,0016736	-1,4972	0,1464
Количество наблюдений (Number of observations): 30 Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 26 Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,0743 Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,969$ Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted): $R^2 = 0,965$ Критерий Фишера (F-statistic vs. zero model): $F = 2,04 \cdot 10^{+03}$ Уровень значимости: $p = 4,54 \cdot 10^{-32}$				

Высокое значение коэффициента детерминации, а также результаты проверки по критерию Фишера позволяют рассматривать полученную модель как статистически значимую. Однако проверка по двустороннему критерию Стьюдента для коэффициента  $a_4$  показывает вероятность высокой ошибки. Это говорит о необходимости уточнения модели, но основной экспоненциальный характер подтверждается. Очевидно, как-то иначе следует учитывать влияние нагрузки на снижение  $СН$ .

Это же видно на графике (рисунок 2.2).  $СН$  экспоненциально снижается в зависимости от наработки и, скорее, линейно от нагрузки. Однако, в целом экспериментальные точки достаточно хорошо ложатся на расчетную поверхность, имеющую экспоненциальный характер.

Можно сделать вывод, что общий характер деградации масла во времени имеет экспоненциальный характер и может быть уточнен с учетом фактических режимов эксплуатации двигателя.

Такая же ситуация наблюдается при анализе изменения щелочного числа в условиях различной работы масляного насоса (рисунок 2.3). Поскольку

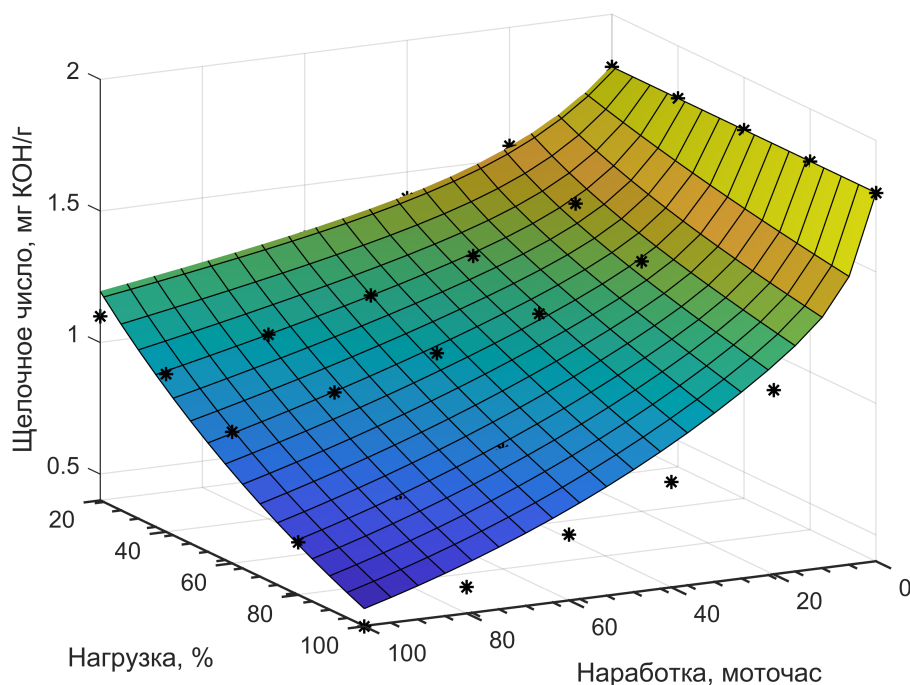


Рисунок 2.2 — Изменение щелочного числа моторного масла в зависимости от наработки и нагрузки двигателя по данным [10]

между частотой вращения коленчатого вала и подачей насоса существует прямая конструктивная связь, изменение подачи масляного насоса можно считать эквивалентным изменению оборотов коленчатого вала.

Исследователи в работах [87; 161] также приходят к выводу об экспоненциальном характере изменения щелочного числа. На основе результатов полученных в ходе проведения исследования [87], предлагается использовать следующую математическую модель при определении изменения щелочного числа:

$$Y = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot x}, \quad (2.6)$$

где  $x$  — пробег автомобиля, км;

При этом величина достоверности аппроксимации равняется 0,9673.

В исследовании [162] выполнена обработка экспериментальных данных из работы [163]. В результате были получены зависимости, связывающие

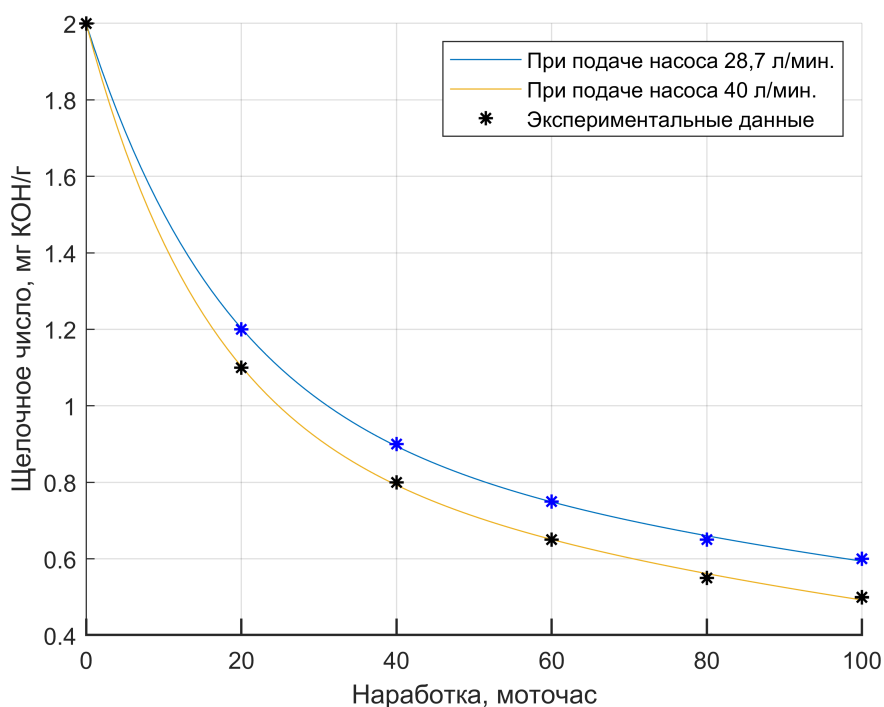


Рисунок 2.3 — Изменение щелочного числа моторного масла в зависимости от подачи масляного насоса двигателя по данным [10]

изменение деградации масла с рядом эксплуатационных факторов. Динамика процесса оценивалась по относительному снижению параметра ( $\Delta CH$ ).

Были получены графики зависимости относительного снижения щелочного числа от наработки в моточасах для различных марок масел и условий эксплуатации. Основная часть данных была аппроксимирована линейными функциями.

Однако подобный подход может привести к ошибкам при прогнозировании. Более корректно оценивать состояние масла по остаточному щелочному числу.

Обработка данных [163] позволила получить статистически обоснованную экспоненциальную зависимость

$$CH \% = a_3 + a_1 \cdot e^{a_2 T_H}, \quad (2.7)$$

где  $CH \%$  — относительная величина снижения щелочного числа, %.

При этом коэффициент детерминации  $R^2 = 0,999$  (табл. 2.4), что существенно отличается от аналогичного  $R^2 = 0,8123$  [162], а следовательно, экспоненциальная зависимость лучше описывает изменение щелочного числа. При этом уровни значимости при проверках коэффициентов регрессии модели по критерию Стьюдента и изменчивости по Фишеру не превышают 0,006, что свидетельствует о качестве модели.

Таблица 2.4 — Результаты статистической обработки при подборе уравнения регрессии (2.7)

Коэффициент	Подобранное значение	Сумма квадратов отклонений (SE)	Критерий Стьюдента ( $tStat$ )	Расчетный уровень значимости ( $p$ )
$a_1$	13.071	0.36149	36.159	0.00076395
$a_2$	-0.01847	0.0013908	-13.28	0.0056227
$a_3$	86.907	0.28117	309.09	$1.0467 \cdot 10^{-05}$
Количество наблюдений (Number of observations): 5				
Число степеней свободы ошибок (Error degrees of freedom): 2				
Среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error): 0,265				
Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,999$				
Скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted): $R^2 = 0,997$				
Критерий Фишера (F-statistic vs. zero model): $F = 789$				
Уровень значимости: $p = 0,00127$				

Представленные результаты разных исследований подтверждают, что изменение щелочного числа моторного масла в процессе эксплуатации происходит по экспоненциальной зависимости. Статистические показатели качества подобранных моделей позволяют рассматривать щелочное число как основной прогнозный параметр состояния моторного масла. Предположительно влияние факторов скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя носит линейный характер по отношению к базовой экспоненциальной зависимости — увеличение значений приводит к интенсификации процессов старения масла [164]. Подтверждение данной гипотезы возможно только посредством проведения экспериментальных исследований.

## 2.2 Зависимости изменения щелочного числа от эксплуатационных факторов

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. В связи с этим предлагаемая модель для прогнозирования изменения щелочного числа имеет вид

$$CH = a_1 + a_2 e^{T_H \left( a_3 + a_5 \frac{M}{M_{\max}} + a_4 \frac{n}{n_H} \right)}, \quad (2.8)$$

где  $M$  и  $M_{\max}$  — текущий и максимальный на данном скоростном режиме крутящие моменты двигателя, Н·м;

$n$  и  $n_H$  — текущий и номинальный скоростной режим, мин<sup>-1</sup>;

$a_5$  — коэффициент уравнения.

Каждый коэффициент регрессии в полученной зависимости имеет конкретный физический смысл. Так, коэффициент  $a_1$  определяет конечное состояние масла, при котором практически прекращается заметное изменение щелочного числа. Коэффициент  $a_2$  — определяет начальное количество щелочных компонентов в двигателе после замены масла. Экспоненциальный компонент определяет общий характер зависимости и скорость старения масла. Коэффициент  $a_3$  определяет деградацию масла на холостом ходу, или общую деградацию, если не выявлено влияния нагрузки и частоты вращения коленчатого вала двигателя. Коэффициенты  $a_4$  и  $a_5$  характеризуют влияние скоростного и нагрузочного режимов на скорость изменения щелочного числа.

Для обобщения модели факторы — «нагрузка» и «скорость» — предлагается учитывать в размерности относительных величин, что объясняет наличие в формуле дробей  $\frac{M}{M_{\max}}$  и  $\frac{n}{n_H}$ .

Для упрощения вида модели введем коэффициент использования мощности двигателя  $u$ , или коэффициент нагрузки:

$$u = \frac{M}{M_{\max}}. \quad (2.9)$$

Так как количество моточасов — это количество часов работы на номинальной частоте, то есть отношение фактического количества оборотов, сделанных коленчатым валом двигателя к количеству оборотов на номинальном режиме, то можно записать

$$T_{\text{H}} = t \frac{n}{n_{\text{H}}}, \quad (2.10)$$

где  $t$  — время, ч.

В дальнейшем для удобства время  $t$  будем измерять в секундах. При необходимости перевести это время в часы не представляет труда. То есть далее в аналитических зависимостях при подстановке единиц в системе СИ  $T_{\text{H}}$  должно подставляться не в моточасах, а в мотосекундах.

С учетом ввода новых переменных выражение (2.8) преобразуется к виду

$$CH = a_1 + a_2 e^{\frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}}. \quad (2.11)$$

Некоторые параметры модели зависят от времени. Поэтому для правильности дифференцирования сложных функций следует учитывать, что такие переменные, как  $u = f(t)$ ,  $n = f(t)$ , зависят от времени. Однако предварительный анализ показал, что в таком случае изменение частоты вращения и нагрузки может как понижать, так и повышать  $CH$ . Но это невозможно. Щелочное число при отсутствии долилки свежего моторного масла может только понижаться. Вероятно, причина в следующем.

Хотя в реальной эксплуатации частота вращения коленчатого вала  $n$  и доля нагрузки  $u$  изменяются во времени, характерное время заметного изменения этих величин существенно меньше времени, за которое происходит заметное снижение щелочного числа. То есть происходит переход из одного состояния деградации в другое, и изменяется только скорость деградации масла, но не ее производная. Фактически можно рассматривать процесс как квазистационарный и при дифференцировании не учитывать, что  $n$  и  $u$  меняются во времени, считая их неизменными. Такой прием соответствует принципу «замороженных» коэффициентов, который широко используется в инженерных расчетах [165].

Продифференцируем выражение (2.11) по времени:

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{a_2 n e^{\frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)}{n_H}}}{n_H} \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right). \quad (2.12)$$

Следует заметить, что в случае дифференцирования уравнения (2.11) в условиях, что частота вращения коленчатого вала  $n$  и доля нагрузки  $u$  меняются во времени, то есть дифференцирование сложной функцией с более высокой степенью вложенности, получается выражение

$$\begin{aligned} \frac{dCH}{dt} = a_2 e^{\frac{tn \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} & \left( \frac{n \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)}{n_H} + \right. \\ & \left. + \frac{t \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right) \frac{dn}{dt}}{n_H} + \frac{t n \left( a_5 \frac{du}{dt} + \frac{a_4 \frac{dn}{dt}}{n_H} \right)}{n_H} \right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

В таком случае наличие производных  $\frac{dn}{dt}$  и  $\frac{du}{dt}$  приводит к возможности на отдельных участках получения положительного значения  $\frac{dCH}{dt}$ . Исходя из физического смысла процесса деградации масла, можно утверждать, что при отсутствии долилки щелочное число моторного масла может со временем

работы только уменьшаться в связи с расходом присадок, выполняющих различные, в том числе моющие, функции. Таким образом, производная  $\frac{dCH}{dt} \leq 0$ .

Следовательно, выражение (2.13) ошибочно и предположение о квазистационарности выполнено правильно и логично.

Учитывая требование  $\frac{dCH}{dt} \leq 0$ , можно сделать вывод, что единственный множитель в выражении производной (2.12), который может иметь отрицательный знак — это выражение внутри скобок:

$$a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H}. \quad (2.14)$$

Очевидно, сумма слагаемых должна быть отрицательна.

Так как на номинальном режиме имеем  $a_3 + a_4 + a_5$  и при этом, как показывают экспериментальные исследования и логика износа свойств моторного масла, скорость снижения  $CH$  максимальна, то и выражение в скобках будет иметь отрицательное значение с максимальным модулем.

Следует обратить внимание на то, что при идентификации модели по этим параметрам в некоторых условиях возможно найти достаточно большое количество сочетаний с разной точностью, удовлетворяющих экспериментальным данным, и коэффициенты  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  могут иметь различные по знаку значения, особенно если использовать средние значения  $u$  и  $n$  или работать на номинальном режиме.

Необходимо отметить, что на регуляторной ветви анализируемая сумма примет вид

$$a_3 + a_5 u + a_4 \rightarrow \min. \quad (2.15)$$

В этом случае понятно, что чем выше нагрузка на двигатель, т.е.  $u \rightarrow 1$ , тем меньше значение суммы. Анализ результатов экспериментов показывает, что увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя и увеличение нагрузки увеличивают скорость деградации моторного масла. Следовательно-

но,  $a_5$  имеет отрицательное значение. Аналогичные рассуждения приводят к выводу, что и  $a_4$  также имеет отрицательное значение. То есть значения  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  всегда отрицательны, но это ограничение не исключает множества локальных минимумов.

Полученные выводы были проверены на основе численных экспериментов по идентификации модели и получили подтверждение.

Анализ зависимости показывает, что в начальный момент времени при  $T_H = 0$  значение  $CH$  определяется величинами  $a_1$  и  $a_2$ . Причем  $a_1$  определяет скорость в момент достижения  $CH = 0$ , то есть полного израсходования щелочных компонентов или достижения определенного граничного значения.

Так, для  $CH = 1$  после преобразований можно получить уравнение:

$$-\frac{a_1 - 1}{a_2} = e^{\frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)}{n_H}}. \quad (2.16)$$

Логарифмирование правой и левой части с некоторыми математическими преобразованиями дает результат в виде

$$\frac{n_H \log \left( -\frac{a_1 - 1}{a_2} \right)}{nt} = a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H}. \quad (2.17)$$

При работе двигателя на номинальном режиме в течение всего срока эксплуатации моторного масла будет правомерно условие

$$\frac{\log \left( -\frac{a_1 - 1}{a_2} \right)}{t} = a_3 + a_4 + a_5. \quad (2.18)$$

Это уравнение позволяет оценить порядок значений величин.

Для товарного моторного масла согласно ГОСТ 8581-2021  $CH_0 \leq 8,5$ . Для исследуемых масел начальное значение  $CH$  часто было в диапазоне 7...9. Так как  $a_2$  имеет значение, определяющее начальное значение щелочного числа, его величина может ограничиваться пределами [7, 15]. Так как  $a_1$  —

это смещение относительно 0 в конце эксплуатации, то  $a_1$   $[-3, 0]$ . В таком случае величина логарифма в (2.18) меняется в диапазоне примерно  $[-2,4, -0,69]$ .

Так как в уравнение (2.18) входит время, порядок значений  $a_3, a_4, a_5$  определяется временем работы за весь срок эксплуатации моторного масла. Для деградации в течение 250 моточасов — это 900 000 с, а в течение 500 моточасов — 1 800 000 с.

Сумма коэффициентов при этом для 250 моточасов составляет  $-2,666 \cdot 10^{-6}$ , а для 500 моточасов —  $-1,333 \cdot 10^{-6}$ .

Данное значение или близкое к нему может быть использовано как ограничение при поиске коэффициентов методами оптимизации. Для получения некоторого расчетного запаса минимальное значение принималось равным  $-10^{-5}$ . Дальнейшие расчетные исследования подтвердили этот результат и позволили локализовать решение, которое для всех коэффициентов находится в пределах от  $-5 \cdot 10^{-6}$  до  $-1 \cdot 10^{-8}$ .

Также необходимо помнить, что ни одно из значений  $a_3, a_4, a_5$  не должно быть равно нулю. Кроме того, значения коэффициентов не должны иметь слишком большую разницу. В противном случае влияние отдельных факторов будет незаметно, что не соответствует действительности.

В реальности объем масла в двигателе может быть непостоянен. В модели (2.12) изменение объема не учитывается. Это означает, что при каждом изменении объема все коэффициенты уравнения должны изменяться. Таким образом, необходимо преобразовать модель, сделав переменные, отвечающие за объем масла, явными и независимыми от постоянных коэффициентов.

Выразим щелочное число через массу щелочных компонентов. Обратимся к определению щелочного числа согласно ГОСТ 11362-96. Общее щелочное число — количество щелочи, выраженное в миллиграммах гидроксида калия (KOH) на 1 г образца, необходимое для потенциометрического титрования испытуемой массы в определенном растворителе от начального

показания измерительного прибора до показания свежеприготовленного кислого неводного буферного раствора или четкой точки перегиба, как указано в стандарте [76]. Таким образом, щелочное число можно выразить как

$$CH = \frac{m_{\text{KOH}}}{m_{\text{обр}}}, \quad (2.19)$$

где  $m_{\text{KOH}}$  — масса щелочи (условного KOH) в образце масла, мг;

$m_{\text{обр}}$  — масса исследуемого образца моторного масла, г.

Можно выразить массу щелочных компонентов (эквивалентных действию KOH):

$$m_{\text{KOH}} = CH m_{\text{обр}}. \quad (2.20)$$

Подставив в (2.20) зависимость (2.11), получим:

$$m_{\text{KOH}} = m_{\text{обр}} \left( a_1 + a_2 e \frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}} \right). \quad (2.21)$$

Массу образца можно выразить через его объем и плотность:

$$m_{\text{обр}} = V_{\text{обр}} \rho, \quad (2.22)$$

где  $V_{\text{обр}}$  — объем исследуемого образца моторного масла, см<sup>3</sup>;

$\rho$  — плотность масла, г/см<sup>3</sup>.

Тогда масса щелочных компонентов, выраженная через объем, принимает вид

$$m_{\text{KOH}} = \rho V_{\text{обр}} \left( a_1 + a_2 e \frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}} \right). \quad (2.23)$$

Учитывая, что переменные  $m_{\text{КОН}} = f(t)$ ,  $V_{\text{обр}} = f(t)$  изменяются со временем, можем получить скорость изменения щелочных компонентов, про- дифференцировав полученное выражение (2.23) по времени. Получим

$$\begin{aligned} \frac{dm_{\text{КОН}}}{dt} = \rho \left( a_1 + a_2 e \frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}} \right) \frac{dV_{\text{обр}}}{dt} + \\ + \frac{a_2 n \rho e \frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}} V_{\text{обр}} \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

В полученном уравнении слагаемое  $\frac{dV_{\text{обр}}}{dt}$  описывает изменения объема масла (в случае, если происходит утечка моторного масла, угар или доливка). Если же двигатель трактора находится в исправном состоянии, то обычно  $\frac{dV_{\text{обр}}}{dt} = 0$ . При утечке  $\frac{dV_{\text{обр}}}{dt} < 0$ . При доливке  $\frac{dV_{\text{обр}}}{dt} > 0$ .

Также следует отметить, что доливка свежего масла приводит к скачкообразному изменению щелочного числа. Или можно рассматривать высокую скорость  $\frac{dV_{\text{обр}}}{dt}$ . При угаре масла процесс идет намного медленнее. Скорость не должна оказывать существенного влияния на конечный результат, так как при отсутствии масляного голодания часть масла будет постоянно выполнять свои функции. Это ведет к естественному процессу деградации масла. По крайней мере, на первый взгляд, отсутствуют причины утраты дополнительного количества компонентов, определяющих  $CH$ . Другие частные производные зависят исключительно от условий эксплуатации.

Перейдем к дифференциальной форме для щелочного числа  $\frac{dCH}{dt}$ . Поскольку  $CH = \frac{m_{\text{КОН}}}{V_{\text{обр}} \rho}$ , то

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{d \left( \frac{m_{\text{КОН}}}{V_{\text{обр}} \rho} \right)}{dt}. \quad (2.25)$$

Дифференцируя как частное, получаем

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{dm_{\text{КОН}}}{\rho V_{\text{обр}} dt} - \frac{m_{\text{КОН}}}{\rho V_{\text{обр}}^2} \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}. \quad (2.26)$$

Заменяем известную  $\frac{dm_{\text{КОН}}}{dt}$  и получим формулу (2.26) в виде

$$\begin{aligned} \frac{dCH}{dt} = & \frac{\rho \left( a_1 + a_2 e \frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)}{n_H} \right) \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}}{\rho V_{\text{обр}}} + \\ & \frac{a_2 n \rho e \frac{nt \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)}{n_H}}{V_{\text{обр}} \left( a_3 + a_5 u + \frac{a_4 n}{n_H} \right)} + \\ & + \frac{n_H}{\rho V_{\text{обр}}} - \\ & - \frac{m_{\text{КОН}}}{\rho V_{\text{обр}}^2} \frac{dV_{\text{обр}}}{dt} \end{aligned} \quad (2.27)$$

при условии, что  $m_{\text{КОН}} = f(t)$ .

Полученные зависимости имеют ограничения, одним из которых является незначительные утечки и угар масла, поскольку коэффициенты эмпирические и учитывают характеристики и состояние двигателя, включая объем системы смазки. Следовательно, уравнение может адекватно описывать работу двигателя только в хорошем техническом состоянии.

При прогнозировании расчет щелочного числа может быть выполнен с учетом изменения во времени интегрированием:

$$CH = \int \frac{\left( a_1 \rho V_{\text{обр}} - m_{\text{КОН}} + a_2 \rho e \frac{a_4 n^2 t}{n_H^2} e^{\frac{a_5 n t u}{n_H}} e^{\frac{a_3 n t}{n_H}} V_{\text{обр}} \right) \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}}{\rho V_{\text{обр}}^2} dt +$$

$$+ \frac{V_{\text{обр}} \left( a_1 + a_2 e^{\frac{nt (a_4 n + a_3 n_{\text{H}} + a_5 n_{\text{H}} u)}{n_{\text{H}}^2}} \right)}{V_{\text{обр}}}. \quad (2.28)$$

После преобразования зависимость можно записать в виде

$$\begin{aligned} CH = & \int -\frac{dm_{\text{KOH}}}{\rho V_{\text{обр}}} dt + \int \frac{a_1 dV_{\text{обр}}}{V_{\text{обр}}} dt + \\ & + \int \frac{a_2 e^{\frac{a_4 n^2 t}{n_{\text{H}}^2}} e^{\frac{a_5 n t u}{n_{\text{H}}}} e^{\frac{a_3 n t}{n_{\text{H}}}} V_{\text{обр}} \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}}{V_{\text{обр}}^2} dt + \\ & + \frac{m_{\text{KOH}}}{\rho V_{\text{обр}}} + a_2 e^{\frac{a_4 n^2 t}{n_{\text{H}}^2}} e^{\frac{a_5 n t u}{n_{\text{H}}}} e^{\frac{a_3 n t}{n_{\text{H}}}}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Для начального момента времени  $t = 0$  щелочное число равно

$$\begin{aligned} CH_0 = & \int \frac{a_1 dV_{\text{обр}}}{V_{\text{обр}}} dt \Big|_{t=0} + \int \left( -\frac{dm_{\text{KOH}}}{\rho V_{\text{обр}}} \right) dt \Big|_{t=0} + \\ & + \int \frac{a_2 e^{\frac{a_4 n^2 t}{n_{\text{H}}^2}} e^{\frac{a_5 n t u}{n_{\text{H}}}} e^{\frac{a_3 n t}{n_{\text{H}}}} V_{\text{обр}} \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}}{V_{\text{обр}}^2} dt \Big|_{t=0} + \frac{m_{\text{KOH}0}}{\rho V_{\text{обр}0}} + a_2, \end{aligned}$$

где  $CH_0$  — щелочное число в начальный момент времени, мг КОН/г;

$V_{\text{обр}0}$  — объем масла в картере двигателя в начальный момент времени, см<sup>3</sup>.

$m_{\text{KOH}0}$  — масса щелочных компонентов масла в начальный момент времени, мг.

Однако полученные зависимости плохо описывают процесс при изменении объема масла. При доливке будут меняться коэффициенты  $a_i$ .

Анализ уравнений (2.23), (2.20) и (2.11) позволяет утверждать, что изменение массы щелочных компонентов  $m_{\text{KOH}}$  происходит по модели, аналогичной деградации  $CH$ . То есть для случая, при котором на всем про-

тяжении эксплуатации масла его объем в картере двигателя не изменялся, деградация происходит в основном из-за изменения массы щелочных компонентов. Тогда логично записать следующее выражение:

$$m_{\text{КОН}} = b_1 + b_2 e^{T_{\text{H}}} \left( b_3 + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} + \frac{M b_5}{M_{\text{max}}} \right), \quad (2.30)$$

где  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  — коэффициенты уравнения.

Между коэффициентами  $a_i$  и  $b_i$  существует связь, которая вытекает из уравнений (2.11), (2.30), (2.20) и (2.22):

$$b_1 = a_1 V_{\text{обр}} \rho, \quad b_2 = a_2 V_{\text{обр}} \rho, \quad b_3 = a_3, \quad b_4 = a_4, \quad b_5 = a_5. \quad (2.31)$$

Перейдя к  $u = \frac{M}{M_{\text{max}}}$  и  $T_{\text{H}} = \frac{n}{n_{\text{H}}}$ , получим зависимость

$$m_{\text{КОН}} = b_1 + b_2 e^{\frac{t n \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}}. \quad (2.32)$$

В соответствии с (2.19) получаем

$$CH = \frac{b_1 + b_2 e^{\frac{t n \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}}}{V_{\text{обр}} \rho}. \quad (2.33)$$

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

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{b_2 n e^{\frac{t n \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}}}{V_{\text{обр}} n_{\text{H}} \rho} \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right). \quad (2.34)$$

Перейдем к определению изменения щелочного числа при смешивании масел.

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

$$CH_{\text{смеси}} = \frac{m_{\text{КОН1}} + m_{\text{КОН2}}}{m_{\text{обр1}} + m_{\text{обр2}}} = \frac{CH_1 m_{\text{обр1}} + CH_2 m_{\text{обр2}}}{m_{\text{обр1}} + m_{\text{обр2}}}, \quad (2.35)$$

где  $m_{\text{КОН1}}$  и  $m_{\text{КОН2}}$  — массы щелочи (условного КОН) в первом и втором образцах масла, мг;

$CH_1$  и  $CH_2$  — щелочные числа моторного масла в первом и втором образцах, мгКОН/г;

$m_{\text{обр1}}$  и  $m_{\text{обр2}}$  — массы первого и второго образцов, г.

Выразив массы образцов через объем и плотность (2.22) и подставив в (2.35), получим

$$CH_{\text{смеси}} = \frac{CH_1 V_{\text{обр1}} \rho + CH_2 V_{\text{обр2}} \rho}{V_{\text{обр1}} \rho + V_{\text{обр2}} \rho} = \frac{CH_1 V_{\text{обр1}} + CH_2 V_{\text{обр2}}}{V_{\text{обр1}} + V_{\text{обр2}}}. \quad (2.36)$$

где  $V_{\text{обр1}}$  — объем первого образца масла, см<sup>3</sup>;

$V_{\text{обр2}}$  — объем второго образца масла, см<sup>3</sup>.

При доливке в малых дозах или за элементарно малые промежутки времени свежим маслом с начальной концентрацией  $CH_0$  щелочное число будет определяться по зависимости, полученной из формул (2.33) и (2.36) и будет иметь вид

$$CH = \frac{CH_0 dV_{\text{обр}} + \frac{V_{\text{обр}} \left( b_1 + b_2 e^{\frac{tn \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} \right)}{V_{\text{обр0}} \rho}}{dV_{\text{обр}} + V_{\text{обр}}}, \quad (2.37)$$

где  $dV_{\text{обр}}$  — изменение объема при доливке, см<sup>3</sup>.

Для рассмотрения процесса доливки в динамике продифференцируем это выражение по времени:

$$\frac{dCH}{dt} = \left( \frac{\left( b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} \right) \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}}{V_{\text{обр}0} \rho} + \frac{b_2 n e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} V_{\text{обр}} \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{V_{\text{обр}0} n_H \rho} \right) - \frac{\left( CH_0 dV_{\text{обр}} + \frac{V_{\text{обр}} \left( b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} \right)}{V_{\text{обр}0} \rho} \right) \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}}{(dV_{\text{обр}} + V_{\text{обр}})^2}. \quad (2.38)$$

Учитывая, что  $dV_{\text{обр}}$  является полным дифференциалом, то

$$dV_{\text{обр}} = \frac{dV_{\text{обр}}}{dt} dt. \quad (2.39)$$

Подставляем выражение в формулу и получаем следующую зависимость:

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{\left( \frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{b_1 + b_2 e} \right) \frac{dV_{\text{обп}}}{dt}}{\frac{V_{\text{обп}0} \rho}{\frac{dV_{\text{обп}}}{dt} dt + V_{\text{обп}}}} + \frac{\left( \frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{b_2 n e} \right) \frac{V_{\text{обп}} \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{\frac{V_{\text{обп}0} n_H \rho}{\frac{dV_{\text{обп}}}{dt} dt + V_{\text{обп}}}}}{\left( CH_0 \frac{dV_{\text{обп}}}{dt} dt + \frac{V_{\text{обп}} \left( \frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{b_1 + b_2 e} \right)}{V_{\text{обп}0} \rho} \right) \frac{dV_{\text{обп}}}{dt}}}{\left( \frac{dV_{\text{обп}}}{dt} dt + V_{\text{обп}} \right)^2}. \quad (2.40)$$

Перейдем к определению щелочного числа при утечке масла. В общем виде, когда меняется масса масла ( $V_{\text{обп}} = f(t)$ ), щелочное число при этом мож-

НО ВЫЧИСЛИТЬ:

$$CH = \frac{b_1 + b_2 e}{V_{\text{обр}} \rho} \frac{t n \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}, \quad (2.41)$$

Уравнение в дифференциальной форме:

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{b_2 n e}{n_H \rho V_{\text{обр}}} \frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H} \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right) - \frac{\left( b_1 + b_2 e \frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H} \right) \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}}{\rho V_{\text{обр}}^2}. \quad (2.42)$$

В случае утечки масла масса щелочных компонентов и масса базового масла уменьшаются пропорционально, поэтому щелочное число не должно изменяться. Процесс идет с одинаковой скоростью. Это позволяет сформулировать условие утечки:

$$\frac{dCH}{dV_{\text{обр}}} = 0. \quad (2.43)$$

Таким образом, условие постоянства щелочного числа при утечке примет вид

$$\frac{dCH}{dV_{\text{обр}}} = - \frac{b_1 + b_2 e}{\rho V_{\text{обр}}^2} \frac{t n \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H} = 0. \quad (2.44)$$

Это условие можно переписать, используя производные по времени:

$$\frac{dCH}{dV_{\text{обр}}} \frac{dt}{dt} = \frac{dCH}{dt} \frac{dt}{dV_{\text{обр}}} = \frac{\frac{dCH}{dt}}{\frac{dV_{\text{обр}}}{dt}} = 0. \quad (2.45)$$

Подставив в числитель (2.45) производную  $CH$  из выражения (2.42) получим

$$\begin{aligned} \frac{\frac{dCH}{dt}}{\frac{dV_{\text{обп}}}{dt}} = & - \frac{\left( b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} \right) \frac{dV_{\text{обп}}}{dt}}{\rho V_{\text{обп}}^2} + \\ & + \frac{b_2 n e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H \rho V_{\text{обп}} \frac{dV_{\text{обп}}}{dt}} = 0. \end{aligned} \quad (2.46)$$

После преобразований и упрощения получим

$$\begin{aligned} n_H \frac{dV_{\text{обп}}}{dt} \left( b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} \right) = \\ = b_2 n e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right)}{n_H}} V_{\text{обп}} \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_H} \right). \end{aligned} \quad (2.47)$$

Полученное уравнение характеризует взаимосвязь коэффициентов  $b_i$  и объема моторного масла в двигателе. Вероятно, при наличии утечек процесс деградации будет идти более интенсивно. Это может оказывать влияние на значения коэффициентов при подборе.

Для проверки модели рассмотрим случай, когда двигатель все время работает на номинальном режиме с максимальной мощностью. В этом режиме частота вращения  $n$  равна номинальной  $n_H$ , а коэффициент нагрузки  $u = 1$ . Подставим значения в уравнение (2.47) и упростим выражение. Получаем

$$\left( b_1 + b_2 e^t (b_3 + b_4 + b_5) \right) \frac{dV_{\text{обп}}}{dt} =$$

$$= b_2 e^t (b_3 + b_4 + b_5) V_{\text{обр}} (b_3 + b_4 + b_5). \quad (2.48)$$

В начальный момент времени  $t = 0$  уравнение принимает вид

$$(b_1 + b_2) \left. \frac{dV_{\text{обр}}}{dt} \right|_{t=0} = b_2 V_{\text{обр}}(0) (b_3 + b_4 + b_5). \quad (2.49)$$

Полученные уравнения показывают, что коэффициенты зависят не только от объема масла в двигателе, но и от скорости утечки. А учитывая, что изменение объема при утечке отрицательное, то и сумма коэффициентов  $b_3 + b_4 + b_5$  должна быть меньше нуля, в то время как  $b_1 + b_2 > 0$ .

Такое же уравнение можно получить и для произвольного момента времени. Его можно использовать для проверки правильности подобранных коэффициентов, а также оно может характеризовать наличие и величину утечек.

В реальных условиях эксплуатации скорость утечки или угара на определенных промежутках времени относительно постоянна. Обозначим эту скорость как

$$v_{\text{ут}} = \frac{dV_{\text{обр}}}{dt}, \quad (2.50)$$

где  $v_{\text{ут}}$  — скорость утечки или угара моторного масла,  $\text{см}^3/\text{с}$ .

Для определения при моделировании объема масла в двигателе из (2.47) выразим объем масла

$$V_{\text{обр}} = \frac{n_{\text{H}} e^{-\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}} \frac{dV_{\text{обр}}}{dt} \left( b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}} \right)}{b_2 n \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}. \quad (2.51)$$

Полученное уравнение можно использовать при постоянной скорости утечки (угара). На практике скорость утечки  $v_{\text{ут}}$  часто неизвестна. Но ее можно определить, зная объем  $\Delta V$  долитого масла и время работы в моточасах, в

течении которого происходил угар. В этом случае скорость утечки

$$v_{\text{уг}} = \frac{dV_{\text{обр}}}{dt} = \frac{\Delta V}{t} \frac{n}{n_{\text{H}}}. \quad (2.52)$$

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

$$V_{\text{обр}} = \frac{\Delta V e^{-\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}} \left( b_1 + b_2 e^{\frac{nt \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}{n_{\text{H}}}} \right)}{b_2 t \left( b_3 + b_5 u + \frac{b_4 n}{n_{\text{H}}} \right)}. \quad (2.53)$$

Полученная формула позволяет при моделировании определять, сколько масла осталось в двигателе, если известно, сколько его долили, за какое время эксплуатации оно было израсходовано с учетом режимов работы двигателя и при известных параметрах модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла.

Таким образом, получили три зависимости, описывающие динамику щелочного числа в разных условиях: при постоянном объеме, при доливке и при угаре моторного масла.

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 [166]).

### 2.3 Алгоритм определения параметров модели цифрового двойника

Алгоритм определения параметров модели включает три основных этапа.

1. Фиксация режимов работы двигателя в эксплуатации.

2. Лабораторный анализ проб масла в контрольных точках или при замене масла.

3. Параметрическая идентификация модели методами оптимизации.

### 2.3.1 Имитационное моделирование процесса деградации масла

Для поисков коэффициентов модели использовалась параметрическая идентификация с помощью подбора параметров в среде Matlab Simulink. Уравнения, выведенные ранее, были реализованы в виде имитационной модели (рисунок 2.4), на вход которой подавались изменяющиеся во времени либо постоянные (для номинального режима) сигналы нагрузки на двигатель и частоты вращения коленчатого вала.

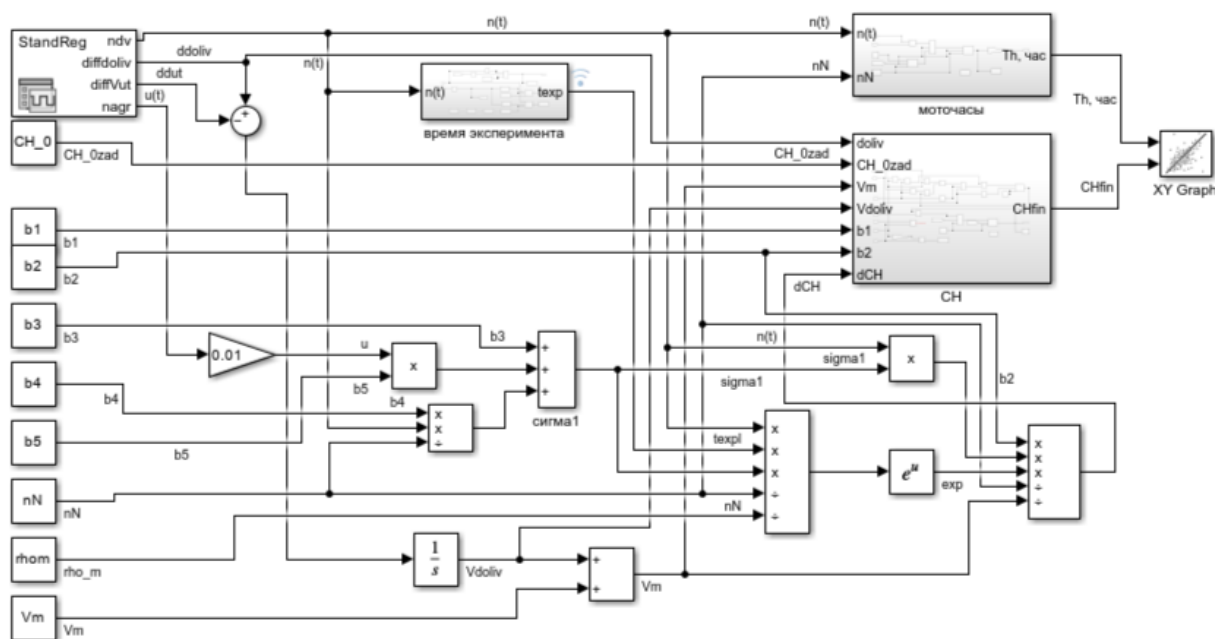


Рисунок 2.4 — Цифровой двойник процесса деградации моторного масла в виде имитационной модели

Перед началом работы в рабочее пространство вводятся исходные данные: объем масла в картере двигателя на начало испытаний, начальное щелочное число и плотность моторного масла, номинальная частота вращения коленчатого вала, а также предполагаемые значения коэффициентов уравнения.

Важно подчеркнуть, что для идентификации параметров модели необходимы экспериментальные значения щелочного числа, получаемые лабораторным анализом проб масла. Однако после определения коэффициентов модели для конкретного двигателя и марки масла прогнозирование остаточного ресурса осуществляется в реальном времени на основе данных о режимах работы. Лабораторный контроль в дальнейшем может использоваться для уточнения коэффициентов (например, при каждой плановой замене масла), что существенно сокращает трудоемкость диагностики по сравнению с существующей практикой.

Изменяющиеся во времени переменные  $n$  и  $u$  задавались в процессе моделирования. Значения вводились в виде числового массива, на основе которого строился соответствующий график (рисунок 2.5). Массив формировался по результатам мониторинга работы трактора, находящегося в реальных условиях эксплуатации, а также данных, полученных системой автоматизированного сбора данных при проведении стендовых испытаний, после предварительной обработки. Для условий, редко реализуемых на практике, а также опасных с точки зрения безопасности управления или надежности двигателя, массив данных может быть получен с помощью имитационного моделирования работы трактора [167].

При практическом применении разработанного цифрового двойника данные о частоте вращения коленчатого вала и нагрузке будут поступать в реальном времени — с бортовой системы трактора или удаленно. Это позволит выполнять пересчет текущего щелочного числа и обновлять прогноз остаточного ресурса моторного масла.

Модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла позволяет учитывать особенности эксплуатации двигателя. Например, модель отслеживает изменение объема масла в картере при утечках и последующих доливах. Также реализована возможность учитывать остановки работы двигателя, которые могут возникать как в процессе реальной эксплу-

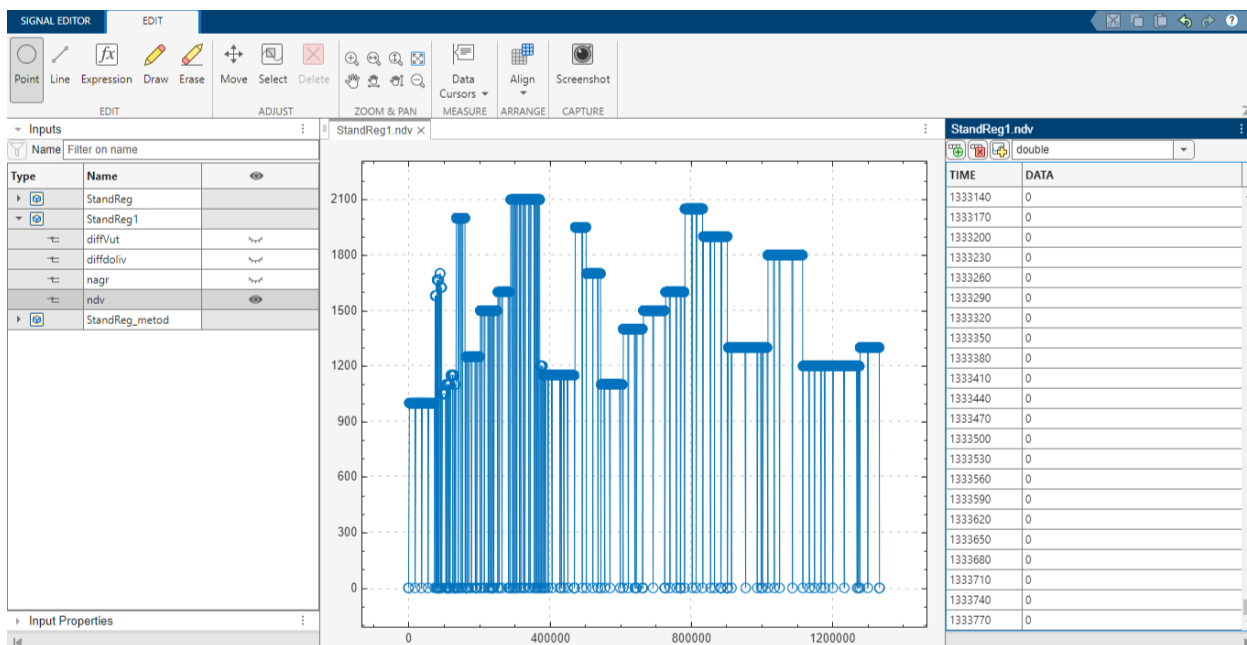


Рисунок 2.5 — Установка сигналов параметров режимов работы трактора в блоке Signal Editor

атации трактора (при сборе данных по режимам работы), так и в интервалах между экспериментами при стендовых испытаниях. В таких случаях процесс изменения щелочного числа приостанавливается без остановки общего процесса моделирования (рисунок 2.6). Данный механизм реализован в подсистеме, представленной на рисунке 2.7. В модели предусмотрен подсчет моточасов на основе отношения фактической частоты вращения коленчатого вала к номинальной.

Модель цифрового двойника позволяет также прогнозировать ресурс моторного масла и определять момент его замены. Суть заключается в непрерывном анализе текущих режимов работы трактора. Так, оператор в любой момент времени может увидеть прогноз: минимальное время до замены — при работе на номинальном режиме, максимальное — при эксплуатации на минимальных частотах вращения коленчатого вала, а также прогноз, рассчитанный исходя из средней интенсивности эксплуатации.

Подобный подход позволяет ориентироваться не на регламентные сроки замены, а на фактическое состояние масла.

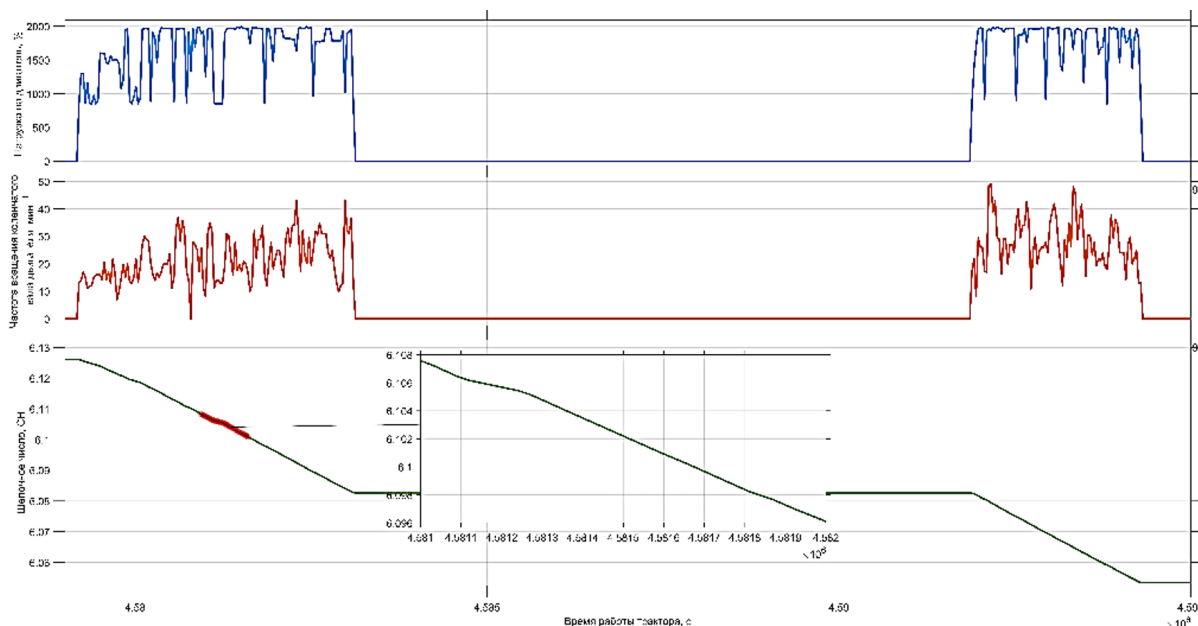


Рисунок 2.6 — Моделирование изменения щелочного числа с остановкой двигателя

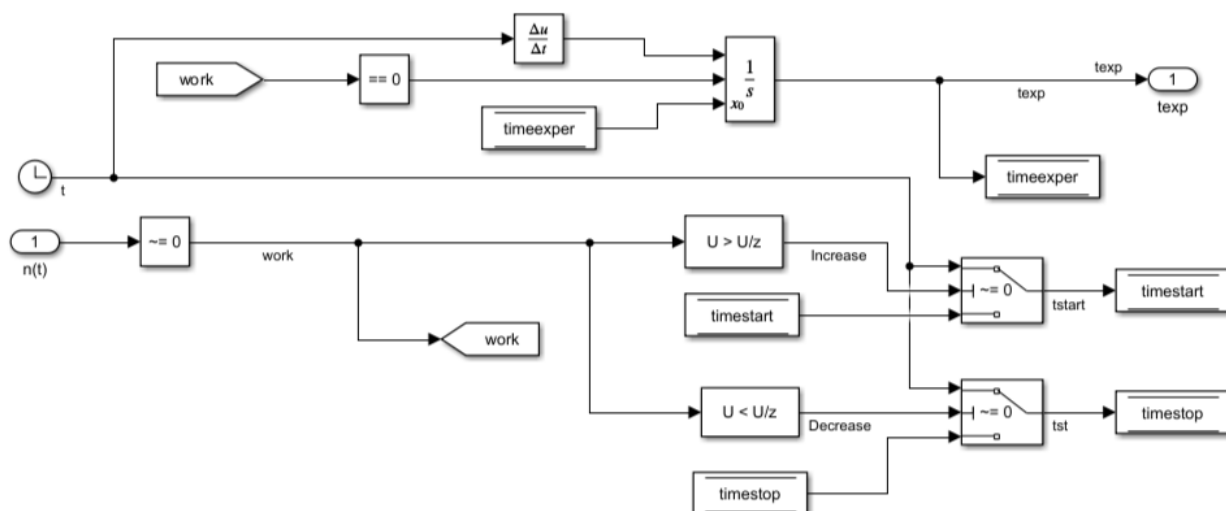


Рисунок 2.7 — Подсистема подсчета времени работы модели

Корректность получаемых прогнозов напрямую зависит от точности идентификации параметров модели. Для устойчивого подбора коэффициентов необходимо максимально локализовать диапазон возможных значений параметров.

### 2.3.2 Идентификация модели на основе подбора параметров

Для непосредственного подбора параметров модели использовался инструмент «Parameter Estimator». В качестве искомым величин задавались коэффициенты  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$ . Для обеспечения правильного и устойчивого подбора устанавливались начальные значения, порядок и границы поиска коэффициентов. Выходной переменной модели, относительно которой проводилась оценка, выступало щелочное число моторного масла. Данными для идентификации служили экспериментальные значения этого параметра, полученные при натурных испытаниях [168].

При запуске процедуры подбора параметров выполнялось численное решение дифференциального уравнения, описывающего динамику изменения щелочного числа. Полученные данные также сохранялись в рабочем пространстве модели в виде переменных для возможности последующего использования.

Значения параметров модели были получены методами идентификации, которые основаны на оптимизации. В процессе подбора были опробованы разные алгоритмы и методы оптимизации, включая градиентные, метод нелинейных квадратов и методы прямого поиска. Также задавались критерии остановки — допустимые погрешности изменения функции и варьируемых параметров, а также максимальное число итераций. При достижении установленных значений процесс идентификации автоматически завершался.

Использовалась функция оптимизации, которая минимизирует расхождение между экспериментом и результатами моделирования:

$$f_{\text{опт}} = \sum (CH_{\text{экспер}} - CH_{\text{мод}})^2 \rightarrow \min, \quad (2.54)$$

где  $CH_{\text{экспер}}$  — щелочное число моторного масла, полученное при проведении эксперимента, мг КОН/г;

$SN_{\text{мод}}$  — щелочное число моторного масла, полученное в ходе моделирования, мг КОН/г.

При известных значениях  $u$  и  $n$  функция имеет пять переменных, и при неверных начальных условиях можно получить неверный локальный минимум, а полученные значения не позволят провести валидацию.

Для устойчивого решения важно максимально локализовать диапазон значений коэффициентов, что было выполнено в подразделе 2.2. Кроме того, используя принципы планирования эксперимента, можно ожидать, что однозначное решение будет при наличии хотя бы одной дополнительной степени свободы. В нашем случае для поиска пяти коэффициентов необходимы данные о  $SN_{\text{экспер}}$  в шести точках.

Взаимосвязь коэффициентов  $a_1, a_2$  или  $b_1, b_2$  с начальным щелочным числом упрощает задачу по определению  $a_1$  или  $b_1$ .

Проверка алгоритма осуществлялась для номинального режима. Верхняя граница значений  $a_3, a_4, a_5$  или  $b_3, b_4, b_5$  ограничивалась  $-1 \cdot 10^{-8}$ . Значение  $-1 \cdot 10^{-7}$  использовалось в качестве начального при оптимизации. Процесс оптимизации разными методами завершался следующими результатами. Градиентные методы приводили к значениям  $a_4 = a_5$ , стремящимся к 0 или к максимальной границе. При этом остановка оптимизации происходила по всем параметрам: достижение предельной погрешности изменения функции, предельной погрешности изменения параметров и предельной погрешности ограничения. То есть алгоритмы на градиентных методах пытались, как правило, увести в положительную сторону значения этих коэффициентов.

Метод нелинейных квадратов находил минимум в зоне со значениями коэффициентов, близкими к порядку  $10^{-7}$ . При этом остановка происходила из-за достижения заданной погрешности изменения функции. Кроме того, функция оптимизации при методе нелинейных квадратов получала значение

на порядок меньше, чем при градиентных методах, что позволяет считать этот локальный минимум искомым.

Методы сканирования требовали значительно большего числа итераций и запусков модели, как и метод на основе суррогатного моделирования, и, соответственно, это иногда приводило к преждевременной остановке оптимизации без должного результата.

Таким образом, метод нелинейных квадратов при проведении численных оптимизационных экспериментов выдавал значения, наилучшим образом удовлетворяющие установленным условиям. Так были получены значения  $a_1 = -3,3480$ ;  $a_2 = 14,348$ ;  $a_3 = -9,274 \cdot 10^{-7}$ ;  $a_4 = -5,7557 \cdot 10^{-7}$ ;  $a_5 = -5,175 \cdot 10^{-7}$ .

Следует отметить, что применение алгоритма простого поиска позволяет довести результаты работы других алгоритмов до локального минимума. Но, так как для простого поиска не применяются ограничения, возможен выход за зону поиска. Для получения наиболее точного решения при оптимизации желательно использовать не один эксперимент, а несколько. Это обусловлено следующими моментами.

Во-первых, теория инженерного эксперимента и статистические методы показывают, что для определения  $n$  коэффициентов необходимо иметь  $n$  степеней свободы. А при наличии  $n + 1$  степеней свободы появляется возможность оценить адекватность математической модели. В нашем случае выполняется оценка (определение) четырех независимых коэффициентов при наличии начального значения  $СН$ . Для их однозначности необходимо иметь не менее четырех точек. При отладке методологии поиска на основе параметрической идентификации модели использовались результаты эксперимента с известными значениями  $СН$  нового моторного масла, при его замене и в средней части эксплуатации — это только три точки.

Дополнение процесса оптимизации еще одним экспериментом с промежуточным и конечным значением  $СН$  дало возможность однозначно

определить значения коэффициентов уравнения, так как в этом случае количество экспериментальных данных превышает количество коэффициентов. На практике это позволяет уточнять в процессе эксплуатации параметры цифрового двойника при каждой замене моторного масла.

Во-вторых, трактор при выполнении полевых работ может достаточно быстро выработать количество моточасов, необходимых для замены моторного масла. При этом есть вероятность, что в эксплуатации он будет использовать преимущественно одни и те же режимы работы. Использование более широкого временного промежутка позволит учесть в модели весь спектр режимов работы и более точно оценить влияние таких факторов, как частота вращения коленчатого вала и нагрузка.

Условием практической применимости цифрового двойника является его адаптируемость к различным типам двигателей и маркам моторных масел. Разработанная модель отражает общую закономерность изменения щелочного числа, а предложенный алгоритм идентификации позволяет адаптировать модель для любых тракторных двигателей и масел, уточняя ее коэффициенты при наличии соответствующих эксплуатационных данных за определенный промежуток времени.

## 2.4 Выводы

1. Изменение щелочного числа моторного масла в процессе эксплуатации сельскохозяйственных тракторов происходит по экспоненциальной зависимости.

2. Получены аналитические зависимости, описывающие динамику щелочного числа при разных скоростном и нагрузочном режимах двигателя, а также при постоянном объеме, при доливке или утечке и угаре моторного масла. Эти зависимости содержат коэффициенты, обозначенные  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ , причем коэффициенты  $a_1, a_2, b_1, b_2$  зависят от на-

чального состояния масла, а коэффициенты  $a_3, a_4, a_5, b_3, b_4, b_5$  определяются режимами работы двигателя и непосредственно влияют на интенсивность деградации масла.

3. Установленный диапазон изменения параметров модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла (коэффициенты  $a_3 = b_3, a_4 = b_4$  и  $a_5 = b_5$  имеют отрицательные значения, близкий порядок и не равны нулю, их сумма находится в пределах от «минус»  $5 \cdot 10^{-6}$  до «минус»  $1 \cdot 10^{-8}$ ) обеспечивает возможность условной оптимизации при идентификации модели и позволяет корректно определить параметры цифрового двойника.

4. Разработан алгоритм определения параметров модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла, предусматривающий имитационное моделирование процесса старения масла (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617913 РФ) и параметрическую идентификацию модели, 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.

## **3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Цель экспериментальных исследований — подтверждение результатов теоретических исследований о влиянии режимных параметров работы двигателя на изменение щелочного числа моторного масла [169], сбор данных для подтверждения диапазонов изменения параметров цифрового двойника процесса деградации моторного масла и проверки адекватности модели.

Программа экспериментальных исследований включала:

- 1) стендовые испытания для изучения процесса старения моторного масла;
- 2) мониторинг и регистрацию параметров работы двигателя трактора в условиях реальной эксплуатации;
- 3) статистическую оценку режимов работы двигателя трактора по данным эксплуатации.

### **3.1 Методика проведения стендового эксперимента**

#### **3.1.1 Экспериментальное оборудование**

Экспериментальные стендовые испытания проводились на двигателе Д-241. Данный двигатель устанавливается на широко распространенную модель трактора МТЗ-80, который на данный момент времени остается актуальным благодаря своей универсальности и экономичности и продолжает эксплуатироваться во многих сельскохозяйственных предприятиях [170; 171]. Следует отметить, что выбор конкретной модели двигателя для стендовых испытаний не являлся принципиальным, поскольку базовая зависимость изменения щелочного числа должна быть справедлива для любого типа двигателя.

Для оценки влияния режимных факторов в эксперименте необходимо было поддерживать их постоянными в течение определенного времени. Применение для этих целей трактора, находящегося в реальной эксплуатации, нецелесообразно из-за постоянно изменяющихся режимов работы. Поэтому были выбраны стендовые испытания.

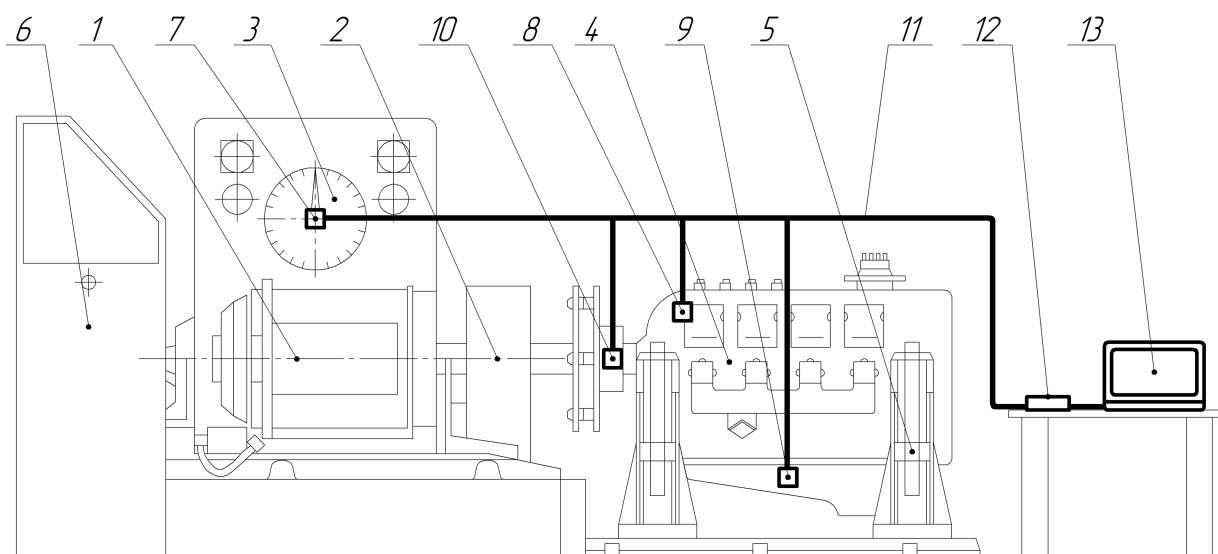
Эксперимент проводился с использованием испытательного тормозного стенда ГОСНИТИ.

Для измерения параметров работы двигателя была создана автоматизированная система сбора данных, состоящая из различных датчиков. Каждый датчик преобразовывает изменение определенной величины в электрический сигнал [172].

Таким образом, экспериментальное оборудование включало две основные составляющие: испытательный тормозной стенд ГОСНИТИ с двигателем Д-241 и автоматизированную систему сбора данных (рисунок 3.1).

Электрический тормоз 1 (рисунок 3.1) выполнен на базе асинхронного электродвигателя с фазным ротором, работающего от сети трехфазного переменного тока. В режиме холодной обкатки он вращает коленчатый вал испытуемого двигателя 4, выступая в роли привода. Это же позволяло осуществлять пуск двигателя. При проведении испытаний под нагрузкой электродвигатель переключается в генераторный режим и создает тормозное усилие. Крутящий момент измерялся устройством на основе весового механизма 3, соединенного с балансирной подвеской электродвигателя-тормоза. Редуктор 2 обеспечивал согласование частот вращения, а жидкостный реостат 6 позволял плавно регулировать частоту вращения коленчатого вала двигателя.

Система автоматизированного сбора данных включала в себя датчики (рисунок 3.1): нагрузки 7, определяющий положение стрелки весового устройства; определения положения рейки 8 [173], который является альтернативой для определения уровня нагрузки; температуры моторного масла



- 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 3.1 — Экспериментальная установка

9; Холла 10 для определения частоты вращения и счета оборотов. Датчики системы связаны экранированным кабелем 11 с аналого-цифровым преобразователем 12 и персональным компьютером 13.

Для правильного подбора компонентов и параметров цепи системы мониторинга на этапе проектирования использовались средства имитационного моделирования, в частности Matlab Simulink.

В качестве средства регистрации применялся АЦП L-CARD E14-440, входящий в реестр средств измерения. Для обеспечения взаимозаменяемости и удобства использовались серийные автомобильные датчики. Для их питания использовалось номинальное напряжение 12 В. Для этого применялся стабилизированный источник питания 12 В.

Схемы согласования обеспечивали напряжение на входе не более 5 В для совместимости схемы измерительного комплекса с АЦП микроконтроллеров, так как такой величиной ограничиваются максимальные значения напряжений широко распространенных АЦП, например atmega 328 и др.

В системах управления ДВС частота вращения и положение коленчатого вала двигателя определяется при помощи индукционных датчиков или датчика Холла. При проведении лабораторных испытаний использовался датчик Холла 21110-3706040-01. При питании напряжением цепи 12 В во время срабатывания датчика на сигнальный провод подавалось напряжение около 11 В. Так как система разрабатывалась под вход АЦП в диапазоне от 0 до 5 В, то на выходе датчика применялась схема согласования исходя из входного импеданса АЦП 10 МОм. Схема обеспечивала условие изменения напряжения от 1 В до 4 В, что достаточно как для работы цифрового входа, так и для регистрации П-образного сигнала на аналоговом входе АЦП.

Для определения температуры в картере двигателя применялся термистор. Был выбран термистор с отрицательным температурным коэффициентом (NTC). Диапазон измерения температуры — от «минус» 50 °С до «плюс» 125 °С.

На испытательных стендах по типу тормозного стенда ГОСНИТИ нагрузка определяется с помощью маятникового силоизмерителя, соединенного с балансирной подвеской электромагнитного тормоза. Для того, чтобы передать значения с силоизмерителя в АЦП, использовался обратный переменный резистор.

Другой способ определения нагрузки на двигатель заключался в отслеживании положения рейки топливного насоса высокого давления. Для этого на рейку устанавливался потенциометр ползункового типа. Он реагировал на перемещение рейки изменением своего сопротивления.

Для установки потенциометра на весовой механизм (рисунок 3.2) и потенциометра измерения положения рейки топливного насоса высокого

давления (рисунок 3.3) были разработаны и напечатаны на 3D-принтере конструкции, обеспечивающие крепление датчиков и схем согласования.

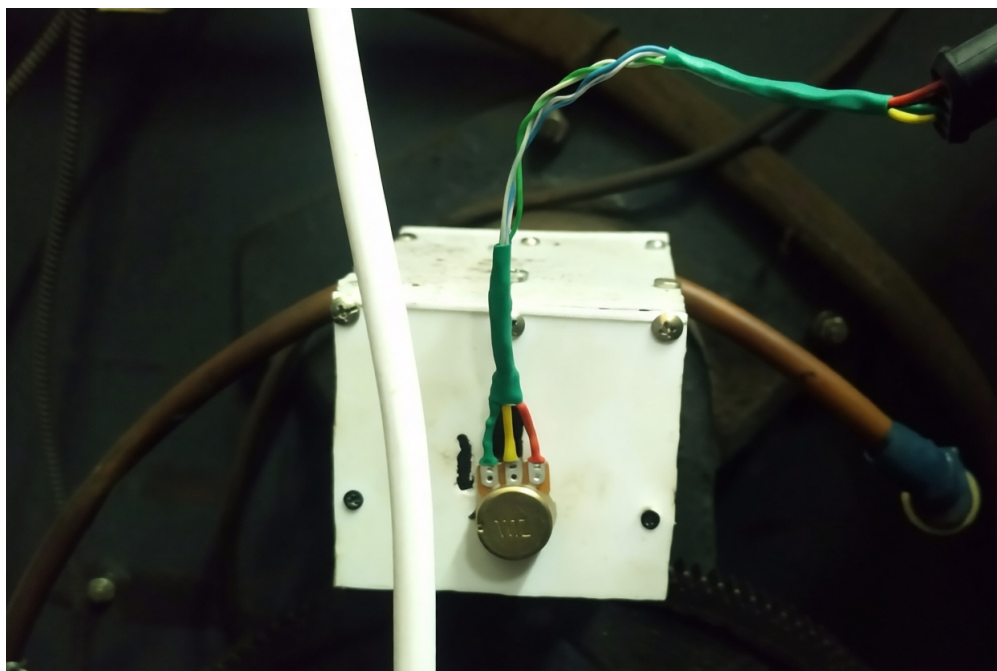


Рисунок 3.2 — Место установки потенциометра для определения положения стрелки весового устройства

Датчик Холла для измерения частоты вращения коленчатого вала был установлен на защитный кожух маховика двигателя (рисунок 3.4). В районе зубчатого венца на маховике был закреплен неодимовый магнит, обеспечивающий разовое срабатывание датчика Холла за один оборот коленчатого вала. Датчик температуры помещался в место установки щупа (см. рисунок 3.4) рядом с маслозаливной горловиной.

В качестве сигнальных проводов использовалась витая пара экранированного UTP-провода (рисунок 3.5). Сигналы датчиков подавались на аналого-цифровой преобразователь L-Card E14-440 по схеме дифференциального входа.

Информация из АЦП передавалась через USB непосредственно на персональный компьютер (рисунок 3.6) и записывалась стандартным программным обеспечением L-Card.

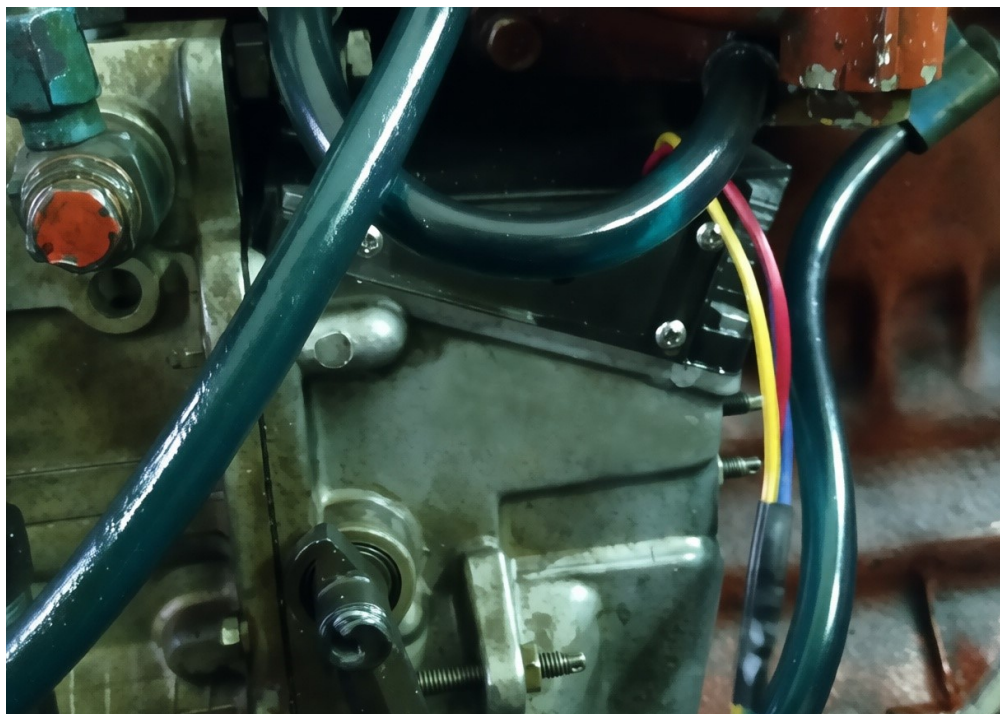


Рисунок 3.3 — Установка датчика определения положения рейки топливного насоса высокого давления

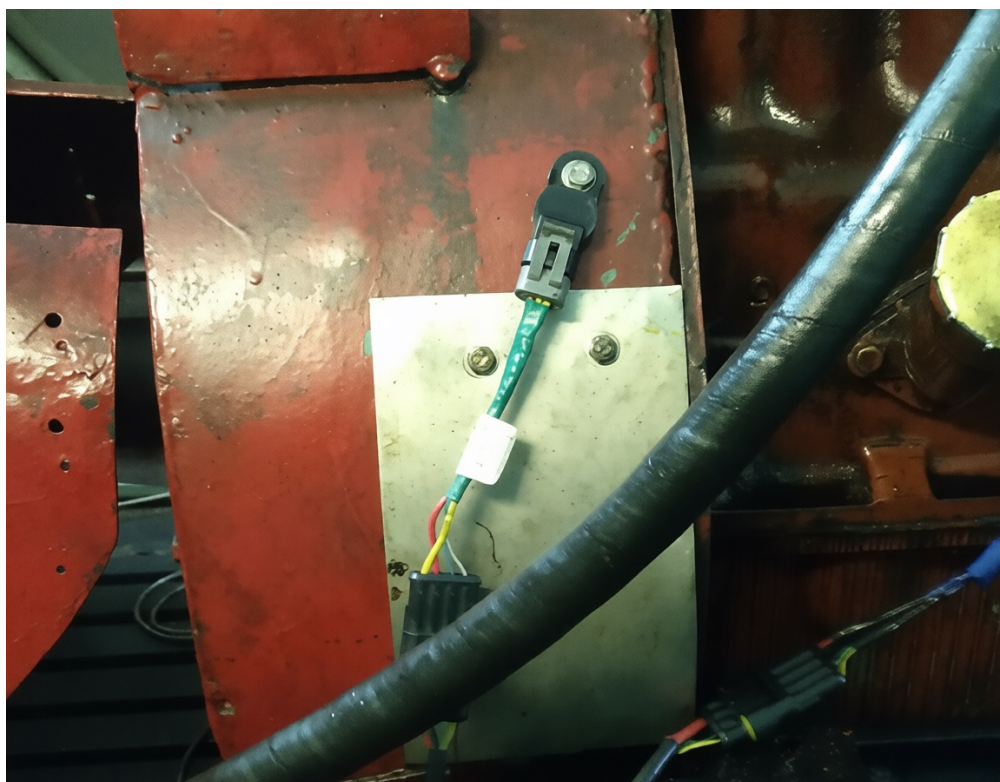


Рисунок 3.4 — Места установки датчика Холла для измерения частоты вращения коленчатого вала и термистора для определения температуры масла



Рисунок 3.5 — Аналого-цифровой преобразователь L-Card E14-440 во время проведения эксперимента



Рисунок 3.6 — Сбор данных на ЭВМ

Для обеспечения минимизации помех влияния силы тока в цепях электрического тормоза был выполнен ряд мероприятий. Измерительная система не имела общей массы с испытательным оборудованием для исключения дополнительных помех. Персональный компьютер и блок питания датчиков подключались к сети питания через блок бесперебойного питания с отдельным заземлением. Датчики соединялись с АЦП по схеме дифференциальных входов с помощью витой пары, что совместно с экранированием позволяло существенно снизить шумы от силовых линий и помех из неизвестных источников. Эти мероприятия были проверены и зарекомендовали себя при проведении тестовых испытаний [174].

Разработка специализированных измерительных приборов для контроля параметров дизелей при диагностировании и обкатке, является актуальным направлением, подтверждаемым работами в этой области [175]. В целом система сбора данных выполнялась с возможностью после небольшой доработки установки на трактор для автономного мониторинга режимов эксплуатации двигателя и реализации цифрового двойника процесса деградации моторного масла на тракторах без электронных систем управления дизельным двигателем.

### 3.1.2 Планирование эксперимента

В рамках исследования в качестве испытуемого образца выступало моторное масло G Profi MSI PLUS 15W-40, которое широко используется хозяйствами агропромышленного комплекса.

Нижний порог щелочного числа, регламентированный нормативами, не может опускаться ниже 1 мг КОН/г. Минимально допустимым начальным значением щелочного числа для такого товарного масла должно быть 11,3 мг КОН/г. Таким образом мы получаем диапазон изменения параметра. Согласно предлагаемой модели, ее график должен проходить через точки с координатами (0 моточасов; 11,3 мг КОН/г) и (250 моточасов; 1 мг КОН/г).

Так как на этапе построения плана эксперимента коэффициенты модели неизвестны и сама модель цифрового двойника не подтверждена, для упрощения рассматриваем базовую обобщенную зависимость, которая описывается уже знакомым уравнением

$$CH = a_1 e^{a_2 T_H}. \quad (3.1)$$

Планирование эксперимента осуществлялось исходя из предположения деградации моторного масла по обобщенной зависимости (3.1).

При этом учитывался ряд требований, которые вытекали из особенностей исследуемого процесса. Предварительно были выбраны три фактора, определявшиеся процессом эксплуатации: количество отработанных моточасов с момента замены масла; нагрузка на двигатель; частота вращения коленчатого вала.

Теория планирования инженерного эксперимента, которая используется для оптимизации эксперимента в исследовательских задачах, требует, чтобы факторы обладали следующими свойствами: независимость, управляемость, однозначность и совместимость.

Частота вращения коленчатого вала и нагрузка на двигатель в данном случае являются независимыми и управляемыми факторами. Все три ранее названных фактора являются однозначными и совместимыми. Однако время работы двигателя в моточасах является независимым, но не в полной мере управляемым фактором. Провести отдельный эксперимент для определенного времени работы, например установить 20 моточасов со 150 до 170, не представляется возможным. Необходимо, чтобы двигатель отработал весь диапазон времени до нужного значения. Возможно проведение для разных значений нагрузки и частоты вращения эксперимента до достижения момента замены моторного масла. Это достаточно дорого и затратно по времени эксперимента.

Так в предположении линейного закона для влияния нагрузки и частоты вращения коленчатого вала мы получили бы серию из четырех экспериментов. Учитывая, что для исследуемого двигателя завод-изготовитель в зависимости от типа и качества масла предполагает его замену при 250 и 500 моточасах работы, то, как минимум, пришлось бы отработать 1000 моточасов. Это потребовало бы как надежности экспериментального двигателя, так и всего экспериментального оборудования. Кроме того, необходимо было бы значительное количество топлива для проведения экспериментальных исследований.

Строго говоря, при последовательном проведении серии таких экспериментов было бы сложно говорить об их воспроизводимости. В процессе эксплуатации двигатель мог загрязняться и численные значения коэффициентов уравнения, описывающего характер изменения щелочного числа, вероятнее всего, менялись бы. Базовый характер кривых целесообразно было получить с одного эксперимента в пределах одного срока замены масла.

Данный факт сделал неприменимыми методы классической теории инженерного эксперимента. Наиболее целесообразным решением при построении плана эксперимента было принято следующее: оставить два управляемых фактора, и для различных их сочетаний проводить серии экспериментов с наработкой двигателем количества моточасов до достижения срока замены масла.

В случае определения изменения щелочного числа моторного масла в пределах одного срока замены фактор времени работы меняется непрерывно. Частота вращения коленчатого вала и нагрузка на двигатель могут задаваться в соответствии с некоторым планом. То есть в таком случае фактически требовалось перейти к двухфакторному плану эксперимента. При этом не удастся получить зависимость щелочного числа ни от одного из этих факторов, так как при разном отработанном времени будет свой набор режимов

работы двигателя. Но возможно рассмотреть процесс, используя дифференциальный подход.

Фактически требовалось получить зависимость

$$CH = f(\mathbf{X}), \quad CH = f(x_1, x_2, x_3), \quad (3.2)$$

где  $CH$  — щелочное число моторного масла;

$\mathbf{X}$  — матрица факторов  $x_1, x_2, x_3$ .

При переходе к производной по времени имеем

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{d(f(x_1, x_2, x_3))}{dt}. \quad (3.3)$$

или в конечной форме

$$\frac{\Delta CH}{\Delta t} = \frac{\Delta(f(x_1, x_2, x_3))}{\Delta t}. \quad (3.4)$$

В случае, если значение факторов в течение промежутка времени оставалось неизменным, можно было говорить о том, что получена средняя скорость изменения щелочного числа. В большей степени представляла интерес скорость изменения щелочного числа не с изменением времени, а с изменением отработанных моточасов.

Учитывая, что количество отработанных моточасов является неуправляемым фактором, стендовый эксперимент был построен по следующей принципиальной методике:

- планирование эксперимента осуществлялось как двухфакторного с равномерным заполнением факторного пространства для покрытия всего диапазона моточасов работы двигателя;
- отдельные опыты соответствовали участкам изменения первого фактора — количества отработанных моточасов, и шли последовательно, фиксируя изменение этого фактора;

– в течение опыта 2 фактора, частота вращения коленчатого вала и нагрузка на двигатель, оставались постоянными, на заранее определенном уровне;

– план эксперимента включал несколько этапов и несколько серий, так как заранее был неизвестен момент достижения критического значения щелочного числа  $CH_{кр}$ , после которого эксплуатация двигателя опасна или нецелесообразна.

Учитывая, что наработка имеет зависимость от времени, а другие факторы в течении опыта постоянны, зависимость (3.3) при дифференцировании сложной функции примет вид

$$\frac{dCH}{dt} = \frac{d(f(x_1, x_2, x_3))}{dx_1} \frac{dx_1}{dt} \Leftrightarrow dCH = dx_1 \frac{d(f(x_1, x_2, x_3))}{dx_1}. \quad (3.5)$$

Таким образом, можно определить среднюю скорость деградации моторного масла как функцию, зависящую от трех факторов:

$$\frac{\Delta CH}{\Delta x_1} = F(x_1, x_2, x_3). \quad (3.6)$$

Ее интегрирование дает искомую зависимость, позволяющую прогнозировать достижение критического значения щелочного числа.

Максимальный план эксперимента был рассчитан на 4 этапа. Учитывая, что критическое значение  $CH_{кр}$  могло быть достигнуто в диапазоне 250–500 моточасов, но возможно и ранее [176; 177], каждый этап включал выполнение одной серии опытов, которой должно было быть достаточно для достижения целей эксперимента.

Выполнение первых двух серий опытов позволяло выйти на 250 моточасов работы. В случае недостижения критических значений может быть добавлен следующий этап.

Особенностью такого эксперимента являлось то, что один из факторов изменялся последовательно. Два других являлись независимыми, и планирование эксперимента осуществлялось для определения установочных

значений этих факторов. При этом количество моточасов работы на каждом режиме определялось отдельно и не было связано с режимом работы. При увеличении количества опытов погрешность определения изменения щелочного числа  $\Delta CH$  должна возрастать. Уменьшение же количества опытов приводит к уменьшению количества точек, что сказалось бы на качестве аппроксимации данных.

В целом определение плана эксперимента сводилось к трем основным моментам: определение количества опытов в серии эксперимента, определение шага в моточасах для изменения управляемых факторов при непрерывном изменении времени работы в отдельных сериях, планирование изменения независимых управляемых факторов для каждой серии опытов.

Количество опытов в одной серии эксперимента определялось исходя из следующих соображений:

1. Для удобства количество опытов в каждой серии эксперимента было одинаковым. Это позволило равномерно насыщать факторное пространство при переходе от серии к серии.

2. Из-за возможности достижения критического значения  $\Delta CH_{кр}$  до 250 моточасов работы двигателя каждый участок 0–250 и 250–500 моточасов был разбит на два этапа.

3. Продолжительность опытов выбиралась исходя из примерно равной точности определения  $\Delta CH$ .

Определение щелочного числа в пробах осуществлялось лабораторным методом. Используемые методы и оборудование позволили получить значение  $CH$  с абсолютной погрешностью  $\delta_{CH} = 0,05$  мг КОН/г. Относительная погрешность была определена как  $\Delta_{CH} = \frac{\delta_{CH}}{\Delta_{CH}} \cdot 100\%$ . Таким образом количество опытов в серии при двух сериях на диапазон изменения  $CH$  в эксперименте

$$N_{\text{оп.сер}} = \Delta_{CH} \frac{CH_{\text{max}} - CH_{\text{min}}}{2\delta_{CH} \cdot 100\%}. \quad (3.7)$$

Учитывая, что регрессионный анализ позволял сглаживать погрешности эксперимента, и при этом желательно было иметь максимальное количество точек для построения цифрового двойника, было принято решение остановиться в эксперименте на максимально возможной погрешности не более 10 %. В таком случае, согласно полученной зависимости, количество опытов в одной серии должно быть равно 10.

С учетом описанных подходов важным является определение рационального шага изменения управляемых факторов при непрерывном изменении времени работы в отдельных сериях опытов, то есть расстояние между точками плана эксперимента.

Для количества опытов в серии, равного  $N_{\text{оп.сер}}$ , имеем такое же количество участков и  $k = N_{\text{оп.сер}} + 1$  точек времени работы двигателя на кривой изменения  $CH$  (3.1). Тогда изменение щелочного числа  $\Delta CH$  в  $i$ -ом опыте

$$\Delta CH_i = a_1 e^{a_2 T_{H_i}} - a_1 e^{a_2 T_{H_{i+1}}}. \quad (3.8)$$

Задача оптимизации была сформулирована как равенство изменений щелочного числа  $\Delta CH$  во всех опытах:

$$\Delta CH_1 = \Delta CH_2 = \dots = \Delta CH_i = \dots = \Delta CH_{k-1}. \quad (3.9)$$

То есть должна была быть решена система из  $N_{\text{оп.сер}}$  уравнений (3.8) при условии (3.9) и найдены значения  $T_{H_i}$ . Система может дать решение на любом участке, для любой серии опытов, если известны коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$ . Но рассматривать серии опытов отдельно не имело смысла, так как на каждом участке будет свое решение, а границы участков для серии опытов заранее не определены. Поэтому целесообразно было решать систему для всего интервала изменения  $CH$ , для которого известны начальное и конечное значения. Для планируемого проведения базовых серий до достижения  $T_H = 250$

моточасов количество точек  $k = 2N_{\text{оп.сер}} + 1$ , а уравнение (3.9) примет вид

$$\begin{aligned} CH_{\max} - a_1 e^{a_2 T_{H_2}} = \dots = a_1 e^{a_2 T_{H_i}} - a_1 e^{a_2 T_{H_{i+1}}} = \dots = \\ = a_1 e^{a_2 T_{H_{k-1}}} - CH_{\min}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Получаем систему из  $k - 1$  уравнений.

Решение системы может быть выполнено численными методами оптимизации или аналитически [178].

Если предполагается провести  $n$  опытов в промежутке наработки между  $T_{H_1}$  и  $T_{H_{\text{end}}}$ , величина  $\Delta CH$  может быть найдена по зависимости

$$\Delta CH = \frac{a_1 e^{a_2 T_{h_1}} - a_1 e^{a_2 T_{h_{\text{end}}}}}{n}. \quad (3.11)$$

Для некоторой промежуточной точки  $k$  имеем уравнение

$$\frac{a_1 e^{a_2 T_{H_1}} - a_1 e^{a_2 T_{H_k}}}{k - 1} = \frac{a_1 e^{a_2 T_{H_1}} - a_1 e^{a_2 T_{H_{\text{end}}}}}{n}. \quad (3.12)$$

Его решение относительно  $T_{H_k}$  имеет вид

$$T_{H_k} = \frac{\ln \left( e^{a_2 T_{H_1}} - \frac{(k-1) \left( e^{a_2 T_{H_1}} - e^{a_2 T_{h_{\text{end}}} } \right)}{n} \right)}{a_2}. \quad (3.13)$$

Зависимость (3.13) позволила определить момент окончания каждого опыта из предполагаемой серии опытов эксперимента. При этом разница соседних значений дает фактическое значение времени проведения опыта в моточасах.

Моменты окончания опытов и время их проведения показаны в табл. 3.1.

Аналогичная задача решалась с помощью методов численной оптимизации. Результаты совпали с точностью численного решения.

Таблица 3.1 — Продолжительность работы двигателя в эксперименте

№ опыта	Количество моточасов $T_H$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
окончание	4.809	9.854	15.15	20.75	26.66	32.93	39.61	46.75	54.43	62.72
продолжи- тельность	4.809	5.044	5.304	5.592	5.912	6.272	6.679	7.142	7.673	8.291
№ опыта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
окончание	71.73	81.61	92.54	104.7	118.6	134.6	153.6	177.0	207.1	250.0
продолжи- тельность	9.016	9.881	10.92	12.22	13.87	16.03	18.99	23.31	30.16	42.82

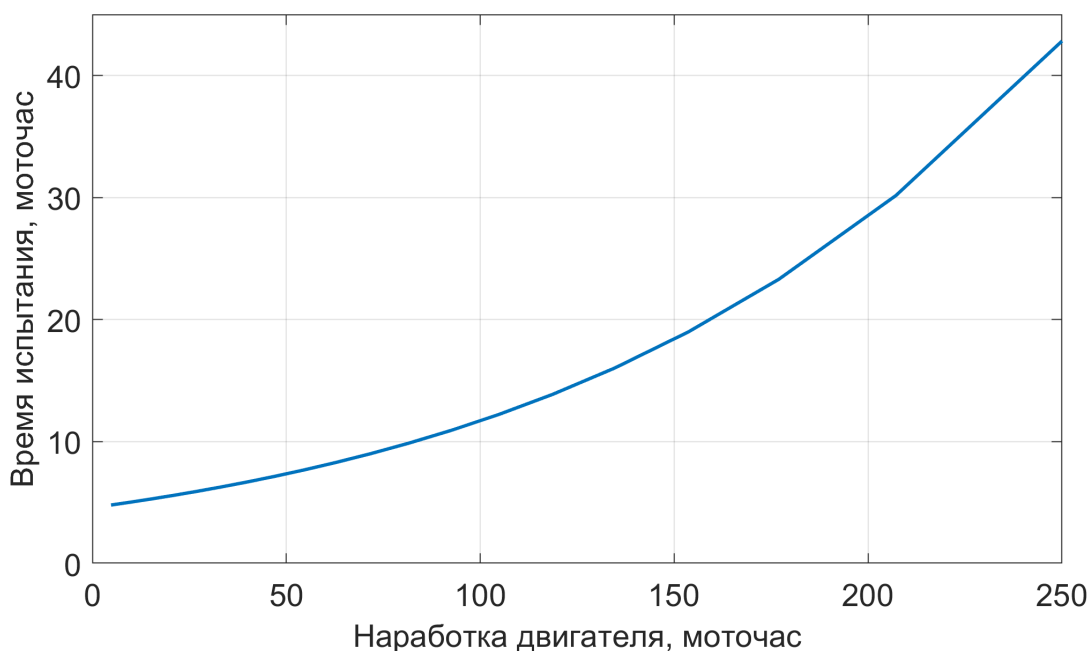


Рисунок 3.7 — Зависимость времени эксперимента от наработки двигателя

Данное решение позволило получить продолжительность работы двигателя в каждом опыте (табл. 3.1) для двух серий. Таким образом, в первой серии опытов снижение щелочного числа должно составить примерно половину допустимого за 62,7 моточаса, а во второй — за оставшиеся 187,3 моточаса.

Характер зависимости времени отдельного эксперимента от наработки двигателя в моточасах показан на рисунке 3.7. Как видно из графика, продолжительность растет экспоненциально по мере наработки двигателя.

В случае, если бы критическое значение щелочного числа не было бы достигнуто за 250 моточасов работы двигателя, коэффициенты зависимости могли быть уточнены и аналогичным образом рассчитаны временные промежутки работы двигателя для следующих серий экспериментов.

Планирование изменения независимых управляемых факторов для каждой серии опытов выполнялось, исходя из задачи равномерно покрыть факторное пространство, так как достоверно аналитическая зависимость влияния нагрузки и частоты вращения коленчатого вала неизвестна.

Планирование было выполнено с помощью алгоритма латинских гиперкубов. Некоторые особенности были связаны с наличием серий опытов. Это потребовало написание собственного алгоритма.

Суть алгоритма заключалась в следующем. Факторное пространство двух независимых факторов разбивалось на участки, характеризующие уровни факторов. Так как количество серий опытов в эксперименте планировалось не более четырех, а в каждой серии было определено 10 опытов, то количество уровней факторов  $4 \cdot 10 = 40$ . Таким образом, факторное пространство разбивается на  $40^2 = 1600$  возможных точек (рисунок 3.8). План должен был быть построен таким образом, чтобы точки были равномерно распределены в каждой серии опытов, а по окончании 4-й серии были задействованы все уровни факторов. При этом режимы, то есть уровни факторов, не должны повторяться (рисунок 3.8).

Для контроля равномерности заполнения факторного пространства оно разбивалось на области в соответствии с количеством серий опытов и количеством факторов  $n = 4^2 = 16$ .

Первое заполнение факторного пространства выполнялось с помощью алгоритма определения уровней факторов методом латинских гиперкубов из пакета *Statistic and Machine Learning Toolbox Matlab* с алгоритмом оптимизации на расстоянии между точками [179]. При достаточно большом количестве итераций алгоритм давал хороший результат.

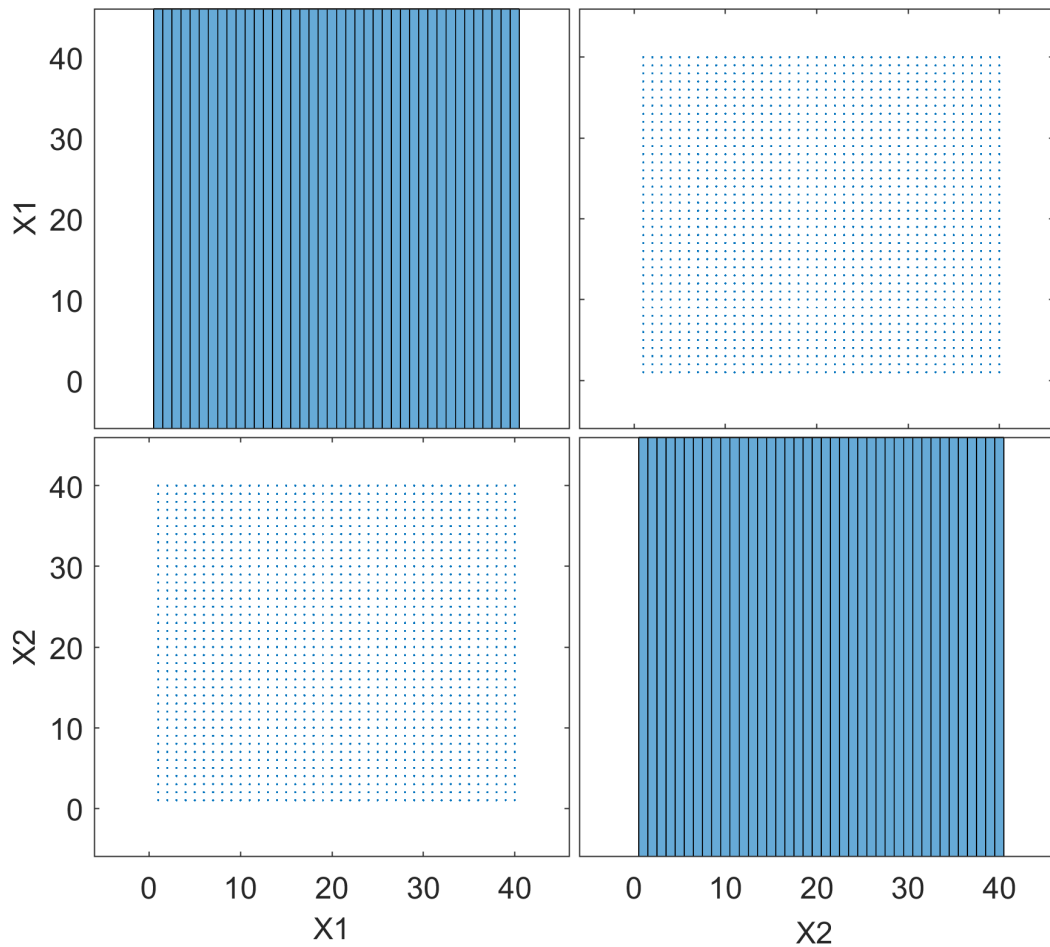


Рисунок 3.8 — Сетка заполнения факторного пространства

Затем осуществлялись проверки принадлежности точек к участкам и зонам. Задействованные участки исключались из дальнейшего планирования. Зоны, не задействованные в первой серии, получали приоритет в плане эксперимента в следующей серии опытов. Случайным образом определялись дополнительные зоны, и также на основе метода Монте-Карло определялись участки — уровни факторов для следующей серии опытов. Такая процедура повторялась до последней серии. Для алгоритма количество серий не ограничено. В последней серии остается только 10 режимов для каждого фактора. Их распределение также осуществлялось на основе случайного выбора. Разработанный алгоритм, на наш взгляд, дал неплохой результат (таблица 3.2, рисунок 3.9).

В таблице 3.2 приведен план эксперимента по сериям опытов в долеговой кодировке относительно нижнего уровня варьирования фактора.

Таблица 3.2 — План эксперимента. Режимы работы двигателя в долеговой кодировке

Серия опытов							
№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
<i>n</i>	<i>Me</i>	<i>n</i>	<i>Me</i>	<i>n</i>	<i>Me</i>	<i>n</i>	<i>Me</i>
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

На матричной диаграмме видно, что факторное пространство заполнено достаточно равномерно. Точки разного цвета соответствуют разным сериям опытов, и каждая из серий равномерно заполняет факторное пространство. Таким образом, серия является самостоятельным планом эксперимента.

Гистограммы уровней факторов (рисунок 3.9) показывают, что при распределении значений повторения отсутствовали.

Для перехода к натуральным показателям использовалась зависимость

$$x = x_{\min} + X(x_{\max} - x_{\min}), \quad (3.14)$$

где  $X$  — значение фактора в долях;

$x$  — натуральное значение фактора;

$x_{\max}$  и  $x_{\min}$  — значения, определяющие верхний и нижний пределы диапазона варьирования факторов.

Для определения натуральных значений факторов в плане была снята внешняя скоростная характеристика (ВСХ) экспериментального двигателя. ВСХ двигателя позволила определить максимальные показания весового

Матричная диаграмма факторного пространства  
по планам 1-4 этапов

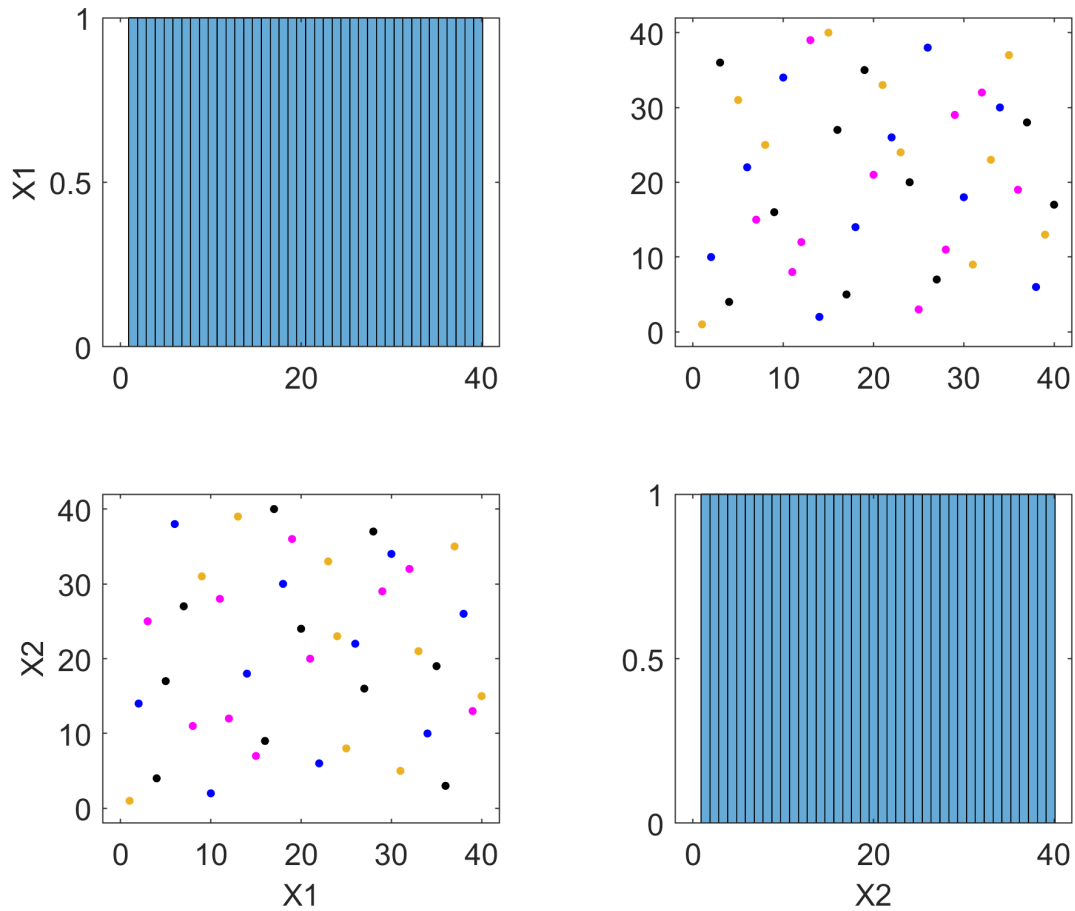


Рисунок 3.9 — Матричная диаграмма факторного пространства по планам 1–4-й серий опытов

устройства для определенной частоты вращения коленчатого вала двигателя. Это необходимо для определения доли нагрузки для данного скоростного режима.

Частота вращения коленчатого вала двигателя изменялась в пределах от  $1100 \text{ мин}^{-1}$  до  $2100 \text{ мин}^{-1}$ . Крутящий момент определялся по весовому устройству и для удобства задавался в кГс. Значения в плане соответствуют долям в зависимости от значения по внешней скоростной характеристике на данном режиме.

На современном уровне развития компьютерной техники не было необходимости иметь план эксперимента, обладавший определенными свой-

ствами для получения коэффициентов уравнения регрессии по детерминированным зависимостям. Методы машинного обучения позволяют получить коэффициенты для уравнения регрессии любого вида, однако для качественной модели предпочтительнее было, чтобы информация о поверхности отклика в факторном пространстве представлялась равномерно. Этому способствуют планы на основе вероятностных методов, что и было реализовано в работе.

Полученный план эксперимента позволял определить данные с известной и достаточной точностью, минимизировал количество опытов и равномерно заполнял факторное пространство.

### 3.1.3 Обработка результатов стендового эксперимента

Лабораторные исследования проб моторных масел проводились на базе ФГБНУ ВНИИТиН. Параллельно проводился экспресс-анализ проб (рисунок 3.10) [9].

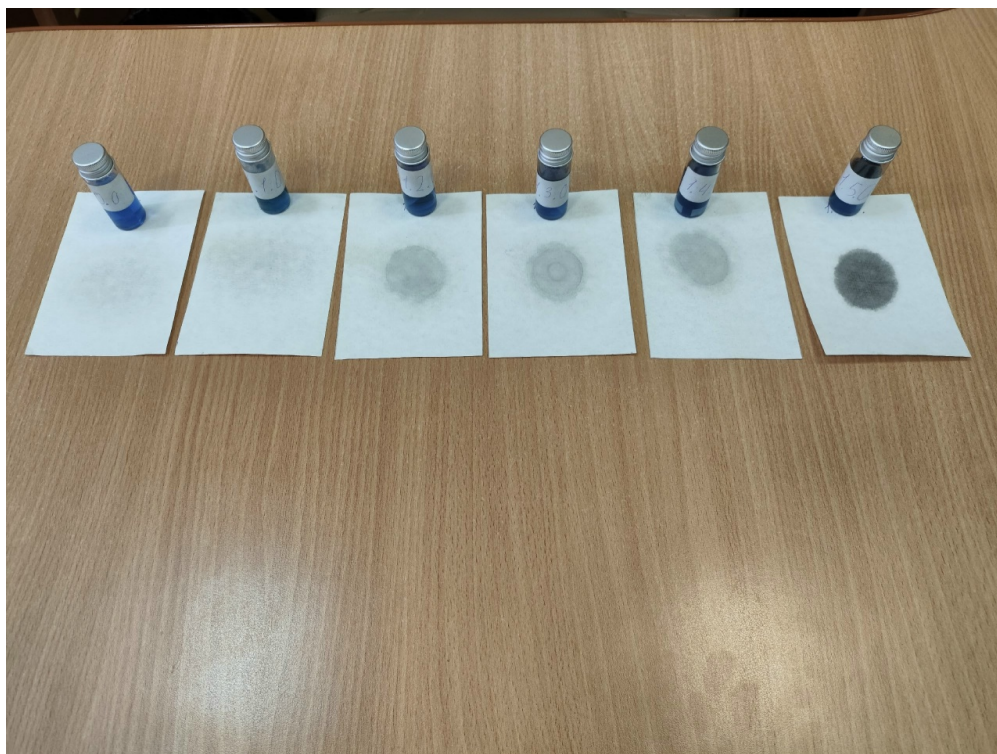


Рисунок 3.10 — Определение щелочного числа методом экспресс-анализа

Результаты фиксировались в журнале испытаний.

Несмотря на предпринятые меры минимизации помех, для сигналов, поступающих от датчиков к АЦП, было характерно наличие некоторого количества шумов, которые носили случайный характер. Сигналы были обработаны и сглажены с помощью фильтра Гаусса.

Обработка результатов замеров на АЦП проводилась с помощью скриптов Matlab. Экспериментальным путем были определены наилучшие параметры предобработки сигналов для каждого датчика. Как видно из рисунка 3.11, в результате предобработки устранялись шумы даже в очень слабых сигналах, как, например, при определении температуры масла в двигателе.

При этом очевидно, что пики, характеризующие прохождения датчика Холла при регистрации частоты вращения коленчатого вала, не повреждены и потери данных не происходило.

Окончательные значения режимных параметров определялись как средние от напряжений, по обработанным сигналам.

$$u_{\text{ср}} = \frac{\sum u_i}{i}, \quad (3.15)$$

где  $u_{\text{ср}}$  — среднее значение напряжения на выходе датчика, В;

$u_i$  — отдельные значения напряжения, В;

$i$  — количество отсчетов в сигнале.

Так как отсчеты фиксировались через равные интервалы времени, данная зависимость не приводит к погрешностям.

Для определения значений сигналов, полученных с датчика положения рейки топливного насоса и датчика нагрузки, предварительно были сняты передаточные характеристики датчиков. В связи с тем, что они носили линейный характер, полученное среднее напряжение пересчитывалось в фи-

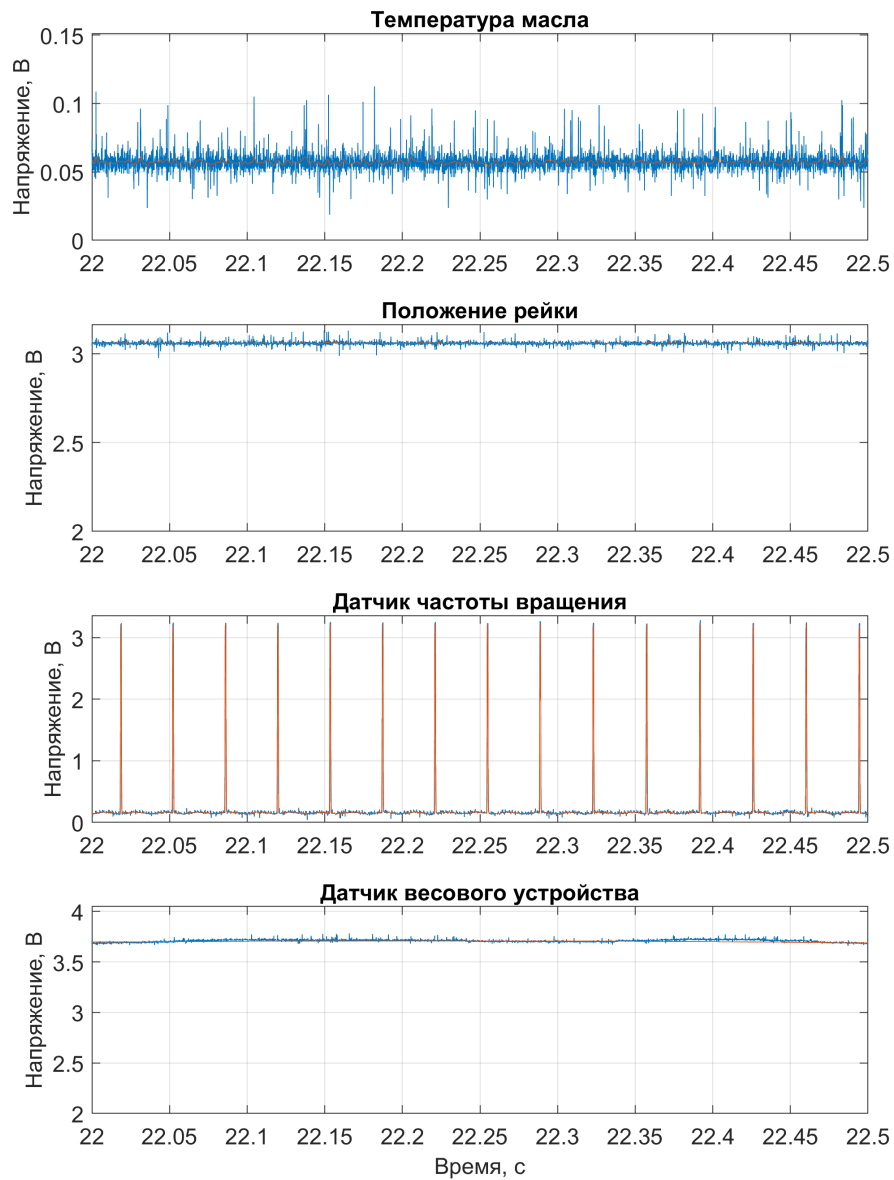


Рисунок 3.11 — Результаты предварительной обработки сигналов АЦП, полученных при проведении экспериментов

зическую величину с использованием калибровочного коэффициента:

$$u = u_{\text{ср}} K_{\text{к}}, \quad (3.16)$$

где  $u$  — итоговое значение физической величины;

$K_{\text{к}}$  — калибровочный коэффициент.

Для определения температуры масла в картере двигателя после усреднения напряжения применялась формула Стейнхарта-Харта. Использовалась его модифицированная форма — В-уравнение:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left( \frac{R}{R_0} \right), \quad (3.17)$$

где  $T$  — искомая температура масла, К;

$T_0$  — опорная температура (298,15 К), соответствующая 25 °С;

$B$  — коэффициент термистора, К;

$R$  — сопротивление термистора при измеряемой температуре, Ом;

$R_0$  — сопротивление термистора при опорной температуре, Ом.

По зафиксированному значению среднего напряжения определялось сопротивление термистора.

Частота вращения коленчатого вала определялась отношением количества пиковых сигналов ко времени их возникновения:

$$n = \frac{N_{\text{пик}}}{t}, \quad (3.18)$$

где  $n$  — частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин;

$N_{\text{пик}}$  — количество пиковых сигналов.

$t$  — время фиксации пиковых сигналов, с.

### 3.1.4 Результаты стендового эксперимента

По итогу проведения стендовых экспериментов была получена сводная таблица данных (приложение 1).

Фиксировались начальное и конечное время проведения эксперимента, которые затем переводились в относительные величины. Это позволяло представить время в долях суток, что было удобно для последующих расчетов, включая определение моточасов работы двигателя.

На начальных этапах проведения эксперимента была проведена имитация процесса утечки масла из двигателя для последующей проверки модели цифрового двойника при условиях изменения объема масла.

В результате стендового эксперимента получены значения щелочного числа, соответствующие поведению реального процесса и отражающие тенденцию изменения состояния масла при эксплуатации в двигателе трактора, в том числе с учетом доливки в процессе эксплуатации.

### **3.2 Сбор и обработка данных на основе мониторинга параметров работы трактора в эксплуатации**

Данные мониторинга параметров работы трактора в эксплуатации использовались для анализа реальных режимов эксплуатации двигателя и для оценки параметров цифрового двойника [180].

Для получения данных использовалась система мониторинга техники [3]. Подобные системы позволяют провести удаленный сбор и регистрацию широкого спектра параметров работы автотракторной техники.

В числе контролируемых показателей, представляющих интерес для данного исследования, были: скорость движения, расход топлива, частота вращения коленчатого вала, температура двигателя, нагрузка и крутящий момент. Кроме того, фиксировалось местоположение тракторов и тип используемого навесного или прицепного оборудования.

С помощью подсистемы GPS-трекинга анализировались временные интервалы и географические зоны работы тракторов. На рисунке 3.12 представлена траектория движения одного из исследуемых тракторов при выполнении сельскохозяйственной операции.

Данные GPS-позиционирования позволили визуально разделять рабочие и холостые ходы, а также идентифицировать характер выполняемых операций.



Рисунок 3.12 — Траектория движения трактора по полю в процессе эксплуатации

При сборе данных учитывались два технологических ограничения. Во-первых, запись показаний датчиков осуществлялась дискретно, с периодичностью в 30 секунд. Во-вторых, полнота и достоверность собираемой информации напрямую зависели от качества связи бортового оборудования с сервером, что в полевых условиях, при нестабильном доступе к сети, являлось проблематичным.

В результате был сформирован массив данных, который после соответствующей обработки использовался для дальнейших исследований в зависимости от задач.

### 3.2.1 Статистическая оценка режимов работы двигателя трактора в эксплуатации

При условии продолжительной эксплуатации трактора на номинальных или близких к ним оборотах коленчатого вала двигателя актуальность применения цифрового двойника может быть поставлена под сомнение, поскольку прогнозирование остаточного ресурса теряет смысл при заведомо постоянных условиях эксплуатации [181]. Поэтому важно было провести количественный анализ появления каждого режима работы трактора.

На основе данных мониторинга выполнялся частотный анализ режимов работы двигателя трактора.

Датчики системы мониторинга фиксируют показатели с интервалом в 30 секунд. При работе техники в полевых условиях могут возникать ситуации, когда связь бортового оборудования с сервером временно отсутствует. В таких случаях система продолжает записывать данные, присваивая им реальные временные метки на основе собственных часов. Накопленная информация сохраняется во внутренней памяти и передается на сервер после восстановления соединения. В результате на сервер поступают массивы данных с корректными метками, но передаваемые пакетами, что может приводить к неравномерности итогового временного ряда.

В отдельных случаях передача данных прекращается и их часть может быть потеряна. Возможны кратковременные пропуски данных, связанные с потерей отдельных пакетов при передаче. Кроме того, возможны сдвиги временных меток из-за синхронизации часов, отключения питания и т. д. При восстановлении связи после перерыва граничные точки могут оказаться разделены интервалом, не кратным 30 секундам.

Для обеспечения корректности статистического анализа ряды данных мониторинга приводились к равномерной сетке с шагом в 30 секунд. Для этого применялась линейная интерполяция, позволяющая восстановить значения в промежуточных точках при небольших пропусках или устранить влияние неравномерности поступления данных, в том числе по разным показателям.

При обработке все данные объединялись в единый массив, на основе которого формировалась таблица расписания. В ней каждому моменту времени соответствовало значения частоты вращения и нагрузки. Поскольку в процессе эксплуатации присутствовали периоды, когда двигатель не работал, они были исключены из анализа. Из объединенного массива удалялись все записи, в которых частота вращения коленчатого вала составляла менее 400

об/мин, а также записи с нагрузкой на двигатель менее 2 %. Указанные значения соответствовали моментам запуска двигателя, его остановки или работе в неустойчивых переходных режимах. В отдельных случаях — это результат восполнения данных интерполяцией. Такая фильтрация позволяла сосредоточиться исключительно на времени непосредственной работы техники и удалить некорректные точки.

Для частотного анализа данные группировались по интервалам. Для частоты вращения ширина интервала составляла 100 об/мин, а для нагрузки — 10 %. Каждое измерение относилось к соответствующему интервалу, после чего подсчитывалось количество попаданий в каждый из них.

Полученные частоты нормировались относительно общего количества измерений за анализируемый период. В результате определялась доля времени, в течение которой двигатель работал в каждом из выделенных диапазонов.

Разработанная программа для ЭВМ (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2026619413 [182]) позволила в автоматическом режиме осуществлять подготовку численных данных результатов мониторинга работы двигателя трактора для анализа и обрабатывать отдельные периоды времени.

Данная методика статистической обработки применялась как к отдельным декадам, так и к годовым периодам эксплуатации тракторов, что позволяло оценивать как краткосрочные, так и долговременные тенденции в распределении режимов работы. Результаты анализа представляли гistogramмы частот появления оборотов коленчатого вала и нагрузки на двигатель.

### **3.2.2 Оценка параметров модели цифрового двойника в условиях эксплуатации**

Проверка разработанной модели цифрового двойника осуществлялась на основе данных о режимах работы тракторов в реальных условиях экс-

плуатации и по соответствующим значениям щелочных чисел моторного масла, полученным преимущественно при его замене. Одна проба свежего (товарного) масла отбиралась в момент замены старого, одна — в конце срока эксплуатации, и еще по возможности до трех проб отбиралось в промежуточные периоды. По каждой пробе определялось значение щелочного числа лабораторным методом.

Данные, полученные при мониторинге и предварительно обработанные, позволили с помощью специально разработанных программ формировать файлы-сценарии для цифрового двойника (рисунок 2.5).

Для оценки параметров модели цифрового двойника по результатам мониторинга работы тракторов использовался алгоритм, в целом описанный в подразделе 2.3, но с некоторыми особенностями.

В имитационную модель добавлялось несколько блоков сценариев с возможностью выбора (рисунок 3.13).

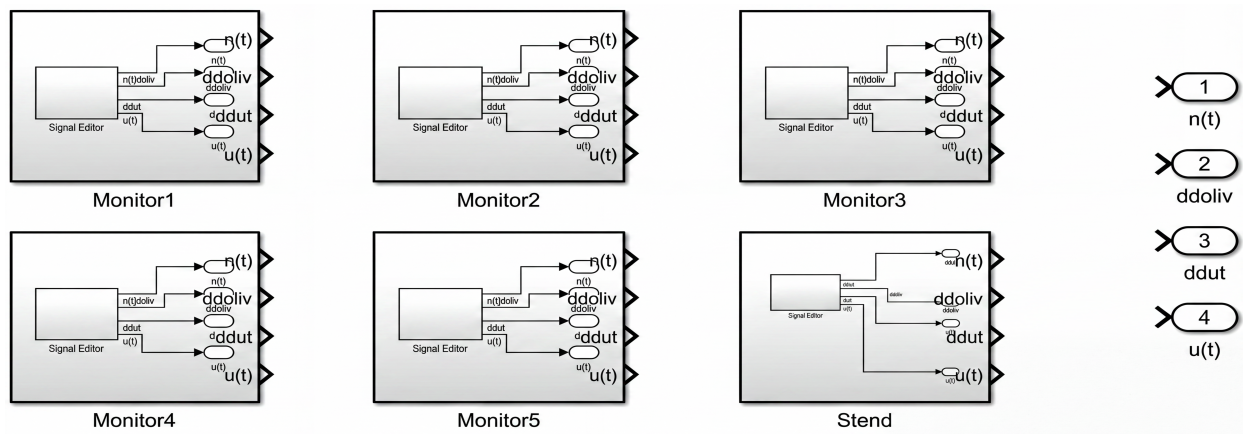


Рисунок 3.13 — Вариативная подсистема сценария работы двигателя

В приложении подбора параметров формировалось несколько экспериментов в зависимости от количества данных о щелочном числе моторного масла и количества сервисного обслуживания двигателя трактора, полученных в результате наблюдений.

Все независимые эксперименты, за исключением одного, использовались для подбора параметров методами оптимизации. Как правило,

использовался метод нелинейных квадратов и его производная — алгоритм Trust Region (метод доверительной области). Один эксперимент использовался для валидации модели. Это обеспечивало адекватность полученных результатов.

Следует заметить, что в дальнейшем, при использовании полученной модели в качестве цифрового двойника процесса деградации моторного масла двигателя трактора, процесс проверки адекватности становится излишним. Это связано с тем, что каждая серия новых данных, полученная в результате мониторинга и лабораторной оценки пробы масла, будет добавляться в число обучающей выборки, то есть в качестве новых экспериментов, для дообучения цифрового двойника и уточнения параметров модели.

Предлагаемая методика позволяет использовать лабораторный анализ пробы моторного масла только при его замене.

### 3.3 Выводы

1. Предложен алгоритм планирования эксперимента на основе латинского гиперкуба, обеспечивающий равномерное заполнение факторного пространства для последовательных серий опытов и наличие точек в каждой исследуемой зоне (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617913 РФ).

2. Разработанная система автоматизированного сбора данных для регистрации результатов стендового эксперимента и обеспечения возможности автономного сбора режимных параметров при эксплуатации включает устройство для определения нагрузки по фактическому положению рейки топливного насоса высокого давления (патент № 243901 РФ), позволяет определять режимные параметры в двигателях с топливным насосом высокого давления и механическим регулятором без системы электронного управления и может быть установлена на трактор.

3. Предложена методика обработки результатов мониторинга работы двигателя трактора, которая позволяет оценивать частоты появления скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя сельскохозяйственного трактора.

4. Разработана компьютерная программа для подготовки численных данных результатов мониторинга, анализа и обработки отдельных периодов времени (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026617913 РФ), которая формирует базу данных режимов работы двигателя сельскохозяйственного трактора в течение заданного периода времени.

5. Проведенный стендовый эксперимент обеспечил сбор данных по изменению щелочного числа тракторного двигателя Д-241 во всех диапазонах скоростного и нагрузочного режимов.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Анализ режимов работы двигателя трактора в эксплуатации

В результате мониторинга и обработки данных о режимах работы тракторов, находящихся в эксплуатации в небольшом фермерском хозяйстве, с помощью метода частотного анализа были получены данные по частоте появления режимов работы двигателя. Проанализированы данные по тракторам John Deere 6B и Кировец К-742М.

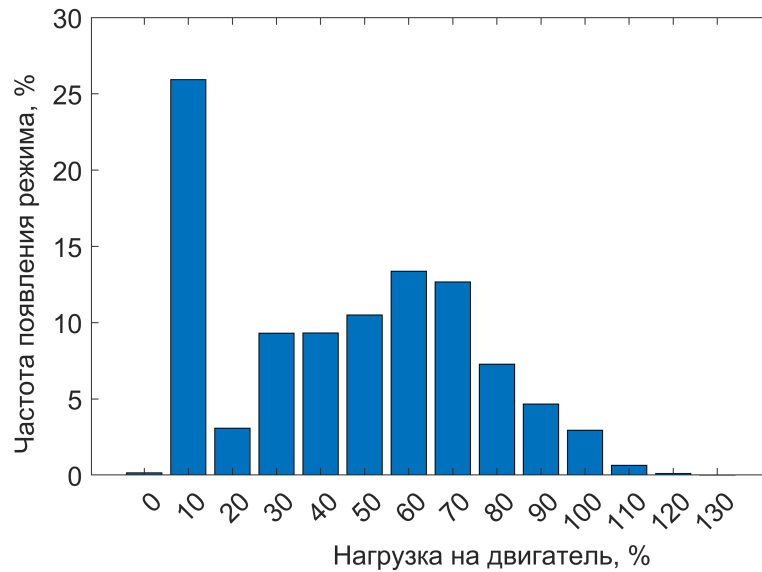
#### 4.1.1 Анализ режимов работы трактора Кировец К-742М

При анализе данных основное внимание уделялось двум ключевым параметрам: частоте вращения коленчатого вала двигателя и нагрузке на него. Для исследуемого трактора номинальное значение частоты вращения составляет 1900 об/мин.

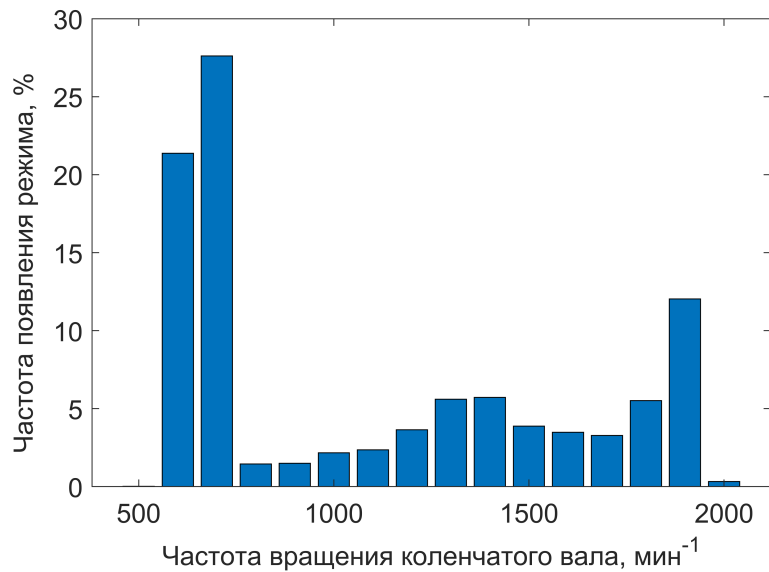
Анализ распределения нагрузок при работе трактора в апреле и мае (рисунок 4.1*а*) показал, что наибольшую долю времени двигатель эксплуатировался с нагрузкой около 10 %. Так как нагрузка определялась по работе системы впрыска — это холостой ход двигателя. Значительное время также занимали режимы в диапазоне 30–70 %.

Распределение частоты вращения коленчатого вала (рисунок 4.1*б*) было значительно более неравномерное. Наиболее часто фиксировались обороты в диапазоне 600–700 об/мин. На номинальной частоте вращения (1900 об/мин) трактор работал не более 15 % времени.

При анализе данных июля и августа (рисунок 4.2) отчетливо видно увеличение появления номинальной частоты вращения коленчатого вала. Преобладающая нагрузка также осталась на значении 10 %, однако распределение остальных изменилось. С ростом нагрузки свыше 40 % частота ее



а

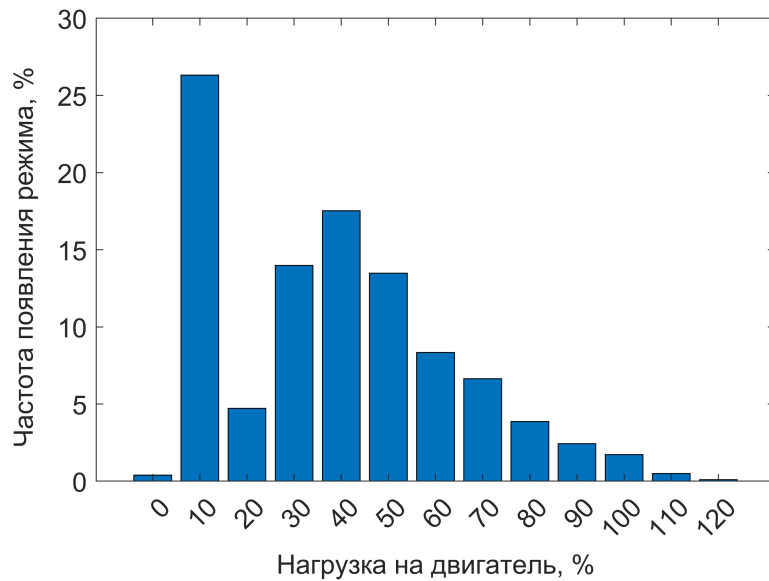


б

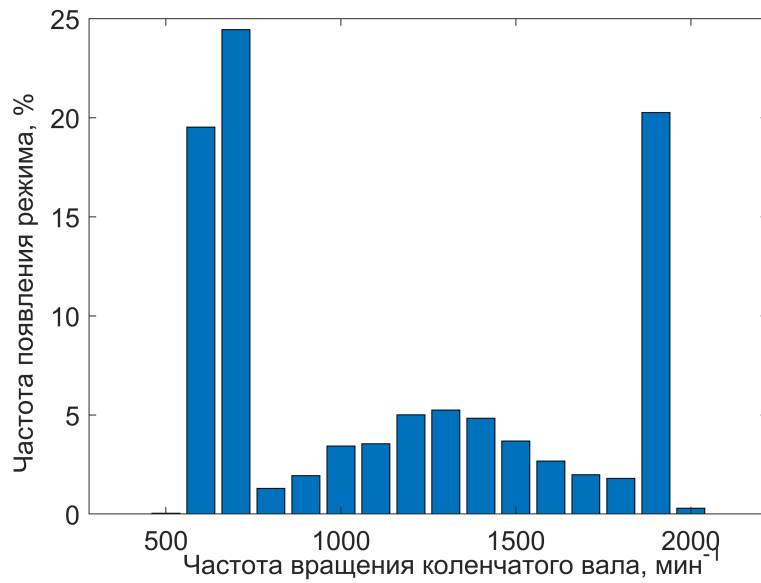
а — частота появления нагрузочных режимов; б — частота появления скоростных режимов

Рисунок 4.1 — Частота появления режимов при работе трактора Кировец К-742М в апреле и мае

появления уменьшается практически экспоненциально. То есть преобладал холостой ход и явно выраженные средние нагрузки. Значительное время занимало перемещение трактора между полями, что не требовало больших мощностей, но, как правило, проходило при максимальных частотах вращения коленчатого вала.



а

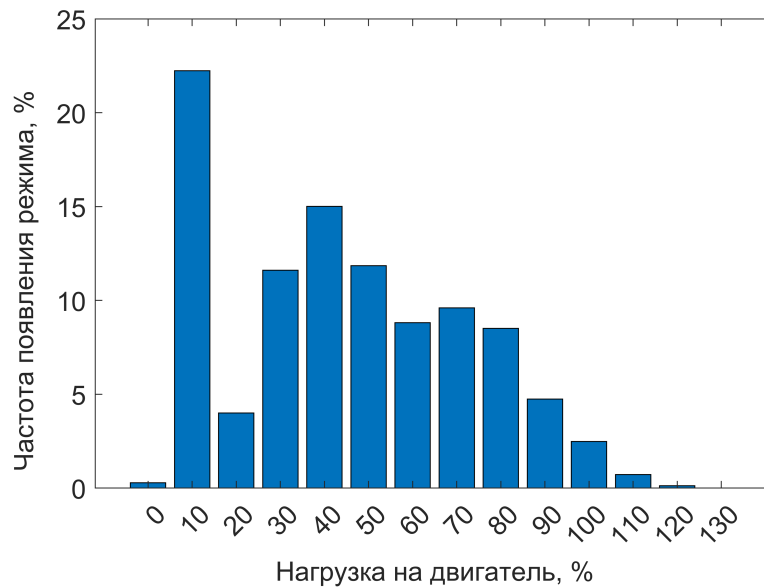


б

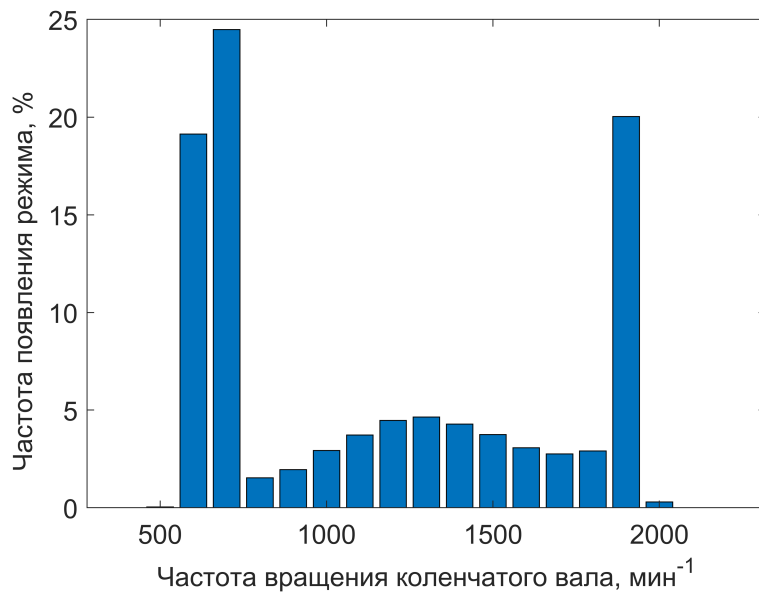
а — частота появления нагрузочных режимов; б — частота появления скоростных режимов

Рисунок 4.2 — Частота появления режимов при работе трактора Кировец К-742М в июле и августе

В целом за год (рисунок 4.3) тенденция практически не меняется: наибольшую долю времени двигатель работал с нагрузкой 10 %. Значительное время также занимали режимы в диапазоне 30–50 % с пиком на 40 %. Остальные нагрузочные режимы встречались с частотой не более 10 % от общего времени. Частота вращения коленчатого вала оставалась преимущественно



а



б

а — частота появления нагрузочных режимов; б — частота появления скоростных режимов

Рисунок 4.3 — Частота появления режимов при работе трактора Кировец К-742М за год

в диапазоне 600–700 об/мин это около 45 % времени, а номинальная частота составляла около 20 % времени.

Таким образом, частотный анализ режимов работы трактора Кировец К-742М показал, что работа трактора в небольшом фермерском хозяйстве сопровождается достаточно большим разнообразием как нагрузок на дви-

гатель, так и частот вращения, но с уклоном к минимальным оборотам холостого хода.

#### 4.1.2 Анализ режимов работы трактора John Deere 6B

Анализ работы трактора в апреле и мае (рисунок 4.4) показал, что преобладающей была нагрузка 10–30 % с дальнейшим падением. При этом на гистограмме распределения оборотов выделяются два пика: в диапазонах 800–900 об/мин и 1700–1800 об/мин.

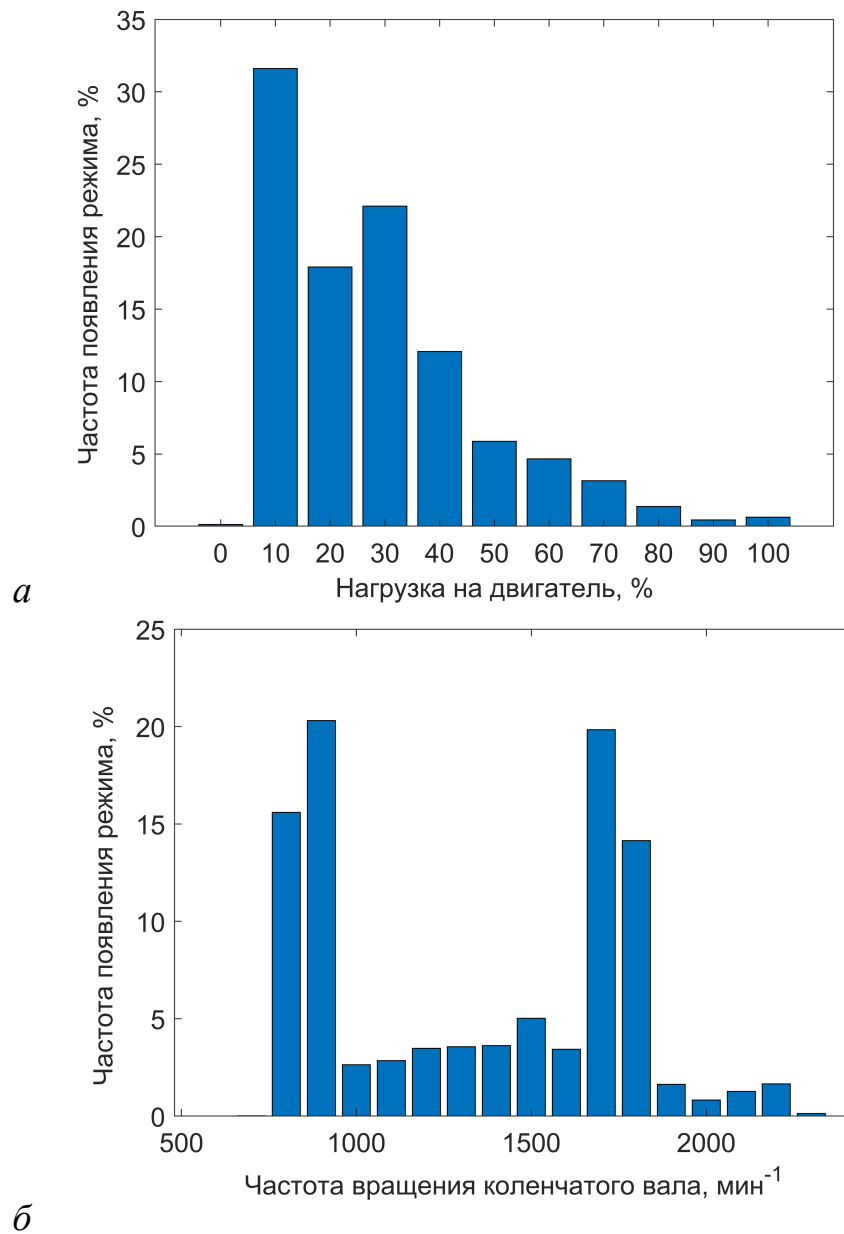
При рассмотрении срока работы трактора за июль и август (рисунок 4.5) картина меняется: на первый план выходит нагрузка 20 %, а пик по оборотам приходится на значение 900 об/мин. То есть преобладали малые нагрузки и частота вращения коленчатого вала, близкая к минимальной.

За год работы трактора (рисунок 4.6) наиболее часто встречаются обороты в диапазоне 800–900 об/мин — их доля составляет 20–25 % от общего времени работы двигателя. Следом идут частоты вращения 1700, 1800 и 2100 об/мин. Эти скоростные режимы наблюдаются с частотой не более 10 %, причем остальные не превышают 5 %. Номинальная частота вращения (2200 об/мин) фиксируется лишь примерно в 1 % времени. В целом диапазон рабочих частот варьируется от 800 до 2200 об/мин. И большинство частот распределены равномерно.

Частота появления нагрузочных режимов (см. рисунок 4.6а) явно напоминает экспоненциальное распределение. И преимущественно трактор работал на малых нагрузках.

Анализ нагрузочных режимов показал, что наибольшую долю времени (более 25 %) двигатель эксплуатировался с нагрузкой 10 %. Значительную продолжительность также имели режимы с нагрузкой 20 и 30 %. Работа с полной нагрузкой встречалась реже всего.

Полученные данные по приведенным моделям тракторов свидетельствуют о том, что в реальных условиях эксплуатация происходит в широком

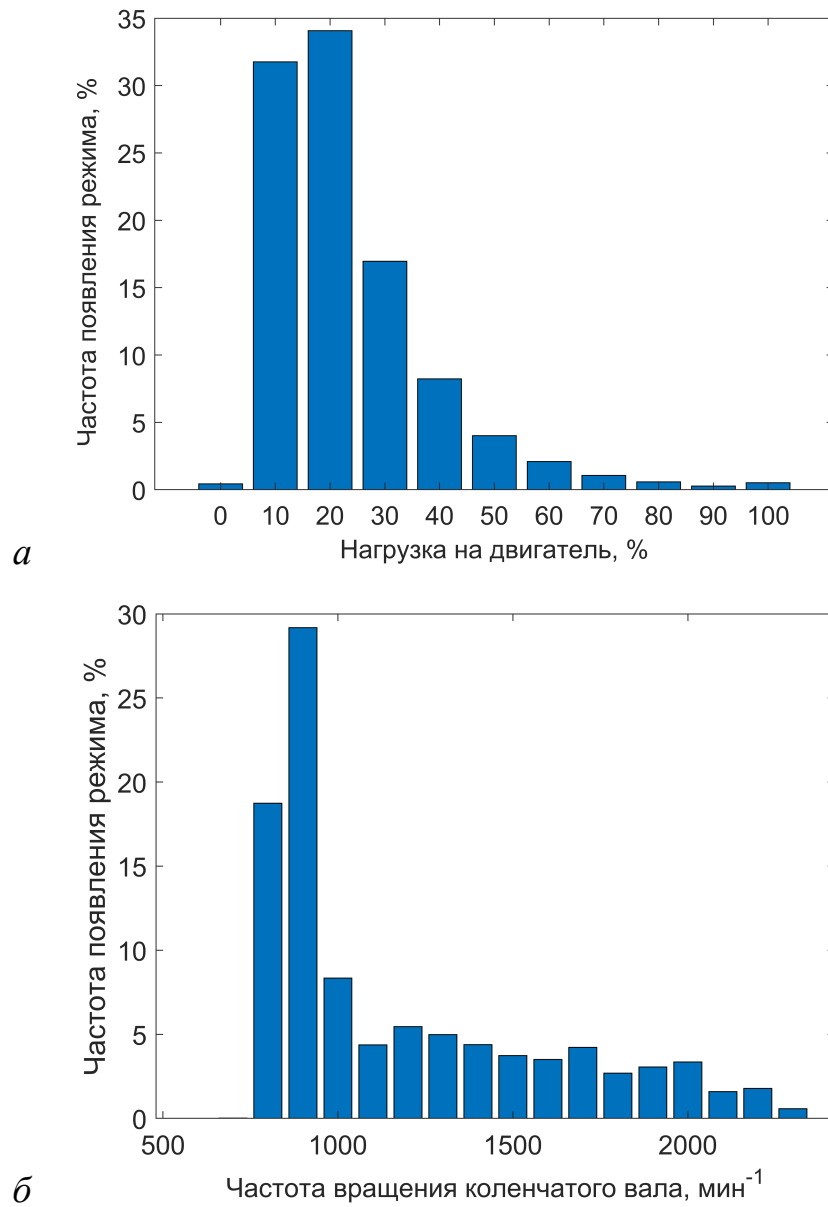


*a* — частота появления нагрузочных режимов; *б* — частота появления скоростных режимов

Рисунок 4.4 — Частота появления режимов при работе трактора John Deere 6B в апреле и мае

диапазоне режимов работы. Гораздо более характерными являются менее напряженные условия.

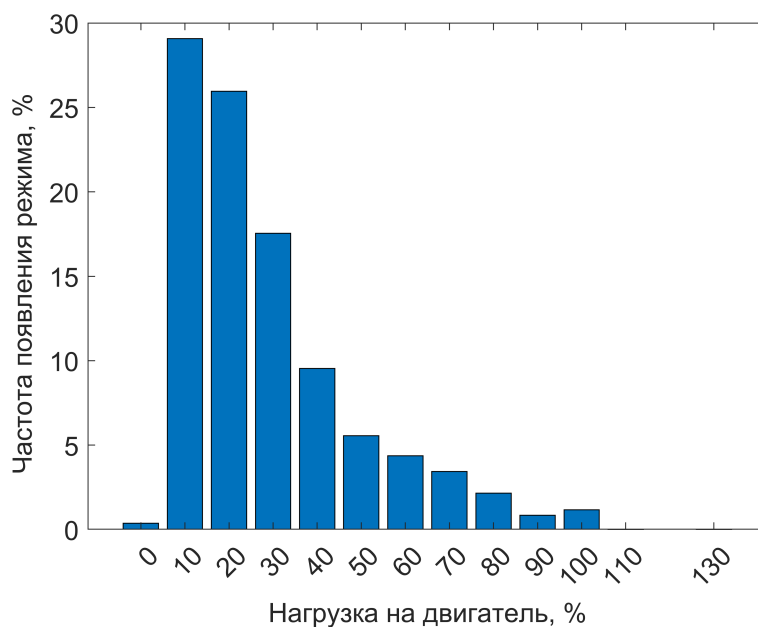
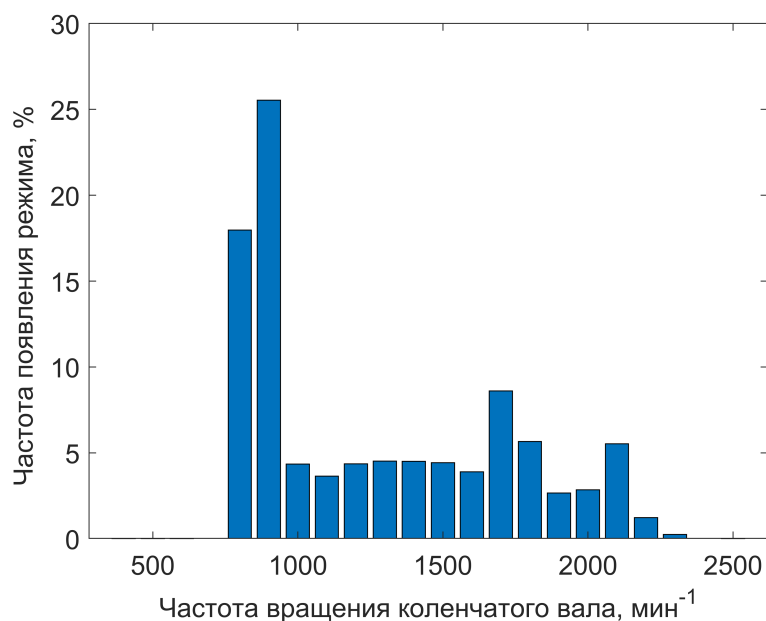
Таким образом, проведенный анализ подтверждает возможность продления сроков эксплуатации масла и обосновывает применимость цифрового



*а* — частота появления нагрузочных режимов; *б* — частота появления скоростных режимов

Рисунок 4.5 — Частота появления режимов при работе трактора John Deere 6В в июле и августе

двойника. Данный вывод также подтвердился фактическими значениями щелочного числа, полученными при отборе проб масла с указанных тракторов.

*a**б*

*a* — частота появления нагрузочных режимов; *б* — частота появления скоростных режимов

Рисунок 4.6 — Частота появления режимов при работе трактора John Deere 6В за год

## 4.2 Параметры модели цифрового двойника и прогнозирование ресурса масла на основе стендового эксперимента

На основе данных, полученных в ходе проведения стендового эксперимента, были определены параметры модели цифрового двойника для

используемых в испытаниях модели двигателя Д-241 и марки масла G-Profi MSI Plus 15W-40.

Определение коэффициентов проводилось по методу нелинейных квадратов, поскольку в ходе предварительных проверочных испытаний было установлено, что данный метод обеспечивает большую точность и устойчивость по сравнению с другими. В результате правильного выбора зоны изменения параметров модели, полученных при рассмотрении теории, подбор параметров осуществлялся достаточно быстро за несколько итераций (рисунок 4.7). Полученные значения коэффициентов модели составили:  $b_1 = -3,5$ ;  $b_2 = 101,8252$ ;  $b_3 = -5,2601 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_4 = -4,6159 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_5 = -6,2209 \times 10^{-7}$ .

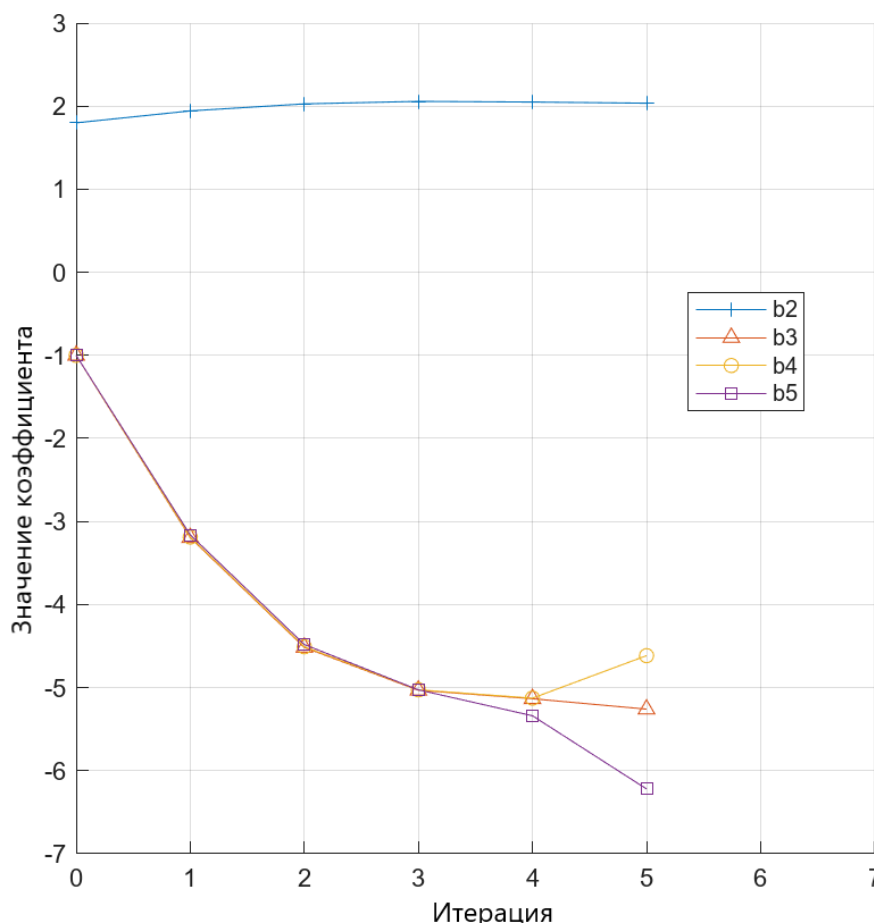


Рисунок 4.7 — Изменение параметров модели цифрового двойника в процессе оптимизации по результатам стендового эксперимента

В процессе идентификации параметров были опробованы различные начальные значения коэффициентов в пределах диапазонов возможных значений. Результаты получаются близкими в пределах заданной погрешности оптимизации. Это хорошо видно на графике (рисунок 4.8).

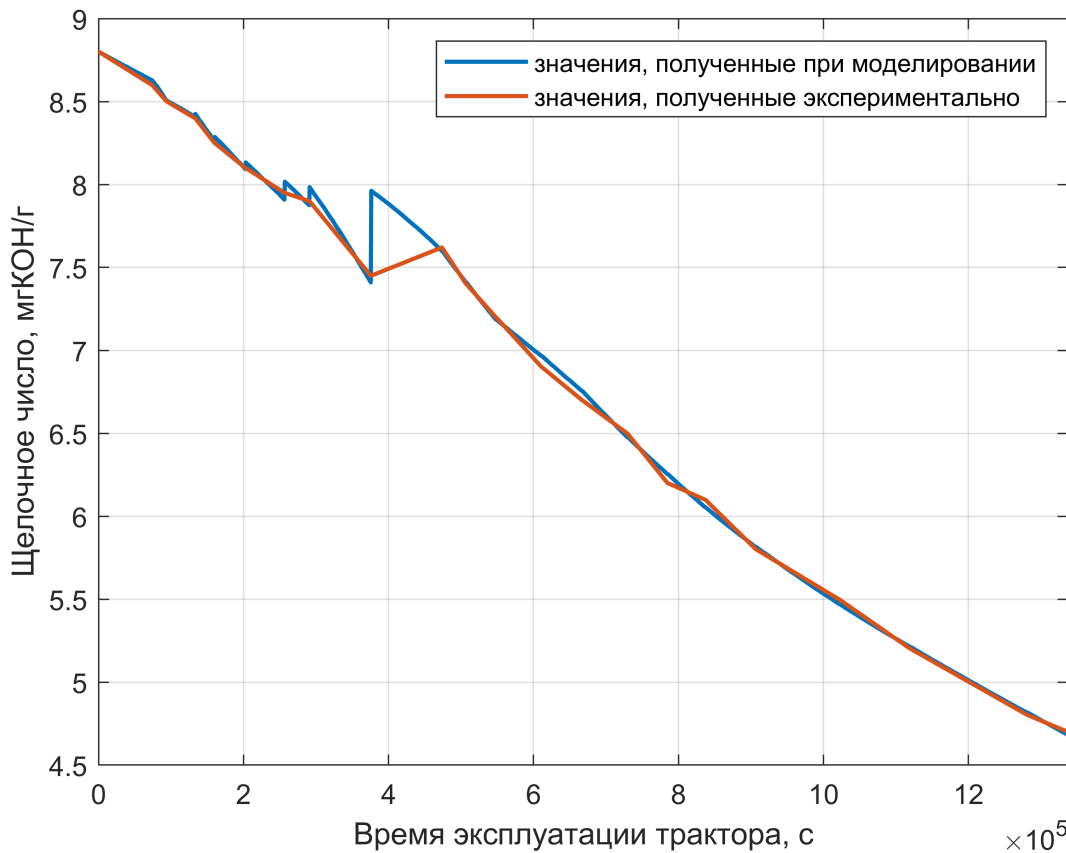


Рисунок 4.8 — Сопоставление результатов моделирования после идентификации параметров модели цифрового двойника с экспериментальными данными, полученными в ходе стендового эксперимента

После подбора коэффициентов расчетная кривая демонстрирует хорошее совпадение с экспериментальными точками. Это свидетельствует о корректности выбранной модели и успешной идентификации ее параметров в рамках проведенных экспериментов. Отдельные расхождения не выходят за пределы погрешности лабораторного определения щелочного числа (0,05 мг КОН/г), обусловленной используемыми методами и оборудованием.

Коэффициенты  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  имеют одинаковый порядок ( $10^{-7}$ ), что свидетельствует о значимом влиянии соответствующих факторов. Поскольку коэффициент  $b_5$ , отвечающий за влияние нагрузочного режима, имеет несколько большее значение по сравнению с коэффициентами  $b_3$  и  $b_4$ , можно сделать вывод, что нагрузочный режим трактора в стендовом эксперименте оказывал большее влияние на скорость изменения щелочного числа, чем скоростной.

Идентифицированная модель цифрового двойника позволяет определять изменение щелочного числа (рисунок 4.9а) для любых заданных режимов работы двигателя трактора. В данном случае получена зависимость без изменения объема масла в картере двигателя, однако в цифровом двойнике возможно учитывать эти условия.

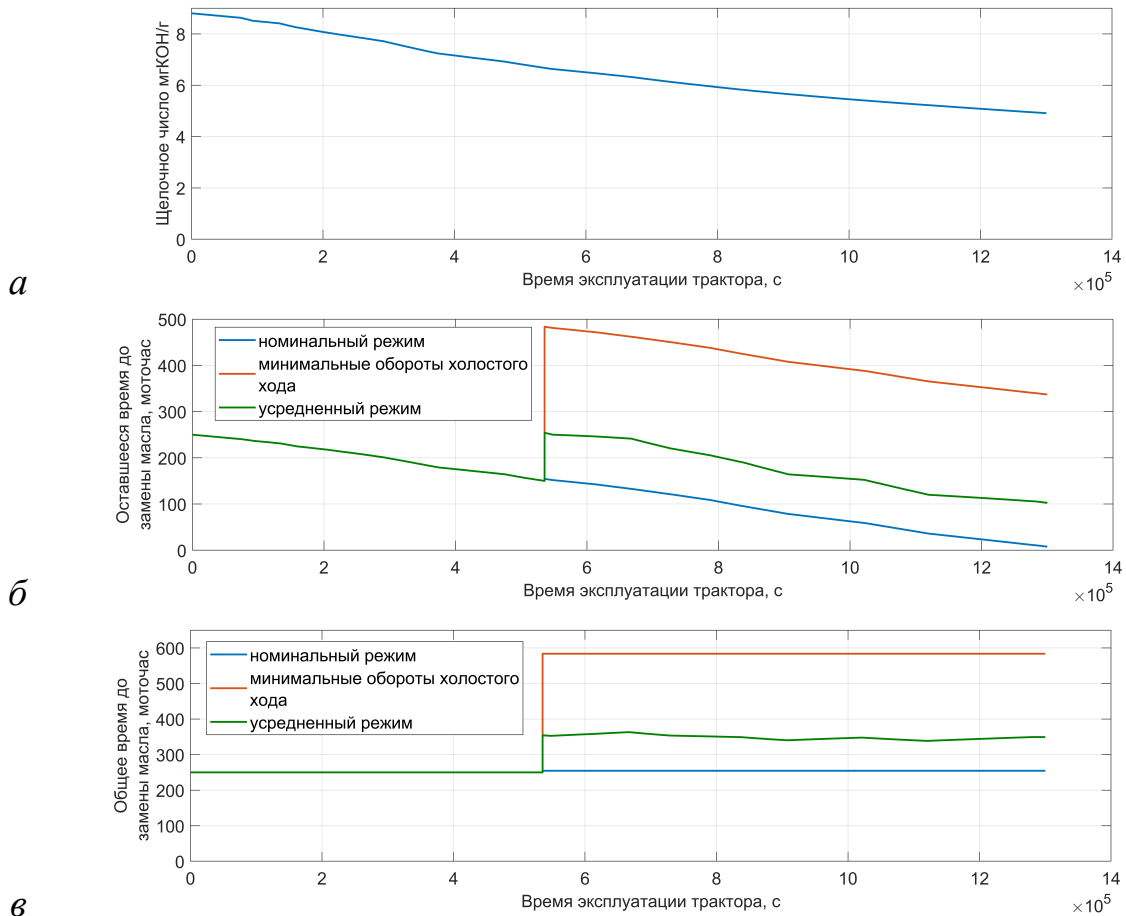
При работе цифрового двойника в любой момент времени возможно получить прогноз оставшегося срока эксплуатации моторного масла (рисунок 4.9б) и общего ресурса с момента последней замены (рисунок 4.9в) для разных условий эксплуатации, например:

- при работе на номинальном режиме;
- при работе на минимальных оборотах холостого хода;
- при режимах аналогичных тем, что уже зафиксированы с момента замены моторного масла.

В представленном варианте прогнозирование началось при наработке в 100 моточасов, что отражено на графиках.

Таким образом, в модели цифрового двойника реализованы два типа прогнозов: оставшееся время работы до замены масла (рисунок 4.9б) и общее время работы между сервисными обслуживаниями (рисунок 4.9в).

При прогнозировании достижения щелочным числом браковочного значения (1,5 мг КОН/г) модель цифрового двойника позволила определить, что при эксплуатации двигателя на минимальных оборотах холостого хода возможно продлить срок использования масла с 250 регламентных до 590



*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 4.9 — Прогнозирование на основе цифрового двойника времени до замены моторного масла для двигателя Д-241 в стендовых испытаниях

моточасов. Данное время является граничным — максимально возможным для используемых в эксперименте марки масла и модели двигателя. В реальных условиях эксплуатации трактора достичь такого времени работы масла маловероятно, поскольку при выполнении сельскохозяйственных операций двигатель работает на более напряженных режимах. Однако при выполнении легких работ сдвиг в этом направлении может быть существенным.

Другим граничным значением является прогноз времени использования масла при эксплуатации двигателя на номинальном режиме. Данный режим является наиболее напряженным, и для него прогнозируется мини-

мальное возможное время использования масла. В данном случае прогноз составил 255 моточасов, что практически совпадает с 250 регламентными моточасами, установленными заводом-изготовителем. Таким образом, этот результат служит валидацией модели и подтверждает соответствие результатов моделирования реальному процессу. Рекомендации завода изготовителя в этом случае подтверждают адекватность модели цифрового двойника.

Прогнозирование также выполнялось для усредненного режима, на котором двигатель эксплуатировался ранее, в процессе стендового эксперимента. Модель цифрового двойника спрогнозировала, что при дальнейшей работе двигателя на примерно идентичных режимах время достижения браковочного значения щелочного числа составит 360 моточасов. Данное значение превышает регламентный срок, что подтверждает целесообразность применения цифрового двойника.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований на основе стендовых испытаний и применение предложенного алгоритма определения параметров модели цифрового двойника позволили определить параметры модели для двигателя Д-241 и моторного масла масла G-Profi MSI Plus 15W-40.

Полученные данные и результаты прогнозирования позволили подтвердить адекватность модели, проведя валидацию по рекомендациям завода-изготовителя.

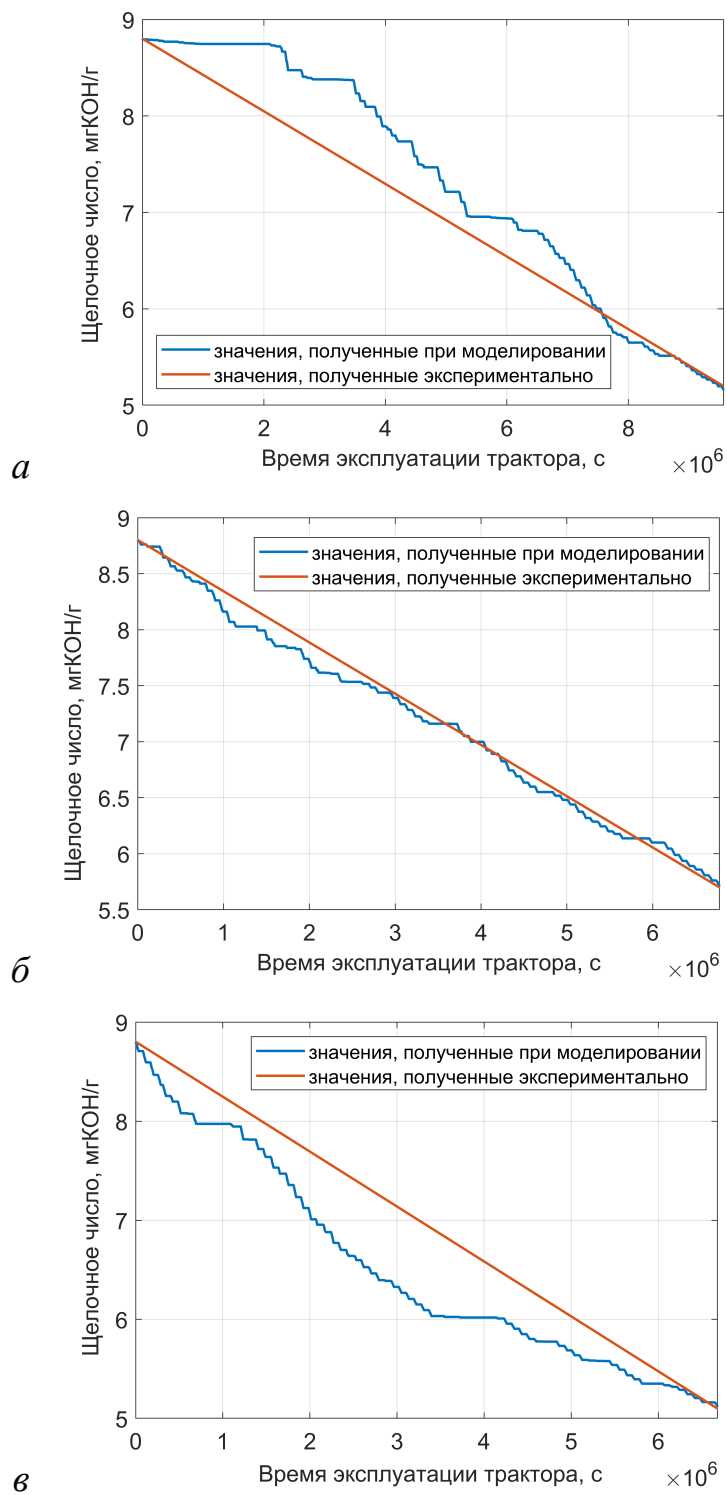
### **4.3 Прогнозирование ресурса масла на основе данных мониторинга, полученных с трактора в эксплуатации**

Идентификация параметров модели цифрового двойника для трактора, находящегося в эксплуатации, выполнялась на основе данных работы John Deere 6В и значений щелочного числа проб масла John Deere Torq-Gard 15W-40.

В результате подбора коэффициентов модели по данным стендовых испытаний были установлены диапазоны возможных значений. Это позволило сократить количество необходимых проб масла в ходе эксплуатационного эксперимента до двух: одна проба свежего масла в момент замены и одна проба отработанного масла в конце срока службы. В дальнейшем каждая замена масла сопровождается уточнением параметров цифрового двойника. В данном случае подбор коэффициентов выполнялся по шести точкам (по результатам трех экспериментов) (рисунок 4.10).

Наибольшим по модулю значением обладает коэффициент  $b_5$ . Это опять же свидетельствует о большем влиянии нагрузочного режима двигателя на изменение щелочного числа, что согласуется с результатами стендового эксперимента. Получены следующие значения коэффициентов:  $b_1 = -2,4581$ ;  $b_2 = 111,8271$ ;  $b_3 = -9,9180 \cdot 10^{-8}$ ;  $b_4 = -7,9837 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_5 = -9,9644 \cdot 10^{-7}$ . Отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных, как и в случае со стендовым экспериментом, не выходят за пределы погрешности лабораторного определения. Относительно низкое (по модулю) значение коэффициента  $b_3$ , отвечающего за скорость изменения щелочного числа при холостом ходе, подтверждает, что основное влияние в этом процессе играют коэффициенты  $b_4$  и  $b_5$ , что также указывает на их значимость.

Для валидации разработанной модели было проведено моделирование изменения щелочного числа моторного масла по данным другого периода работы того же трактора John Deere 6B (с тем же типом масла John Deere Torq-Gard 15W-40), не участвовавшего в идентификации параметров. В процессе эксплуатации трактора были отобраны пробы масла в начальный и конечный моменты, определены их щелочные числа. На рисунке 4.11 представлено сопоставление экспериментальных значений щелочного числа и расчетной кривой, полученной моделью. Расчетная кривая хорошо согласуется с экспериментальными точками, что подтверждает адекватность модели.



*а* — для первого срока работы трактора; *б* — для второго срока работы трактора; *в* — для третьего срока работы трактора

Рисунок 4.10 — Сопоставление результатов моделирования после идентификации параметров модели цифрового двойника с экспериментальными данным, полученными с трактора John Deere 6В

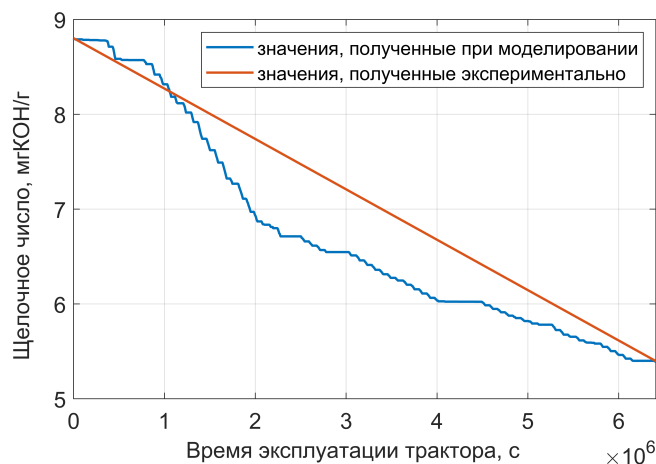
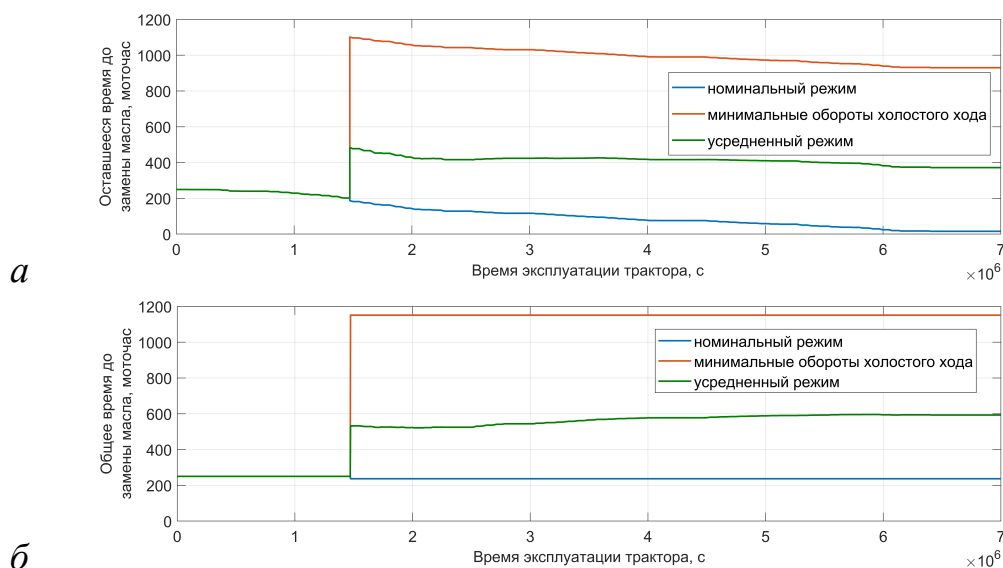


Рисунок 4.11 — Валидация модели цифрового двойника по экспериментальными данными

Как уже было сказано, модель цифрового двойника позволяет получить прогноз остаточного ресурса моторного масла в любой момент времени. На рисунке 4.12 представлен прогноз, выполненный при наработке 50 моточасов, а на рисунке 4.13 — с начала эксплуатации (с 1 моточаса).

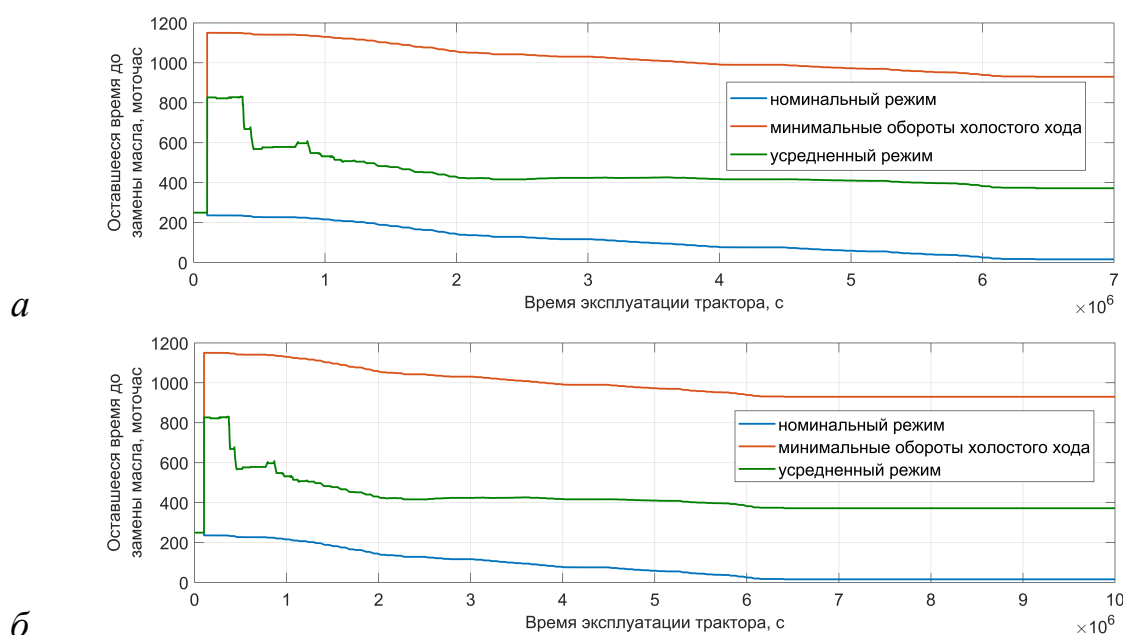


*а* — прогнозирование цифровым двойником оставшегося времени до замены моторного масла; *б* — прогноз общего времени работы двигателя до замены моторного масла

Рисунок 4.12 — Прогнозирование на основе цифрового двойника времени до замены моторного масла для трактора John Deere 6В (начало прогнозирования — 50 моточасов)

Прогноз показал, 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.



**а** — прогнозирование цифровым двойником оставшегося времени до замены моторного масла; **б** — прогноз общего времени работы двигателя до замены моторного масла

Рисунок 4.13 — Прогнозирование моделью цифрового двойника времени до замены моторного масла для трактора John Deere 6B (прогнозирование с 1 моточаса)

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.

Однако конкретные рекомендации по замене моторного масла очень сильно зависят от типа моторного масла и типа и состояния двигателя.

#### 4.4 Выводы

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

2. В результате параметрической идентификации модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла по данным стендового эксперимента на двигателе Д-241 с моторным маслом G-Profi MSI Plus 15W-40 получены коэффициенты модели:  $b_1 = -3,5$ ;  $b_2 = 101,8252$ ;  $b_3 = -5,2601 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_4 = -4,6159 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_5 = -6,2209 \cdot 10^{-7}$ .

3. Прогнозирование ресурса масла с использованием цифрового двойника по результатам стендового эксперимента показало, что при эксплуатации двигателя на номинальном режиме ресурс составляет 255 моточасов, что близко к граничной наработке, рекомендованной изготовителем двигателя, и подтверждает адекватность модели. На режиме холостого хода ресурс может быть продлен до 590 моточасов, а при работе на усредненных режимах (по данным стендового эксперимента) — до 360 моточасов.

4. Мониторинг работы трактора John Deere 6В с моторным маслом John Deere Torq Gard 15W-40 позволил определить коэффициенты модели:  $b_1 = -2,4581$ ;  $b_2 = 111,8271$ ;  $b_3 = -9,9180 \cdot 10^{-8}$ ;  $b_4 = -7,9837 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_5 = -9,9644 \cdot 10^{-7}$ .

5. Прогнозирование ресурса масла для трактора John Deere 6В с использованием цифрового двойника показало, что время достижения браковочного значения щелочного числа при работе на усредненных режимах — 580 моточасов, при работе на холостом ходу — 1150 моточасов, а при экс-

плуатации на номинальном режиме — около 250 моточасов, что в целом соответствует рекомендациям изготовителя и подтверждает адекватность модели.

6. На основе результатов стендового эксперимента на двигателе Д-241 и мониторинга работы трактора John Deere 6В установлено, что наибольшее влияние на скорость изменения щелочного числа оказывает коэффициент модели  $b_5$ , отражающий нагрузочный режим работы двигателя.

7. Результаты проведенных исследований подтверждают, что применение цифрового двойника позволяет увеличить межсервисный интервал замены моторного масла в 1,4...2,3 раза по сравнению с граничной наработкой, рекомендованной изготовителем двигателя (250 моточасов).

## **5 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МОТОРНОГО МАСЛА В ДВИГАТЕЛЕ ТРАКТОРА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА**

### **5.1 Исходные данные для расчета**

С целью определения экономической эффективности применения цифрового двойника процесса деградации моторного масла был проведен соответствующий расчет.

Расчет выполнен на примере эксплуатации колесных тракторов марок МТЗ-80 и John Deere 6В, применяемых в условиях предприятия ООО НПКФ «Агротех-Гарант Березовский». Расчет проведен для 5 тракторов марки МТЗ-80 и 3 тракторов марки John Deere 6В.

Для минимизации рисков, связанных с возможной выработкой ресурса моторного масла, на предприятии принят межсервисный интервал — 250 моточасов. Объем заливаемого моторного масла в картер двигателя в соответствии с технической документацией составляет 12 л для трактора МТЗ-80 и 15 л для трактора John Deere 6В. Среднегодовая наработка одного трактора при условии эксплуатации в две смены составляет 1000 моточасов для МТЗ-80 и 1500 моточасов для John Deere 6В.

Применяются следующие моторные масла: для двигателя трактора МТЗ-80 — масло G-Profi MSI Plus 15W-40 стоимостью 300 рублей за литр, для двигателя John Deere 6В — масло John Deere Torq-Gard 15W-40 стоимостью 500 рублей за литр. Стоимость масляного фильтра для John Deere 6В составляет 1200 рублей. Двигатель МТЗ-80 оснащен центрифугой (роторной очисткой масла), поэтому сменный фильтр отсутствует.

Стоимость одной операции замены масла, включая чистку центрифуги для МТЗ-80 и замену фильтра для John Deere 6В, составляет 2500 рублей для МТЗ-80 и 3000 рублей для John Deere 6В.

Потери от простоя трактора при замене масла могут складываться из нескольких составляющих: недополученная выручка, амортизационные отчисления, заработная плата механизатора и другие. Однако поддающейся точному учету величиной является заработная плата тракториста с начислениями, которую предприятие выплачивает независимо от того, работает трактор или находится на обслуживании.

Минимальная оценка потерь от простоя может быть выполнена на основе данных о заработной плате тракториста. Часовая ставка рассчитывается по формуле

$$C_{\text{час}} = \frac{Z_{\text{мес}}}{N_{\text{дн}} T_{\text{см}}}, \quad (5.1)$$

где  $Z_{\text{мес}}$  — месячная заработная плата тракториста, руб.;

$N_{\text{дн}}$  — количество рабочих дней в месяце;

$T_{\text{см}}$  — продолжительность рабочей смены, час.

Месячная заработная плата тракториста принимается в размере 55 000 рублей. При 22 рабочих днях в месяц и 8-часовой рабочей смене часовая ставка составляет 312,5 руб./час. С учетом страховых взносов (начисления на заработную плату в размере 30 % в соответствии с законодательством РФ) полная часовая ставка составляет 406,25 руб./час.

Время простоя на одну замену масла с учетом чистки центрифуги для МТЗ-80 составляет 1,5 часа, а для John Deere 6В — 1 час.

Прогнозирование остаточного ресурса моторного масла с помощью разработанной модели цифрового двойника было выполнено для нескольких тракторов каждой марки. Для каждого экземпляра модель на основе фактических данных о режимах его работы определяла индивидуальный срок достижения щелочным числом браковочного значения. Полученные таким

образом индивидуальные прогнозы варьировались в зависимости от характера эксплуатации конкретного трактора. Осреднение этих значений позволило установить, что применение цифрового двойника дает возможность увеличить межсервисный интервал замены масла в среднем с регламентных 250 моточасов до 360 моточасов для тракторов МТЗ-80 и до 550 моточасов для тракторов John Deere 6B.

Цифровой двойник процесса деградации моторного масла может быть внедрен в систему мониторинга, установленную на тракторах, в виде дополнительного модуля. Для корректной работы модуля необходимо в первое время собирать пробы масла как минимум при каждой замене. На основе анализа этих проб производится подбор коэффициентов модели изменения щелочного числа масла, то есть выполняется настройка цифрового двойника под конкретный двигатель и марку масла. В дальнейшем, по мере накопления данных, пробы масла продолжают отбираться для уточнения модели.

Модуль предоставляется по плате в размере 100 рублей в месяц за один трактор. В указанную стоимость входит: выезд специалиста для настройки модуля, отбор проб масла при заменах, их анализ, подбор коэффициентов модели, а также поддержание работоспособности цифрового двойника.

Для организации передачи информации о состоянии моторного масла оператору трактора предусматривается установка в каждом тракторе смартфона (стоимостью 6000 руб.) с SIM-картой, предоставляемой бесплатно, и ежемесячной платой за безлимитный интернет-трафик 500 руб. Приобретение смартфонов относится к капитальным вложениям, а ежемесячная плата за связь — к эксплуатационным затратам (наряду с абонентской платой за модуль цифрового двойника). Срок службы приобретенных смартфонов принят равным 3 годам, что соответствует годовой норме амортизации 33,33 % (линейный метод).

Исходные данные для экономической оценки сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 — Исходные данные для расчета

Показатель	MT3-80	John Deere 6B
Количество тракторов, шт.	5	3
Объем заливаемого масла, л	12	15
Стоимость 1 л масла, руб.	300	500
Стоимость масляного фильтра, руб.	—	1200
Стоимость замены масла (с заменой фильтра/чисткой центрифуги), руб.	2500	3000
Потери от простоя, руб./час	406,25	406,25
Время замены масла, час	1,5	1,0
Среднегодовая наработка, моточас	1000	1500
Интервал замены масла, принятый на предприятии, моточас	250	250
Прогнозный интервал замены масла, моточас	360	550
Плата за модуль, руб./мес. на 1 трактор	100	100
Стоимость смартфона на 1 трактор, руб.	6000	6000
Ежемесячная плата за связь, руб./мес. на 1 трактор	500	500
Срок службы смартфонов, лет	3	3

## 5.2 Методика расчета

Число замен масла в год на один трактор определяется по формуле

$$n = \frac{T_{\text{год}}}{T_{\text{инт}}}, \quad (5.2)$$

где  $T_{\text{год}}$  — среднегодовая наработка трактора, моточас;

$T_{\text{инт}}$  — межсервисный интервал замены масла (регламентный или прогнозный), моточас.

Затраты на масло в год на один трактор рассчитываются следующим образом:

$$Z_{\text{масл}} = V_{\text{м}} n C_{\text{л}}, \quad (5.3)$$

где  $V_{\text{м}}$  — объем заливаемого масла, л;

$C_{\text{л}}$  — цена одного литра масла, руб.

Затраты на работы по замене масла

$$Z_{\text{раб}} = n C_{\text{зам}}, \quad (5.4)$$

где  $C_{\text{зам}}$  — стоимость одной замены масла (с чисткой центрифуги для МТЗ-80 или заменой фильтра для John Deere 6В), руб.

Потери от простоев при замене масла

$$Z_{\text{прост}} = C_{\text{час}}^{\text{полн}} n t_{\text{зам}}, \quad (5.5)$$

где  $C_{\text{час}}^{\text{полн}}$  — часовая ставка тракториста с начислениями, руб./час;

$t_{\text{зам}}$  — время замены масла, час.

Общие годовые затраты на один трактор составляют

$$Z_{\text{общ}}^1 = Z_{\text{масл}} + Z_{\text{раб}} + Z_{\text{прост}}. \quad (5.6)$$

Затраты по всему парку тракторов

$$Z_{\text{общ}}^{\text{парк}} = Z_{\text{общ}}^{1,\text{МТЗ}} N_{\text{МТЗ}} + Z_{\text{общ}}^{1,\text{JD}} N_{\text{JD}}, \quad (5.7)$$

где  $N_{\text{МТЗ}}$  — количество тракторов МТЗ-80 в парке, шт.;

$N_{\text{JD}}$  — количество тракторов John Deere 6В в парке, шт.

Годовая экономия от применения цифрового двойника

$$\Delta Z = Z_{\text{общ,рег}}^{\text{парк}} - Z_{\text{общ,дв}}^{\text{парк}}, \quad (5.8)$$

где  $Z_{\text{общ,рег}}^{\text{парк}}$  — годовые затраты при замене по регламенту, руб.;

$Z_{\text{общ,дв}}^{\text{парк}}$  — годовые затраты при использовании цифрового двойника, руб.

Затраты на модуль цифрового двойника для всего парка

$$Z_{\text{мод}} = C_{\text{мес}} 12 N_{\text{общ}}, \quad (5.9)$$

где  $C_{\text{мес}}$  — плата за модуль в месяц на один трактор, руб./мес;

$N_{\text{общ}}$  — общее количество тракторов в парке, шт.

Приобретение смартфонов относится к капитальным вложениям, а плата за связь — к эксплуатационным затратам.

Капитальные вложения

$$K = C_{\text{смарт}} \cdot N_{\text{общ}}, \quad (5.10)$$

где  $C_{\text{смарт}}$  — стоимость одного смартфона, руб.

Годовые эксплуатационные затраты на связь

$$Z_{\text{связь}} = C_{\text{тариф}} \cdot 12 \cdot N_{\text{общ}}, \quad (5.11)$$

где  $C_{\text{тариф}}$  — ежемесячная плата за связь на один трактор, руб./мес.

Годовая экономия от применения цифрового двойника с учетом всех дополнительных эксплуатационных расходов, вычисляется по формуле

$$\Delta Z_{\text{чист}} = \Delta Z - Z_{\text{мод}} - Z_{\text{связь}}, \quad (5.12)$$

Расчет срока окупаемости

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta Z_{\text{чист}}}. \quad (5.13)$$

Амортизационные отчисления на приобретенные смартфоны (срок службы 3 года)

$$A = \frac{K}{T_{\text{сл}}} = K \cdot \frac{N_a}{100}, \quad (5.14)$$

где  $T_{\text{сл}}$  — срок службы смартфонов, лет;

$N_a$  — годовая норма амортизации, %.

Чистая годовая экономия с учетом амортизации

$$\Delta Z_{\text{чист,ам}} = \Delta Z_{\text{чист}} - A. \quad (5.15)$$

Экономическая эффективность оценивается через сравнение ежемесячной экономии с ежемесячными платежами. Ежемесячная экономия на один трактор (до вычета платежей)

$$\Delta Z_{\text{мес}}^1 = \frac{\Delta Z^1}{12}, \quad (5.16)$$

где  $\Delta Z^1$  — годовая экономия на одном тракторе (до вычета платежей).

Ежемесячная чистая экономия на один трактор (после вычета всех платежей)

$$P_{\text{мес}}^1 = \Delta Z_{\text{мес}}^1 - (C_{\text{мес}} + C_{\text{тариф}}). \quad (5.17)$$

### 5.3 Результаты расчета

На основе представленных формул и исходных данных были выполнены расчеты затрат для варианта, реализуемого на предприятии, и варианта с применением цифрового двойника. Расчет производился отдельно для каждого типа трактора с последующим суммированием по парку. Полученные результаты сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 — Затраты при различных способах определения срока замены масла

Показатель	Базовый вариант	Вариант с применением цифрового двойника
Число замен масла в год (МТЗ-80), шт.	4	2,78
Число замен масла в год (John Deere 6B), шт.	6	2,73
Затраты на масло (МТЗ-80), руб./год	14 400	10 008
Затраты на масло (John Deere 6B), руб./год	45 000	20 455
Затраты на работы по замене масла (МТЗ-80), руб./год	10 000	6944

Продолжение табл. 5.2

Показатель	Базовый вариант	Вариант с применением цифрового двойника
Затраты на работы по замене масла (John Deere 6B), руб./год	18 000	8182
Потери от простоев трактора (МТЗ-80), руб./год	2437,5	1693
Потери от простоев трактора (John Deere 6B), руб./год	2437,5	1108
Общие затраты на 1 трактор МТЗ-80, руб./год	26 837,5	18 645
Общие затраты на 5 тракторов МТЗ-80, руб./год	134 187,5	93 225
Общие затраты на 1 трактор John Deere 6B, руб./год	65 437,5	29 745
Общие затраты на 3 трактора John Deere 6B, руб./год	196 312,5	89 235
Итого затраты по парку, руб./год	330 500	182 460

Результаты расчета экономической эффективности представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 — Экономическая эффективность применения цифрового двойника процесса деградации моторного масла

Показатель	Значение
Годовая экономия по парку (до вычета платы за модуль и связь), руб.	148 040
Годовые затраты на модуль и связь, руб.	57 600
Чистая годовая экономия по парку (без учета амортизации), руб.	90 440
Амортизация смартфонов (срок службы 3 года), руб./год	16 000
Чистая годовая экономия с учетом амортизации, руб.	74 440
Капитальные вложения (смартфоны), руб.	48 000
Срок окупаемости капитальных вложений (по денежному потоку), лет	0,53
Экономия в месяц на один трактор МТЗ-80 (до вычета платежей), руб./мес	683

Продолжение табл. 5.4

Показатель	Значение
Экономия в месяц на один трактор John Deere 6В (до вычета платежей), руб./мес	2974
Экономия в месяц на один трактор МТЗ-80 (после вычета всех платежей, без амортизации), руб.	83
Экономия в месяц на один трактор John Deere 6В (после вычета всех платежей, без амортизации), руб.	2374

Как видно из результатов расчетов, экономия достигается с первого месяца использования модуля для обоих типов тракторов.

#### 5.4 Выводы

1. При внедрении цифрового двойника в тракторный парк хозяйства капитальные вложения потребуются на приобретение смартфонов, в частности на парк из восьми тракторов необходимо 48 000 руб. Затраты на модуль цифрового двойника составляют 9 600 руб/год, на один трактор приходится 600 руб/год.

2. Чистая годовая экономия для парка из восьми тракторов — 90 440 руб., срок окупаемости капитальных вложений — 0,53 года. Экономия с одного трактора МТЗ-80 после вычета всех платежей — 83 руб/мес., с одного трактора John Deere 6В — 2 374 руб/мес.

3. Экономический эффект 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что процесс деградации моторного масла в двигателе внутреннего сгорания сопровождается изменением его физико-химических 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 напряженные 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 нагруз-

ки 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дегтярева И. В.* Проблемы развития автомобильной отрасли России и роль государства в инвестиционном процессе отрасли / И. В. Дегтярева, К. В. Косаткин // Уфимский гуманитарный научный форум. — 2023. — № 1(13). — С. 35—45. — DOI: 10.47309/2713-2358\_2023\_1\_35\_45.
2. Периодичность замены моторного масла с учетом условий эксплуатации автомобилей в современных условиях / Д. А. Попов [и др.] // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий : материалы Всероссийской научно-технической конференции. — 2021. — С. 19—22. — DOI: 10.34220/PRTOPT2021\_19-22.
3. *Химченко А. В.* Анализ данных мониторинга режимов работы трактора при выполнении сельскохозяйственных операций / А. В. Химченко, Е. А. Григорьев // Проблемы ресурсобеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 26 сентября 2025 года. — Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. — С. 145—151.
4. *Венцель С. В.* Применение смазочных масел в ДВС / С. В. Венцель. — М. : Химия, 1979. — С. 150.
5. Автомобильные масла, смазки, присадки : справочное пособие / И. И. Гнатченко [и др.] ; под ред. С. Золотарев. — М.; СПб. : ООО «Издательство АСТ»; ООО «Издательство «Полигон», 2000. — С. 360.
6. *Бондаренко И. И.* Определение порогового значения предельной выработки ресурса моторного масла колесного трактора // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — Минск, Республика Беларусь, 2021. — № 2. — С. 191—195.

7. *Карпиевич Ю. Д., Мальцев Н. Г., Бондаренко И. И.* Бортовой мониторинг степени выработки ресурса моторного масла колесных и гусеничных машин // Наука и техника. — 2014. — № 4. — С. 10—14.

8. Испытания трибодатчика для контроля уровня деградации масла / А. Ю. Корнев [и др.] // Наука в центральной России. — 2013. — № 4. — С. 14—18.

9. *Патент № 2183018 С1 РФ, МПК G01N 31/22, G01N 21/78, G01N 33/28.* Способ определения щелочного числа моторных масел : 2001116755/04 / В. В. Остриков, Г. Д. Матыцин ; заявитель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт по использованию техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве. — Заявл. 15.06.2001 ; опубл. 27.05.2002.

10. Оценка влияния эксплуатационных факторов на процесс старения моторного масла / Д. С. Голубев [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. — 2017. — 3(35). — С. 91—97.

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 : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. — С. 63—67.

12. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : монография / под ред. А. И. Боровков. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. — С. 492.

13. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. — М. : Стандартинформ, 2021. — С. 15.

14. Tanwar M., Raghavan N. Lubricating Oil Remaining Useful Life Prediction Using Multi-Output Gaussian Process Regression // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 128897–128907. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3008328.
15. Golbodaghi M., Jafari S. M. Predicting the remaining useful life of diesel engine oil using Gaussian process regression // The Journal of Engine Research. – 2024. – Vol. 71, no. 3. – P. 77–91. – DOI: 10.22034/er.2024.2046647.1069.
16. *Филина О. А.* Функции моторных масел и их примеси / О. А. Филина, С. В. Пасечник, А. Н. Зараменских // Наука сегодня: вызовы и решения: материалы международной научно-практической конференции, Вологда, 25 января 2017 года / Научный центр «Диспут». — Вологда : ООО «Маркер», 2017. — С. 35—36.
17. *Венцель С. В.* Применение смазочных масел в автомобильных и тракторных двигателях / С. В. Венцель. — М. : Химия, 1969. — С. 228.
18. Эксплуатационные материалы : учебник для вузов / А. П. Уханов [и др.]. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Лань, 2025. — С. 532. — ISBN 978-5-507-46754-9. — URL: <https://e.lanbook.com/book/465182> (дата обр. 16.09.2025).
19. *Вербицкий В. В., Курасов В. С., Шепелев А. Б.* Эксплуатационные материалы. — 4-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2024. — С. 76. — ISBN 978-5-507-48579-6. — URL: <https://e.lanbook.com/book/356153> (дата обр. 16.09.2025).
20. *Агровиченко Д. В., Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н.* Результаты исследования влияния доливов на термоокислительную стабильность синтетических моторных масел // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2018. — № 4. — С. 315—322.
21. *Парфёнов З. В., Корниенко В. Н.* Анализ браковочных показателей моторных масел // Повышение эффективности эксплуатации машин в АПК на основе современных технологий : материалы внутривузовской

научно-технической конференции, Новосибирск, 12 апреля 2022 года. — Новосибирск : Новосибирский государственный аграрный университет, Инженерный институт, 2022. — С. 22—25.

22. *Каня В. А.* Эксплуатационные материалы : электронный ресурс: курс лекций / В. А. Каня, В. С. Пономаренко ; Министерство образования и науки Российской Федерации; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)», кафедра «Тепловые двигатели и автотракторное оборудование». — Омск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)», 2015. — С. 277. — ISBN 978-5-93204-801-6.

23. *Кузнецов А. В.* Топливо и смазочные материалы: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности 311300 «Механизация сел. хоз-ва». — М. : КолосС, 2004. — С. 198.

24. *Васильева Л. С.* Автомобильные эксплуатационные материалы: учебник для студентов вузов. — М. : Наука-Пресс, 2003. — С. 420.

25. *Данилогорский Д. И.* Анализ процесса старения моторного масла в двигателе внутреннего сгорания / Д. И. Данилогорский, Б. Джан, А. Д. Бреки // Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2024: материалы 1-й Международной научно-практической конференции, Санкт - Петербург, Россия, 21–22 июня 2024 года. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. — С. 314—321. — DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-264.

26. *Зеленцов В. В., Крупа В. В.* Эксплуатационные свойства и тепловые режимы поршневых автомобильных двигателей внутреннего сгорания: (Анализ теплового режима деталей и систем ДВС при эксплуатации наземных транспортно-технологических систем). — Н. Новгород : Типография НГТУ, 2002. — С. 70.

27. Григорьев М. А. Качество моторного масла и надежность двигателей / М. А. Григорьев, Б. М. Бунаков, В. А. Долецкий. — М. : Издательство стандартов, 1981. — С. 232.

28. Салмин В. В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных двигателей совершенствованием трибохимических и гидротермодинамических процессов в смазочных системах : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Салмин В. В. — Саранск, 2003. — 475 с.

29. Гурвич И. Б., Сыркин П. Э., Чумак В. И. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Транспорт, 1994. — С. 144.

30. Кошелев А. В. Ресурсосберегающая технология очистки системы смазки дизельных двигателей сельскохозяйственных машин от загрязнений составом на основе отработанного моторного масла : дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1. / Кошелев А. В. — Тамбов, 2025. — 181 с.

31. Патент № 2528421 С1 Российская Федерация, МПК С10М 175/02, С10G 21/20, С10G 49/18. Способ очистки моторного масла от продуктов старения и загрязнений : № 2013130794/04 : заявл. 04.07.2013 : опубл. 20.09.2014 / В. В. Остриков, С. Ю. Попов, А. Г. Зимин ; заявитель Государственное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии).

32. Григорьев М. А. Комбинированные системы очистки масла дизеля / Григорьев М. А., Кенжебаев С. О., Волков В. И. // Автомобильная промышленность. — 1992. — № 7. — С. 14—16.

33. Григорьев М. А. Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях. — М. : Машиностроение, 1970. — С. 270.

34. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости : учебное пособие / В. В. Остриков [и др.]. — Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. — С. 391.

35. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot / A. A. S. Omar [и др.] // Tribology International. — 2021. — Т. 160. — С. 107054. — DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107054.

36. *Лиханов В. А., Деветьяров Р.* Производство и классификация моторных масел : учебное пособие. — Киров : Вятская ГСХА, 2010. — С. 114.

37. *Колесников К. А.* Обзор современных присадок моторного масла и их влияние на работу двигателя / К. А. Колесников // Cifra. Машиностроение. — 2024. — № 2(3). — DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.5.

38. *Сырбаков А. П., Корчуганова М. А.* Топливо и смазочные материалы : учебное пособие. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. — С. 159.

39. *Беляев С. В.* Применение моторных масел в ДВС : учебник. — М. ; Вологда : Инфра-инженерия, 2023. — С. 132. — ISBN 978-5-9729-1379-4.

40. *Серебряков М. А.* Влияние обводнения на старение моторного масла и состояние судового дизеля / М. А. Серебряков // Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта: материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием, Владивосток, 16–17 ноября 2022 года. — Владивосток : Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2022. — С. 44—50.

41. *Лаушкин А. В.* Причины обводнения моторного масла в эксплуатации / А. В. Лаушкин, А. А. Хазиев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2012. — № 1(28). — 63а—67.

42. *Картошкин А. П., Колпаков В. Е.* Методы и средства теплового контроля мощностных показателей мобильного сельскохозяйственного агрегата. — М. : ИКЦ «Колос-С», 2022. — С. 256.

43. *Тарасов М. И., Кича Г. П.* Кинетика старения моторного масла в судовых дизелях при непрерывном и периодическом его доливе для ком-

пенсации угара // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 68—76. — DOI: 10.24143/2073-1574-2023-1-7-14.

44. Влияние доливов на процессы окисления моторных масел / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2011. — 4(86). — С. 58—63.

45. *Тарасов М. И., Кича Г. П., Надежкин А. В.* Влияние угара смазочного масла на интенсивность его старения в судовом тронковом дизеле // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4—3(54). — С. 56—65. — DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.089.

46. Результаты исследования влияния доливов на показатели термоокислительной стабильности минерального моторного масла Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC / Б. И. Ковальский [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — 5(123). — С. 168—175. — DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-168-174.

47. *Надежкин А. В., Соколова И. В.* Имитационное моделирование влияния режимов долива моторного масла на эффективность эксплуатации судовых двигателей // Научные труды Дальрыбвтуза. — Владивосток, 2022. — Т. 24. — С. 98—102.

48. ГОСТ 17479.1-2015. Масла моторные. Классификация и обозначение. — Введ. 2016-07-01. — М. : Стандартинформ, 2015. — С. 16.

49. ГОСТ 8581—2021. Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия. — Введ. 2022-07-01. — М. : Стандартинформ, 2021. — С. 24.

50. ГОСТ 10541-2020. Масла моторные универсальные и для автомобильных карбюраторных двигателей. Технические условия. — Введ. 2021-07-01. — М. : Стандартинформ, 2020. — С. 18.

51. ГОСТ 32511-2013 (EN 590-2009) Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия Diesel fuel EURO. [Текст]. — Введ. 2015-01-01. — М. : Стандартинформ, 2017. — 7 с. — (Межгосударственный стандарт).

52. Порохня А. А., Якименко И. Ю., Порохня Е. А. Совершенствование системы нормирования ресурса моторного масла для сельскохозяйственных тракторов // Современные материалы, техника и технологии. — 2019. — 5(26). — С. 240—249.

53. ГОСТ 33113-2014. Топливо базовое биодизельное В100 и смеси биодизельные. — Введ. 2015-07-01. — М. : Стандартинформ, 2014.

54. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия : Межгосударственный стандарт. — М., 2014.

55. Смазочная способность биокеросина / Д. А. Уханов [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. — 2025. — Т. 10, № 1. — С. 17—21. — DOI: 10.55170/1997-3225-2025-10-1-17-21.

56. ASTM D 6751-23. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2023. — С. 9.

57. РД 37.001.019-84. Методика диагностирования технического состояния автомобильных двигателей по показателям работающего масла. — М. : НАМИ, 1984.

58. 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 : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. — С. 142—147.

59. Пилипенко Е. М., Попов Д. А. Анализ факторов, влияющих на интенсивность износа моторных масел // Воронежский научно-технический вестник. — 2019. — 1 (27). — С. 47—52.

60. *Соломахин Ю. В., Чех В. Ю.* Периодичность замены моторного масла при различных условиях эксплуатации // *Успехи современной науки.* — 2016. — № 6. — С. 54—57.

61. *Шилин Б. И., Захарова А. С.* Эксплуатационные факторы, влияющие на процесс старения моторного масла автотракторных двигателей // *Новые материалы и технологии в машиностроении.* — 2018. — № 28. — С. 104—107.

62. *Долгова Л. А., Салмин В. В.* Расчетное определение времени работы моторного масла в двигателе внутреннего сгорания // *Международный технико-экономический журнал.* — 2020. — № 3. — С. 47—53. — DOI: 10.34286/1995-4646-2020-72-3-47-53.

63. Оценка влияния качества дизельного топлива и характеристик моторного масла на изменение его свойств в ДВС и срок службы / *В. В. Остриков [и др.]* // *Наука в Центральной России.* — 2020. — 2 (44). — С. 99—104. — ISSN 2305-2538. — DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-99-104.

64. *Остриков В. В., Кошелев А. В., Вязникин В. С.* Изменение характеристик моторных масел в двигателях зерноуборочных комбайнов в период эксплуатации и межсезонного хранения // *Наука в центральной России.* — 2023. — 2(62). — С. 106—114. — DOI: 10.35887/2305-2538-2023-2-106-114.

65. *Перминов Б. Н.* Теоретическое исследование старения моторного масла в судовых тронковых дизелях // *Труды Дальневосточного государственного технического университета.* — 2004. — № 137. — С. 162—169.

66. *Кузин Е. Г., Шальков А. В.* Анализ факторов деградации моторного масла карьерных самосвалов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* — 2025. — № 12/3. — С. 100—116. — DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_123\_0\_100.

67. *Голубев Д. С.* Влияние условий эксплуатации БМД-4м на закономерности изменения свойств моторного масла в дизеле УТД-29 / *Д. С.*

Голубев, С. С. Штурманов, А. В. Духно // Военный инженер. — 2021. — № 1(19). — С. 42—46.

68. *Верещагин В. И.* Результаты исследования изменения состояния полусинтетического моторного масла при температурных воздействиях / В. И. Верещагин, О. Н. Петров, В. И. Афанасов // *Cifra. Машиностроение*. — 2024. — № 2(3). — DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.1.

69. Результаты исследования влияния процессов окисления на вязкостно-температурные характеристики частично синтетических моторных масел / Е. А. Ефремова [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. — 2021. — № 5(349). — С. 9—14. — DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-9-14.

70. *Omiya T., Hanyuda K., Nagatomi E.* Predicting engine oil degradation across diverse vehicles and identifying key factors // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2025. — Т. 229. — С. 112524. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112524>.

71. The role of soot particles in the tribological behavior of engine lubricating oils / Е. Hu [и др.] // *Wear*. — 2013. — Т. 304, № 1. — С. 152—161. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.05.002>.

72. Experimental investigation into the effects of diesel dilution on engine lubrication / М. Yu [и др.] // *Tribology International*. — 2021. — Т. 156. — С. 106828. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106828>.

73. Characterising the effects of simultaneous water and gasoline dilution on lubricant performance / J. Zhang [и др.] // *Tribology International*. — 2023. — Т. 179. — С. 108089. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108089>.

74. *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 : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. — С. 359—364.

75. *Patent US 6,327,900 B1. Oil life monitor for diesel engines / J. E. McDonald [et al.] ; Applicant, patent holder General Motors Corporation. — № US 09/467,499; declared 20.12.1999; published 11.12.2001.*

76. ГОСТ 11362-96 (ИСО 6619-88) Нефтепродукты и смазочные материалы. Число нейтрализации. Метод потенциометрического титрования. — М. : Изд-во стандартов, 2009. — С. 107.

77. ГОСТ 20502-75 Масла и присадки к маслам. Метод определения коррозионности. — М. : Изд-во стандартов, 1975. — С. 13.

78. ГОСТ 24943-81 Масла моторные. Фотометрический метод оценки загрязненности работавших масел. — М. : Изд-во стандартов, 2005. — С. 5.

79. ГОСТ 33-2000 (ИСО 3104-94) Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. — М. : Изд-во стандартов, 2008. — С. 19.

80. ГОСТ 3900-85 Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности. — М. : Изд-во стандартов, 1985. — С. 40.

81. ГОСТ 4333-87 Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле. — М. : Изд-во стандартов, 2005. — С. 8.

82. *Гурьянов Ю. А. Показатели работающих моторных масел и методы их определения // Автомобильная промышленность. — 2005. — № 10. — С. 20.*

83. *Патент № 2194973 Российская Федерация, МПК G01N 21/67. Способ определения технического состояния двигателей и других машин и механизмов по характеристикам микропримесей металлов, обнаруженных в смазочных маслах, топливах и специальных жидкостях : 99109741/28 /*

А. Б. Алхимов, В. Г. Дроков, А. Д. Казмиров [и др.] ; заявитель Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета. — Заявл. 11.05.1999 ; опубл. 20.12.2002.

84. *Авлиекулов Ж. С., Нарзиев С. О., Магдиев Ш. П.* Исследование периодичности замены моторного масла в условиях эксплуатации // Вестник науки и образования. — 2021. — 9—3(112). — С. 16—19. — DOI: 10.24411/2312-8089-2021-10912.

85. *Остриков В. В., Корнев А. Ю., Бусин И. В.* Контроль работающих масел с помощью экспресс-методов оценки качества // Инновации в сельском хозяйстве. — 2015. — 3(13). — С. 174—177.

86. *Покровский В. В.* Проект лаборатории экспресс-анализа технических жидкостей и смазочных материалов на базе автотранспортного предприятия / В. В. Покровский // Управление качеством в транспортной и социальной сферах: материалы XLIV студенческой научной конференции, Оренбург, 19–26 апреля 2022 года. — Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2022. — С. 14—18.

87. *Долгова Л. А.* Совершенствование методов и средств контроля качества моторных масел в условиях эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Долгова Лариса Александровна. — Саранск, 2022.

88. *Патент № 2578754 С1 Российская Федерация, МПК F01M 11/10.* Устройство для контроля масла в ДВС : 2014154458/06 / А. А. Семенов, В. В. Салмин, И. И. Артемов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пензенский государственный университет"(ФГБОУ ВПО "Пензенский государственный университет"). — Заявл. 30.12.2014 ; опубл. 27.03.2016.

89. *Патент № 2251705 Российская Федерация, МПК G01R 27/26.* Устройство для измерения и контроля диэлектрической проницаемости диэлектрических сред : 2002134155/28 / А. С. Яровенко, В. С. Барабохин, О. В.

Солопов [и др.] ; заявитель ОАО "НК Роснефть-ТуапсеНефтепродукт". — Заявл. 19.12.2002 ; опубл. 10.05.2005.

90. *Патент № 2303787 Российская Федерация, МПК G01R 27/26.* Способ измерения диэлектрической проницаемости жидких и плоских твердых диэлектриков : 2006109893/28 / Н. М. Алейников, А. Н. Алейников ; заявитель ГОУ ВПО "Воронежский государственный университет". — Заявл. 27.03.2006 ; опубл. 27.07.2007.

91. *А. с. № 1698831 СССР, МПК G01R 27/26, G01N 22/00.* Измерительная ячейка для исследования диэлектрических параметров образца : 4751870/21 / Ю. Ф. Зуев, Ю. Д. Фельдман, Е. А. Польшгалов ; заявитель Казанский институт биологии. — Заявл. 21.10.1989 ; опубл. 15.12.1991. — 4 с.

92. *Карпиевич Ю. Д., Русакевич Д. А., Бондаренко И. И.* Диэлектрическая проницаемость как показатель степени выработки ресурса моторного масла // *Агропанорама.* — 2018. — № 6. — С. 32—34.

93. *Патент № 57007 U1 РФ, МПК G01N 11/10.* Устройство для оценки загрязненности механическими примесями моторного масла двигателя внутреннего сгорания : 2005140771/22 / С. В. Никонов, В. М. Пащенко, Е. В. Лунин ; заявитель ФГОУ ВПО Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора П.А. Костычева. — Заявл. 26.12.2005 ; опубл. 27.09.2006.

94. *Верещагин В. И., Ковальский Б. И., Попов А. С.* Методика оценки ресурса моторных масел // *Вестник КрасГАУ.* — 2007. — № 6. — С. 169—174.

95. *Верещагин В. И., Ковальский Б. И., Рунда М. М.* Результаты исследования состояния моторного масла при эксплуатации двигателя // *Известия Томского политехнического университета.* — Томск, 2013. — Т. 322, № 2. — С. 157—159.

96. *Аметов В. А.* Повышение эксплуатационной надежности агрегатов автотранспортных средств путем контроля и модифицирования смазочного масла : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10 / Аметов В. А. — Тюмень, 2006. — 44 с.

97. *А. с. № 935774 СССР, МПК G01N 27/22.* Способ определения эксплуатационных качеств картерных масел : Авторское свидетельство 3216275/18—25 / Р. Б. Ахметкалиев, Н. К. Надиров ; заявитель Институт химии нефти и природных солей АН КАЗССР. — Заявл. 20.10.1980 ; опубл. 15.06.1982. — 4 с.

98. *Патент № 1673945 Российская Федерация, МПК G01N 27/02.* Способ контроля эксплуатационных свойств смазочного масла : Патент 4731748 / Н. М. Маряхин, П. А. Калинин, В. Л. Лашхи [и др.] ; заявитель Государственный научно-исследовательский институт по химмотологии. — Заявл. 24.08.1989 ; опубл. 30.08.1991. — 4 с.

99. *Патент № 2110788 Российская Федерация, МПК G01N 21/76.* Способ определения оставшегося срока службы смазочного масла и устройство для его осуществления : Патент 93042756/25 / В. Н. Петров, В. М. Кремешный ; заявители Петров В. Н., Кремешный В. М. — Заявл. 27.08.1993 ; опубл. 10.05.1998.

100. *Патент № 2207556 Российская Федерация, МПК G01N 27/02 G01R 27/26.* Способ определения качества минеральных моторных масел и причин, вызывающих его изменения : Патент 2002102416/28 / В. А. Бабенко, Л. К. Васильева, З. Д. Иванова [и др.] ; заявитель АО закрытого типа "Производственно-коммерческий центр "Меридиан. — Заявл. 18.01.2002 ; опубл. 27.06.2003.

101. *Патент № 2305274 Российская Федерация, МПК G01N 21/67.* Способ оценки степени выработки ресурса смазочного материала : Патент 2006108893/28 / Ю. С. Саркисов, В. Б. Антипов, Ю. И. Цыганюк [и др.] ; ГОУ ВПО "Томский государственный архитектурно-

строительный университет”(ГОУ ВПО ”ТГАСУ”) and ФГНУ ”Сибирский физико-технический институт им. академика В.Д. Кузнецова”. — Заявл. 21.03.2006 ; опубл. 27.08.2007.

102. *Патент № 1337743 Российская Федерация, МПК G01N 21/78, G01N 31/32.* Способ оценки качества смазочного масла : Патент 3988714 / А. В. Непогодьеv, Н. Г. Баклина, С. В. Поляков ; заявитель Рязанский опытный завод всесоюзного научно-исследовательского института по переработке нефти. — Заявл. 14.10.1985 ; опубл. 15.09.1987.

103. *Патент № 989476 Российская Федерация, МПК G01N 31/16, G01N 33/28.* Способ автоматического контроля кислотных чисел : Патент 2335891 / Я. И. Турьян [и др.] ; заявитель Краснодарский Ордена трудового красного знамени политехнический институт. — Заявл. 22.03.1976 ; опубл. 15.01.1983. — 5 с.

104. Математическое моделирование изменения примесей в моторном масле автомобильного дизеля / А. С. Денисов, А. М. Сычев, А. В. Кожинская, А. М. Биниязов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2020. — № 4(87). — С. 16—26.

105. Математическая модель динамики процессов изменения состояния масла дизеля при нарушениях в работе элементов его систем / А. С. Денисов, Л. Х. Сарсенбаева, А. М. Сычев, А. В. Кожинская // Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств: Сборник научных трудов по материалам XVI Международной научно-технической конференции, Саратов, 16 апреля 2021 года. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2021. — С. 227—235.

106. *Патент № 2184950 Российская Федерация, МПК G01N 21/31.* Устройство для идентификации и контроля качества нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов : 2001114142/28 / А. Ф. Страхов, И. В.

Чечкенов, О. А. Страхов ; заявитель Московское конструкторское бюро "Параллель". — Заявл. 28.05.2001 ; опубл. 10.07.2002.

107. *Patent US 4,677,847. Automotive engine oil monitoring system / T. Sawatari, M. Nakamura, T. Sugiura ; Applicant, patent holder Aisin Seiki Kabushiki Kaisha. — № US 781,501; declared 30.09.1985; published 07.07.1987.*

108. Исследование процессов старения моторного масла при различных режимах работы двигателя / А. Ю. Шабанов [и др.] // Труды ГОСНИТИ. — 2015. — Т. 120. — С. 64—68.

109. *Наглюк И. С. Математические модели срока смены моторного и трансмиссионного масел при эксплуатации автомобилей / И. С. Наглюк // Вісник СевНТУ. — 2012. — № 135. — С. 160—163.*

110. *Du Y., Wu T., Makis V. Parameter estimation and remaining useful life prediction of lubricating oil with HMM // Wear. — 2017. — Т. 376/377. — С. 1181—1187. — DOI: 10.1016/j.wear.2016.11.047.*

111. *А. с. № 1283630 СССР, МПК G01N 21/59. Способ определения степени аэрации смазочных масел в потоке : 39569358/28—25 / В. И. Ганьшин, Г. И. Гурин, И. А. Филановский ; заявитель Калининградское высшее инженерное морское училище. — Заявл. 26.07.1985 ; опубл. 15.01.1987. — 5 с.*

112. *А. с. № 455272 СССР, МПК G01N 11/00. Устройство для определения качества масла : 1652904/26—25 / В. Н. Сердечный ; заявитель Северный научно-исследовательский институт промышленности. — Заявл. 26.04.1971 ; опубл. 30.12.1974. — 4 с.*

113. *Нигматуллин Р. Г., Костенков Д. М., Хафизова А. Г. Экспресс-устройство для определения степени разбавления моторных масел топливом и изнашивания двигателя // Химия и технология топлив и масел. — 2012. — № 1. — С. 52—53.*

114. Патент № 2006847 Российская Федерация, МПК G01N 27/22, G01N 27/92. Способ экспрессного контроля содержания воды в маслах и топливах : 904828808 / В. В. Леонов, А. П. Быстрицкая, Ю. А. Никанов ; заявители Леонов В. В., Быстрицкая А. П., Никанов Ю. А. — Заявл. 28.05.1990.

115. Патент № 2057326 Российская Федерация, МПК G01N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов : 925046019 / Б. И. Ковальский, Л. Н. Деревягина, И. А. Кириченко ; заявитель Государственный проектный научно-исследовательский и конструкторский институт "Красноярский промстройиниипроект". — Заявл. 04.06.1992 ; опубл. 04.06.1992.

116. Патент № 2232904 Российская Федерация, МПК F01M 11/00. Способ и система контроля состояния масла в двигателе внутреннего сгорания : 2003101669/06 / Б. В. Евстифеев ; заявитель ФГУП Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава. — Заявл. 22.01.2003 ; опубл. 20.07.2004.

117. Патент № 2275618 Российская Федерация, МПК G01N 21/00, G01N 21/62, G01N 21/71, G01N 21/73. Способ определения параметров простых и сложных частиц износа в маслосистеме двигателя : 2004113296/28 / М. С. Гайдай, В. Г. Дроков, М. Л. Кузменко ; заявители ОАО "Научно-производственное объединение "Сатурн" and ООО "Диагностические технологии". — Заявл. 30.04.2004 ; опубл. 27.04.2006.

118. Патент № 242486 Российская Федерация, МПК G01N 33/28. Прибор для испытания антифрикционных, противоизносных и противозадирных свойств смазочных материалов : 1235738/26—25 / Ю. Я. Подольский [и др.] ; заявитель ВНИИЖТ. — Заявл. 29.04.1968 ; опубл. 25.04.1969.

119. Диагностирование дизельных двигателей мелиоративных и строительных машин / Н. К. Усманов [и др.]. — Саратов : ООО «Амирит», 2024. — 80 с. — ISBN 978-5-00207-487-7.

120. ГОСТ Р 57188–2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. — М. : Стандартинформ, 2016. — С. 12.

121. ГОСТ Р 57700.14–2018 Численное моделирование физических процессов. Верификация получаемых сеточными методами численных решений задач механики сплошной среды. — М. : Стандартинформ, 2018. — С. 12.

122. *Боровков А. И., Рябов Ю. А., Гамзикова А. А.* Типологизация цифровых двойников (Digital Twins) // Кластеризация цифровой экономики: Глобальные вызовы / под ред. Д. Г. Родионов, А. В. Бабкин. — СПб., 2020. — Т. 2. — С. 473—482.

123. Цифровые двойники: вопросы терминологии / А. И. Боровков [и др.]. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. — С. 28.

124. Применение математической модели потери влаги культурой и почвой в цифровых двойниках (ЦД) агропромышленных объектов / Т. В. Сафонова, О. Н. Колбина, Н. В. Яготинцева [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — 11(137). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.154.

125. Цифровой двойник растения в светокультуре на примере перца (*Capsicum Annuum* L.) в рассадный период / Е. Н. Ракутько, С. А. Ракутько, А. П. Мишанов, А. Е. Маркова // АгроЭкоИнженерия. — 2021. — 3(108). — С. 13—33. — DOI: 10.24412/2713-2641-2021-3108-13-33.

126. *Гольяпин В. Я., Федоренко В. Ф., Балабанов В. И.* Современные тенденции интеллектуализации тракторов и машин сельскохозяйственного назначения. — М. : Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-

техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2024. — 92 с. — ISBN 978-5-7367-1828-3.

127. *Дорохов А. С.* Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения / А. С. Дорохов, Д. Ю. Павкин, С. С. Юрочка // *Агроинженерия*. — 2023. — Т. 25, № 4. — С. 14—25. — DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.

128. *Тикки Д. А.* Цифровые двойники в сельском хозяйстве / Д. А. Тикки, Т. В. Сафонова, В. Д. Рускин // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. — 2022. — №4(44). — С. 49—53.

129. *Жолобова А. И.* Использование цифровых двойников в сельском хозяйстве / А. И. Жолобова, О. Т. Ергунова // *Вопросы отраслевой экономики*. — 2023. — №2(2). — С. 31—39. — DOI: 10.24888/2949-2793-2023-2-31-39.

130. Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании / А. А. Жиздюк, В. Н. Буйлов, С. В. Чумакова, М. Н. Ахилбеков // *Агроинженерия*. — 2025. — Т. 27, № 1. — С. 20—25. — DOI: 10.26897/2687-1149-2025-1-20-25.

131. *Дидманидзе О. Н.* Формирование подхода к созданию цифрового двойника трактора сельскохозяйственного назначения / О. Н. Дидманидзе, Н. Н. Пуляев, А. С. Гузалов // *Известия Международной академии аграрного образования*. — 2022. — № 61. — С. 33—37.

132. Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a vision of sustainability / S. Cesco, P. Sambo, M. Borin, B. Basso, G. Orzes, F. Mazzetto // *European Journal of Agronomy*. — 2023. — Т. 146. — С. 126809. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126809>.

133. *Subeesh A., Chauhan N.* Agricultural digital twin for smart farming: A review // *Green Technologies and Sustainability*. — 2026. — Т. 4, № 2. — С. 100299. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100299>.

134. Interoperable agricultural digital twins with reinforcement learning intelligence / M. Kallenberg, H. Baja, M. Ilić, A. Tomčić, M. Tošić, I. Athanasiadis // *Smart Agricultural Technology*. — 2025. — Т. 12. — С. 101412. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101412>.

135. Digital twin for monitoring threshing performance of combine harvesters / D. Guo, Y. Du, L. Wang, W. Zhang, T. Sun, Z. Wu // *Measurement*. — 2025. — Т. 239. — С. 115411. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115411>.

136. Construction method and case study of digital twin system for combine harvester / Y. Yin, B. Ma, Z. Meng, L. Chen, M. Liu, Y. Zhang, B. Zhang, C. Wen // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2024. — Т. 226. — С. 109395. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109395>.

137. *Jose A., Shrivastava S.* A comprehensive review of digital twin applications in electric vehicles: Evolution, classification, and future directions towards Industry 5.0 // *Results in Engineering*. — 2025. — Т. 27. — С. 106570. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106570>.

138. *Amer Y., Soufali A., Zaghwan A.* A digital twin-based framework for predictive quality assurance and supply chain resilience in the automotive industry // *Advanced Engineering Informatics*. — 2026. — Т. 69. — С. 103969. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103969>.

139. *Фомичева Т. Л.* Применение технологии цифровых двойников в автомобильной промышленности: российский опыт / Т. Л. Фомичева // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. — 2021. — Т. 11, № 12—1. — С. 181—186. — DOI: [10.34670/AR.2021.24.88.003](https://doi.org/10.34670/AR.2021.24.88.003).

140. Цифровые двойники как способ оптимизации производства электромобилей / А. В. Лихвойнен, М. В. Комарова, А. А. Розов [и др.] // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. — 2021. — № 7—2. — С. 184—191. — DOI: [10.17513/vaael.1797](https://doi.org/10.17513/vaael.1797).

141. *Сосфенов Д. А.* Использование цифровых двойников в автомобильной промышленности: российский и зарубежный опыт // Экономика и управление. — 2023. — Т. 29, № 6. — С. 662—669. — DOI: 10.35854/1998-1627-2023-6-662-669.

142. *Габитова Г. Ф.* Цифровой двойник как основа инновационного развития малых и средних предприятий автомобильной промышленности на примере Германии и России / Г. Ф. Габитова, Т. Ю. Хватова // Бизнес. Образование. Право. — 2020. — № 3(52). — С. 132—138. — DOI: 10.25683/VOLBI.2020.52.387.

143. *Robyns S., Heerwegh W., Weckx S.* A Digital Twin of an Off Highway Vehicle based on a Low Cost Camera // Procedia Computer Science. — 2024. — Т. 232. — С. 2366—2375. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.055>. — 5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing (ISM 2023).

144. *Feilong C., Zhixiong L., Xiaoting D.* Shifting strategy for power shift tractors based on digital Twin-Driven reinforcement learning // Computers and Electronics in Agriculture. — 2025. — Т. 236. — С. 110513. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110513>.

145. *Barker G., Abdoli S.* Experimentable Digital Twin for Development of Electric Vehicles; A Case of Formula Society of Automotive Engineers // Procedia CIRP. — 2025. — Т. 136. — С. 564—569. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.097>. — 35th CIRP Design 2025.

146. *Комков Е. Ю.* Разработка цифрового двойника газопоршневой установки с локальным генератором электроэнергии // / Е. Ю. Комков, А. И. Тихонов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения): материалы международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом, Иваново, 02–04 июня 2021 года. Т. III. —

Иваново : Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. — С. 225—228.

147. *Трефилов С. А.* Цифровой двойник мехатронного устройства на основе алгоритма прогнозирования по малым обучающим выборкам / С. А. Трефилов, П. В. Лекомцев, Ю. Р. Никитин // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. — 2020. — №3(11). — С. 39—49.

148. *Коробов А. А.* Разработка цифрового двойника сердечно-сосудистой системы с регуляцией для поддержки принятия врачебных решений при диагностике и терапии кардиологических больных : дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1.; 2.2.12. / Коробов А. А. — Тамбов, 2022. — 249 с.

149. *Никитина М. А.* “Цифровой двойник” - имитационная модель пищевого продукта / М. А. Никитина // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2020. – Т. 6. — С. 136—140.

150. *Дунина А. А.* Цифровые двойники на производстве как одно из направлений цифровой трансформации экономики / А. А. Дунина // Стратегии бизнеса. — 2022. — Т. 10, № 5. — С. 114—116. — DOI: 10.17747/2311-7184-2022-5-114-116.

151. *Бреус И. В.* Искусственный интеллект для прогнозирования социально-экономических кризисов: создание «цифрового двойника» российской экономики / И. В. Бреус // Научный Лидер. — 2025. — № 22(223). — С. 273—277.

152. Fundamental requirements of Digital Twins for production system in Oil and Gas Industry: A systematic literature review / R. C. Belo, M. S. Pimenta, T. T. Salvador, R. H. Petry, M. Abel // Information and Software Technology. — 2025. — Т. 184. — С. 107742. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2025.107742>.

153. Review of the digital twin design of the smart satellite thermal control structure / H. Wang [и др.] // Acta Astronautica. — 2026. — Т. 239. — С. 491—521. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.11.014>.

154. From pre-treatment to post-operative care: Leveraging digital twins for precision surgery transformation / F. Dehghan [и др.] // *Smart Health*. — 2026. — Т. 39. — С. 100620. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2025.100620>.

155. Predicting the performance status of aero-engines using a spatio-temporal decoupled digital twin modeling method / D. Xiao [и др.] // *Advanced Engineering Informatics*. — 2025. — Т. 65. — С. 103218. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103218>.

156. A model-based approach for co-simulation-driven digital twins in robotics / S. Gil [и др.] // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2026. — Т. 196. — С. 105240. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.105240>.

157. Nazari N. M., Muhammad M., Mokhtar A. A. Prediction of Lubrication Oil Parameter Degradation to Increase the Oil Change Interval Based on Gaussian Process Regression (GPR) // *Tribology Online*. — 2022. — Vol. 17, no. 3. — P. 135–143. — DOI: [10.2474/trol.17.135](https://doi.org/10.2474/trol.17.135).

158. Динамические испытания в условиях реальной эксплуатации транспортного средства / А. В. Александров [и др.] // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. — 2024. — 3(41).

159. Александров А. В., Долгов И. А., Сидоров К. М. Мобильный диагностический комплекс для анализа работы ДВС // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. — 2025. — 1(43).

160. Изменение вязкости моторного масла как показатель технического состояния двигателя внутреннего сгорания и свойств смазочного материала / В. В. Остриков [и др.] // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. — 2019. — Т. 12, 3(62). — С. 54—61. — DOI: [10.17238/issn2071-2243.2019.3.54](https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.3.54).

161. Лаушкин А. В. Результаты оценки влияния эксплуатационных факторов на кинематическую вязкость моторного масла // *Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава ав-*

томобильного транспорта: Сборник научных трудов по материалам 80-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 25–26 января 2022 года / Под общей редакцией А.А. Солнцева. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). — 2022. — С. 78—82.

162. *Назаров Ф. Л.* Факторы увеличения срока замены моторного масла в автомобильных дизельных двигателях // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 5. — С. 92—101. — DOI: 10.25198/2077-7175-2023-5-92.

163. Динамика свойств моторного масла в эксплуатации как основа обоснования периодичности его замены для двигателей КАМАЗ нового поколения / А. Т. Кулаков [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2022. — № 6. — С. 31—37. — DOI: 10.36535/0236-1914-2022-06-5.

164. Предпосылки применения цифрового двойника для определения предельного состояния моторного масла или прогнозирования его остаточного ресурса / А. В. Химченко, В. И. Оробинский, В. В. Остриков [и др.] // Наука в центральной России. — 2024. — 3(69). — С. 148—160. — DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-148-160.

165. *Бенькович Е. С.* Практическое моделирование динамических систем / Е. С. Бенькович, Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. — СПб. : БХВ-Петербург, 2002. — С. 464.

166. *Химченко А. В., Григорьев Е. А., Мищенко Н. И.* Модель цифрового двойника процесса деградации моторного масла : program. — Российская Федерация, 23.03.2026. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

167. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614490 Российская Федерация.* Имитационная модель для испытания трактора МТЗ-80 «Беларус» : 2024614490 / 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". — Заявл. 26.02.2024 ; опубл. 26.02.2024.

168. 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.

169. *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 года. — Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2026. — С. 157—163.

170. Трактор МТЗ-80. Руководство по эксплуатации / Министерство сельского хозяйства СССР. — 3-е изд., перераб. и доп. — Минск : Урожай, 1986. — С. 239.

171. Прицеп самосвальный 2ПТС-6,5. Руководство по эксплуатации / ГСКБ по прицепной технике. — Минск, 1989. — С. 78.

172. *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 : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. — С. 408—413.

173. *Химченко А. В., Григорьев Е. А.* Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2026101511/09(003018). — М. : Роспатент, 2026. — 5 мая. — 5 с.

174. *Химченко А. В.* Отладка системы автоматизированного сбора данных перед проведением экспериментальных исследований / А. В. Химченко, Е. А. Григорьев // Проблемы ресурсобеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 25 сентября 2024 года. — Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. — С. 190—195.

175. *Тимохин С. В., Морунков А. Н.* Контроль параметров автотракторных дизелей при диагностировании и обкатке методом динамического нагружения // Нива Поволжья. — 2024. — 3(71). — DOI: 10.36461/NP.2024.71.3.003.

176. 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.

177. 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".

178. 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 : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. — С. 407—412.

179. MATLAB & Simulink. Simscape Electrical Reference / MathWorks. — 2024. — С. 3108. — URL: [https://uk.mathworks.com/help/pdf\\_doc/sps/sps\\_ref.pdf](https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/sps/sps_ref.pdf).

180. Химченко А. В., Григорьев Е. А. Частотный анализ режимов работы двигателя трактора «John Deere 6В» в условиях реальной эксплуатации // 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.

181. Кленин Н. И., Сакун В. А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины : справочник. — 6-е изд. — М. : КолосС, 2013. — С. 568.

182. Химченко А. В., Григорьев Е. А. Подготовка численных данных результатов мониторинга работы двигателя трактора для прогнозирования ресурса моторного масла : program. — Российская Федерация, 02.04.2026. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## Приложение А

## Результаты проведения стендового эксперимента

Таблица А.1 — Результаты стендового эксперимента

№ опыта	Время эксперимента		Средняя частота вращения, об/мин	Моточасы		Средние показания весового механизма, кгс	Коэффициент нагрузки	Щелочное число, мг КОН/г	Объем доливаемого масла, л
	Начало	Окончание		Начало	Окончание				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.0.0.	09:00	09:00	0	0	0	0	0	8,8	0
1.0.1.	09:00	14:00	1002	0	2,381	0	0	—	0
1.0.2.	11:00	16:00	998	2,381	4,762	0	0	—	0
1.0.3.	09:00	14:00	1001	4,762	7,143	0	0	—	0
1.0.4.	10:00	15:00	1004	7,143	9,524	0	0	—	0
1.1.0.	12:15	12:15	0	9,524	9,524	0	0	8,6	0
1.1.1.	12:15	13:15	1699	9,524	10,276	24,912	0,731	—	0
1.1.2.	17:57	18:27	1702	10,276	10,652	19,888	0,583	—	0
1.1.3.	12:53	13:23	1696	10,652	11,049	32,945	0,997	—	0
1.1.4.	17:00	18:00	1704	11,049	11,841	32,902	0,995	—	0
1.1.5.	13:20	14:20	1698	11,841	12,650	31,877	0,977	—	0
1.1.6.	10:24	11:24	1701	12,650	13,424	29,934	0,892	—	0
1.2.0.	14:40	14:40	0	13,424	13,424	0	0	8,5	0
1.2.1.	14:40	17:40	1003	13,424	14,924	0	0	—	0
1.2.2.	12:30	13:30	997	14,924	15,448	0	0	—	0
1.2.3.	17:40	18:40	1000	15,448	15,972	0	0	—	0
1.2.4.	11:53	12:53	1005	15,972	16,496	0	0	—	0
1.2.5.	10:38	12:38	996	16,496	17,591	0	0	—	0
1.2.6.	12:42	13:42	1001	17,591	18,139	0	0	—	0
1.2.7.	12:34	13:34	999	18,139	18,662	0	0	—	0
1.3.0.	10:53	10:53	0	18,662	18,662	0	0	8,4	0,625
1.3.1.	10:53	12:53	2003	18,662	20,567	9,923	0,331	—	0
1.3.2.	15:50	17:50	1997	20,567	22,472	9,879	0,329	—	0
1.3.3.	13:10	14:10	2002	22,472	23,424	9,946	0,332	—	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.3.4.	10:05	12:05	1998	23,424	25,329	9,901	0,330	—	0
1.4.0.	17:30	17:30	0	25,329	25,329	0	0	8,25	0,682
1.4.1.	17:30	18:30	1251	25,329	25,924	34,968	0,916	—	0
1.4.2.	16:50	17:20	1249	25,924	26,222	34,923	0,914	—	0
1.4.3.	12:10	13:10	1254	26,222	26,817	34,889	0,913	—	0
1.4.4.	16:24	18:24	1246	26,817	28,008	34,946	0,915	—	0
1.4.5.	09:10	12:10	1250	28,008	29,793	34,901	0,914	—	0
1.4.6.	17:35	18:35	1252	29,793	30,389	34,879	0,913	—	0
1.4.7.	10:15	12:45	1248	30,389	31,877	34,935	0,915	—	0
1.5.0.	17:30	17:30	0	31,877	31,877	0	0	8,1	0,795
1.5.1.	17:30	18:30	1501	31,877	32,591	9,912	0,282	—	0
1.5.2.	10:20	12:20	1504	32,591	34,020	9,888	0,282	—	0
1.5.3.	09:52	12:52	1498	34,020	36,162	9,935	0,283	—	0
1.5.4.	12:29	13:29	1503	36,162	36,877	9,901	0,282	—	0
1.5.5.	17:52	18:52	1496	36,877	37,591	9,879	0,282	—	0
1.5.6.	12:35	13:35	1502	37,591	38,305	9,923	0,283	—	0
1.5.7.	17:20	18:20	1499	38,305	39,020	9,946	0,283	—	0
1.5.8.	17:50	18:50	1505	39,020	39,734	9,889	0,282	—	0
1.5.9.	10:00	13:00	1497	39,734	41,877	9,968	0,284	—	0
1.6.0.	16:20	16:20	0	41,877	41,877	0	0	7,95	1,608
1.6.1.	16:20	17:20	1601	41,877	42,639	5,935	0,175	—	0
1.6.2.	11:00	13:00	1604	42,639	44,162	5,901	0,174	—	0
1.6.3.	12:20	17:20	1597	44,162	47,972	5,889	0,174	—	0
1.6.4.	12:10	13:10	1602	47,972	48,734	5,923	0,175	—	0
1.7.0.	11:20	11:20	0	48,734	48,734	0	0	7,9	1,568
1.7.1.	11:20	13:20	2103	48,734	50,734	25,946	0,938	—	0
1.7.2.	17:35	18:35	2097	50,734	51,734	25,901	0,937	—	0
1.7.3.	12:05	13:05	2101	51,734	52,734	25,879	0,936	—	0
1.7.4.	17:30	18:30	2098	52,734	53,734	25,923	0,938	—	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.7.5.	15:53	17:53	2104	53,734	55,734	25,889	0,936	—	0
1.7.6.	17:10	18:10	2096	55,734	56,734	25,935	0,938	—	0
1.7.7.	16:00	18:00	2100	56,734	58,734	25,968	0,939	—	0
1.7.8.	17:53	18:53	2102	58,734	59,734	25,912	0,937	—	0
1.7.9.	16:03	19:03	2099	59,734	62,734	25,888	0,936	—	0
1.7.10.	16:03	17:03	2105	62,734	63,734	25,946	0,938	—	0
1.7.11.	13:15	16:15	2095	63,734	66,734	25,901	0,937	—	0
1.7.12.	17:45	18:45	2103	66,734	67,734	25,879	0,936	—	0
1.7.13.	17:35	18:35	2098	67,734	68,734	25,923	0,938	—	0
1.7.14.	15:00	16:00	2101	68,734	69,734	25,889	0,936	—	0
1.7.15.	16:40	17:40	2097	69,734	70,734	25,935	0,938	—	0
1.8.0.	16:20	16:20	0	70,734	70,734	0	0	7,45	4,256
1.8.1.	16:20	17:20	1155	70,734	71,305	24,946	0,643	—	0
1.8.2.	17:42	18:42	1150	71,305	71,877	24,901	0,642	—	0
1.8.3.	16:45	17:45	1151	71,877	72,424	24,879	0,631	—	0
1.8.4.	17:38	18:38	1154	72,424	72,972	24,923	0,632	—	0
1.8.5.	17:35	19:35	1148	72,972	74,067	24,889	0,631	—	0
1.8.6.	15:15	18:15	1153	74,067	75,710	24,935	0,632	—	0
1.8.7.	09:30	15:30	1147	75,710	78,996	24,968	0,633	—	0
1.8.8.	17:10	18:10	1150	78,996	79,543	24,912	0,632	—	0
1.8.9.	17:20	19:20	1152	79,543	80,639	24,888	0,631	—	0
1.8.10.	17:20	20:20	1149	80,639	82,281	24,946	0,633	—	0
1.8.11.	15:10	20:10	1155	82,281	85,020	24,901	0,631	—	0
1.9.0.	20:10	20:10	0	85,020	85,020	0	0	7,62	0
1.9.1.	09:00	15:00	1936	85,020	90,591	10,935	0,371	—	0
1.9.2.	10:00	13:00	1932	90,591	93,377	10,889	0,369	—	0
1.10.0.	16:00	16:00	0	93,377	93,377	0	0	5,992	0
1.10.1.	16:00	21:00	1716	93,377	97,424	24,923	0,764	—	0
1.10.2.	17:00	21:00	1718	97,424	100,662	24,889	0,763	—	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.10.3.	17:00	19:00	1712	100,662	102,281	24,935	0,765	—	0
1.11.0.	19:00	19:00	0	102,281	102,281	0	0	5,775	0
1.11.1.	17:00	20:00	1083	102,281	103,853	14,946	0,373	—	0
1.11.2.	17:00	21:00	1078	103,853	105,948	14,901	0,372	—	0
1.11.3.	10:00	18:00	1081	105,948	110,139	14,879	0,371	—	0
1.11.4.	12:00	14:00	1084	110,139	111,186	14,923	0,373	—	0
1.12.0.	17:00	17:00	0	111,186	111,186	0	0	5,566	0
1.12.1.	17:00	21:00	1413	111,186	113,853	6,912	0,192	—	0
1.12.2.	15:00	20:00	1408	113,853	117,186	6,888	0,191	—	0
1.12.3.	17:00	18:00	1411	117,186	117,853	6,935	0,193	—	0
1.12.4.	16:00	21:00	1414	117,853	121,186	6,901	0,192	—	0
1.13.0.	16:00	16:00	0	121,186	121,186	0	0	5,340	0
1.13.1.	09:00	17:00	1523	121,186	126,900	34,946	0,996	—	0
1.13.2.	09:00	18:00	1520	126,900	133,329	34,901	0,995	—	0
1.14.0.	18:00	18:00	0	133,329	133,329	0	0	5,077	0
1.14.1.	11:00	15:00	1578	133,329	136,377	20,923	0,618	—	0
1.14.2.	17:00	22:00	1574	136,377	140,186	20,889	0,617	—	0
1.14.3.	17:00	20:00	1581	140,186	142,472	20,935	0,618	—	0
1.14.4.	17:00	20:00	1577	142,472	144,758	20,901	0,617	—	0
1.15.0.	16:00	16:00	0	144,758	144,758	0	0	4,841	0
1.15.1.	16:00	22:00	2071	144,758	150,615	13,946	0,493	—	0
1.15.2.	17:00	20:00	2075	150,615	153,543	13,901	0,492	—	0
1.15.3.	08:00	13:00	2069	153,543	158,424	13,879	0,491	—	0
1.16.0.	13:00	13:00	0	158,424	158,424	0	0	4,473	0
1.16.1.	13:00	19:00	1881	158,424	163,853	29,923	0,993	—	0
1.16.2.	18:00	21:00	1879	163,853	166,567	29,889	0,992	—	0
1.16.3.	15:00	20:00	1884	166,567	171,091	29,935	0,994	—	0
1.16.4.	17:00	22:00	1876	171,091	175,615	29,901	0,992	—	0
1.17.0.	17:00	17:00	0	175,615	175,615	0	0	4,256	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.17.1.	17:00	20:00	1331	175,615	177,472	9,946	0,265	—	0
1.17.2.	09:00	20:00	1333	177,472	184,281	9,901	0,264	—	0
1.17.3.	08:00	17:00	1327	184,281	189,853	9,879	0,263	—	0
1.17.4.	18:00	21:00	1330	189,853	191,710	9,923	0,264	—	0
1.17.5.	17:00	18:00	1328	191,710	192,329	9,889	0,263	—	0
1.17.6.	17:00	21:00	1332	192,329	194,805	9,935	0,264	—	0
1.18.0.	16:00	16:00	0	194,805	194,805	0	0	3,927	0
1.18.1.	16:00	21:00	1798	194,805	199,091	30,923	0,986	—	0
1.18.2.	15:00	19:00	1794	199,091	202,520	30,889	0,985	—	0
1.18.3.	08:00	18:00	1801	202,520	211,091	30,935	0,986	—	0
1.18.4.	10:00	18:00	1797	211,091	217,948	30,901	0,985	—	0
1.19.0.	18:00	18:00	0	217,948	217,948	0	0	3,562	0
1.19.1.	17:00	22:00	1223	217,948	220,805	7,946	0,205	—	0
1.19.2.	17:00	21:00	1217	220,805	223,091	7,901	0,204	—	0
1.19.3.	16:00	21:00	1221	223,091	225,948	7,879	0,203	—	0
1.19.4.	17:00	20:00	1219	225,948	227,662	7,923	0,204	—	0
1.19.5.	15:00	21:00	1224	227,662	231,091	7,889	0,203	—	0
1.19.6.	08:00	17:00	1216	231,091	236,234	7,935	0,204	—	0
1.19.7.	08:00	18:00	1222	236,234	241,948	7,912	0,204	—	0
1.19.8.	18:00	19:00	1218	241,948	242,520	7,888	0,203	—	0
1.19.9.	17:00	18:00	1220	242,520	243,091	7,946	0,205	—	0
1.20.0.	18:00	18:00	0	243,091	243,091	0	0	3,202	0
1.20.1.	14:00	20:00	1303	243,091	246,805	22,923	0,610	—	0
1.20.2.	09:00	18:00	1300	246,805	252,377	22,889	0,609	—	0
1.21.0.	18:00	18:00	0	252,377	252,377	0	0	3,078	0

## Приложение Б

### Акты внедрения

РЕКОМЕНДОВАНО

Учебно-методической комиссией  
агроинженерного факультета

ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ,

Протокол № 9 от 21.05.2026 г.

Председатель


 \_\_\_\_\_ О.М. Костиков

УТВЕРЖДАЮ

Врио проректора по учебной работе  
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

Н.М. Дерканосова

«15» ИЮНЯ 2026 г.

### АКТ

#### о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс

Комиссия в составе представителей кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ заведующего кафедрой Оробинского В.И., доцента Лощенко А.В. и членов учебно-методической комиссии агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ Афоничева Д.Н., Козлова В.Г. составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований, выполненных на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ аспирантом Григорьевым Е.А. под руководством кандидата технических наук, доцента Химченко А.В., внедрены в учебный процесс при подготовке обучающихся по направлению подготовки 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства». Результаты исследований используются при выполнении обучающимися практических работ по дисциплине «Информационное обеспечение автотранспортных систем». С помощью модели цифрового двойника процесса деградации моторного масла выполняется прогнозирование срока замены по результатам мониторинга. Алгоритм определения параметров модели применяется для изучения методов оптимизации, а программа подготовки численных данных — для отработки навыков обработки и анализа данных. Внедрение указанных результатов положительно сказывается на качестве профессиональной подготовки обучающихся.

Представители

Учебно-методической комиссии  
агроинженерного факультета

ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:


 \_\_\_\_\_ Афоничев Д.Н.



 \_\_\_\_\_ Козлов В.Г.

Представители кафедры

сельскохозяйственных машин,

тракторов и автомобилей

ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ:


 \_\_\_\_\_ Оробинский В.И.


 \_\_\_\_\_ Лощенко А.В.

УТВЕРЖДАЮ  
 директор  
 филиала проектора по научной работе  
 ФГБОУ ВО «Воронежский  
 государственный аграрный  
 университет имени императора  
 Петра I» к.в.н, доцент

Семенов  
 14 \_\_\_\_\_ 14.09.2026г.



УТВЕРЖДАЮ  
 директор  
 ООО НПКФ «Агротех-Гарант  
 Берёзовский»

В.И. Кичигин  
 \_\_\_\_\_ 14.09.2026г.



АКТ

внедрения результатов исследований по определению остаточного ресурса моторного масла за счет применения цифрового двойника

Результаты исследований, выполненные к.т.н., доцентом Химченко А.В. и аспирантом Григорьевым Е.А. на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» содержат сведения, интересные для практического использования в ООО НПКФ «Агротех-Гарант Берёзовский»:

- результаты анализа мониторинга режимов работы двигателей тракторов, показывающие широкий диапазон использования скоростных и нагрузочных режимов работы в эксплуатации и их влияние на сроки замены моторного масла;
- данные по динамике изменения щелочного числа моторного масла дизельных двигателей в разных условиях;
- данные о состоянии моторного масла по окончании срока эксплуатации при замене;
- результаты прогнозирования использования моторного масла с помощью модели цифрового двойника в условиях эксплуатации в ООО НПКФ «Агротех-Гарант Берёзовский».

Материалы исследований будут использоваться для корректировки периодичности технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания тракторов с учетом условий эксплуатации. Как показали исследования, применение цифрового двойника позволяет оптимизировать график замены моторного масла на основе его фактического состояния, что представляет практический интерес и особенно актуально в условиях интенсивных сезонных полевых работ.

Главный инженер  
 ООО НПКФ «Агротех-Гарант Берёзовский»

Д.А. Тарарыков

Доцент кафедры сельскохозяйственных  
 машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО  
 Воронежский ГАУ, к.т.н.

А.В. Химченко

УТВЕРЖДАЮ

врио проректора по научной работе  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», к.т.н., доцент  
С.И. Семцов

08



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ООО «ТРАНСКОДЕР»



Е.А. Суханова

06

Мая

2026 г.

## АКТ

внедрения результатов исследований по определению остаточного ресурса моторного масла за счет применения цифрового двойника

Результаты исследований, выполненные к.т.н., доцентом Химченко А.В. и аспирантом Григорьевым Е.А. на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» содержат:

– обзор и результаты исследований различных способов корректировки времени замены моторного масла;

-- аналитические зависимости, описывающие динамику изменения щелочного числа в разных условиях: при постоянном объеме, при доливке и при угаре моторного масла;

– модель цифрового двойника изменения щелочного числа моторного масла;

– алгоритм определения параметров модели цифрового двойника;

– результаты анализа мониторинга режимов работы двигателей тракторов, подтверждающие широкий диапазон скоростных и нагрузочных режимов работы в реальных условиях эксплуатации;

– результаты прогнозирования сроков замены моторного масла по деградации моторного масла на основе изменения щелочного числа.

Материалы исследований представляют практический интерес и используются ООО «ТРАНСКОДЕР» для внедрения в систему мониторинга с целью определения фактического остаточного ресурса моторного масла тракторов и сельскохозяйственных машин, находящихся в эксплуатации и предоставления рекомендаций клиентам компании.

Инженер

ООО «ТРАНСКОДЕР»

Доцент кафедры сельскохозяйственных  
машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО  
Воронежский ГАУ, к.т.н.

Шевнев С.В.

А.В. Химченко