На правах рукописи

ЗАХАРОВ СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАКТОРОВ С ГАЗОДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ НА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Омск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина» (ФГБОУ ВО Омский ГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, Редреев Григорий Васильевич

Официальные оппоненты: Болоев Петр Антонович, доктор технических наук, профессор Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова», кафедра общей и теоретической физики, профессор

Старцев Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», кафедра тракторов, сельскохозяйственных машин и земледелия, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск

Защита состоится «20» декабря 2025 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.315.04, при ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», по адресу: 650056, г. Кемерово, бульвар Строителей, 47, 2 лекц. ауд.
С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» https://kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-24-2-315-04/protects/.

Отзывы на автореферат отправлять по адресу: 650000,г.Кемерово, ул.Красная, 6

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 24.2.315.04
д-р тех. наук, доцент Горелкина Алена Константиновна

Общая характеристика работы

Актуальность. Основным энергетическим средством в сельскохозяйственных предприятиях является трактор с двигателем, использующим дизельное топливо. Недостаток этого топлива – в его высокой стоимости, отражающейся на себестоимости сельскохозяйственной продукции, и значительное количество выбрасываемых двигателем вредных веществ. При эксплуатации в условиях сельскохозяйственного производства коэффициент использования мощности дизеля на транспортных работах составляет всего 0,55–0,6, а на основных сельскохозяйственных работах – 0,85–0,9 от $N_{ен}$. Это вызвано многими факторами, которые определяют неустановившийся режим работы МТА, и в первую очередь, изменением тяговой нагрузки. Случайные отклонения тяговой нагрузки трактора в составе МТА от установившейся вызывают изменения тепловой и механической нагруженности деталей двигателя, увеличение расхода топлива. В этих условиях необходимо обеспечивать быстрое восстановление режима работы дизеля.

В какой-то мере эти проблемы можно решить использованием в дизелях в качестве топлива недорогого компримированного природного газа (КПГ). Использование альтернативного источника энергии природного газа требует тщательного изучения процессов, происходящих в узлах и механизмах с учётом действия реальных нагрузок в составе МТА. При этом необходимо проведение исследований как в статических, так и в динамических условиях.

Существующие топливные системы не приспособлены для применения газообразного топлива, поэтому перевод двигателя на газ требует определенных изменений конструкции его топливоподающей системы. В связи с этим, исследования, направленные на совершенствование системы топливоподачи и обоснование параметров и режимов работы устройства, обеспечивающего работу дизеля на дизельном топливе и КПГ, актуальны.

Цель исследований: повышение эффективности эксплуатации тракторов тягового класса 14 кН с газодизельными системами питания путём обоснования параметров и режимов системы топливоподачи. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Обосновать выбор газа для питания дизеля и его соотношение с дизельным топливом, обеспечивающее поддержание мощностных показателей двигателей.
2. Разработать математическую модель оптимизации эксплуатационных затрат на работу трактора с двигателем в газодизельном режиме.
3. Определить параметры и режимы системы топливоподачи дизеля в газодизельном режиме.
4. Провести экспериментальные исследования и производственную проверку основных результатов исследований.
5. Определить ожидаемый экономический эффект от использования

предложенной системы питания газодизеля.

Объект исследования – процесс смешанной топливоподачи двигателя при выполнении трактором сельскохозяйственных работ.

Предмет исследования – закономерности изменения технико-экономических и эксплуатационных показателей при выполнении работ машинно-тракторным агрегатом с газодизельным энергосредством.

Научная новизна работы. Диссертационная работа содержит элементы научной новизны: пункты 4, 5 и 6 паспорта специальности ВАК 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса».

Научная новизна исследований заключается:

– в разработке математической модели установления экономически целесообразной степени замещения дизтоплива компримированным газом;

– установлении соотношения количества дизельного топлива и сжатого газа в зависимости от затрат на переоборудование и ремонт двигателя;

– установлении взаимообусловленной связи устройств подачи дизтоплива и газа с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей.

Новизна предложенного технического решения подтверждена патентом на полезную модель №88070U1 «Система питания газодизеля».

Рабочая гипотеза – повысить эффективность использования тракторов с газодизельными двигателями возможно путём обоснования параметров и режимов системы топливоподачи.

Практическая значимость. В процессе исследований была разработана система питания газодизеля, работоспособность которой подтверждена проведёнными испытаниями в ФГБУ «Сибирская МИС», а также производственной проверкой в условиях сельскохозяйственных предприятий.

Совершенствование системы регулирования подачи топлива позволяет обеспечить работоспособность трактора при применении КПГ в условиях сельскохозяйственного производства при выполнении технологических процессов. Полученные зависимости и методика расчёта позволяют сформулировать закономерности регулирования топлива при разработке газодизельных систем питания. На основании исследований определены технико-экономические показатели работы дизеля при переводе на компримированный природный газ. Благодаря предложенному техническому решению в газодизельном режиме уменьшается потребление дизельного топлива, улучшается топливная экономичность двигателя за счёт лучшего сгорания смеси дизельного топлива и КПГ, снижается токсичность отработавших газов. Предложены мероприятия по техническому обслуживанию газобаллонного оборудования.

Результаты проведенного исследования успешно внедрены в работу хозяйств СПК «Сибиряк» Москаленского района Омской области и ООО «Инициатива» Полтавского района Омской области, а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Омский государственный университет имени

П.А. Столыпина».

Разработана и утверждена на заседании научно-технического совета ФГБОУ ВО Омский ГАУ инструкция по переоборудованию тракторов МТЗ для работы на дизельном топливе и компримированном природном газе.

Методология и методы исследования. Для проведения экспериментов использовался метод многофакторного планирования эксперимента и математической статистики. Теоретические аспекты исследования базировались на классической механике, математическом моделировании, численных методах математического анализа и вычислительных экспериментах. Полученные результаты вычислительных экспериментов обрабатывались с помощью программ анализа числовых данных.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов газодизеля;

– рациональные конструктивные параметры системы дозирования и регулирования топливоподачи газодизеля;

– аналитические выражения для определения рационального соотношения дизтоплива и природного газа.

Апробация. Основные положения и результаты исследований докладывались:

– на Международном научно-техническом форуме «Реализация Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия: инновации, проблемы, перспективы», Омск, 2009 г.;

– Международной научно-практической конференции молодых ученых Россельхозакадемии «Актуальные вопросы научного обеспечения АПК в работах молодых ученых», СибНИИСХоз, Омск, 2010 г.;

– Международной научно-практической конференции магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Инновации в развитии сельскохозяйственного производства в современной России и Казахстане», посвященной Дню российской науки в 2015 г.;

– Международной научно-практической конференции «Новая наука: стратегии и векторы развития», Ижевск, 2016 г.;

– национальных и международных научно-практических конференциях ФГБОУ ВО Омский ГАУ (2013 – 2024 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 печатные работы, включая одну статью в журнале, входящем в международную базу цитирования Scopus и Web of Science, четыре статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получен патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание кандидатской диссертации включает 108 страниц основного текста, приложения на 26

страницах, 42 рисунка, 23 таблицы и список литературы из 194 источников.

В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследований» на основе работ В.П. Горячкина, В.В. Василенко, А.Б. Лурье, С.А. Иофинова, А.А. Зангиева, А.Н. Карпенко, Э.И. Липковича, Э.В. Жалнина и др. сформулированы цель и задачи исследования. Показано, что по экономическим и экологическим причинам, а также из-за снижения установленной мощности двигателей МТА наиболее обоснованным является замена дизельного топлива КПГ. Выполнен анализ достоинств и недостатков природного сжатого, сжиженного и попутного газа; дано обоснование перевода питания дизельного двигателя с традиционного ДТ на КПГ. Выбор КПГ для питания дизельного двигателя обусловлен следующими его преимуществами перед сжиженным нефтяным и попутным газами:

1. Стоимость КПГ почти в 3 раза ниже стоимости ДТ и в 2 раза сжиженного нефтяного газа. Природный газ не смывает с деталей двигателя масляную пленку, позволяя сэкономить, по сравнению с дизельным топливом, от 30 до 40% масла.

2. КПГ более безопасен в эксплуатации ввиду низкого концентрационного предела воспламенения и взрыва, невысокой плотности природного газа. Улучшаются экологические показателей за счет снижения содержания в выхлопных газах: NO_x – на 80%; CH_4 – на 70%; CO – на 90%.

Актуальность перевода на газ энергетических установок подтверждается Государственной программой Российской Федерации «Расширение использования природного газа в качестве газомоторного топлива» (срок реализации – 2018-2022 годы), решением Всероссийского агрономического совещания (январь 2023 г.) о выделении Минсельхозом РФ в 2023 году 500 миллионов рублей на компенсацию части затрат сельскохозяйственных товаропроизводителей для перевода тракторов на природный газ.

Во второй главе диссертации «Теоретические исследования» выполнено экономическое обоснование повышения эффективности использования МТА с газодизельными двигателями.

Оптимальный уровень замещения дизельного топлива газом определяется из экономической целесообразности перехода на газодизельное топливо.

Вычисляют общие затраты на работу газодизеля:

$$C = C_T + C_{ОБ} + C_{ЭКС} + C_{РЕМ}, \text{ руб.}, \quad (1)$$

где C_T – стоимость топлива, общая, руб.;

$C_{ОБ}$ – стоимость дооборудования топливной системы двигателя, руб.;

$C_{ЭКС}$ – эксплуатационные затраты, руб.;

$C_{РЕМ}$ – стоимость ремонта двигателя, руб.

Стоимость дополнительного оборудования топливной системы считаем пропорционально возможностям оборудования по замещению дизельного топлива газом.

При увеличении количества газа снижается износ двигателя, его ресурс увеличивается. Стоимость ремонта двигателя в пересчете на нормативный межремонтный срок снижается.

Развернув составляющие формулы (1) и приведя их к удельным величинам затрат получим затраты на работу дизеля на дизельном топливе и КПГ за время межремонтного цикла в расчете на 1 час:

$$C = Ц_{ДТ} - \left(Ц_{ДТ} - Ц_{Г}\right) \cdot К_{ЗГ} + C_{ОБ0} + C_{ОБ1} \cdot К_{ЗГ} + C_{ЭКС} + C_{НОРМ} / \left(T_{РЕМ} \cdot К_{ЗГ}\right), \quad (2)$$

при $0{,}3 \geq К_{ЗГ} \geq 0{,}8$,

где $Ц_{ДТ}$, $Ц_{Г}$ – цена 1 кг топлива и м^3 газа соответственно, руб./кг, руб./м^3;

$К_{ЗГ}$ – коэффициент замещения дизельного топлива газом;

$C_{ОБ0}$ – удельная базовая стоимость газового оборудования, руб./час;

$C_{ОБ1}$ – переменная составляющая затрат на переоборудование дизеля, руб./час;

$C_{НОРМ}$ – нормативные затраты на плановый ремонт двигателя, руб.;

$T_{РЕМ}$ – нормативная периодичность ремонта, час.

Графическая интерпретация модели выглядит следующим образом:

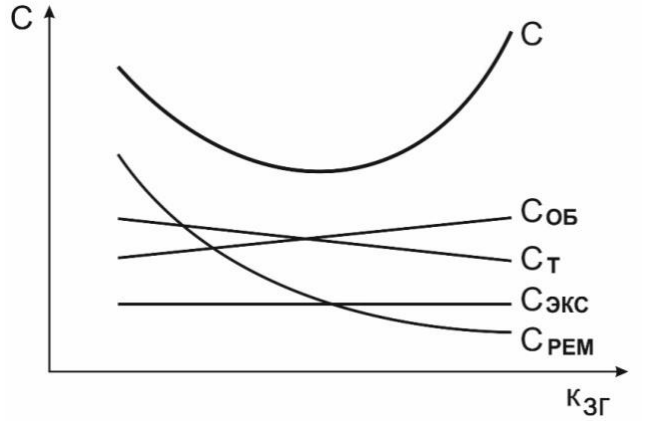

Рисунок 1 – Графическая интерпретация экономико-математической модели

Взяв первую производную функции затрат по коэффициенту замещения и приравняв её к нулю, получим выражение для оптимальной величины коэффициента замещения дизельного топлива газом:

$$C = -\left(Ц_{ДТ} - Ц_{Г}\right) + C_{ОБ1} - C_{НОРМ} / \left(T_{РЕМ} \cdot \left(К_{ЗГ}\right)^2\right). \quad (3)$$

Обозначим $\left(Ц_{ДТ} - Ц_{Г}\right) = \Delta C$ – разница в цене дизтоплива и газа, руб.

$C_{НОРМ} / T_{РЕМ} = C_{УД}$ – удельные затраты на ремонт, руб./час.

Тогда

$$К_{ЗГ} = \sqrt{\frac{C_{УД}}{C_{ОБ1} - \Delta C}}. \quad (4)$$

На рисунке 2 приведены графики изменения коэффициента замены дизельного топлива газом при разных значениях удельной переменной составляющей стоимости оборудования от удельных затрат на ремонт и разницы в стоимости топлива и газа (в ценах 2024 года).

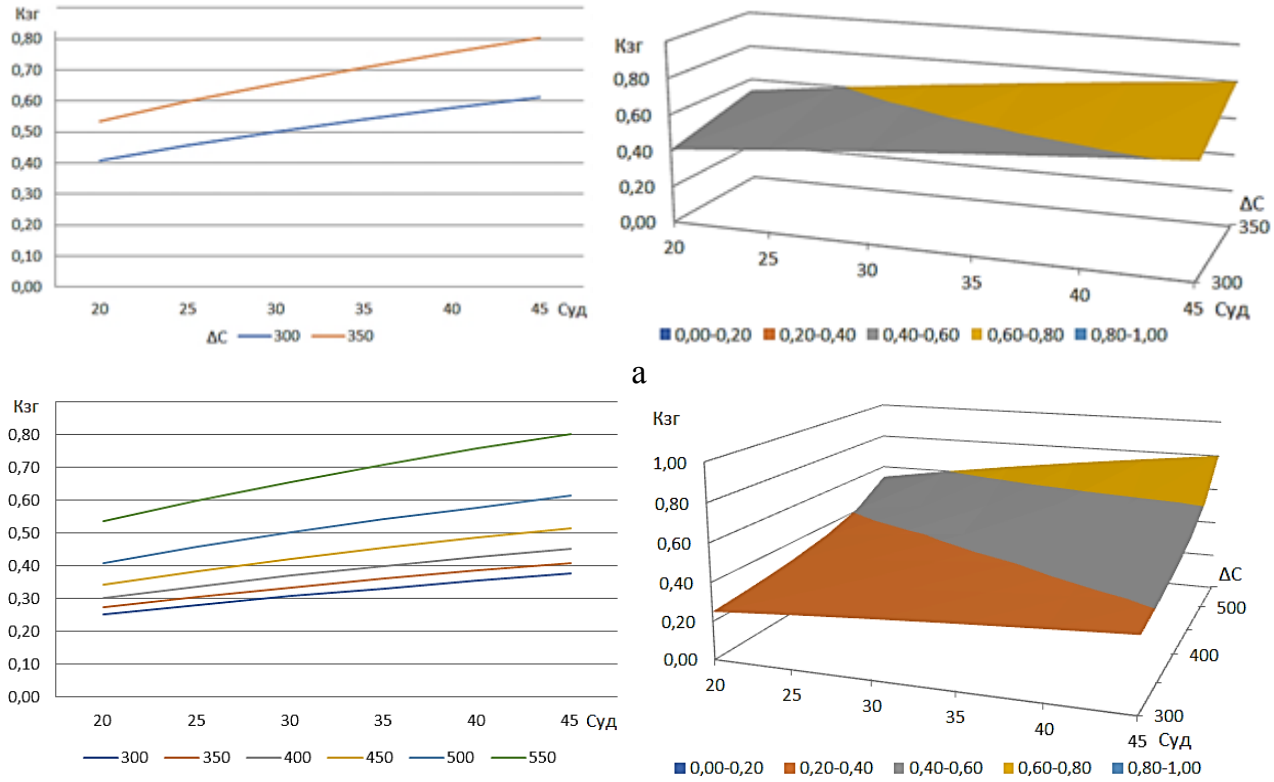

Рисунок 2 – Изменение оптимального значения коэффициента замены дизельного топлива газом: а – $C_{ОБ1} = 420$ руб.; $C_{УД} = 20 - 45$ руб./час; $\Delta C = 300 - 350$ руб.; б – $C_{ОБ1} = 620$ руб.; $C_{УД} = 20 - 45$ руб./час; $\Delta C = 300 - 550$ руб.

При уменьшении разницы в стоимости дизтоплива и газа коэффициент замены должен быть снижен.

На рисунках 3 и 4 показано графическое представление изменения требуемой величины суммарных затрат на переоборудование дизеля, в тыс. руб.

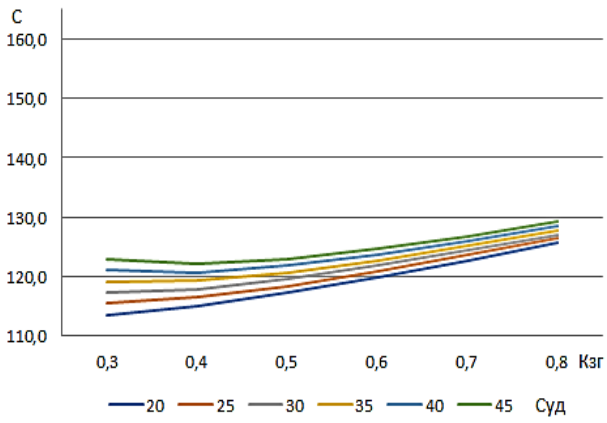

Рисунок 3 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля при $\Delta C = 300$ руб.

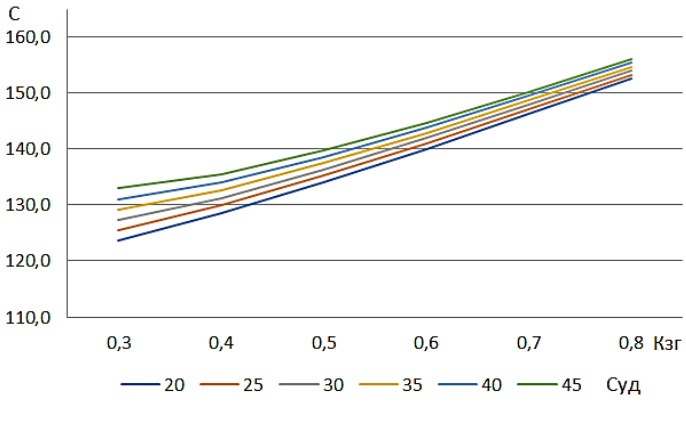

Рисунок 4 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля при $\Delta C = 600$руб.

Допустимая величина переменной составляющей затрат на

переоборудование дизеля, исходя из разницы в стоимости дизтоплива и КПГ, удельных затрат на ремонт дизеля и полученной на практике величины коэффициента замещения дизтоплива газом может быть установлена:

$$C_{ОБ1} = \frac{C_{УД}}{K_{ЗГ}^2} + \Delta C \quad . \qquad (5)$$

Теоретически рассмотрено влияние неустановившегося режима работы МТА на эффективность перевода дизеля на газодизельный режим работы. Установлено влияние резких увеличений и уменьшений нагрузки на производительность, расход топлива и качественное выполнение операции МТА, в результате которых происходит рассогласование в работе систем двигателя. На основании теоретических исследований и эксплуатационных данных сформулированы требования к модели.

В третьей главе «Экспериментальные исследования» представлены лабораторные испытания топливной аппаратуры и двигателя Д-240, а также производственные испытания трактора МТЗ-82, оборудованного газодизельным двигателем Д-240 с системой питания по патенту на полезную модель №88070U1 «Система питания газодизеля».

Экспериментальная программа исследований состояла из нескольких этапов:

• параметры топливоподачи на безмоторной установке исследовались с помощью осциллографии для анализа характеристик процесса подачи топлива;

• снятие внешней регуляторной характеристики двигателя с питанием дизельным топливом в условиях статического и динамического нагружения;

• снятие внешней регуляторной характеристики с битопливным питанием дизеля в условиях статического и динамического нагружения;

• производственные испытания трактора МТЗ-82, оборудованного двигателем Д-240 с газодизельным питанием.

На испытаниях использовался трактор МТЗ-82 с двигателем Д-240, выпущенный Минским моторным заводом в 1991 году. В ходе проведения испытаний использовался сжатый природный газ из баллонов согласно ГОСТ 27577 – 2022, а также дизельное топливо марки Л в соответствии с ГОСТ 305 – 82 и моторное масло М-10-Г2 по ГОСТ 17479.1 – 2015.

Методика проведения исследования представлена на рисунке 5.
Проведение исследования топливной системы включало анализ изменения ключевых характеристик процесса впрыска в зависимости от различных регулируемых параметров, а также режимов эксплуатации. Экспериментальные исследования системы подачи топлива проводились на стенде КИ-921М с дополнительно установленной измерительно-регистрирующей аппаратурой (рисунки 6 и 7) для испытания и регулировки ТНВД, оснащенного необходимым оборудованием, обеспечивающим взаимообусловленную связь устройств подачи дизтоплива и газа.

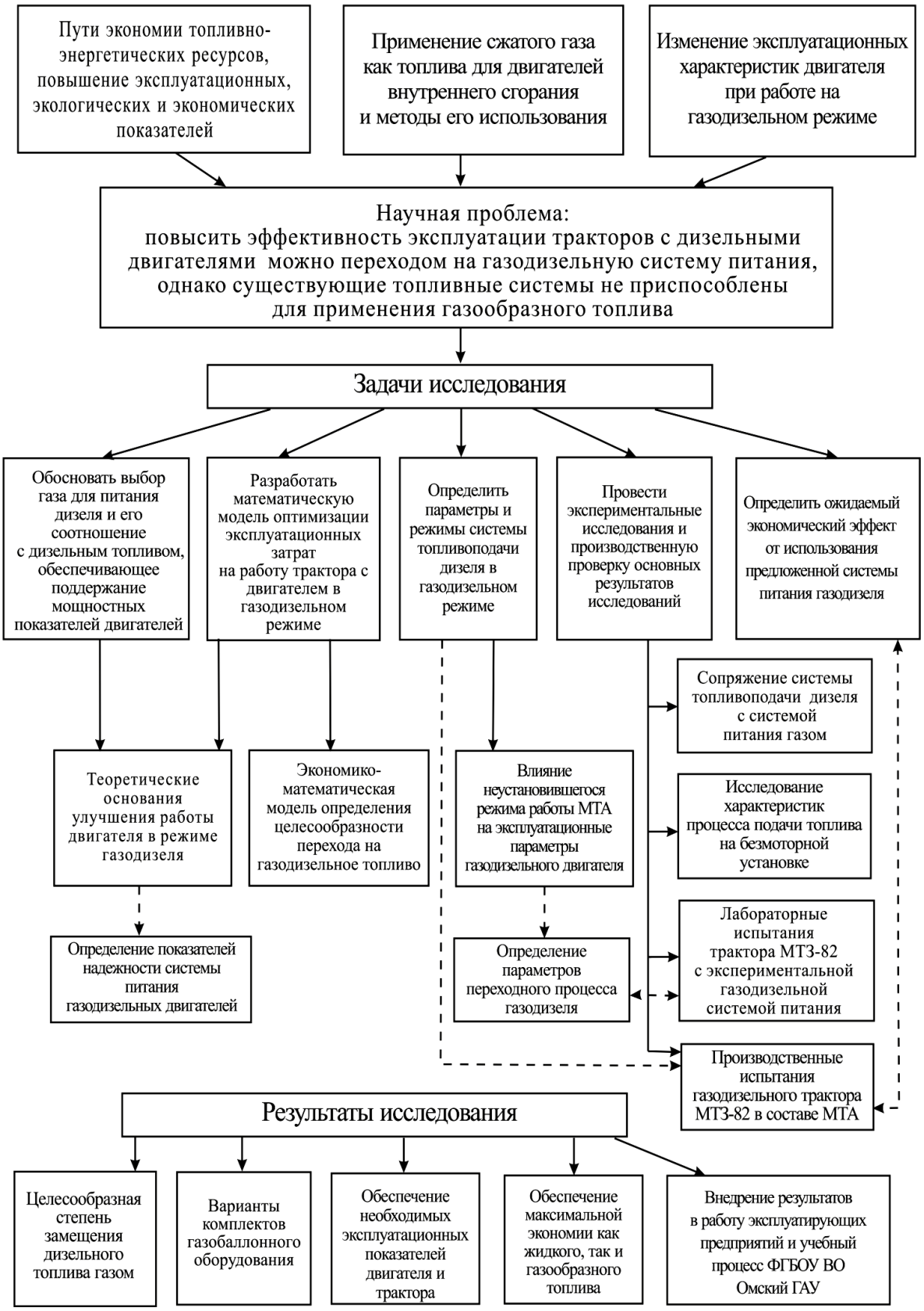

Рисунок 5 – Методика проведения исследования

Сравнительные испытания проводили в ФГБУ «Сибирская МИС» Таврического района Омской области с использованием электротормозного нагрузочного стенда «RAPIDO» для испытания двигателей внутреннего сгорания (акт испытаний от 20.10.2023 г.).

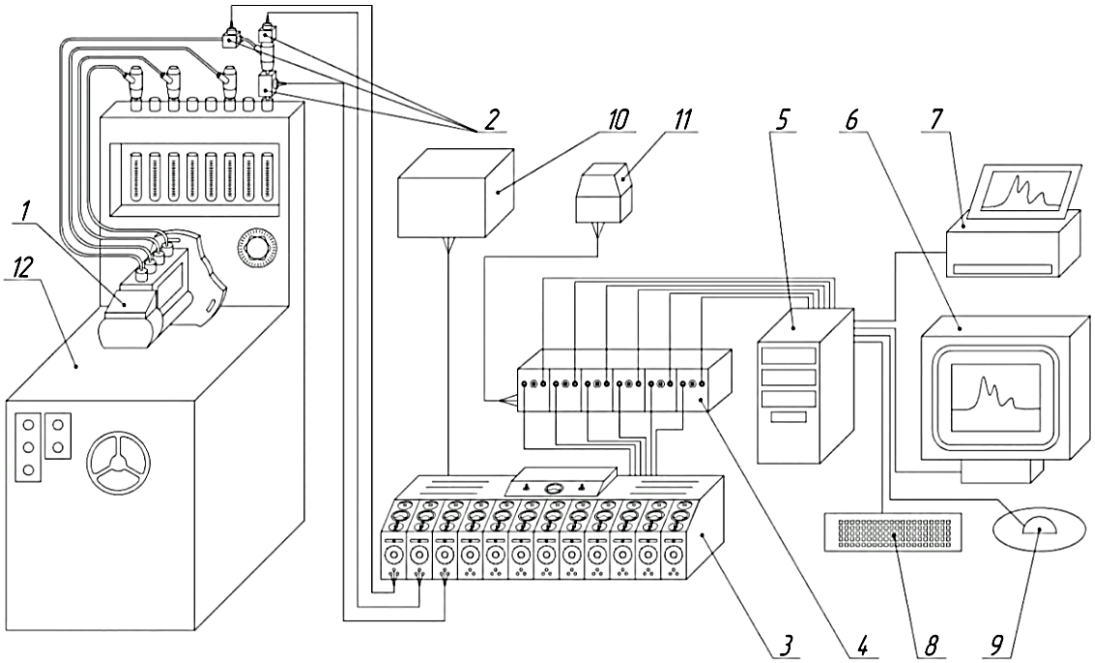

Рисунок 6 – Экспериментальный стенд для исследования подачи топлива:
1 – ТНВД; 2 – датчики тензометрические: давления в топливопроводе у форсунки; характеристики впрыска; 3 – двенадцатиканальная тензометрическая станция УТС1-ВТ-12/35; 4 – высокочастотный фильтр; 5 – персональный компьютер с аналого-цифровым преобразователем ЛА-2М5; 6 – монитор; 7 – принтер; 8 – клавиатура; 9 – мышь; 10 – блок питания тензометрической станции; 11 – блок питания высокочастотного фильтра; 12 – стенд КИ-921М для испытания и регулировки ТНВД

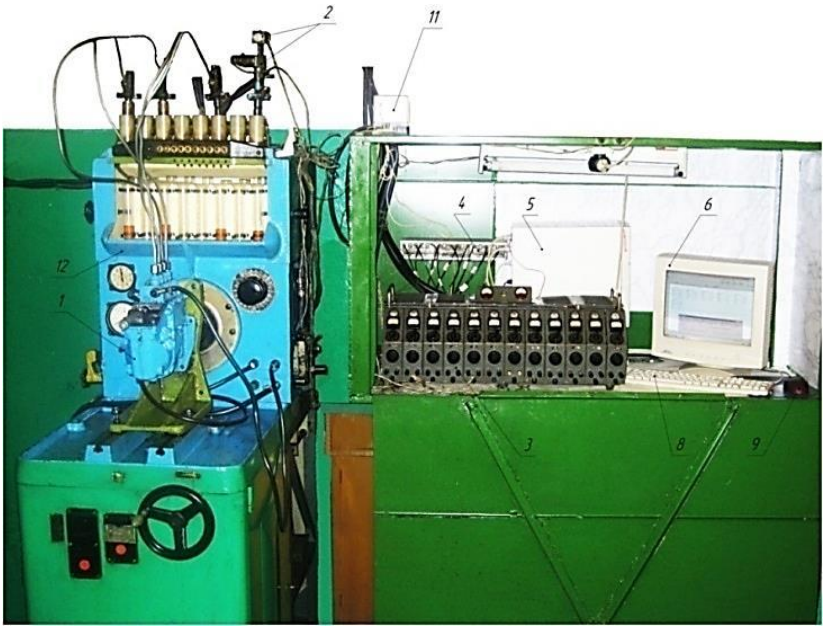

Рисунок 7 – Экспериментальная установка для оценки процесса топливоподачи. Позиции соответствуют рисунку 6

Параметры переходного процесса определяли на электротормозном стенде RAPIDO путём ступенчатого воздействия на тормоз установки. С этой целью стенд был дополнительно оборудован приспособлением для регулирования величины импульса. Во время эксперимента стабилизировались другие виды возмущений, чтобы исключить их влияние на объект исследования. На рисунке 8 приведен переходной процесс при ступенчатом

воздействии на тормоз установки.

Для определения времени переходного процесса t на характеристике переходного процесса по оси ординат откладывают отклонение x, численно равное величине воздействия y в относительных единицах, и по полученной точке A находят искомую величину t.

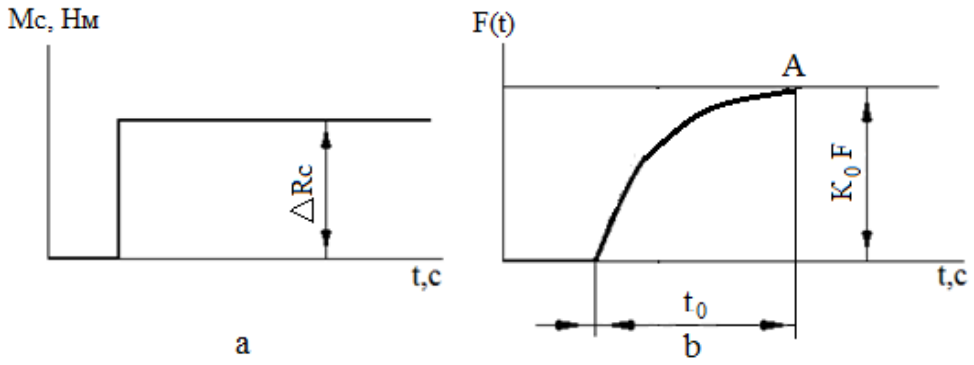

Рисунок 8 – Схематическое изображение ступенчатого воздействия на тормоз стенда (a) и реакции эксплуатационного параметра (b) на это воздействие.

Обработку экспериментальных данных выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 18509 – 88.

Для исключения систематических ошибок и уменьшения случайных обработку результатов экспериментов проводили с использованием статистических методов.

При обработке экспериментальных результатов доверительная вероятность принималась равной 95%.

В главе 4 «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты стендовых испытаний топливного насоса УТН-5, исследования параметров переходных процессов, проведена оценка погрешностей ММ (формулы 13-16) с экспериментальными данными.

Изменения частоты вращения n (мин$^{-1}$) при переходном процессе:

$$\Delta n = e^{-1.6059\cdot 10^{-6}\cdot t}[(2400 - 0{,}867839\cdot \kappa_н M_{кс}) + 0{,}0596\cdot \kappa_н M_c \sin(1{,}681628\cdot t)]. \quad (6)$$

Погрешность модели ε = 0,25%.

Изменения момента двигателя при переходном процессе:

$$\Delta Me = 0{,}687839\cdot e^{0{,}126\cdot t}\cdot \kappa_н M_c \cdot \cos(0{,}187839\cdot t). \quad (7)$$

Погрешность модели ε =1,98%.

Изменение мощности двигателя *Ne* (кВт) при переходном процессе:

$$\Delta Ne = 0{,}198828\cdot e^{0{,}0065\cdot t}\cdot \kappa_н M_c \cdot \cos(0{,}103839\cdot t). \quad (8)$$

Погрешность модели ε = 1,79%.

Изменение часового расхода газа $G_г$ (м^3/ч) при переходном процессе:

$$Gг = 0{,}49 + 0{,}048739\cdot e^{0{,}0065\cdot t}\cdot к_н M_c \cdot \cos(0{,}143839\cdot t)(6{,}1485 - M_c^{0{,}2995}). \quad (9)$$

Погрешность модели ε = 4,19%.

В формулах (6) – (9):

t – время переходного процесса, с;

$\kappa_н$ – коэффициент пропорциональности;

M_c, M_e – момент сопротивления и вращающий момент двигателя, Н·м.

Рассчитанные по формулам (6) – (9) и экспериментальные параметры переходного процесса при увеличении нагрузки представлены на рисунке 9.

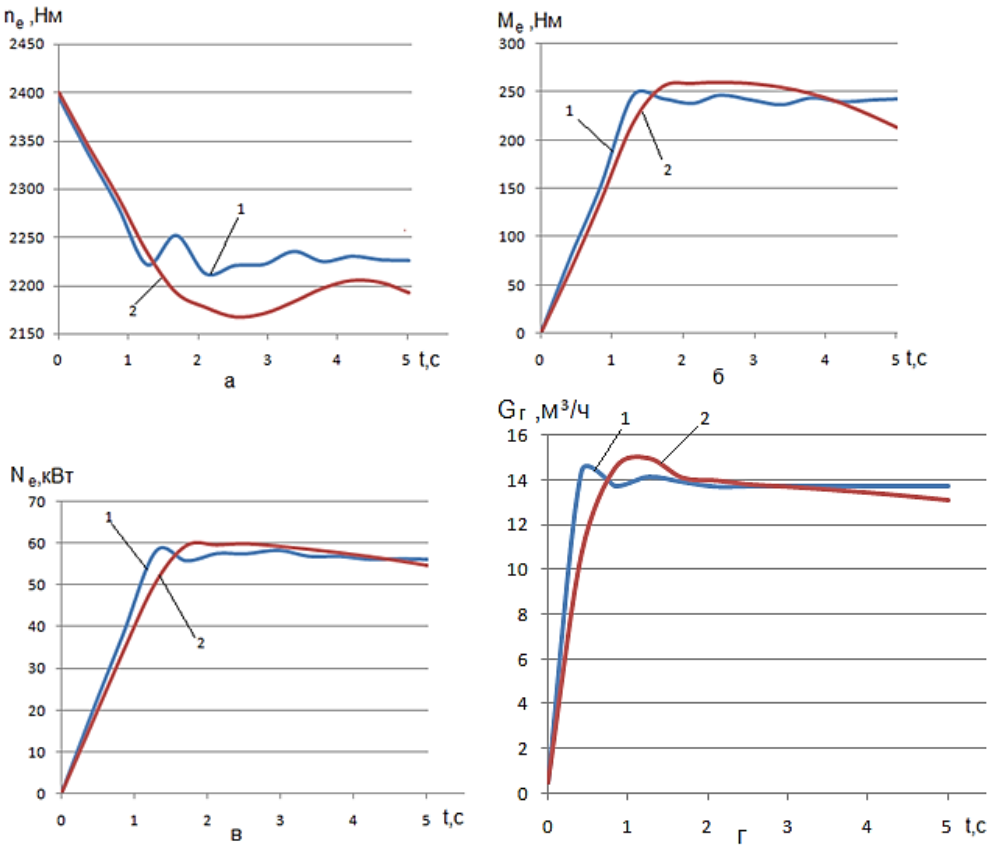

Рисунок 9 – Графики переходных процессов газодизельного двигателя в зависимости от времени процесса : а – n_e; б – M_e ; в – Ne; г – $G_г$: 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные по модели (6) – (9)

Анализ этих графиков показывает, что время переходного процесса при работе дизельного двигателя с предлагаемой системой питания на 30...35 % ниже, что обеспечивает снижение потерь мощности и расхода топлива при выполнении технологических операций, связанных с неустановившейся работой МТА.

Полученные формулы не учитывают времени задержки реакции системы. Для учёта времени задержки можно уточнить формулы (6) – (9), заменив в них время t на $t+\Delta\tau_{зр}$. При времени задержки $\Delta\tau_{зр}= 0$ уравнения будут иметь вид (10) – (13). Если время задержки реакции системы на возмущающее воздействие больше или равно времени переходного процесса, то изменение исследуемого параметра не происходит.

По анализу графиков, построенных по ММ (6) – (9) и полученных экспериментальным путём выявлена высокая сходимость результатов. Об этом свидетельствуют также расчёты погрешностей между экспериментальными данными и данными расчёта по ММ. Наименьшую погрешность в переходном процессе имеет ММ изменения частоты вращения двигателя – ε = 0,25% и наибольшая погрешность у ММ часового расхода газа – ε = 4,19%. Следовательно, отклонение параметров, рассчитанных по ММ, от экспериментальных не превышает ε = 4,19%.

На рисунке 10 представлены графики изменения эксплуатационных

параметров двигателя на переходных процессах при уменьшении нагрузки при работе на газодизельном режиме.

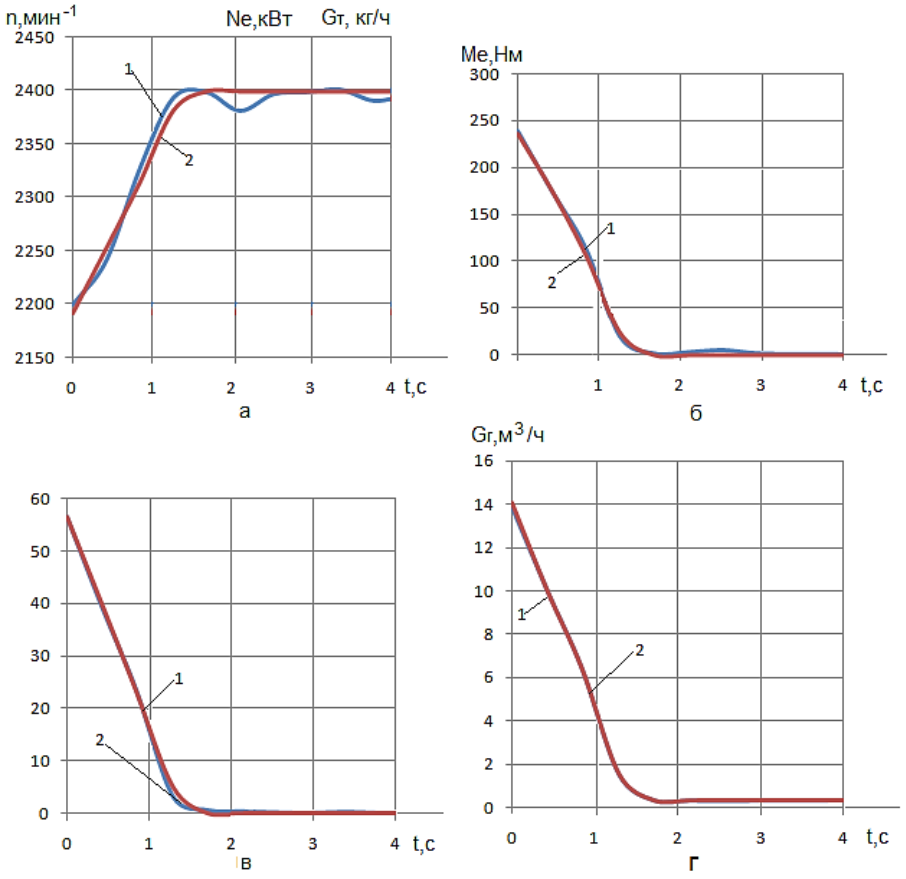

Рисунок 10 – Графики переходных процессов газодизельного двигателя при уменьшении нагрузки в зависимости от времени процесса: а – n_e; б – M_e ; в – Ne; г – Gв : 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные по модели (6) – (9)

При работе двигателя на газе:

$$\Delta n = e^{-1.6061\cdot10^{-6}\cdot t}[(2400-0{,}84763\cdot\kappa_н M_{кс})+0{,}0589\cdot\kappa_н M_c \sin(1{,}681628\cdot t)]\,. \quad (10)$$

Погрешность модели ε = 0,0,42%.

Изменения момента двигателя при переходном процессе:

$$\Delta Me = 0{,}80204\cdot e^{-0{,}12559\cdot t}\cdot\kappa_н M_c\cdot\cos(0{,}20785\cdot t)\,. \quad (11)$$

Погрешность модели ε = 4,31%.

Изменение мощности двигателяNe (кВт) при переходном процессе:

$$\Delta Ne = 0{,}1821\cdot e^{-0{,}0062\cdot t}\cdot\kappa_н M_c\cdot\cos(0{,}103839\cdot t)\,. \quad (12)$$

Погрешность модели ε = 3,26%.

Изменение часового расхода воздуха $G_т$ ($м^3$/ч) при переходном процессе:

$$\Delta G_г = 0{,}04672\cdot e^{0{,}000125\cdot t}\cdot\kappa_н M_c\cdot\cos(0{,}003839\cdot t)\,. \quad (13)$$

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных математической моделью (13): $к_υ$ = 2,86%.

С учётом переходных процессов, определяемых формулами (10) – (13), эффективные показатели двигателя можно представить формулой:

$$F_e = F_0 \pm \Delta F\,, \quad (14)$$

где F_e, F_0 – эффективное значение эксплуатационного параметра и значение

параметра при установившемся режиме соответственно;

ΔF –изменение значения параметра в переходном процессе.

На рисунке 11 для сравнения приведены внешние регуляторные характеристики дизельного двигателя Д-240 при осуществлении дизельного и газодизельного процессов.

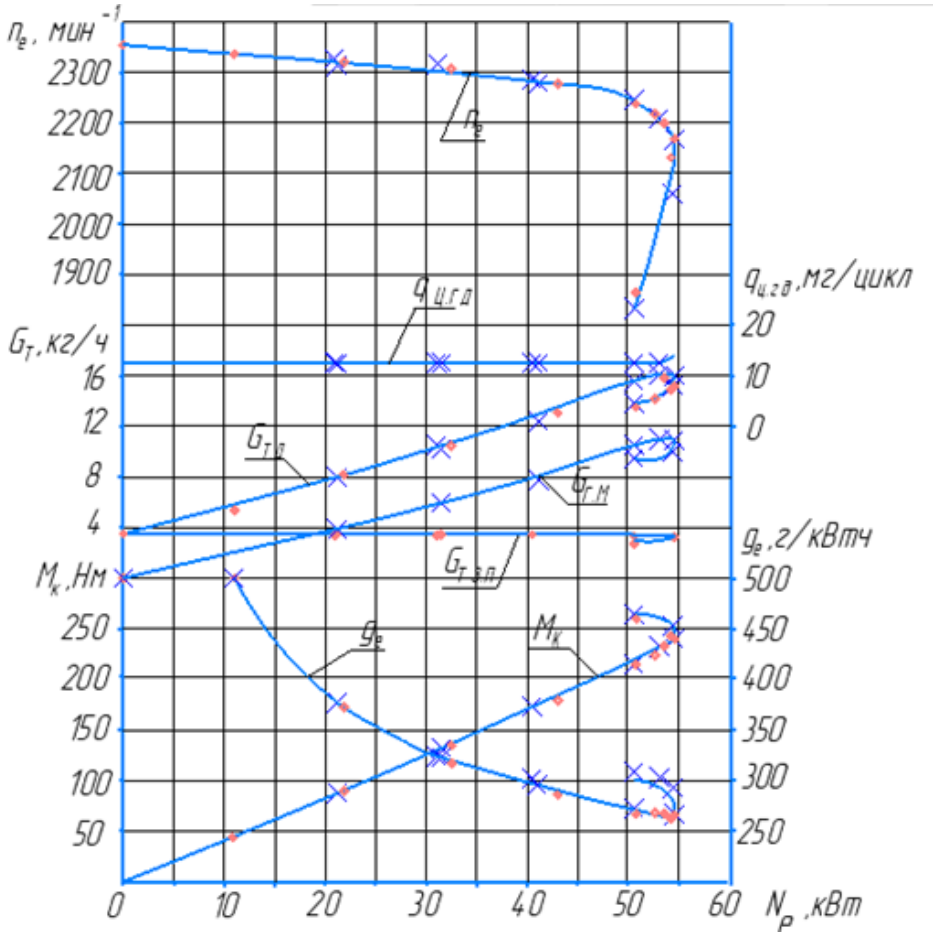

Рисунок 11 – Характеристика дизеля Д-240 (4Ч 11/12,5) при дизельном и газодизельном процессах

Анализ показывает, что характеристика газодизельного процесса с предлагаемой системой питания выглядит как и у дизельного. Параметры частоты вращения двигателя (n_e) при работе по газодизельному процессу при изменении крутящего момента ($M_{крэ}$) и эффективной мощности (N_e), полученные в результате экспериментов, схожи с параметрами при работе по дизельному процессу, что можно увидеть при анализе представленных графиков. При этом средняя погрешность между кривыми не превышает ε = 2%. Модернизированная система питания трактора МТЗ-82 для работы на газообразном топливе обеспечивает требуемые эксплуатационные характеристики как двигателя, так и трактора в целом.

При использовании газодизельного процесса максимальная и номинальная мощности двигателя сохраняются, как и при работе по дизельному процессу – 54,6 кВт. Значения крутящего момента $M_к$ и частоты вращения коленчатого вала двигателя n_e практически не изменяются.

Цикловая подача дизельного топлива не изменяется с ростом нагрузки на

двигатель, а часовой расход топлива снижается с 3,5 кг/ч (холостой ход) до 2,75 кг/ч из-за снижения частоты вращения коленчатого вала двигателя в конце перегрузки. Частота вращения коленчатого вала двигателя и цикловая подача дизельного топлива оказывают влияние на изменение часовой подачи запальной порции топлива:

$$G_{тзп} = \frac{24 g_{цзп} n_e}{200000}, \quad (15)$$

где $g_{цзп}$ – цикловая подача запальной порции топлива, 12,5 мг/цикл;

n_e – частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$.

Вследствие большей теплотворной способности и дополнительной подачи запальной порции дизельного топлива часовой номинальный расход газообразного топлива (метана) $G_{Г.М.Н}$, равный 11 кг/ч, меньше часового номинального расхода дизельного топлива $G_{Т.Д.Н}$, равного 16 кг/ч.

Для оценки регулирования топливоподачи в экспериментальной системе питания газодизеля проводится расчёт относительного коэффициента эффективности изменения крутящего момента $К_э$:

$$K_э = \frac{M_{крэ}}{M_{крсв}}. \quad (16)$$

При анализе динамики газодизельного процесса важно отметить, что экспериментальные точки могут отклоняться от теоретических значений, однако это не означает, что регулирование подачи топлива становится неустойчивым. Теплотворностью смеси с учетом заданной и фактической частоты вращения коленчатого вала двигателя, баланса момента сопротивления и крутящего момента, изменения эффективного КПД управляет всережимный регулятор ТНВД. Особенности его работы подтверждают его соответствие дополнительным критериям конструкции системы топливоподачи.

Момент сопротивления на коленчатом валу двигателя в зависимости от силы тяги $Р_{кр}$, (Н) обоснован многими факторами и может выражаться общей формулой:

$$M_c = F(P_{кр}, P_f, R_к, i_{тр}, \eta_{тр}), \quad (17)$$

где $P_{кр}$ – сила тяги на крюке, Н;

P_f – сила сопротивления качению трактора, Н;

$R_к$ – теоретический радиус колеса, м;

$i_{тр}$ – передаточное число трансмиссии;

$\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии трактора.

Анализ экспериментальных параметров, полученных в процессе исследования, однозначно показывает: гипотеза о повышении экономических и эксплуатационных характеристик газодизельных двигателей является действенной при использовании усовершенствованной системы питания на неустановившихся режимах работы в составе МТА.

В таблице 1 приведены основные показатели эффективности новой газодизельной системы экспериментального трактора по сравнению с обычной дизельной.

Таблица 1– Показатели эффективности экспериментального трактора МТЗ-82 с газодизельной системой питания

Наименование показателя	Значение показателя	
	Базовая модель	Газодизельная модификация
Мощность двигателя, кВт	54,63	54,6
Частота вращения коленчатого вала двигателя, мин $^{-1}$	2174	2167
Крутящий момент, Н·м	240	240
Часовой расход: – дизельного топлива, кг/ч	14,26	3,25
– природного газа, м^3/ч	–	10,9

Представленные в таблице 1 показатели свидетельствуют: у двигателя с новой конструкцией системы питания газодизеля повышается эффективность работы.

Средний коэффициент замещения дизельного топлива на компримированный природный газ ($К_{зт}$) в соответствии с данными исследований установлен в пределах от 0,30 до 0,80. В результате этого значительно сокращаются затраты на топливные ресурсы.

В пятой главе «Технико-экономическая оценка результатов исследования» приведена экономическая оценка использования трактора с экспериментальной системой питания газообразным топливом. Проведенные расчёты подтверждают экономическую целесообразность использования системы питания дизельного двигателя газообразным топливом, поскольку можно получить экономический эффект в размере 409 880 руб. на один трактор в ценах 2024 года. Срок окупаемости затрат на перевод трактора МТЗ на питание природным газом равен 0,27 года при годовой загрузке трактора 1000 мото-часов.

Заключение

Итоги проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что повышение эффективности газодизельного двигателя путем снижения расходов на топливо возможно при использовании компримированного природного газа, при этом для воспламенения смеси в цилиндрах используются стартовые порции дизельного топлива.

2. Разработанная математическая модель затрат на работу газодизельного двигателя позволила установить экономически целесообразную степень замещения дизтоплива компримированным газом в зависимости от затрат на ремонт дизеля, разницы в стоимости дизтоплива и газа, переменной величины удельных затрат на переоборудование системы питания. При увеличении удельных затрат на ремонт в 2 раза коэффициент замещения должен быть увеличен на 41,4%. Установлены варианты комплектов газобаллонного оборудования в соответствии с их рассчитанной стоимостью.

3. Разработана конструкция системы питания дизельного двигателя компримированным газом, защищённая патентом на полезную модель. Расчётно-экспериментальные исследования разработанной системы питания газодизеля показали, что при её использовании отклонения частоты вращения коленчатого вала двигателя не превышают 4...6%, крутящего момента двигателя 1...2%, мощности двигателя 3 ... 4%, часового расхода газа 3 ... 5% при постоянной запальной дозе дизельного топлива.

4. В результате экспериментальных исследований установлено время переходного процесса, составляющее 1,8...1,9 с. При производственной проверке в условиях СПК «Сибиряк» Москаленского района и ООО «Инициатива» Полтавского района Омской области выявлено: предлагаемая система питания дизельного двигателя природным газом обеспечивает необходимые эксплуатационные показатели двигателя и трактора; мощность двигателя составила 54,6 кВт, крутящий момент 240 Н·м при частоте вращения коленчатого вала 2167 мин$^{-1}$.

5. Технико-экономическая оценка предложенной системы питания дизельного двигателя газообразным топливом свидетельствует об обеспечении максимальной экономии как жидкого, так и газообразного топлива при всех режимах работы двигателя. Годовой экономический эффект от внедрения предложенной системы питания дизельных двигателей газообразным топливом составит до 409 880 руб. на один трактор в ценах 2024 года. Срок окупаемости затрат на перевод трактора МТЗ на питание природным газом равен 0,27 года при годовой загрузке трактора 1000 мото-часов.

Рекомендации производству. Результаты исследований можно использовать в эксплуатирующих организациях Омской области, проектно-конструкторских организациях, учебном процессе обучения бакалавров и магистров направления подготовки «Агроинженерия», «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», аспирантов специальности «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса».

Перспективы дальнейшего развития темы исследования состоят в разработке микропроцессорного устройства автоматического регулирования количества дизельного топлива и газа в зависимости от фактической нагрузки на дизель. Результаты исследования могут быть распространены на дизели тракторов других классов тяги.

Основные публикации по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Захаров, С. В.** Эффективность перевода дизеля Д-240 (4Ч 11/12,5) трактора МТЗ на компримированный природный газ / С. В. Захаров. – Текст : непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 9 (59). – С. 60–62.

2. Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата путем оптимизации режимов управления топливоподачи в газодизеле / А. П. Соломкин, И. Г. Сизов, **С. В. Захаров**, О. В. Захарова. – Текст : непосредственный //

Вестник ВСГУТУ. – 2014. – № 3 (48). – С. 53–58.

3. Квашин, В. П. Способы экономии топлива в агропромышленном комплексе / В. П. Квашин, А. Г. Щербакова, **С. В. Захаров** – Текст : непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2 (30). – С. 109–115.

4. **Захаров, С. В.** Оценка показателей надежности системы питания тракторов с газобаллонным оборудованием / **С. В. Захаров**, Е. И. Мальцева. – Текст : непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2024. – № 4 (56). – С. 201–208.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

5. Keruchenko, L. S. Fuel system reliability of gas tank tractors / L. S. Keruchenko, **S. V. Zakharov**, E. I. Maltseva. – Text : direct // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Zernograd, Rostov Region. – 2021. – P. 012114.

Патенты

6. Патент № 88070U1 Российская Федерация МПК7 F02M 41/00 Система питания газодизеля № 2009112639/22 : заявл. 06.04.2009 : опубл. 27.10.2009 / Л. Г. Ковалев, **С. В. Захаров** ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Омский государственный аграрный университет. – 13 с. – Текст : непосредственный.

Публикации в периодических изданиях

7. **Захаров, С. В.** Обоснование к количественному дозированию газа во впускной коллектор двигателя Д-240 с целью улучшения эффективных показателей / **С. В. Захаров**, М. А. Брянцев, Д. Ю. Квашин. – Текст : электронный // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2017. – № 1 (8). – С. 27.

8. **Захаров, С. В.** Улучшение топливной экономичности ДВС интенсификацией рабочего процесса на частичных нагрузках / С. В. Захаров. – Текст : электронный // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2023. – № 3 (34).

9. Редреев, Г. В. Повышение надежности автотракторных двигателей / Г. В. Редреев, **С. В. Захаров**, А. А. Лучинович. – Текст : электронный // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2023. – № 3 (34).

10. Степанов, А. Е. Электронное пособие «Организация эксплуатации газобаллонной автотракторной техники в агропромышленном комплексе» / А. Е. Степанов, С. А. Беляков, **С. В. Захаров.** – Текст : непосредственный // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2014. – № 6 (61). – С. 68.

Публикации в сборниках материалов конференций и семинаров

11. **Захаров, С. В**. Обоснование способа повышения эффективности использования тракторов при выполнении сельскохозяйственных работ / **С. В. Захаров**. – Текст : электронный // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития : сборник материалов Региональной научно-практической конференции, посвященной 65-летию образования факультета ТС в АПК (Мехфак) ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, 28 апреля 2016 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2016. – С. 19-20.

12. **Захаров, С. В.** Повышение эксплуатационных и экономических показателей дизельных двигателей путем перевода их на компримированный природный газ / **С. В. Захаров,** Л. С. Керученко. – Текст : электронный // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития : сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, 19 апреля 2018 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2018. – С. 95–99.

13. **Захаров, С. В.** Определение запальной дозы дизельного топлива при работе дизеля по газодизельному циклу / **С. В. Захаров**, Л. С. Керученко, Е. И. Мальцева. – Текст : электронный // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях : сборник всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 29 ноября 2019 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. – С. 109–113.

14. **Захаров, С. В**. Математическая модель переходного процесса тракторного двигателя при изменяющейся нагрузке на крюке / **С. В. Захаров**, Л. С. Керученко, А. С. Союнов. – Текст : электронный // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях : сборник всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 29 ноября 2019 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. – С. 116–120.

15. **Захаров, С. В.** К вопросу оптимизации соотношения дизельного топлива и газа при работе двигателя в режиме газодизеля / **С. В. Захаров**, Л. С. Керученко, В. П. Квашин. – Текст : непосредственный // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития : сборник II Международной научно-практической конференции, посвященная 25-летию ФГБОУ ВО Омский ГАУ в статусе университета, Омск, 19 апреля 2019 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. – С. 171–175.

16. Керученко, Л. С. Работа газодизельного двигателя при неустановившейся нагрузке / Л. С. Керученко, **С. В. Захаров** // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях : сборник всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 29 ноября 2019 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. – С. 149–152.

17. Повышение эффективных и эксплуатационных показателей дизелей / **С. В. Захаров**, Е. Ю. Мирошник, Д. Н. Виноградов, Я. Д. Высоцкий // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития : Сборник VII Международной научно-практической конференции, Омск, 14 апреля 2022 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2022. – С. 215-219.

18. **Захаров, С. В.** Теоретическое обоснование количества запальной дозы топлива при использовании сжиженного газа в дизельных двигателях / **С. В. Захаров** // Импортонезависимость и продовольственная безопасность: глобальные вызовы и стратегические тренды развития АПК в условиях трансформации международных экономических отношений : Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 105-летию со дня основания ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, 14 июня 2023 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2023. – С. 167-173.