

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина

На правах рукописи

Захаров Сергей Васильевич

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

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Редреев Григорий Васильевич

Омск – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1 Пути экономии топливно-энергетических ресурсов, повышение эксплуатационных, экологических и экономических показателей дизелей переводом на компримированный природный газ	12
1.2 Обоснование применения компримированного природного газа в дизелях машинно-тракторных агрегатов.....	16
1.3 Применение сжатого газа как топлива для двигателей внутреннего сгорания и методы его использования.....	26
1.4 Анализ существующих конструкций систем питания дизельного двигателя КПП	29
1.5 Анализ способов обеспечения автотракторной техники газодизельным топливом.....	33
1.6. Основные аспекты функционирования двигателя на газодизельном топливе в составе МТА.....	35
1.7 Изменение эксплуатационных характеристик двигателя при работе на газодизельном топливе	38
1.8 Выводы, цель и задачи исследований.....	39
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	41
2.1 Модель работы трактора во время осуществления технологических операций.....	41
2.2 Обоснование применения тракторов с газодизельными двигателями в МТА	42
2.3 Влияние неустановившегося режима работы МТА на эксплуатационные параметры газодизельного двигателя	46
2.4 Теоретические основания для улучшения работы двигателя в режиме газодизеля.....	51

2.5 Необходимые условия для успешного создания газодизельных систем	58
2.6 Выводы по второй главе	58
ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	60
3.2. Объект испытаний.....	63
3.3. Методика исследования процесса подачи топлива на безмоторной установке	64
3.4 Описание системы питания газодизеля	66
3.5 Испытания трактора МТЗ-82 с экспериментальной газодизельной системой питания	71
3.5.1 Методика моторных испытаний	71
3.5.2 Методика оценки проведенных моторных испытаний	74
3.5.3 Методика производственных испытаний газодизельного трактора МТЗ-82 в составе МТА	76
3.5.4 Определение параметров переходного процесса.....	77
3.6 Выводы по третьей главе.....	79
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	80
4.1 Результаты стендовых испытаний топливного насоса УТН-5.....	80
4.2 Исследование параметров переходных процессов	81
4.3 Определение показателей надёжности системы питания газодизельных тракторов.....	92
4.4 Техническое обслуживания трактора при работе с газодизельной системой питания	95
4.5 Выводы по главе.....	97
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	98
5.1. Методика расчёта экономической эффективности	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	109
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	138

ПРИЛОЖЕНИЕ 1	139
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	155
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	161
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Важнейшей проблемой, стоящей перед инженерной службой хозяйств, является поддержание в заданных пределах энергетических и улучшение экономических показателей мобильных и стационарных энергетических средств, эксплуатируемых в хозяйствах.

В сельскохозяйственном секторе России вопрос снижения зависимости от нефтяных моторных топлив и поиск альтернативных источников энергии для автотракторной техники стоит особенно остро. Изучение возможностей применения других видов топлива не только актуально, но и вызывает интерес с точки зрения повышения экологических характеристик и эффективности работы двигателей данного типа.

На протяжении многих лет исследователи активно занимались изучением возможности использования альтернативных видов топлива, в частности природного газа, в дизельных двигателях, применяемых в автомобилях и тракторах. Выдающиеся достижения в этой области нашли отражение в научных трудах таких авторов, как Д.Т. Аксенов, Ю.Н. Васильев, Д.Н. Вырубов, К.И. Генкин, Н.А. Гуревич, К.Е. Долганов, А.А. Капустин, Л.К. Коллеров, А.П. Кудряш и С.Е. Лебедев, В.А. Лиханов, Е.К. Мазинг, Г.Г. Мансфельд, В.П. Мараховский, О.Д. Мурашов, А.А. Мугалибов, О.П. Наумов, А.И. Пятниченко, А.А. Равкинд, Г.И. Самоль, Б.Н. Струнге, Н.И. Субоч, Е.А. Чудаков и другие.

Выполнив анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных данной проблеме, можно сделать заключение: для её решения в автотракторных дизелях возможно использовать природный газ, так как он имеет ненефтяное происхождение и может улучшить эффективные и экологические показатели и увеличить ресурсы использования топлива.

Обобщение результатов научных исследований показывает, что учёными стран бывшего СССР исследовались возможности использования газа как альтернативного дизельному топливу источника энергии с целью решения экологических проблем. Исследования в основном были направлены на создание

малотоксичных автотракторных дизелей, дизелей для железнодорожного транспорта. Некоторые работы посвящены исследованию возможности использования в дизелях природного газа [94, 183].

В качестве альтернативного источника энергии использование природного газа требует тщательного изучения процессов, происходящих в узлах и механизмах с учётом действия реальных нагрузок в составе МТА. При этом исследования должны быть проведены как в статических, так и в динамических условиях. 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 $N_{ен}$ [6, 76, 77, 126]. 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, увеличения расхода топлива. В этих условиях необходимо обеспечивать быстрое восстановление режима работы дизеля. Высокая температура воспламенения природного газа, по сравнению с дизельным топливом, требует переоборудования системы питания дизеля.

Совершенствование и создание новой конструкции системы питания дизеля газообразным топливом – одна из актуальных задач.

Научные исследования и разработки, выполненные в рамках решений данной задачи, являются основой диссертации, которая соответствует утвержденному плану НИР ФГБОУ ВО Омский ГАУ по теме «Исследование влияния альтернативных видов топлива на эксплуатационные параметры ДВС», регистрационный номер № 0120.1 002691.

Цель диссертационной работы: повышение эффективности эксплуатации тракторов тягового класса 1,4 тс, оснащённых газодизельными двигателями на переходных режимах путём совершенствования системы топливоподачи.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить 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 в рамках пунктов 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» (акт испытаний от 20.10.2023 г., приложение 2), а также в условиях производства.

Совершенствование системы регулирования подачи топлива позволяет обеспечить работоспособность трактора при применении КПП 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 КПП, снижается токсичность отработавших газов. Предложены мероприятия по техническому обслуживанию газобаллонного оборудования.

Результаты проведенного исследования успешно внедрились в работу хозяйств СПК «Сибиряк» Москаленского района Омской области (акт внедрения от 16.12.2024 г., приложение 2) и ООО «Инициатива» Полтавского района Омской области (акт о проведении испытаний систем подачи газообразного топлива от 30.05.2019 г., приложение 2), а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Омский государственный университет имени П.А. Столыпина» (акт внедрения результатов НИР от 01.10.2024 г., приложение 2).

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 (протокол № 1 заседания НТС от 30.01.2025 г., приложение 2).

Методология и методы исследования

Для проведения экспериментов использовались методы планирования экспериментов и математической статистики. Теоретические аспекты исследования базировались на классической механике, математическом моделировании, численных методах математического анализа и вычислительных экспериментах. Полученные результаты обрабатывались с помощью вычислительных экспериментов.

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.

Достоверность результатов проведенных исследований: благодаря применению передовых технологий сбора и анализа информации результаты проведенных исследований подтвердили свою достоверность. Совпадением результатов теоретических и практических исследований в лабораторных и производственных условиях, а также с соответствующими данными из независимых источников гарантирована точность данных.

Апробация результатов исследования. 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 тридцать три 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным энергетическим средством в сельскохозяйственных предприятиях является дизельный двигатель, как следствие сельскохозяйственные предприятия – крупнейшие потребители дизельного топлива (ДТ) (рисунок 1.1) [54]. Ежегодно в отрасли потребляется около 12–15 млн тонн ДТ, производимых из нефти [3, 54], это 25% выпускаемых нашей промышленностью, из них летние сорта ДТ составляют примерно 85%.

Недостаток дизельного двигателя – высокая стоимость дизельного топлива (ДТ); расходы на топливо, занимающие до 50% в себестоимости производства сельскохозяйственной продукции, составляют значительную часть затрат. Недостатком дизельных двигателей, работающих на ДТ, является также и значительное количество выделяющихся при работе выбросов вредных веществ. Кроме того, ДТ изготавливают из нефти, её запасы ежегодно истощаются. По данным [14, 81, 94], её дефицит к 2030 г. достигнет 16 млн баррелей в день, приводя к дефициту моторных топлив.

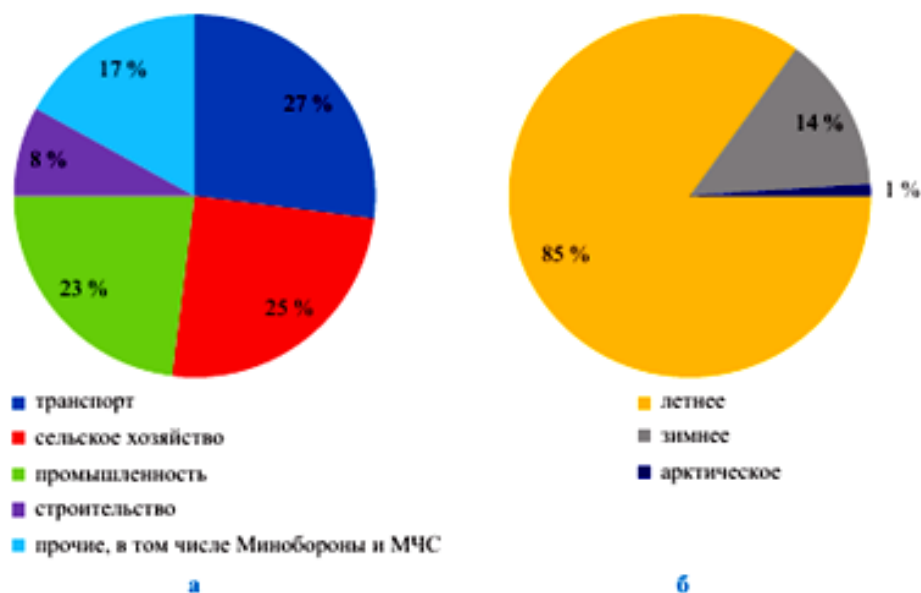


Рисунок 1.1– Основные потребители ДТ (а) и доля каждого вида ДТ (б) в общем потреблении, 2020 – 2022 гг.

Эти факторы обуславливают необходимость применения

энергосберегающих технологий, перехода на альтернативные, менее дорогостоящие виды топлив [23, 83, 95, 145, 181].

При использовании альтернативных топлив неизбежна модернизация топливной системы для совершенствования рабочих процессов дизелей с целью улучшения их эксплуатационных, экологических и экономических показателей [105, 154].

1.1 Пути экономии топливно-энергетических ресурсов, повышение эксплуатационных, экологических и экономических показателей дизелей переводом на компримированный природный газ

В сельском хозяйстве широко применяются дизельные двигатели в мобильной и стационарной технике, включая тракторы и комбайны. Они доминируют среди всех видов моторов, используемых в этой отрасли.

С огромным потенциалом для разнообразных областей применения считаются дизельные двигатели, их преимущества – долговечность, мощность, экономичное потребление топлива, высокая степень надёжности и невысокое воздействие на окружающую среду. Благодаря выделенным качествам они имеют преимущество перед карбюраторными двигателями. В дизельных двигателях достигается более эффективное сгорание топлива, благодаря тому что из каждого объёма сгораемого топлива удастся получить примерно 40-50% энергии, это намного выше, чем у бензиновых, так как у них 70% энергии теряется безвозвратно [75, 106]. Дизельное летнее топливо ДТ-Л содержит компоненты, которые обозначаются молекулярной формулой $C_{13}H_{24}$ [54].

При сгорании дизельного топлива выделяется теплота в объеме 42,5 МДж на каждый килограмм вещества. Температура самовоспламенения этого топлива достигает +250 °С.

Снижению токсичности обработанных газов придаётся важное значение в современных модификациях дизельных двигателей. Увеличение долговечности и надёжности, повышение эффективности и достижение высокой удельной мощности – задачи, на которые сегодня ориентированы улучшения в данной

области [10, 12, 49, 146, 152]. Большинство указанных проблем могут быть решены при помощи применения сжатого природного газа для модификации сельскохозяйственной техники [66, 122, 153].

Компримированное топливо – это название принято употреблять для природного газа, когда его сжимают до давления 20 МПа.

В зависимости от нахождения месторождения состав и структура природного газа могут различаться содержанием алифатических углеводородов (метан, этан, бутан и пропан) и алифатических спиртов (метанол и этанол), а также содержанием водорода.

Состав и структура природного газа представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Состав и структура природного газа [46, 47, 69].

Газ	Молекулярная формула	% содержание
Метан	CH_4	87 – 95
Этан	C_2H_6	0,5 – 4
Пропан	C_3H_8	0,2 – 1,5
Бутан	C_4H_{10}	0,1 – 1
Пентан	C_5H_{12}	0 – 1
Др. компоненты		2 – 13

Низшая теплотворность природного газа добываемого на месторождениях Российской Федерации и соседних государств может различаться, о чем свидетельствует таблица 1.2.

Таблица 1.2 – Низшая теплотворная способность природного газа [46, 69]

Месторождение газа	Q_H^P , КДж/м ³	Пересчет на условное топливо
Саратовское	35755	1,22
Ставропольское	36048	1,23
Средняя Азия	37514	1,28
Оренбургское	38100	1,30

Компримированный природный газ имеет ряд преимуществ:

- Сжатый природный газ дешевле дизельного топлива. 1 м³ в Омской области стоит 23,40 руб./м³, при стоимости дизельного топлива 67 руб./л.
- Имеет меньшее отрицательное воздействие на окружающую среду:

– при использовании дизельного топлива уровень выбросов оксида углерода достигает высоких значений, а применение природного газа снижает это количество до 5 – 10 раз, уменьшая воздействие парникового эффекта;

– уровень выбросов углеводородов уменьшился до трех раз;

– оксиды азота снижаются на уровне от 1,5 до 2,5 раза.

- Отмечается повышение КПД двигателя, работающего на природном газе, на 3-5% в сравнении с дизельным двигателем.

Использование в качестве топлива природного газа сопряжено с рядом недостатков, среди которых можно выделить следующие:

- Проведение сжижения для транспортировки и регазификации для дальнейшего использования, в результате происходит рост цены на газ для потребителей.

- С целью гарантирования эффективной работы требуется использование двух различных систем топливоподачи: газовой и дизельной, это значительно усложняет конструкцию системы питания в целом.

Высокая температура самовоспламенения алифатических углеводородов в природном газе требует наличия дополнительной системы зажигания. С помощью различных источников и методик расчета была установлена наименьшая температура самовоспламенения компонентов природного газа, представленная в таблице 1.3 [107, 141, 166].

Таблица 1.3 – Температуры самовоспламенения компонентов природного газа

Газ	Молекулярная формула	Температура самовоспламенения, °C
Метан	CH_4	650
Этан	C_2H_6	510
Пропан	C_3H_8	500
Бутан	C_4H_{10}	429
Водород	H_2	530

Из таблицы 1.3 видно, что дизельное топливо имеет значительно более низкую температуру самовоспламенения (250°C) по сравнению с алифатическими углеводородами. Метан выделяется из группы алифатических углеводородов,

обладая достаточно высокой температурой самовоспламенения (650°C). Длина углеводородной цепи алифатических углеводородов определяет их температуру самовоспламенения. Снижение температуры самовоспламенения происходит при увеличении длины цепи. Так как температура самовоспламенения метана более чем в два раза выше температуры дизельного топлива, его самовоспламенение невозможно при обычной степени сжатия дизельного двигателя Д-240. Поэтому для осуществления самовоспламенения природного газа необходимо увеличение степени сжатия или подача запальной порции дизельного топлива [59].

Важно учитывать, что нагрузка двигателя напрямую влияет на величину запальной дозы [14, 67, 174, 184].

При пуске и в случае, если нагрузка на двигатель не выше 20% от номинальной, он работает на дизельном топливе. Для того чтобы двигатель мог эффективно работать на низких оборотах, требуется постоянное регулирование подачи газообразного топлива и запальной дозы, что вызывает затруднения.

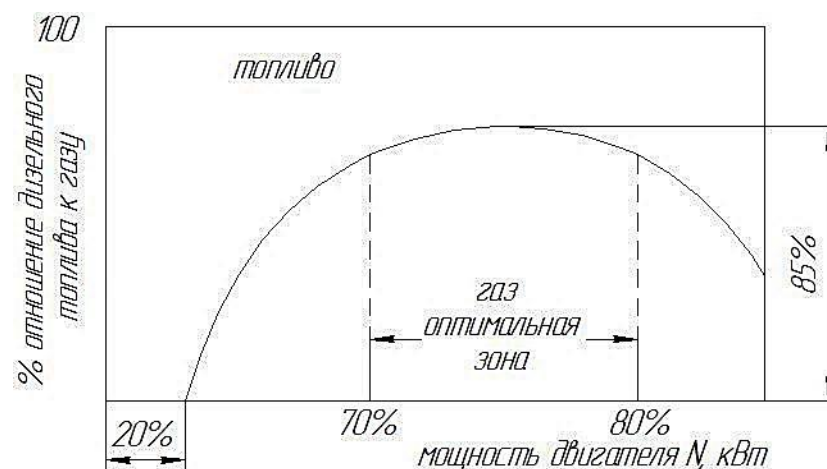


Рисунок 1.2— Зависимость величины запальной дозы дизельного топлива от нагрузки двигателя

При увеличении нагрузки двигателя до 70 – 80%, в использовании газодизельного режима зафиксированы лучшие результаты. Доля замещения дизельного топлива газом может достигать 85% [70, 149, 161, 185].

Из-за увеличения концентрации газа в топливной смеси возможно ухудшение работы дизельных топливных форсунок [110]. Это происходит из-за нарушения теплового баланса в силу недостаточного теплоотвода газа по

сравнению с дизельным топливом. Поэтому может произойти увеличение тепловой нагрузки на форсунки, что приведет к перегреву или другим неблагоприятным последствиям.

Чтобы избежать перегрева форсунок на этих режимах работы, необходимо увеличение подачи топлива с целью улучшения их теплового режима и обеспечения эффективной работы. Это также поможет избежать возможных проблем, связанных с перегревом форсунок.

При рациональной нагрузке двигателя возможно значительное увеличение оборотов, что ведет к возможному неполному сгоранию газа.

Уменьшение объёма поступления газа на указанных режимах является важным этапом оптимизации процесса. Этот подход способствует максимальному сгоранию газа и снижению вероятности возникновения негативных последствий.

Степень замещения природным газом дизельного топлива находится в интервале от 60 до 80%, в зависимости от различных факторов, таких как условия эксплуатации и техническое состояние двигателя. Более высокая степень замещения может быть достигнута при правильном управлении транспортным средством и своевременном техническом обслуживании.

1.2 Обоснование применения компримированного природного газа в дизелях машинно-тракторных агрегатов

При выборе вида альтернативного топлива необходимо учитывать экономические, энергетические, эксплуатационные показатели, а также показатели промышленной и экологической безопасности.

В качестве альтернативы дизельному топливу рассматриваются следующие виды газов [22, 24, 29, 51, 52, 57, 58, 60, 75, 86, 95, 98, 99, 124, 130, 131]:

- водород;
- попутный нефтяной газ (ПНГ);
- биогаз;
- природный газ.

В таблице 1.4 представлены сравнительные данные по стоимости альтернативных видов топлива.

Таблица 1.4 – Стоимость альтернативных видов топлива, руб./литр и для КПГ руб./м³

Состав	ДТ	Природный газ		ПНГ
		СПГ	КПГ	
Цена, руб./литр (руб./м ³)	63,30	27,5	23,4	22,65

Сравнение представленных в таблице 1.4 стоимостей различных видов топлив показывает: по сравнению с дизельным топливом стоимость КПГ в почти в 3 раза ниже стоимости ДТ, в 2,3 раза СПГ и 2,7 раза ниже ПНГ.

Попутный нефтяной газ

Попутный нефтяной газ, содержащий предельные углеводороды и инертные газы, извлекается из сопутствующего нефти газа. Такая смесь газов, называемая ПНГ, включает гомологи метана от CH_4 до C_6H_{14} . Содержание гексана и более тяжелых углеводородов обычно не превышает 1 %, а пентан ограничивается 2 %. Попутный газ также содержит азот и углекислый газ. При повышении давления до 0,8–1,6 МПа эти газы легко переходят в жидкое состояние. Использование газа в жидком состоянии позволяет значительно увеличить энерговооружённость трактора и автомобиля [48, 75].

Состав попутных нефтяных газов зависит от месторождения (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Химический состав попутного газа нефтяных месторождений, об. % [75]

Месторождение	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	N_2	CO_2	Относит. плотность
Самотлорское	60,64	4,13	13,05	12,64	5,17	1,48	0,59	1,010
Варьеганское	59,33	8,31	13,51	10,7	4,0	1,51	0,69	1,010
Аганское	46,94	6,89	17,37	15,31	7,88	1,53	0,5	1,288
Советское	51,89	5,29	15,57	15,35	6,25	1,53	1,021	—

Исследования геологических особенностей месторождений нефти в Удмуртской Республике и Пермском крае показывают, что в большинстве из них

доминирует содержание азота, достигая до 80%. Это делает данные месторождения уникальными по составу. В то же время доля метана в этих месторождениях обычно составляет 12–15%. Калорийность газа – 1,46 МДж/м³. Для повышения калорийности ПНГ необходимо увеличивать затраты на удаление из них азота, который не горит. В 2015 г. нефтяники сожгли примерно 10,5 млрд куб. м. газа, за это они заплатили около 2 млрд. руб. штрафов.

ПНГ в целом не ядовиты и только содержание их в воздухе более 30% вызывает у человека некоторую потерю чувствительности.

Сложности в использовании ПНГ как альтернативы нефтяному дизельному топливу:

- низкая калорийность газа – 1,46–1,5 МДж/м³;
- высокий коэффициент объёмного расширения, поэтому баллоны заполняют СНГ на 80% вместимости;
- плотность попутных газов в сжиженном состоянии 510–580 кг/м³, а в газообразном – в 1,5–2,1 раза тяжелее воздуха, это приводит при утечках к накапливанию в кабине и возможности воспламенения и взрыва;
- СНГ – растворяют нефтепродукты, следовательно, необходимо применение специальных уплотнительных смазок и заменителей резины;
- низкие значения цетановых чисел ПНГ (4–5 ед.) затрудняют применение их в двигателях с воспламенением от сжатия;
- отсутствие необходимой инфраструктуры в сельской местности;
- высокая, по отношению к природным газам стоимость ПНГ.

Биогаз

Биогаз – это метаносодержащий газ, который получается вследствие анаэробного разложения органической биомассы. Биогаз классифицируют по источнику получения – это три основных вида [41]:

- БГКОС - биогаз, который получают на городских очистных канализационных сооружениях;
- БГСХП - биогаз, который получают при сбраживании отходов сельскохозяйственного производства;

– БГТБО биогаз, получаемый на полигонах твердых бытовых отходов.

Состав и физико-химические свойства биогаза зависят от вида исходного сырья и технологии его производства. Усреднённый состав биогазов приведен в таблице 1.6 [99, 132].

Таблица 1.6 – Состав биогазов

Компоненты биогаза	Содержание компонентов, % об.		
	БГКОС	БГСХП	БГТБО
CH ₄	62,4	67,1	66,9
CO ₂	33,9	31,9	34
H ₂ S	0,35	0,4	0,63

По анализу представленных в таблице 1.6 данных: наиболее стабилен по отношению к метану газ метантенков городских канализационных отходов. Содержание метана на разных очистных сооружениях изменяется от 60 до 65% по объёму [132]. В газе, получаемом при переработке отходов сельскохозяйственного производства, содержание метана изменяется в достаточно широких пределах от 55 до 75%, при этом в газе присутствует значительное количество сероводорода, который перед использованием необходимо удалять. Ещё более значительная вариация содержания метана (35–80%) в газе, получаемом из отходов на свалках. Плотность биогаза 1,2 кг/м³ несколько легче воздуха, поэтому при утечках он не собирается у пола или в углублениях, быстро смешивается с воздухом, благодаря чему уменьшается вероятность взрыва. Также температура возгорания в 700°С достаточно высокая, а это ощутимое преимущество в аспекте безопасности в эксплуатации. Биогаз как моторное топливо, по сравнению с нефтяными моторными топливами, имеет более высокую детонационную стойкость, низкую эмиссию вредных веществ и наименьший зольный балласт [132].

При плотности 1,2 кг/м³ биогаз несколько легче воздуха. Этот факт очень важен, поскольку по этой причине вытекающий биогаз не собирается у пола или в углублениях, как более тяжёлый пропан. При утечке он быстро смешивается с воздухом, благодаря чему уменьшается вероятность взрыва.

Природный газ

Основной составляющей природного газа является метан. Данный газ относится к углеводородам и содержит 4 атома водорода на один атом углерода, что дает высокую теплотворную способность, широкий диапазон воспламеняемости, а также низкое значение содержания токсичных веществ (СО и СН) в продуктах сгорания [135]. Теплотворная способность метана (таблицы 1.7, 1.8) выше теплотворной способности ДТ в 1,16 раз, сжиженного газа в 1,11 раз, а теплотворная способность ПНГ в 3,25 раза ниже теплотворной способности ДТ. Метан не может быть сжижен при нормальных условиях, так как имеет критическую температуру – 82 °С [5, 125, 157, 188].

Таблица 1.7 - Теплотворная способность топлив

Вид топлива	Единица измерения	Теплота сгорания, МДж	Эквивалент ДТ
Дизельное топливо	кг	42,3	–
Природный газ	кг	49,7	0,777
Сжиженный газ	кг	45,2	1,049
Метан	кг	50,03	1,16
Пропан	кг	45,85	1,057
ПНГ	кг	14,7	0,308

Природный газ, содержащий метан, обладает высокой детонационной стойкостью, это делает его эффективным топливом для двигателей. Метановое число (МЧ) газов, используемых в двигателях, обычно равно 100, что обеспечивает «мягкую» работу двигателя. Это свойство позволяет достичь высокой степени сжатия $\varepsilon = 15$, улучшая эффективность и экологическую чистоту сгорания (таблица 1.8) [5, 178, 180]. Сложности с запуском двигателя возникают из-за высокой температуры воспламенения сжатого газа в камере сгорания, которая составляет 635-645°С. Это значительно выше, чем температура воспламенения дизельного топлива, и усложняет процесс запуска, особенно при низких температурах окружающей среды. Однако не только температура, но и давление играют важную роль в этом процессе [23, 167].

Явление Джоуля – Томсона, возникающее при снижении давления метана в

газовом редукторе, вызывает резкое падение температуры. Этот процесс, например, может привести к уменьшению температуры газа на 30°C при переходе от 10,0 до 1,0 МПа давления, оказывая значительное воздействие на работу двигателя. Особенно важно отметить, что этот феномен становится критическим в зимний период, когда в газе присутствует влага, которая может вызвать образование ледяных кристаллов и мешать нормальной подаче топлива в двигатель, даже в теплое время года.

Таблица 1.8 – Физико-химические свойства компонентов газообразных топлив и дизельного топлива [5, 46, 48]

Свойства	Компоненты сжатого газа	Компоненты сжиженного газа			Дизельное топливо
	Метан	Этан	Пропан	Бутан	
Молекулярная масса, г/моль	16	30	44	58	230
Плотность жидкой фазы при температуре кипения и давлении 100МПа, кг/м ³	416	546	584	600	830-860
Плотность газовой фазы при нормальных условиях, кг/м ³	0,717	1,356	2,019	2,703	5,840
Относительная плотность газа к плотности воздуха	0,554	1,048	1,562	2,091	4,642
Критическое давление, МПа	4,58	4,88	4,2	3,6	–
Температура воспламенения в воздухе при атмосферном давлении, °С	680 – 750	508 – 605	510 – 580	475 – 550	230
Температура кипения при Р=100 кПа, °С	–161,5	–88,5	–42,1	–0,5	360
Критическая температура кипения, °С	–82	32,3	96,8	152,9	–
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	49,7	47,1	45,85	45,43	42,4
Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания газообразного топлива, м ³ /м ³	9,52	16,66	23,91	30,95	–
Критическая степень сжатия	15	14	12	8	–
Детонационная стойкость, МЧ	100	44	34	11	–
Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания газообразного топлива, кг/кг	17,24	16,8	15,7	15,48	15
Концентрационные пределы объемные, %					
НКПР	5,3	3,2	2,4	1,9	1
ВКПР	14	12,5	9,5	8,5	8
Октановое число (моторный метод)	110	108	105	90	–

Особенности эксплуатации автотракторного двигателя на сжатом природном газе требуют проведения ряда важных мероприятий для обеспечения

надёжной работы. В первую очередь необходимо осуществлять осушение газа от влаги, что позволит избежать образования льда и предотвратить возможные проблемы при подаче газа в двигатель. Кроме того, важным этапом является регулярная замена фильтрующих элементов системы питания автотракторного двигателя, чтобы обеспечить чистоту и эффективность работы двигателя.

Дополнительно следует обратить внимание на необходимость подогрева газа в редукторе, особенно в условиях холодного периода эксплуатации. Это позволит избежать возможных замерзаний и обеспечить плавную подачу топлива в двигатель. Таким образом, у комплекса мероприятий по обслуживанию системы подачи сжатого природного газа в автотракторный двигатель важная роль в обеспечении его эффективной и надёжной работы.

Чтобы выполнить заправку, критически важно обеспечить давление на уровне 20-25 МПа. В системе газобаллонной установки, которая включает в себя такие компоненты, как баллоны, различная арматура, редукторы и газопроводы, давление сжатого газа удерживается на отметке в 20 МПа. С течением времени и использованием газа давление в баллонах становится меньше, падая до минимально допустимого уровня.

Анализ приведённых в таблице 1.8 данных показывает, что относительная плотность метана по отношению к воздуху составляет 0,554, т.е. природный газ почти в 2 раза легче воздуха. Вне замкнутых пространств природный газ рассеивается, объединяясь с атмосферным воздухом. Предел, ниже которого пламя не может распространяться, равен 5,3%, что не даёт возможность образовать в открытых объёмах пожаро- или взрывоопасную смесь, её концентрация составляет до 300 мг/м³ (в пересчете на углерод). Следовательно, у него ниже и пожаровзрывоопасность по сравнению с нефтяными и попутными газами.

Это обусловлено тем, что компоненты сжиженного и попутного газов имеют относительную плотность, превышающую плотность воздуха: этан – в 1,356 раза, пропан – в 2,019 раза и бутан – в 2,703 раза. Таким образом, эти компоненты осаждаются в кабине трактора и образуют с воздухом пожаро-

взрывоопасную смесь. Опасность увеличивается тем, что нижний концентрационный предел распространения пламени этих компонентов ниже чем у природного газа: этана – 3,2%, пропана – 2,4% и бутана 1,9%. Температура кипения метана $-161,5^{\circ}\text{C}$ требует больших материальных затрат на сжижение газа, поэтому его обычно в тракторах и автомобилях используют в сжатом состоянии. Для сжатия природного газа требуется простое оборудование, однако невысокая плотность сжатого метана, по сравнению с сжиженным, требует увеличенные ёмкости для обеспечения работы трактора в течение смены без дозаправки.

Сжатый природный газ может быть опасен, так как его токсические свойства негативно влияют на организм человека, в частности, могут раздражать кожу, вызывать проблемы с глазами и дыхательными путями, а также негативно сказываться на функционировании центральной нервной системы [150, 164].

В таблице 1.9 приводятся сравнительные данные по выбросам токсичных продуктов сгорания при сгорании различных топлив.

Таблица 1.9 – Выбросы токсичных продуктов сгорания

Вид топлива	Выбросы вредных веществ, кг/т.у.т.			
	Твёрдых веществ	SO ₂	Оксида углерода	CO ₂ ,
Дизельное	0,4	1,4	221,1	3,02
КПГ	–	–	85,1	2,5
СНГ	–	0,1	159,2	2,97

Продукт сгорания водорода – обычная вода. В процессе не выделяются топочные шлаки, зола, угарный и углекислый газ, что делает вещество экологически чистым горючим. Поэтому такое топливо сложно сжижается и транспортируется.

Сжиженные газы

Использование сжиженного газа как топлива для различных транспортных средств, включая автомобили и тракторы, основывается на его составе, который включает в себя пропан (C₃H₈), бутан (C₄H₁₀), а также их различные комбинации.

Этот тип топлива производится в ходе обработки нефти, а также может быть получен в процессе её добычи или извлечения природного газа, образуя специфическую жидкую фракцию. Компоненты сжатого газа отличаются физико-химическими свойствами (таблица 1.8). Следовательно, характеристики сжиженного газа устанавливаются на основе средневзвешенных значений. В этом контексте у каждого из составляющих элементов присутствует своя уникальная точка кипения, поэтому температура кипения газа определяется по формуле [5]:

$$T_{КСГ} = \sum_{i=1}^n T_{ки} r_i, \quad (1.1)$$

где $T_{КСГ}$ – температура кипения газа, К;

$T_{ки}$ – температура кипения i -го компонента газа, К;

r_i – объёмная доля компонента в сжиженном газе.

При стандартном атмосферном давлении, равном 101325 Па, бутан и пропан закипают при температурах близких к $-0,5^{\circ}\text{C}$ и $-42,1^{\circ}\text{C}$ соответственно, как указано в таблице 1.5, а их температуры для достижения критического состояния составляют $+126^{\circ}\text{C}$ и $+96,8^{\circ}\text{C}$. Эти свойства дают возможность без особых усилий превратить их в жидкое состояние при относительно невысоком давлении и поддерживать в таком состоянии, не прибегая к дополнительному охлаждению, при давлении вплоть до 1,6 МПа и в условиях температур от -40 до $+45$ градусов Цельсия. В частности, при повышении температуры до $+20^{\circ}\text{C}$ для сжижения пропана потребуется давление в 0,716 МПа, в то время как для бутана хватит и 0,103 МПа [5].

Насыщенный пар сжиженного газа проявляет различное давление в зависимости от температуры, показывая изменение от минимума в 0,27 МПа при отметке в -10°C до максимума в 1,6 МПа при температурном показателе $+45^{\circ}\text{C}$ [5].

В газовых баллонах для тракторов важно поддерживать уровень заполнения в рамках 80-85% их ёмкости, чтобы избежать их переполнения и обеспечить безопасность. Это связано с тем, что давление внутри газового баллона увеличивается на 0,6-0,7 МПа с каждым повышением температуры на один градус

Цельсия, что может привести к разрыву баллона. Такое повышение давления вызвано высоким коэффициентом объёмного расширения сжиженного газа, которое зависит от температуры окружающей среды, а не от объёма самого газа внутри. Чтобы предотвратить такие опасности, в баллонах предусмотрена так называемая паровая подушка или фаза, которая служит для контроля давления. При достижении максимального допустимого уровня топлива, автомобильные газовые баллоны прекращают заправку благодаря специальному механизму, встроенному в их арматуру, обеспечивая таким образом дополнительную безопасность [5].

Плотность воздуха значительно ниже, чем у газовых компонентов, таких как этан, пропан и бутан, которые соответственно превосходят его на 1,356, 2,019 и 2,703 раза. Это явление предоставляет возможность для более эффективного наполнения цилиндров двигателя газообразным топливом, что ведёт к увеличению его мощности и эффективности использования топлива. Зимой, когда плотность этой смеси максимально высока, двигатели на сжиженном газе демонстрируют оптимальные рабочие характеристики. Благодаря широкому диапазону пределов воспламенения, которыми обладают газовые топлива, особенно в отношении обеднённых смесей, открываются дополнительные пути для повышения их топливной эффективности [5, 25, 119, 125].

Пожаровзрывоопасность компонентов сжиженного или попутного газов ниже, чем у природного газа. Это обусловлено тем, что компоненты сжиженного и попутного газов имеют относительную плотность, превышающую плотность воздуха: этан – в 1,356 раза, пропан – в 2,019 раза и бутан – в 2,703 раза. Таким образом, эти компоненты осаждаются в кабине трактора и образуют с воздухом пожаровзрывоопасную смесь [121].

Опасность увеличивается тем, что нижний концентрационный предел распространения пламени этих компонентов ниже чем у природного газа: этана – 3,2%, пропана – 2,4% и бутана 1,9%. Температура кипения метана (161,5°C) требует больших материальных затрат на сжижение газа, поэтому его обычно в тракторах и автомобилях используют в сжатом состоянии.

Использование сжиженного газа в качестве топлива имеет свои недостатки, особенно при низких температурах. Чтобы запустить холодный двигатель при температуре от -5 до -7 °C, необходимо применять топливо зимней формуляции. В более холодных условиях, когда трактор не находится в гараже, требуются дополнительные методы для подогрева. В отсутствие таких методов запуск может осуществляться на бензине, это увеличивает расход бензина и уменьшает выгоду от использования газового оборудования [5].

Баллоны объемом 250 литров, предназначенные для хранения сжиженных газов, выдерживают давление до 1,6 МПа. Это условие позволяет поддерживать пропан в жидком состоянии, обеспечивая возможность использования автомобилей на сжиженном газе в течение всего года по всей стране. Исключение составляют южные регионы в летние месяцы, когда столбик термометра поднимается выше $+48,5^{\circ}\text{C}$ [5].

Пропан и бутан, а также продукты их сгорания достаточно опасны для здоровья и жизни человека, и не только потому, что при высокой концентрации могут спровоцировать мощный взрыв, но еще и потому, что, надышавшись смесью этих газов, можно получить сильнейшее отравление, которое может быть несовместимым с жизнью [135].

Проведенный анализ альтернативных топлив показал, что наиболее приемлемое газовое топливо для дизелей, эксплуатируемых в сельскохозяйственных предприятиях, КПП.

Для того чтобы двигатель мог функционировать на чистом топливе или его смеси с КПП, не требуются кардинальные модификации его структуры. Достаточно произвести корректировку в стандартной топливной системе.

1.3 Применение сжатого газа как топлива для двигателей внутреннего сгорания и методы его использования

Давно известно, что природный газ служит ключевым топливным элементом для создания горючей смеси, используемой в дизельных двигателях [14, 29, 106, 189]. В 1930-1940-х годах известные автопроизводители из Европы,

включая FIAT, MAN и RENAULT, инициировали детальные изыскания, целью которых было усовершенствование работы двигателей за счёт применения газа как топлива.

В период с 1950 по 1952 год на заводах Советского Союза, специализирующихся на производстве двигателей, был запущен ограниченный выпуск газодизельных моторов моделей «В-2» и «ЗД6ГД», это стало возможным благодаря проведению аналогичных исследований [29, 106]. В прошлом отсутствие развитой сети снабжения газом сельскохозяйственных предприятий и недостатки в газодизельных конструкциях препятствовали внедрению КПП до конца 1990-х годов [18, 21, 106, 122, 124, 140].

В 2013 году российское правительство инициировало разработку стратегии с целью увеличения применения природного газа как топлива для сельскохозяйственной техники, через издание распоряжения. В этом документе было поручено Министерству промышленности и торговли, Министерству сельского хозяйства и Министерству регионального развития России до начала 2014 года сформулировать и внести на рассмотрение в правительство план действий, цель которого заключается в повышении использования газа как альтернативного вида топлива для автотракторных двигателей.

В 2018 году Министерство транспорта Российской Федерации запустило на 2018-2022 годы государственную программу «Расширение использования природного газа в качестве моторного топлива на транспорте и техникой специального назначения». Основной задачей программы являлось стимулирование использования природного газа в качестве моторного топлива техникой специального назначения.

В постановлении Правительства РФ от 2 марта 2020 г. № 221 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие энергетики» внесено дополнение паспортом подпрограммы «Развитие рынка газомоторного топлива», цель которой стимулирование развития рынка природного газа как моторного топлива, выражающегося в увеличении потребления такого топлива, расширении инфраструктуры и распространении

транспорта на природном газе.

В 2023 году Газпром и Минсельхоз РФ подписали соглашение о сотрудничестве в области использования природного газа в качестве моторного топлива. Это позволит расширить его применение в агропромышленном комплексе.

Сейчас в регионах с хорошо развитой газотранспортной инфраструктурой уже действуют автозаправки для КППГ, а проблему доставки газа к работающим агрегатам успешно решают мобильные заправщики.

Существует два основных типа двигателей, способных функционировать с применением компримированного природного газа. Первый тип – собой поршневые двигатели с искровым зажиганием [10, 29, 55, 158]. Второй тип – это газодизельные двигатели, воспламенение смеси в них происходит за счёт дозы дизельного топлива [59, 106, 108, 141, 156].

Сложность тракторной газодизельной системы затрудняет перевод тракторов на КППГ [65, 106, 123, 124, 170], в то время как предприятия АПК успешно осуществляют переход автомобилей на этот вид топлива.

Основным источником энергии для работы газодизельного двигателя является сжатый природный газ вместе с дизельным топливом, которое используется в небольших количествах для запуска процесса горения. Сравнивая температуры самовоспламенения, можно отметить, что природный газ имеет более высокую планку (680–750 °С) по сравнению с дизельным топливом (280°С). [10, 18, 29, 106, 115, 123]. Энергия, необходимая для полного сгорания смеси, определяет минимальное количество дизельного топлива, требуемого для воспламенения.

По исследованиям, проведённым по данным [123], выявлено: использование газодизельной системы может привести к колебаниям в расходе дизельного топлива от 25 до 30% [29]. Риск сокращения срока службы распылителей форсунок возникает при уменьшении объёмной запальной дозы топлива до 15%. Процессы закоксовывания в топливовыводных отверстиях форсунок интенсифицируются из-за повышенной температуры распылителей в процессе

сгорания газодизельной смеси. Эксперты утверждают, что это количество не превышает 5% [29, 55].

При проведении эксплуатационно-технологических испытаний тракторов К-701 продемонстрировано значительное повышение эффективности. Одним из ключевых факторов, способствующих этому, являются процессы термохимических преобразований молекул углеводородов. Снижение расхода дизельного топлива происходит за счёт точного контроля отверстий распылителей, что влияет на общую производительность техники в реальных условиях эксплуатации [55, 106].

Для достижения высокой эффективности при использовании природного газа важно провести ряд ключевых мероприятий при модернизации сельскохозяйственных тракторов [18, 87, 89, 106, 173]:

- 1) для хранения КППГ под давлением до 20 МПа требуется установить на тракторе газобаллонную систему с необходимой вместимостью;
- 2) создание механизма, который регулирует количество газа в зависимости от того, как работает двигатель, и осуществляет его подачу [91, 92, 106, 171];
- 3) использование газа или газодизельной смеси вместо дизельного топлива в двигателе – это процесс преобразования системы работы двигателя [106, 138, 169];
- 4) для достижения нужной мощности и экономических характеристик по топливу работы по настройке и установке включают корректировку системы газоснабжения и двигателя [106].

1.4 Анализ существующих конструкций систем питания дизельного двигателя КППГ

Для достижения оптимальной производительности двигателя необходимо поддерживать баланс между топливом и воздухом в рабочей смеси. Этот процесс контролируется и регулируется битопливной газодизельной системой питания. Важно учитывать, что точная настройка смеси является ключевым фактором для эффективной работы двигателя. Газодизельная система обеспечивают

оптимальную смесь топлива и воздуха, способствуя улучшению экономичности и экологической безопасности транспортных средств [64, 106, 113, 114, 175, 194].

Способы смесеобразования и регулирования определяют типы конструкций газодизельных систем, которые были разработаны (рисунок 1.3) [106].

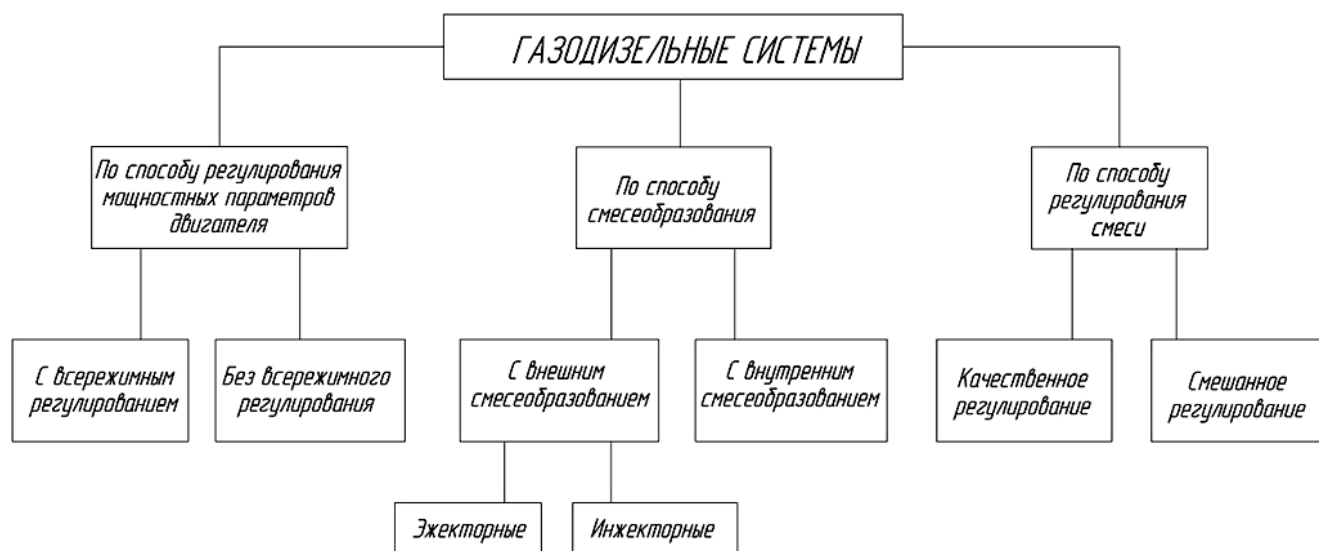


Рисунок 1.3 – Типы газодизельных систем

Преимущественно в РФ в разработанных конструкциях применяется внешнее смешивание в газовом оборудовании – это простой, безопасный и надежный вариант, основанный на использовании эжекторного метода формирования газовойоздушной смеси и её точного регулирования.

Эжекторная газодизельная система, предложенная ВИМ-ВНИИГАЗ с технологией качественного регулирования, обеспечивает оптимальную работу в различных условиях эксплуатации [77, 106, 116, 128] (рисунок 1.4). Принцип работы следующий: хранящийся газ под давлением 20 МПа поступает в газовый редуктор высокого давления 22 из газовых баллонов 2 при открытом расходном вентиле 4, где его давление уменьшается до 0,8 - 1 МПа. В газовый редуктор низкого давления 21 газ начинает поступать после включения газового электроклапана 24, где его давление уменьшается 0 – 200 Па. В смесителе 1 образуется газовойоздушная смесь путем смешивания газа, поступающего из механического дозатора 19, и воздуха, поступающего из воздушного фильтра. Механизм 8, фиксируя положение рейки ТНВД, управляет подачей запальной порции дизельного топлива [106].

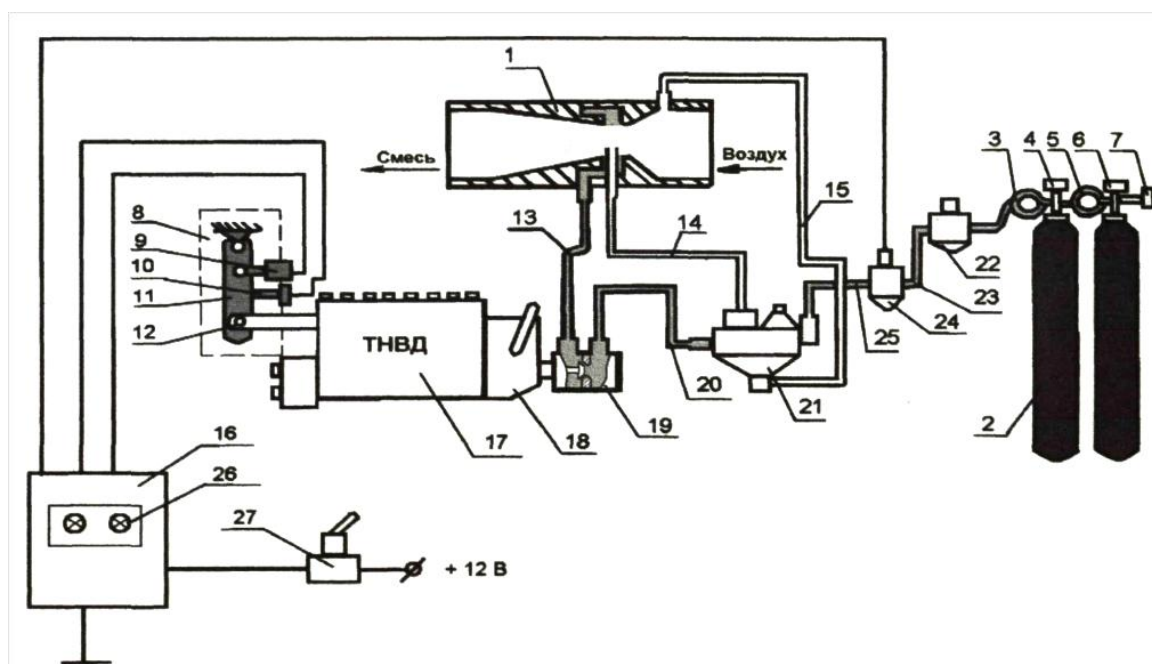


Рисунок 1.4 – Система питания газодизеля ВИМ-ВНИИГАЗ: 1–смеситель; 2 – газовые баллоны; 3, 5, 13, 14, 15, 20, 23, 25 – газопроводы; 4, 6 – расходный и заправочный вентили; 7 – устройство для заправки баллонов; 8 – механизм установки запальной дозы; 9 – электромагнит; 10 – датчик; 11 – планка; 12 – рейка; 16 – блок индикации; 17 – ТНВД; 18 – регулятор ТНВД; 19 – дозатор подачи газа; 21, 22– газовые редукторы низкого и высокого давления; 24 – электроклапан газовый; 26 – индикатор вида топлива; 27 – переключатель режима работы

Данная система обладает следующими достоинствами:

- а) оптимизация базового дизельного двигателя путем проведения незначительных модификаций;
- б) работы по регулировке газодизельной системы не требуют больших трудозатрат;
- в) при работе двигателя в дизельном режиме газовая система не оказывает влияния на дизельную топливную аппаратуру;
- г) потребитель имеет возможность преоборудовать дизельный двигатель в газодизельный, заказав комплект для модернизации прямо на предприятии, например, в сельскохозяйственной мастерской, где проводятся ремонтные работы;
- д) несмотря на низкую стоимость, устройство комплекта для модернизации гарантированно обеспечивает высокие показатели надежности.

В результате анализа данных исследований [138] ВИМ была создана обновлённая версия газодизельной эжекторной системы, которая компенсирует

уменьшение вращающего момента путём увеличения подачи порции стартового топлива [87, 106].

Вместо одного газового редуктора высокого давления используются две параллельно включенные системы газовых редукторов в конструкции, которая была разработана совместно ГНУ ВИМ и ЗАО «Автосистема» и относится к аналогам системы ВНИИГАЗ [91, 106, 128].

Специальные электромагнитные газовые форсунки выполняют впрыск газа во впускной коллектор в инжекторной системе, созданной благодаря совместному труду компаний «Автосистема» и ЗАО «Газомотор».

Электропривод рейки ТНВД отвечает за регулирование запальной дозы, а нормирование времени работы электромагнитов газовых форсунок контролирует подачу газа. Микропроцессорный электронный блок занимается общим управлением всех элементов этой инновационной системы [91, 106].

В сотрудничестве между ОАО «Дизельавтоматика» и ГНУ ВИМ была разработана инжекторная система, в которой с помощью скоростного импульсного газового клапана осуществляется высокоточное регулирование подачи газа. Микропроцессорный электронный блок управляет временем включения клапана, а также, используя давление газа с помощью пневмопривода, устанавливает запальную дозу дизельного топлива [89, 93, 106].

Инжекторная система НПФ «ЭКИП» ЗАО «Газомотор» [91, 106] с высокой точностью управляет распределенным фазированным впрыском газа с помощью электромагнитных клапанов-форсунок. Уникальность данной конструкции проявляется в использовании электронного управления давлением на выходе из газовых безмембранных редукторов среднего давления, обеспечивая динамическое регулирование запальной дозы через электропривод. За управление и регулирование составом газозоудшной смеси отвечает микропроцессорный блок, в сравнении с механическими системами он более точен. Однако отметим что такие микропроцессорные устройства сложны и дорогостоящи [91].

В системах газодизеля за границей используются уникальные электронные устройства, контролирующие процесс подачи топлива [12, 14, 18, 29, 62, 106, 151,

179, 190, 191, 192]. Среди различных систем можно отметить такие, как системы газодизельной топливной аппаратуры «Bombardir 12-251-DF», «Caterpillar 340 B», и подобные [29, 162].

В Аргентине компания GN Group создала систему подачи газа для дизельных двигателей – эжекторную систему, которая регулируется механически при помощи педали акселератора. В данной системе при помощи механизма, управляемого газовым давлением, стандартный дизельный ТНВД подает запальную дозу. Исследования, проведенные компанией, показали эффективное использование этой системы на дизельных двигателях для автомобилей. Однако данный метод управления не способен обеспечить всережимную подачу топлива на тракторах, поэтому его эффективное использование невозможно [106].

Недостатки инжекторных систем: необходимость коррекции крутящего момента [55, 57], сложность изготовления и массово-габаритные показатели, значительное влияние неустановившихся режимов на эксплуатационные показатели, несовершенство системы подачи запальной дозы дизельного топлива и газа, что приводит к значительному снижению экономической эффективности двигателя.

1.5 Анализ способов обеспечения автотракторной техники газодизельным топливом

В настоящее время сдерживающим фактором перевода автотракторных дизелей на газодизельное топливо является отсутствие разветвлённой сети газозаправочных станций на сельскохозяйственных предприятиях. Поэтому проектируются и вводятся в действие газовые заправки в сельской местности. К сожалению, эти станции в силу своей удалённости от места работы не могут обеспечить эффективную работу тракторов.

Решению проблемы может способствовать строительство мини-заправочных газовых станций непосредственно в сельскохозяйственных предприятиях [21, 30, 85, 90, 130] и использование передвижных автомобильных газовых заправщиков для доставки газа к месту работы тракторов.

Принципиальная схема снабжения газом тракторов представлена на рисунке 1.5

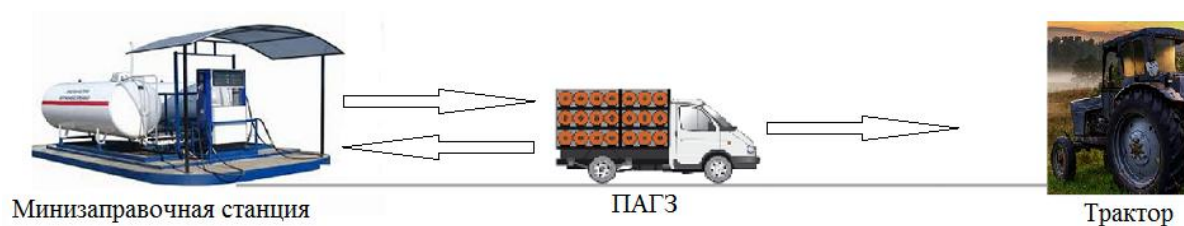


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема снабжения тракторов газом

Снабжение тракторов по этой схеме осуществляется от мини-заправочной станции, расположенной на центральной усадьбе агропромышленного предприятия. На мини-заправочной станции осуществляется сжатие и сушка природного газа, поступающего из централизованного газопровода. Доставка сжатого газа непосредственно к работающей сельскохозяйственной технике осуществляется при помощи передвижных автогазозаправщиков (ПАГЗ). Тракторы заправляют на краю поля. При заправке тракторов по данной схеме необходимо учитывать, что в разные периоды, в зависимости от загруженности, трактора потребляют различное количество топлива. Наиболее загруженными периодами являются весенний, летний и осенний. В эти периоды потребность в газе тракторов возрастает, что обуславливает неравномерность загрузки мини-заправочной станции и ПАГЗ. В работе [4] предложена номограмма для определения доставки оптимального объёма газа с учётом частоты и периодичности доставки.

Анализ номограммы показывает, что перевод тракторов на газодизельное топливо в хозяйствах, количество тракторов в которых не превышает 5-10 единиц, нецелесообразно. Статистическое наблюдение за работой тракторов МТЗ-80/82 показал, что на одной заправке КПП (при давлении 20 МПа) они работают на пахоте от 5 до 7 ч, таким образом, в нагруженные периоды им необходимы как минимум две заправки.

Для увеличения продолжительности работы на одной заправке некоторые

фирмы предлагают повысить давление в заправочных баллонах до 32 МПа. Это приводит к существенному утяжелению конструкции газовых баллонов, переоборудованию мини-заправочных станций. Увеличить продолжительность работы на одной заправке можно также путём снижения расхода топлива при выполнении технологических операций путём учёта неустановившегося режима работы МТА.

1.6. Основные аспекты функционирования двигателя на газодизельном топливе в составе МТА

При выполнении механизированных работ в сельском хозяйстве тракторные газодизели используют при различной нагрузке, которая зависит от скорости работы машины и ее сопротивления [2, 7, 8, 16, 17, 26, 28, 79, 97, 100, 106]. Неустановившийся режим работы приводит к увеличению токсичности отработанных газов [9, 11, 13, 17, 26, 133, 163, 165], росту износа деталей двигателя [6, 9, 26, 31, 74, 80]. Из-за различий в обрабатываемой почве нагрузка на двигатель изменяется непрерывно при выполнении заданных операций с постоянной скоростью. На определенной частоте вращения коленчатого вала достигается определенная мощность двигателя, необходимая для каждого режима работы. Для обеспечения надёжной работы двигателя необходимо, чтобы газодизельная система обладала высокой точностью, а это достигается за счет модификации состава битопливной смеси, именно она регулирует мощность газодизеля [73, 106, 148, 168].

Для правильного функционирования системы управления подачей топлива в двигателе с газодизельным системой питания необходимо выполнять разнообразные функции:

- запускать двигатель на дизельном топливе без подачи газа во впускную трубу [110];
- точное дозирование дизельного топлива следует осуществлять в

соответствии с порядком работы цилиндров и учитывать угол опережения впрыска для оптимальной производительности двигателя [10, 14, 147]. Также важно поддерживать уровень запальной дозы не меньше 15%...17% для уменьшения нагрузки на форсунки двигателя [106, 123, 186];

- работа двигателя в газодизельном режиме требует регулирования подачи топлива и газа с учётом оборотов коленчатого вала и положения педали управления [106].

- гарантировать одинаковые регуляторные и скоростные характеристики для дизельных и газодизельных моделей, чтобы обеспечить их идентичность;

- остановка двигателя должна автоматически прекращать подачу газа, особенно в случае полных цикловых подач дизельного топлива [106].

Для работы двигателя в составе МТА характерен неустановившийся режим работы. Это обусловлено целым рядом причин:

- изменяющимся тяговым сопротивлением агрегатируемой сельскохозяйственной машины;
- цикличностью работы ДВС;
- изменением буксования трактора;
- структурой и влажностью почвы;
- изменением сопротивления качения трактора и т.п.

В Омской области основной зоной сельскохозяйственного производства является лесостепная. В этой зоне на повышенных элементах микрорельефа и в условиях хорошего дренажа формируются почвы чернозёмного типа, а в понижениях микрорельефа формируются луговые, солончаковые и другие почвы. Почвы характеризуются большим разбросом как самых тяговых сопротивлений, так и протяжённостью их и интервалом между ними по длине гона [15].

На рисунке 1.6 схематично изображено изменение тягового сопротивления поля при работе МТА.

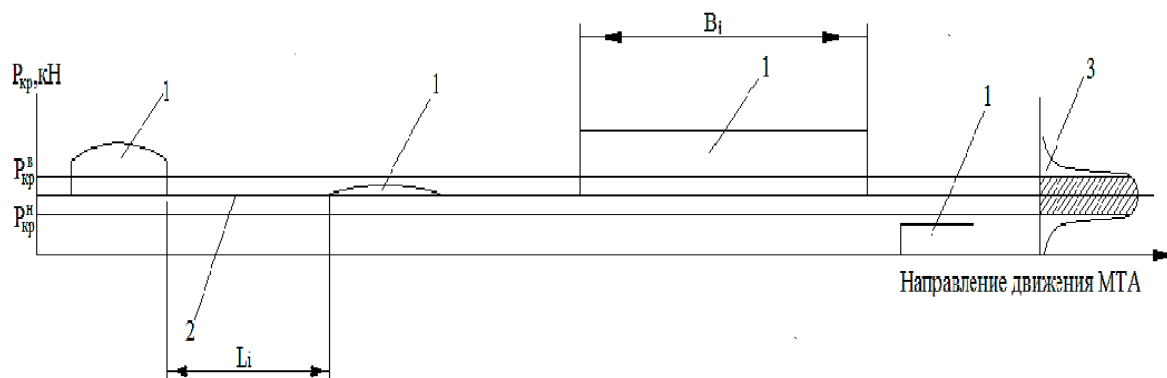


Рисунок 1.6 – Возможные реализации и область оптимальных значений тягового сопротивления: 1 – «пятна» тяговых сопротивлений, отличных от установившегося тягового сопротивления; 2 – тяговое сопротивление при установившемся режиме; 3 – плотность распределения тяговых сопротивлений в почве; L_i – расстояние между «пятнами»; B_i – продолжительность «пятна»

Экспериментальные исследования удельного тягового сопротивления почв при пахоте на полях СПК «Сибиряк» Москаленского района лесостепной зоны Омской области показывают, что интервал между «пятнами» тяговых сопротивлений находится в пределах от 2 до 200 м.

Таблица 1.10 – Удельные сопротивления почв при пахоте при различных режимах увлажнения на глубине хода лемеха [15]

Показатели	Чернозём обыкновенный	Чернозём солонцеватый	Сильно солонцеватая почва	Солонец средний	Солодь типичная
Диапазон оптимального увлажнения					
Нижняя граница, %	16,2	18,7	23,5	18,5	19,8
Верхняя граница, %	23,8	–	29,2	23,2	23,8
Уд. сопротивление, кг/см ²					
Минимальное	0,51	0,53	0,64	0,82	0,60
Среднее	0,54	0,53	0,64	0,84	0,60
Дисперсия	0,0016	–	0,0024	0,0048	–
Средняя ошибка	0,013	–	0,024	0,031	–
Увлажнение ниже оптимального, уд. сопротивление, кг/см ²					
Среднее	0,58	0,66	0,79	0,98	0,79
Дисперсия	0,0037	0,0120	0,0092	0,0120	–
Средняя ошибка	0,014	0,027	0,026	0,063	–
Увлажнение выше оптимального, уд. сопротивление, кг/см ²					
Среднее	0,56	–	0,68	0,91	0,78
Дисперсия	0,001	–	–	0,0214	–
Средняя ошибка	0,013	–	–	0,073	–

На рисунке 1.7 представлена дифференциальная кривая распределения удельного тягового сопротивления при пахоте.

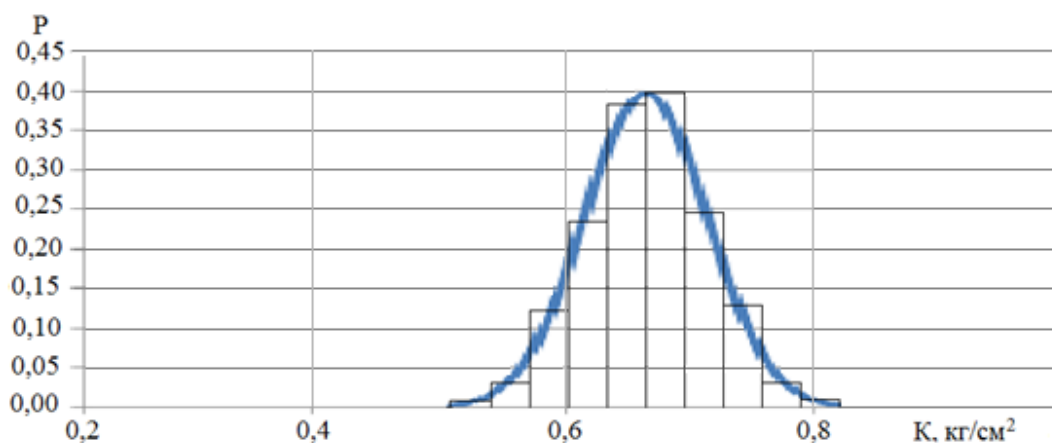


Рисунок 1.7 – Дифференциальная кривая распределения удельного тягового сопротивления при пахоте: K – удельное тяговое сопротивление, P – плотность вероятности

На рисунке 1.8 приведена кривая распределения протяжённости пятен.

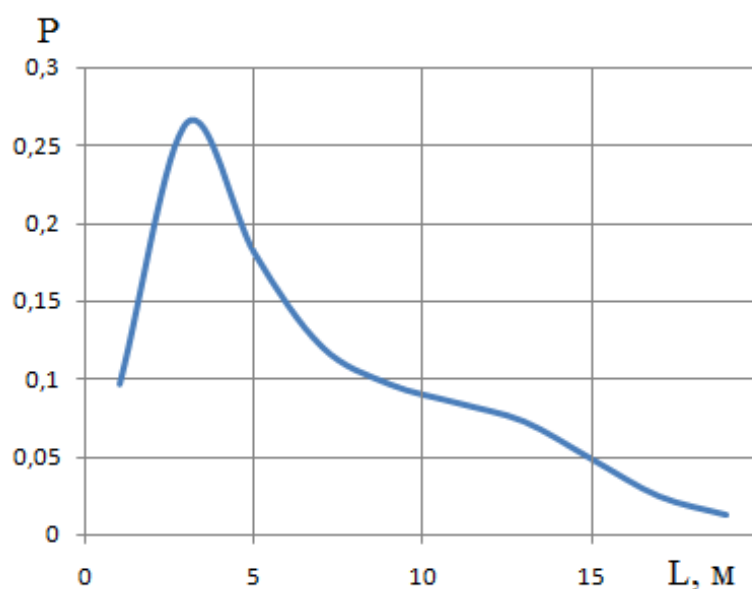


Рисунок 1.8 – Плотность распределения протяжённости пятен: L – расстояние между пятнами, P – вероятность

1.7 Изменение эксплуатационных характеристик двигателя при работе на газодизельном топливе

Анализ существующих источников [18, 19, 50, 52, 53, 81, 82, 88, 93, 109, 120, 123, 134, 139, 155, 177] позволил выявить характер изменения характеристик двигателя при работе дизеля на газодизельном топливе. Установлено, что на характер изменения эксплуатационных характеристик дизеля, работающего на газодизельном топливе, существенное влияние оказывают:

- доля газа в газодизельном топливе;
- конструкция системы топливоподачи;
- параметры, определяющие режим работы двигателя [106]:
 - угол опережения впрыска;
 - частота вращения коленчатого вала;
 - коэффициент избытка воздуха;
 - цикловая подача топлива;
- теплофизические свойства рабочих тел:
 - параметры окружающей среды;
 - состав и разная теплота сгорания топлива;
 - зависимость теплоёмкости рабочей смеси от температуры.
- нагрузка и ее изменение в процессе работы МТА.

Анализ изменения эксплуатационных показателей от влияющих факторов показал, что большинство из этих параметров можно принять за постоянные величины в заданных режимных условиях работы дизеля.

1.8 Выводы, цель и задачи исследований

Проведённый анализ использования газодизельного питания дизелей выявил как преимущества КПП перед дизельным двигателем, так и недостатки, препятствующие его использование в тракторах:

1. В сельской местности отсутствует газозаправочное оборудование, поэтому возникает необходимость изыскания дополнительных средств для заправки тракторов.
2. На одной заправке двигатель работает непродолжительное время.
3. При эксплуатации необходимо обеспечивать соблюдение правил безопасности.
4. При неустановившихся режимах работы снижаются установленные эксплуатационные параметры двигателей.
5. Модернизация топливной системы двигателя для перехода на использование КПП требует изменений в конструкции трактора с целью

увеличения коэффициента запаса крутящего момента и среднего коэффициента замещения дизельного топлива.

6. При использовании имеющихся газодизельных систем наблюдается недостаток значений среднего на КПП корректорного запаса крутящего момента двигателя.

Анализ, проведенный в главе, позволяет сформировать следующую научную проблему: повысить эффективность эксплуатации тракторов с дизельными двигателями можно переходом на газодизельную систему питания, однако существующие топливные системы не приспособлены для применения газообразного топлива.

Цель исследований: повышение эффективности эксплуатации тракторов тягового класса 14 кН с газодизельными системами питания путём обоснования параметров и режимов системы топливоподачи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить 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.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Модель работы трактора во время осуществления технологических операций

Правильное понимание работы технологии достижимо только в том случае, если учесть все факторы, влияющие на процесс. Структура МТА и условия его функционирования должны быть отражены в параметрах, учитываемых при описании процессов. Представленная на рисунке 2.1 упрощённая схема демонстрирует работу МТА во время выполнения технологических процессов почвообработки. В ходе технологической операции сельскохозяйственная машина потребляет энергию, которую вырабатывает двигатель трактора [65, 106].

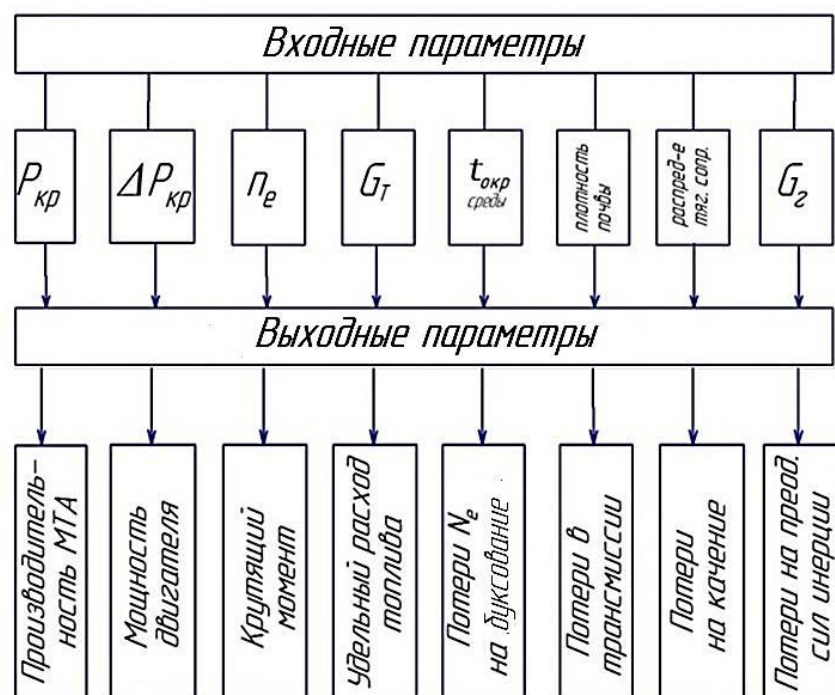


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема расходования вырабатываемой энергии

При выполнении механизированной операции требуется обеспечивать эффективность функционирования МТА как во время основной работы, так и во время вспомогательных. При выполнении технологических операций двигатель работает на полных и частичных режимах, а также во время холостого хода и при остановках. Поэтому в зависимости от потребляемой агрегатом мощности в газодизельной системе происходит регулирование подачи топливной смеси. Эффективность МТА определяется появлением выходных параметров в ходе его

функционирования [61, 106, 172].

Важным показателем в повышении эффективности МТА являются удельные приведенные затраты (C_{Π}), которые служат показателем ресурсосбережения при сохранении высокого уровня выполнения работ и их качества.

Расход каждого компонента и цены на компоненты топлива непосредственно влияют на затраты на топливо в составе битопливной системы питания. Коэффициент замещения дизельного топлива является показателем, характеризующим соотношение компонентов топлива при работе газодизеля.

Снижение общих издержек, включая расходы на топливо, достигается при установлении оптимальных значений входных параметров [106].

Минимизация удельных приведенных затрат в данном случае достигается за счёт общего определения их зависимости от входных параметров.

2.2 Обоснование применения тракторов с газодизельными двигателями в МТА

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

Вычисляют общие затраты на работу газодизеля:

$$C = C_T + C_{OB} + C_{ЭКС} + C_{РЕМ}, \text{ руб.}, \quad (2.1)$$

где C_T – стоимость топлива, общая, руб.;

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

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

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

Стоимость расходуемого топлива в удельном измерении:

$$C_T = G_{ДТ} \cdot C_{ДТ} (1 - K_{ЗГ}) + G_{Г} \cdot C_{Г} \cdot K_{ЗГ} = \Pi_{ДТ} (1 - K_{ЗГ}) + \Pi_{Г} \cdot K_{ЗГ} = \Pi_{ДТ} - (\Pi_{ДТ} - \Pi_{Г}) \cdot K_{ЗГ}, \quad (2.2)$$

где $G_{ДТ}, G_{Г}$ – часовой расход топлива и газа соответственно кг/ч, м³;

$C_{ДТ}, C_{Г}$ – цена 1 кг топлива и м³ газа соответственно, руб./кг, руб./м³;

$K_{ЗГ}$ – коэффициент замещения дизельного топлива газом.

Расчёт стоимости дополнительного оборудования топливной системы для

питания газом проводим пропорционально способности замещения дизельного топлива газообразным. При известном ресурсе газового оборудования и его стоимости:

$$C_{OB} = C_{OB0} + C_{OB1} \cdot K_{зг}, \text{ руб./час,} \quad (2.3)$$

где C_{OB0} – удельная базовая стоимость газового оборудования, руб./час;

C_{OB1} – переменная составляющая затрат на переоборудование дизеля, руб./час.

Эксплуатационные затраты на работу двигателя – $C_{ЭКС}$.

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

Таким образом:

$$C_{РЕМ} = C_{НОРМ} / (T_{РЕМ} \cdot K_{зг}), \text{ руб./час,} \quad (2.4)$$

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

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

Следовательно, затраты на работу дизеля на дизельном топливе и КПП за время межремонтного цикла в расчете на 1 час определяются из выражения:

$$C = C_{ДТ} - (C_{ДТ} - C_{Г}) \cdot K_{зг} + C_{OB0} + C_{OB1} \cdot K_{зг} + C_{ЭКС} + C_{НОРМ} / (T_{РЕМ} \cdot K_{зг}), \quad (2.5)$$

при $0,3 \leq K_{зг} \leq 0,8$.

Графическая интерпретация модели выглядит следующим образом:

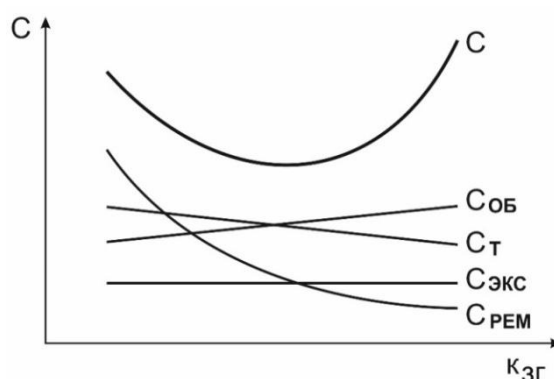


Рисунок 2.2 – Графическая интерпретация экономико-математической модели

Взяв первую производную функции затрат по коэффициенту замещения и приравняв её к нулю, получим выражение для оптимальной величины

коэффициента замещения дизельного топлива газом.

$$C = -(C_{ДТ} - C_{Г}) + C_{ОБ1} - C_{НОРМ} / (T_{РЕМ} \cdot (K_{ЗГ})^2) \quad (2.6)$$

Обозначим $(C_{ДТ} - C_{Г}) = \Delta C$, руб., и $C_{НОРМ} / T_{РЕМ} = C_{УД}$, руб./час.

Тогда:

$$K_{ЗГ} = \sqrt{\frac{C_{УД}}{C_{ОБ1} - \Delta C}} \quad (2.7)$$

В соответствии с зависимостью (2.7) коэффициент замещения дизельного топлива газом находится в степенной зависимости от удельных затрат на ремонт двигателя и обратно степенной зависимости от разницы стоимости дооборудования топливной системы и разницы в цене дизельного топлива и газа.

На рисунках 2.3-2.5 расположено графическое представление результатов расчётов коэффициента замещения дизельного топлива газом (в ценах 2024 года).

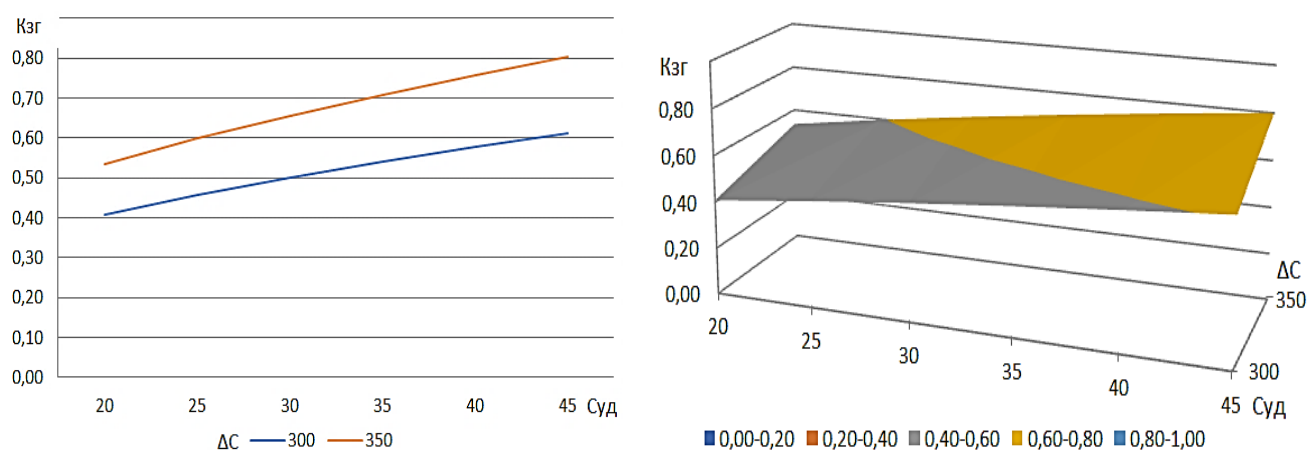


Рисунок 2.3 – Изменение величины $K_{ЗГ}$ при:
 $C_{ОБ1} = 420$ руб.; $C_{УД} = 20 - 45$ руб./час; $\Delta C = 300 - 350$ руб.

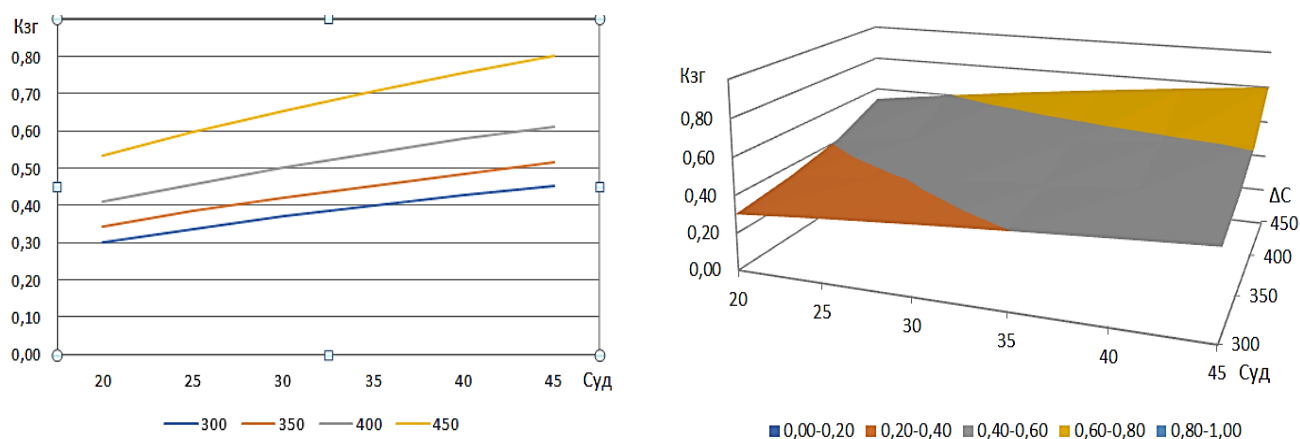


Рисунок 2.4 – Изменение величины $K_{ЗГ}$ при:
 $C_{ОБ1} = 520$ руб.; $C_{УД} = 20 - 45$ руб./час; $\Delta C = 300 - 450$ руб.

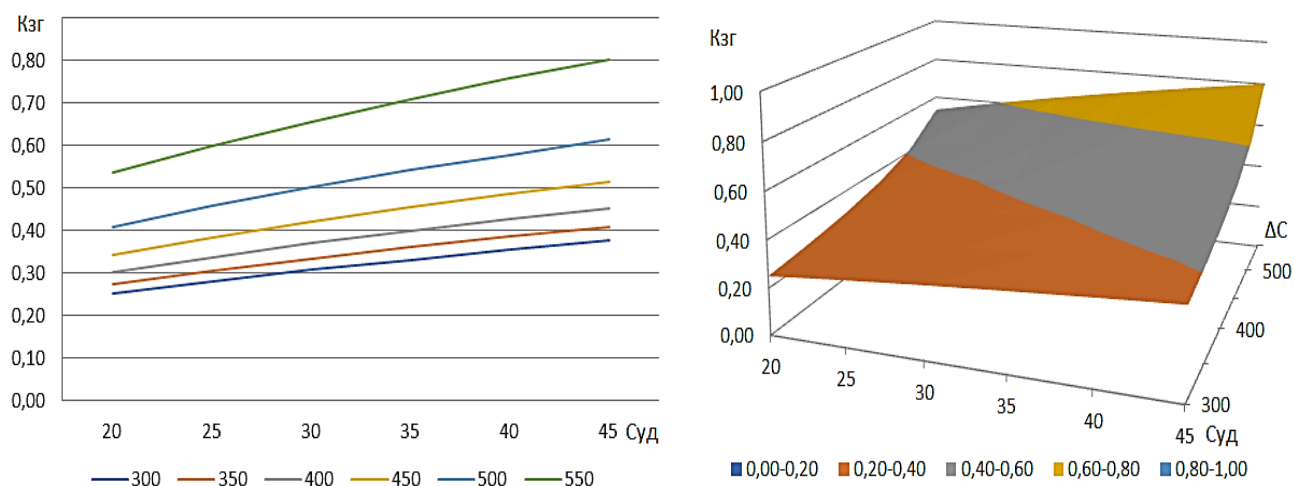


Рисунок 2.5 – Изменение величины $K_{зг}$ при:
 $C_{об1} = 620$ руб.; $C_{уд} = 20 - 45$ руб./час; $\Delta C = 300 - 550$ руб.

Может быть также установлена допустимая величина переменной составляющей затрат на переоборудование дизеля, исходя из разницы в стоимости дизтоплива и КПП, удельных затрат на ремонт дизеля и установленной практикой величины коэффициента замещения дизтоплива газом:

$$C_{об1} = \frac{C_{уд}}{K_{зг}^2} + \Delta C \quad (2.8)$$

Графики изменения переменной составляющей величины затрат на переоборудование дизеля представлены в приложении 3 работы.

На рисунках 2.6 – 2.9 показано графическое представление изменения требуемой величины суммарных затрат на переоборудование дизеля, в тыс. руб.

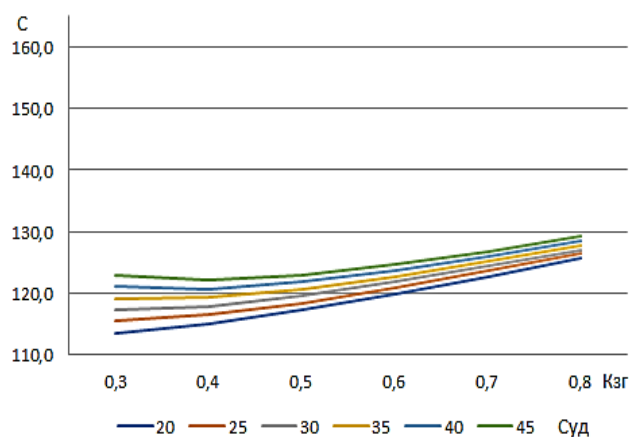


Рисунок 2.6 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля при $\Delta C = 300$ руб.

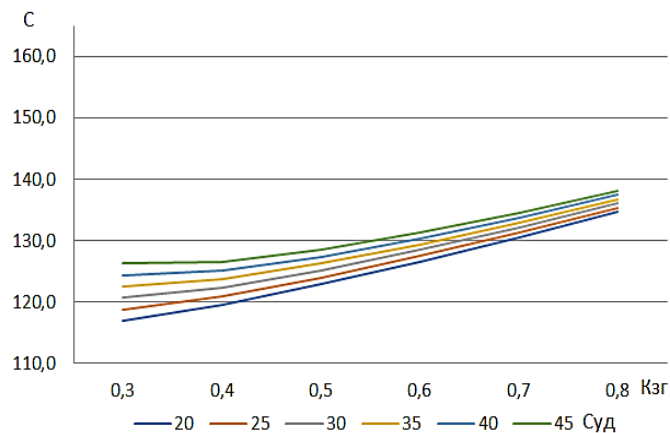


Рисунок 2.7 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля при $\Delta C = 400$ руб.

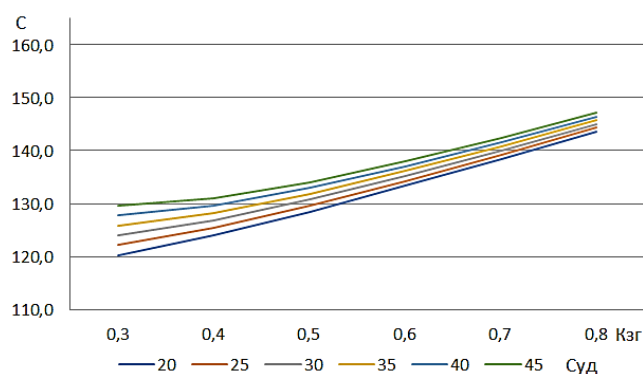


Рисунок 2.8 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля при $\Delta C = 500$ руб.

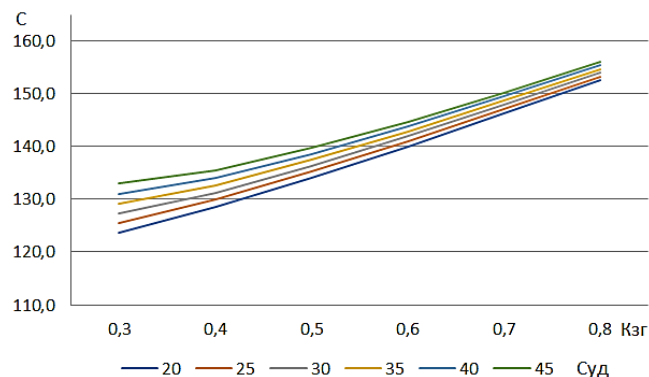


Рисунок 2.9 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля при $\Delta C = 600$ руб.

В соответствии с установленными суммами затрат на переоборудование дизеля определены комплекты газобаллонного оборудования, составы которых представлены в приложении 4 работы.

Машинно-тракторный агрегат (МТА) при выполнении технологических операций работает на неустановившихся режимах, которые вызываются различными факторами, в первую очередь, вариацией тягового усилия. В этой связи необходимо учесть, что расход газа, дизельного топлива и мощность двигателя тесно взаимосвязаны и зависят от тягового усилия трактора. Потеря мощности при работе МТА на неустановившихся режимах приводит к увеличению удельного расхода топлива и ухудшению других эксплуатационных показателей двигателя: эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , частоты вращения коленчатого вала n .

2.3 Влияние неустановившегося режима работы МТА на эксплуатационные параметры газодизельного двигателя

В разделе 2.2 отмечено, что при выполнении сельскохозяйственных операций дизельные двигатели МТА работают большую часть времени в режиме неустановившейся нагрузки. Резкое увеличение и уменьшение нагрузки приводит к изменению во времени одного или всех параметров, определяющих работу двигателя [68, 142]. При этом если МТА работает в стационарном режиме, в точке А регуляторной ветви характеристики, момент двигателя равняется M_0 (рисунок 2.10)

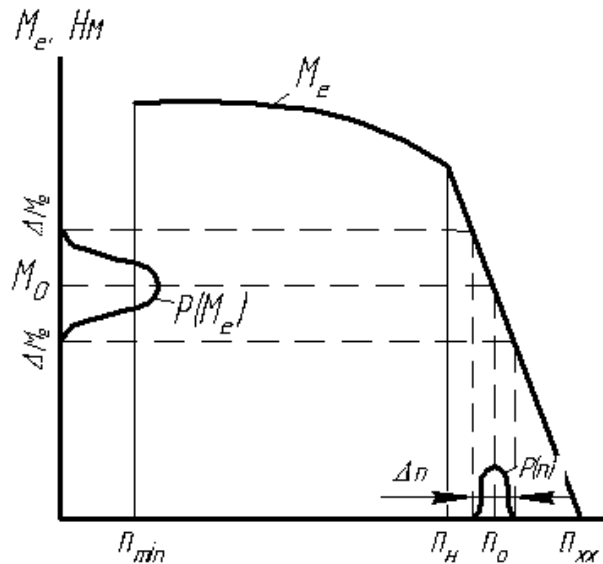


Рисунок 2.10 – Изменение крутящего момента двигателя при неустойчивом режиме: M_e – момент двигателя; M_0 – момент двигателя при установившемся режиме; n_0 – частота вращения двигателя при установившемся режиме; ΔM_e , Δn – соответственно приращение момента и частоты вращения

Изменение момента и частоты вращения двигателя, как и других параметров, носит вероятностный характер и описывается законом распределения отклонений в точках M_0 и n_0 .

Установившийся режим работы МТА характеризуется:

$$M_e = M_c = M_0 = \text{const.}$$

При установившемся режиме момент сопротивления:

$$M_e = (K_v \cdot B_m + P_f) \cdot r_k, \quad (2.10)$$

где K_v – удельное тяговое сопротивление кН/м;

B_m – ширина захвата машины, м;

$P_f = m_g \cdot g \cdot f$ – сила сопротивления качению трактора, Н;

m_g – эксплуатационная масса агрегата, кг;

f – коэффициент сопротивления качению трактора;

r_k – радиус колеса, м.

При возникновении увеличения и уменьшения нагрузки на крюке $P_{кр}$ это условие нарушается, возникает переходной процесс, в результате двигатель переходит на другой режим. Промежуток времени, в течение которого двигатель

переходит на новый стационарный режим, называется переходным процессом. За время переходного процесса эксплуатационные параметры (ω_{01} , M_{01} , G_{m01} , g_{e01}) двигателя изменяются и достигают величины (ω_{02} , M_{02} , G_{m02} , g_{e02}). На рисунке 2.11 изображен переходный процесс M_e и ω_e .

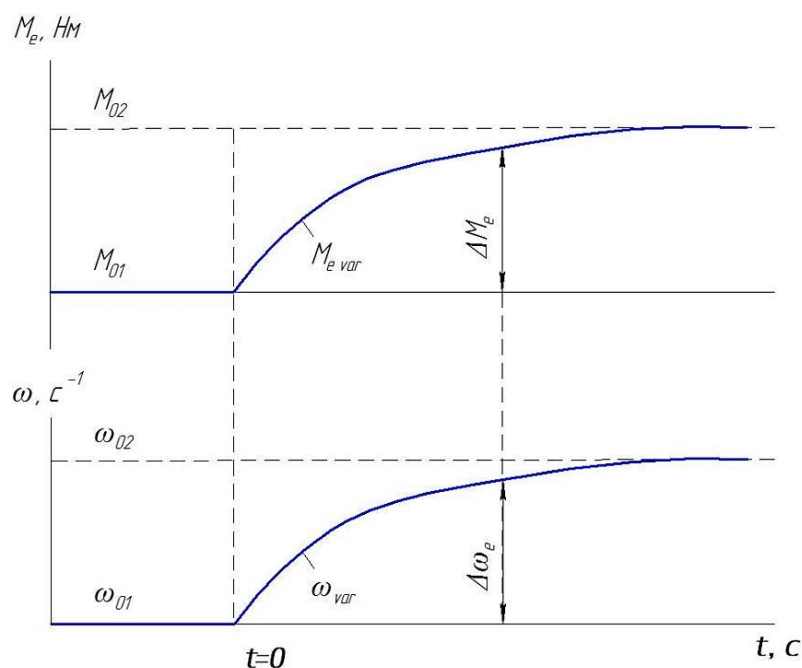


Рисунок 2.11 – Зависимость $M_e(t)$ и $\omega_e(t)$ двигателя при неустановившемся режиме работы трактора

Представленные на рисунке 2.11 кривые характеризуют переходной процесс изменения крутящего момента и частоты вращения двигателя при резком ступенчатом изменении нагрузки на трактор (увеличение удельного тягового сопротивления) [68].

При частоте вращения ω_{01} и $M_e = M_{01}$ трактор выполнял работу в стационарном режиме в промежутке времени $t < 0$. В момент внезапного увеличения нагрузки $P_{кр}$ на величину $\Delta P_{кр}$ момент двигателя, в течение некоторого переходного периода, изменится на величину ΔM_e и достигнет значения M_{02} , а частота вращения изменится на величину $\Delta \omega_e$ и достигнет значения ω_{02} . При этом изменятся и другие эксплуатационные параметры. Для поддержания оптимальных параметров двигателя используют автоматическое регулирование [91, 92, 117, 187]. В переходном процессе изменение параметров описывают системой уравнений [68, 84, 111].

Изменение угловой скорости коленчатого вала двигателя:

$$T_{2n}^2 \frac{d^2 n}{dt^2} + T_{1n} \frac{dn}{dt} + n_{01} = k_{n2} \Delta M_c. \quad (2.11)$$

Изменение цикловой подачи топлива:

$$T_{2g}^2 \frac{d^2 g_u}{dt^2} + T_{1g} \frac{dg_u}{dt} + g_{u01} = k_{g2} \Delta M_c. \quad (2.12)$$

Изменение расхода воздуха:

$$T_{2\epsilon}^2 \frac{d^2 G_\epsilon}{dt^2} + T_{1\epsilon} \frac{dG_\epsilon}{dt} + G_{\epsilon01} = k_{\epsilon2} \Delta M_c. \quad (2.13)$$

Изменение расхода газа:

$$T_{2z}^2 \frac{d^2 G_z}{dt^2} + T_{1z} \frac{dG_z}{dt} + G_{z01} = k_{z2} \Delta M_c. \quad (2.14)$$

где T_{ij} – коэффициенты дифференциальных уравнений;

φ_{01} – начальное значение угловой скорости коленчатого вала двигателя, мин⁻¹;

g_{u01} – начальное значение цикловой подачи топлива, г/цикл;

G_{B01} – начальное значение часового расхода воздуха, кг/ч;

G_{F01} – начальное значение часового расхода газа, м³/ч;

k_i – коэффициенты усиления;

ΔM_c – изменение момента сопротивления, действующего на коленчатый вал двигателя, Н·м.

Анализ системы двигателя при разных нагрузках можно произвести, применив принцип суперпозиции при решении уравнений (2.11) – (2.14).

Линейные уравнения (2.11) – (2.14) решаются методами математического анализа и могут быть представлены уравнением [1]:

$$y = y_0 + y_n, \quad (2.15)$$

где y_0 – решение однородного уравнения;

y_n – решение неоднородного уравнения.

Решение зависит от корней характеристического уравнения:

$$\lambda^2 + a\lambda + b = 0.$$

В нашем случае для определения изменения эксплуатационных параметров были приняты следующие уравнения:

– угловая скорость коленчатого вала двигателя:

$$n = e^{-\alpha t} [(2400 - \beta \cdot \kappa_{H_n} M_c) + \gamma \cdot \kappa_H M_c \sin(\theta \cdot t)]; \quad (2.16)$$

– изменения момента:

$$Me = e^{\alpha_M t} \cdot \beta_M \cdot \kappa_{H_M} M_c \cdot \cos(\theta_M \cdot t); \quad (2.17)$$

– изменение мощности:

$$Ne = e^{\alpha_N t} \cdot \beta_N \cdot \kappa_{H_N} M_c \cdot \cos(\theta_N \cdot t); \quad (2.18)$$

– изменение часового расхода:

$$G_T = e^{\alpha_{G_T} t} \cdot \beta_{G_T} \cdot \kappa_{H_{G_T}} M_c \cdot \cos(\theta_{G_T} \cdot t). \quad (2.19)$$

В этих формулах $\alpha, \alpha_M, \alpha_N$ и α_G – коэффициенты дифференциальных уравнений: угловой скорости коленчатого вала двигателя, крутящего момента, мощности и часового расхода топлива соответственно;

β, β_M, β_N и β_G – коэффициенты пропорциональности;

$\theta, \theta_M, \theta_N$ и θ_G – частоты.

Все коэффициенты определяются исходя из принципа максимального правдоподобия:

$$\int_0^T [y(t) - \hat{y}(t)] dt \rightarrow \min, \quad (2.20)$$

где $y(t)$ – реализация отклика в эксперименте;

$\hat{y}(t)$ – значение функции отклика.

Таким образом, входящие в формулы (2.16) – (2.19) коэффициенты устанавливают по результатам опытов.

В пределах линейного участка исследуемого показателя вычислены коэффициенты дифференциальных уравнений по регуляторной характеристике [96].

Коэффициенты дифференциальных уравнений на линейном участке исследуемого показателя были установлены по внешней регуляторной

характеристике [96].

Результаты лабораторных испытаний двигателей, работающих на дизельном и газодизельном топливе при меняющейся интенсивности нагрузки, представлены в приложении 5, и вполне согласуются с результатами полученными другими исследователями [96].

При сравнении дизельных двигателей с газодизельными заметно, что активность переходного процесса у последних значительно выше и с более низкой частотой колебаний. В неустановившемся режиме газодизельного двигателя моделирование (2.11) – (2.14) изменений показателей рабочего процесса приводит к возможности улучшения системы регулирования подачи топлива и газа серийно выпускаемых двигателей. С использованием известных теоретических положений можно достичь более эффективной работы.

2.4 Теоретические основания для улучшения работы двигателя в режиме газодизеля

Создание конструкций, регулирующих крутящий момент и частоту вращения путём изменения состава смеси, представляет одно из перспективных направлений в области газодизельных технологий. Получили широкую популярность системы питания тракторных газодизелей с качественным регулированием, в которых коэффициент наполнения практически не меняется в ходе процесса регулирования. Качество битопливной смеси в них определяется её теплотворностью, что является основным параметром [28, 113, 114, 118, 160, 193].

При изменении внешней нагрузки МТА возникает проблема согласования динамических характеристик двигателя при переходе работы на газодизельный процесс. При работе по газодизельному процессу величина запальной дозы дизельного топлива устанавливается постоянной, а изменением подачи газозоудшной смеси в цилиндры управляет тракторист.

Отклонение тягового сопротивления орудия от средней величины, колеблющейся в пределах от 25 до 40 %, зависит от скорости движения и свойства почвы и может иметь различную продолжительность, как

кратковременную, так и достаточно долгую, что влияет на общую эффективность работы [100]. В таких условиях в силу индивидуальных особенностей человека, его реакции на определенные ситуации и способности к анализу информации, не всегда можно точно предсказать действия тракториста. Согласно представленным данным [100] при выполнении пропашной обработки междурядий хлопчатника тракторист имеет среднее время реакции 0,5 с. Время, необходимое трактористу на получение информации, её анализа и принятие решения к действию, можно определить из формулы:

$$t_k = t_{\text{обн}} + t_{\text{обр}} + t_p, \quad (2.21)$$

где $t_{\text{обн}}$ – время получения сигнала;

$t_{\text{обр}}$ – время анализа ситуации;

t_p – время для принятия решения.

Возрастающее тяговое сопротивление орудия МТА из-за изменения физико-механических свойств почвы или рельефа местности способствует возникновению переходных режимов работы двигателя во время разгона при изменении трактористом количества подаваемого топлива в двигатель. С целью обеспечения сбалансированности работы двигателя при возникающем ускорении во время переходных режимов необходимо выполнить анализ параметров этих процессов.

Обобщенную форму уравнения, описывающего движение МТА, можно представить в виде выражения [27]:

$$J_a \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c, \quad (2.22)$$

где J_a – приведённый к валу двигателя момент инерции движущихся масс агрегата;

ω – соответствующая поступательному движению МТА угловая скорость коленчатого вала;

M_d и M_c – приведённый к валу двигателя крутящий момент двигателя и момент сопротивления на передвижение МТА.

Уравнение движения МТА $M_d(\omega)$ можно описать выражением:

$$M_d(\omega) = M_{d0} + \Delta M_d(\omega), \quad (2.23)$$

где M_{d0} – крутящий момент при установившемся движении;

$\Delta M_d(\omega)$ – изменение крутящего момента от изменения нагрузки (избыточное усилие).

Текущее значение положения педали управления подачей топлива при работе, устанавливаемое трактористом [28]:

$$x = x_0 \pm \Delta x, \quad (2.24)$$

где x_0 – установившееся положение педали при постоянном значении момента M_{d0} ;

Δx – изменение положение педали в зависимости от изменения момента ΔM .

Избыточное усилие, возникающее при разгоне двигателя на основании данных работ [59, 60], можно описать выражением:

$$P_{изб}(t) = m_{np} \int \frac{dv}{dt}, \quad (2.25)$$

где m_{np} – суммарная приведенная движущаяся масса агрегата;

t и v – время и скорость.

Исходя из описанного ранее выражения, можно определить время разгона агрегата:

$$t_p = m_{np} \int \frac{dv}{P_{изб}(t)}. \quad (2.26)$$

Продолжительность процесса разгона оказывает влияние на возможность перехода от одного режима работы двигателя к другому, а от этого зависит эффективность рабочего цикла и производительность трактора в целом.

Проведя интегрирование уравнения (2.26) от исходной скорости v_n до конечной скорости v_k , которая достигается в самом конце разгона можно определить время разгона агрегата (t_p агрегата). Чтобы упростить решение,

допустим, что $P_{изб}(t) = const$, следовательно:

$$t_p = m_{np} \int_{v_n}^{v_k} \frac{dv}{P_{изб}} = \frac{m_{np}(v_k - v_n)}{P_{изб}} = \frac{m_{np}(v_k - v_n)}{P_{дв} - P_c}, \quad (2.27)$$

где P_c – тяговое сопротивление орудия.

Выражение (2.27) показывает, что при увеличении $P_{дв}$ и уменьшении приведенных масс происходит снижение времени t_p .

С учётом времени для принятия решения трактористом на основании зависимости (2.21) схематично можно представить время разгона (рисунок 2.12):

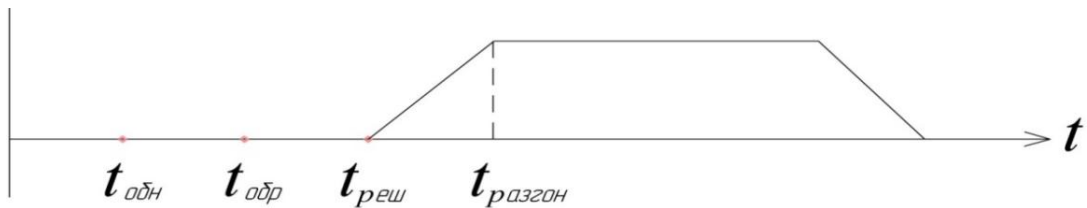


Рисунок 2.12 – Время, затрачиваемое трактористом при ручном управлении подачи газовой смеси

Промежуток времени между $t_{реш}$ и $t_{разгон}$ соответствует положению педали управления подачи топлива Δx от положения x_0 при $M_{до}$.

На основании исследований некоторых ученых [61] уравнение, отображающее движение агрегата под действием возмущений, можно записать в виде:

$$(T_a \cdot p + \gamma)\varphi = -\mu - \eta, \quad (2.28)$$

где T_a – постоянная времени агрегата, характеризующая инерционные свойства двигателя и поступательно движущихся масс;

$p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, t – время регулирования;

γ – коэффициент самовыравнивания объекта регулирования (в упрощенном виде $\gamma \rightarrow 0$);

$\varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega}$ – безразмерное значение угловой скорости коленчатого вала

двигателя;

$\mu = \frac{M_d}{M_d + \Delta M_d}$ – безразмерная величина изменения неустойчившейся

нагрузки, где ΔM_d – переменная составляющая момента, обусловленная колебаниями нагрузки;

η – коэффициент неравномерности перемещения педали управления подачи топлива.

$$T_a = \frac{J_a \cdot \varpi}{M_{\text{кн}}}, \quad (2.29)$$

где ϖ – номинальная угловая скорость коленчатого вала двигателя;

$M_{\text{кн}}$ – номинальный крутящий момент двигателя.

Передаточную функцию управления топливоподачи можно описать уравнением [117]:

$$W\varphi\eta(p) = \frac{1}{T_a \cdot p + \gamma}. \quad (2.30)$$

Изменение момента сопротивления МТА и реакцию тракториста при регулировании подачи газовойздушной смеси в общем виде можно отобразить в виде графика 2.13.

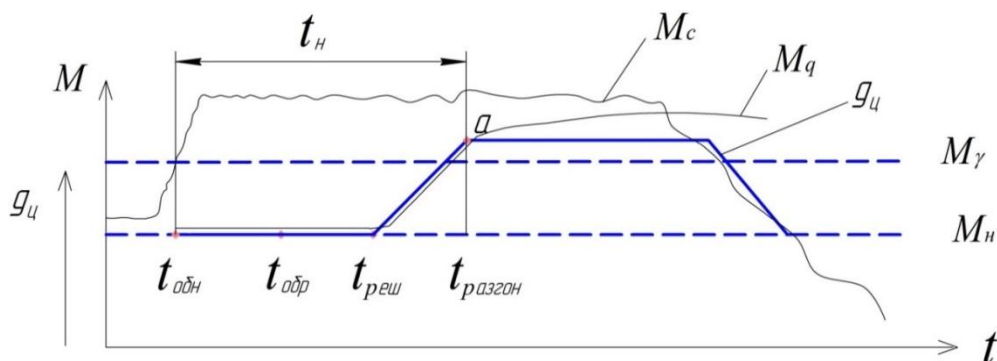


Рисунок 2.13 – График изменение цикловой подачи (q_u) газовойздушной смеси и момента сопротивления (M_c) при ручном регулировании

На рисунке M_n – номинальный крутящий момент двигателя;

M_γ – крутящий момент при самовыравнивании;

t_n – время запаздывания реакции оператора на изменяющееся сопротивление M_c (время нечувствительности).

При снижении оборотов двигателя в течение периода времени t по регуляторной характеристике увеличивается момент M_q . В этом случае

трактористу необходимо перейти на низшую передачу или увеличить количество подаваемого топлива в цилиндры двигателя. Потеря производительности МТА при этом будет зависеть от периодичности изменения возмущающих воздействий (P_c) с периодом колебаний T ($T = \frac{2\pi}{\omega}$, где ω – частота возмущающих воздействий).

По данным, представленным в работах [27, 117], можно прийти к выводу о возможности разложения сложной периодической функции на гармонические компоненты при помощи ряда Фурье $\varphi_s = f(f)$:

$$\varphi_s = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos k\omega_0 t + b_k \sin k\omega_0 t), \quad (2.31)$$

где k – порядок гармоники;

a_0, a_k, b_k – коэффициенты Фурье [27].

Применив передаточную функцию (2.30) для уменьшения негативного воздействия тракториста на управление топливоподачей (газовоздушной смеси) можно обеспечить эффективную работу системы.

При преодолении границ момента сопротивления M_γ моментом M_c выражение (2.28) будет выглядеть следующим образом:

$$(T_a \cdot p + \gamma)\varphi = -\mu.$$

В соответствии с решением дифференциального уравнения изменение частоты вращения коленчатого вала двигателя происходит пропорционально увеличению момента сопротивления, вследствие устранения запаздывания подачи топливной смеси в цилиндры двигателя. Для повышения крутящего момента важно увеличить цикловую подачу топлива, что должно обеспечивать регулирование при резком увеличении момента сопротивления. Уравнение движения (2.28) в этом случае при соблюдении условия $M_d = M_c$ примет вид:

$$(T_a \cdot p + \gamma)\varphi = \eta.$$

Уравнение движения можно представить в виде уравнения Лагранжа 2 рода,

поменяв его взаимосвязь с регулятором частоты вращения ТНВД вместо положения хода педали управления подачей топлива [117]:

$$M_d = M_c \pm \kappa_q \cdot x, \quad (2.32)$$

$$m_p \frac{d^2 x}{dt^2} + k_p \frac{dx}{dt} + c \cdot x = [m_{ep}(r_0 + i_n x)] \omega^2, \quad (2.33)$$

где M_d – крутящий момент коленчатого вала двигателя;

κ_q – коэффициент пропорциональности, определяемый по скоростной характеристике двигателя совместно с x ;

x – текущее значение положение педали управления подачей топлива;

k_p – коэффициент пропорциональности;

c – жесткость пружины регулятора;

m_{tp} – масса грузов регулятора;

r_0 – радиус вращения грузов регулятора;

i_n – передаточное отношение между перемещением грузов регулятора и муфты регулятора;

ω – угловая скорость коленчатого вала двигателя.

Зависимость производительности МТА от мощности N_e можно представить в виде выражения [117]:

$$W = 27 \frac{N_{en}}{K_a} \xi_{Ne} \eta_{tp} T_{cm} \tau, \quad (2.34)$$

где N_{en} – номинальная эффективная мощность двигателя;

K_a – удельное сопротивление агрегата на метр рабочей ширины захвата;

ξ_{Ne} – степень использования номинальной мощности двигателя при основном режиме работы;

η_{tp} – к.п.д. трактора при основном режиме работы;

T_{cm} – полное время смены;

τ – коэффициент использования времени смены.

Определение составляющих потерь мощности ξ_{Ne} в течение времени t_n позволяет установить результат по производительности МТА.

2.5 Необходимые условия для успешного создания газодизельных систем

При соблюдении ряда важных условий успешно осуществляется создание газодизельных систем:

1. Регулирование подачи газообразного и дизельного топлива в системе должно выполняться на основе заложенных теоретических принципов.
2. Для правильного функционирования конструкции важно, чтобы действительная частота вращения коленчатого вала соответствовала теоретической частоте во всех рабочих точках, а также обеспечивалась уравновешенность между крутящим моментом двигателя и моментом сопротивления.

2.6 Выводы по второй главе

На основании данных, представленных выше, можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель затрат на работу двигателя на дизельном топливе и КПП позволяет определить оптимальную величину коэффициента замещения топлива газом в зависимости от удельных затрат на ремонт двигателя, разницы в стоимости дизельного топлива и КПП, затрат на переоборудование двигателя. Модель позволяет также определять допустимую величину затрат на переоборудование двигателя при известных значениях входящих в модель факторов.
2. Представлена система уравнений для определения изменения параметров работы двигателя – угловой скорости коленчатого вала, крутящего момента на коленчатом валу и мощности двигателя – работающего на дизельном и

газодизельном топливе при меняющейся интенсивности нагрузки на переходных режимах функционирования двигателя.

3. Определены основания для теоретического улучшения работы двигателя в режиме газодизеля. Возрастающее тяговое сопротивление орудия МТА из-за изменения физико-механических свойств почвы или рельефа местности способствует возникновению переходных режимов работы двигателя. Успешное преодоление переходных режимов достигнуто введением связи управления заслонкой подачи газа с всережимным регулятором топливного насоса дизеля.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Организация выполнения работы

Экспериментальные исследования проводились в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.1.

На первом этапе проведен литературный обзор, который показал обоснование применения компримированного природного газа в дизелях машинно-тракторных агрегатов и методы его использования. Проанализированы существующие конструкции систем питания дизельного двигателя КПП и способы обеспечения автотракторной техники газообразным топливом.

На втором этапе проведены теоретические исследования работы трактора с газодизельным двигателем во время осуществления технологических операций. Разработана экономико-математическая модель применения тракторов с газодизельными двигателями в МТА. Созданы новые модели общей подачи топлива, дизельного топлива и газа, которые стали основой для новых требований к проектированию газодизельных конструкций, обеспечивающие повышение ресурсосбережения.

На третьем этапе разработана методика проведения экспериментальных исследований. Разработана конструкция системы питания дизельного двигателя компримированным газом, защищённая патентом на полезную модель. В программу экспериментальных исследований входили лабораторные испытания топливной аппаратуры и двигателя Д-240, а также производственные испытания трактора МТЗ -82, оборудованного двигателем Д-240.

На четвертом этапе получены математические модели переходных процессов при увеличении и уменьшении нагрузки при переходных режимах, а также сопоставление теоретических и практических результатов исследования.

На пятом этапе рассчитана технико-экономическая оценка предложенной системы питания дизельного двигателя газообразным топливом.



Рисунок 3.1 – Общая блок-схема диссертационной работы

Экспериментальные исследования системы питания дизеля с использованием компримированного природного газа были проведены для подтверждения результатов теоретического исследования и проверки рабочей гипотезы. Оценка эффективности газодизельного процесса в определённом диапазоне частоты вращения коленчатого вала и нагрузки двигателя являлась целью проведения экспериментальных исследований, учитывающих эксплуатационные требования.

Для создания усовершенствованной газодизельной системы питания для трактора МТЗ-82, которая будет осуществлять регулирование подачи топлива в соответствии с поставленной целью по повышению эффективности использования трактора, необходимо провести экспериментальное исследование, подтверждающее эффективность предложенных моделей регулирования.

В программу экспериментальных исследований входили лабораторные испытания топливной аппаратуры и двигателя Д-240, а также производственные испытания трактора МТЗ -82, оборудованного двигателем Д-240.

Для проведения лабораторных экспериментов была поставлена задача – оценить эффективность газодизельного процесса с учётом разнообразия частот вращения коленчатого вала и типа нагрузки двигателя в условиях статического и динамического нагружения, учитывая требования эксплуатации.

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 нагружения;
- снятие внешней регуляторной характеристики двигателя в условиях динамического нагружения;
- снятие внешней регуляторной характеристики с битопливным питанием дизеля в условиях статического нагружения;
- снятие внешней регуляторной характеристики с битопливным питанием дизеля в условиях динамического нагружения;

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

С двигателя Д-240 трактора МТЗ-82 с экспериментальной системой питания газодизеля на электротормозном стенде, оснащённом специальными измерительными и регистрирующими приборами, проведено снятие мощностных и экономических показателей по внешней регуляторной характеристике в соответствии с методиками, оговоренными в ГОСТ 10578 – 86 и ГОСТ 18509 – 88 [36, 37], и методикой, изложенной в [143].

Для определения отклонений проведено сравнение показателей работы двигателя Д-240 по газодизельному процессу с результатами, полученными в рамках дизельного процесса, при сохранении первоначальных регулировок двигателя.

3.2. Объект испытаний

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 [46], а также дизельное топливо марки Л в соответствии с ГОСТ 305 82 [34] и моторное масло М-10-Г2 по ГОСТ 17479.1 2015 [43].

Состав используемого газа представлен в таблице 3.1.

При нормальных условиях плотность природного газа составляет 0,673 кг/м³, а его средняя удельная теплота сгорания равна 33,4 МДж/м³ [46].

Таблица 3.1 – Компоненты природного газа, используемого при испытаниях

Наименование	Содержание, %
Метан	99,25
Этан	0,20
Пропан	0,09
Изобутан	0,03
Азот	0,39
Оксид углерода	0,01
Прочие	0,03
Сероводород	Отсутствие

В таблице 3.2 в соответствии с ГОСТ 27577 – 2022 [46] представлена характеристика природного газа.

Таблица 3.2 – Характеристика природного газа в соответствии с ГОСТ 27577 2022

Объемная теплота сгорания, низшая, кДж/м	Не менее 31800	По ГОСТ 22667 82
Относительная плотность к воздуху	0,55...0,70	По ГОСТ 22667 – 82
Расчетное октановое число (по моторному методу)	Не менее 105	По ГОСТ 27577 – 2022
Концентрация сероводорода, г/м ³	Не более 0,02	По ГОСТ 22387.2 – 97
Концентрация меркаптановой серы, г/м	Не более 0,036	По ГОСТ 22387.2 – 97
Масса механических примесей в 1 м ³ , мг	Не более 1,0	По ГОСТ 22387.4 – 77
Суммарная объемная доля негорючих компонентов, %	Не более 7,0	По ГОСТ 23781 – 87
Объемная доля кислорода, %	Не более 1,0	По ГОСТ 23781 – 87
Концентрация паров воды, мг/м ³	Не более 9,0	По ГОСТ 20060 – 83

3.3. Методика исследования процесса подачи топлива на безмоторной установке

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 для испытания и регулировки ТНВД, на который было установлено необходимое оборудование, а также дополнительно измерительно-регистрающая аппаратура (рисунок 3.2) для повышения точности измерения параметров топливоподачи при динамическом режиме.

Программа исследований включала:

- снятие внешней регуляторной характеристики;
- выявление линейных участков на внешней регуляторной характеристике и для дальнейшего анализа на этих участках определения коэффициентов усиления.

Согласно методике, утвержденной в работе [133], и в соответствии с ГОСТ 10578 - 86 [36] была снята характеристика.

Регистрацию характеристик топливоподающей аппаратуры проводили на

установке для осциллографирования тензометрической станции UTC1-BT-12/35, включающей 12-канальный усилитель.

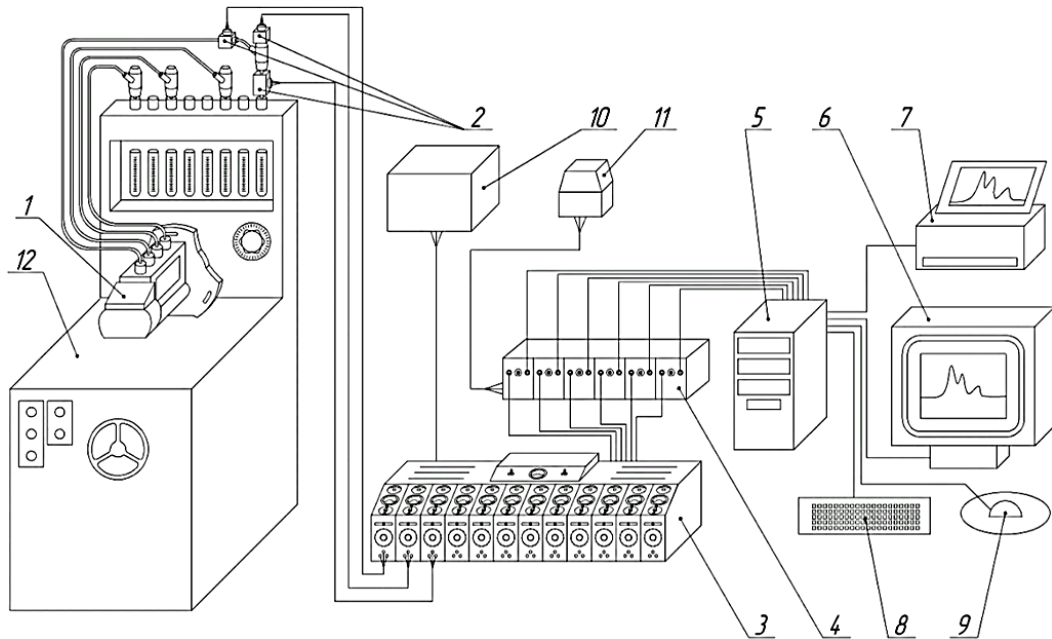


Рисунок 3.2 – Экспериментальный стенд для исследования подачи топлива:
 1 – ТНВД; 2 – датчики тензометрические: давления в топливопроводе у форсунки; характеристики впрыска; 3 – двенадцатиканальная тензометрическая станция UTC1-BT-12/35; 4 – высокочастотный фильтр; 5 – персональный компьютер с аналого-цифровым 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

На рисунке 3.3 изображен общий вид установки.

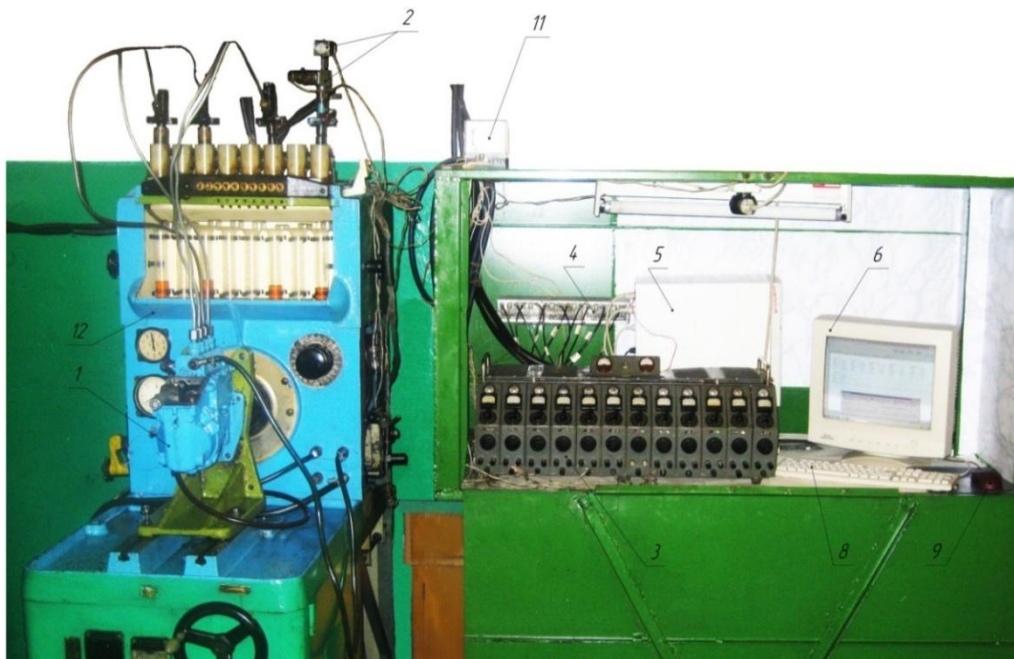


Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка для оценки процесса топливоподачи.
 Позиции соответствуют рисунку 3.2

При испытании топливной аппаратуры дизеля использовали штатный насос 4УТН-1111005-20 (УТН-5) и форсунки ФД-22. Перед проведением испытаний форсунки были отрегулированы на номинальное давление. Результаты испытания топливной аппаратуры в статическом режиме представлены в приложении 6 работы.

3.4 Описание системы питания газодизеля

В главах 1 и 2 диссертации представлены ключевые требования к газодизельной системе и определены функции, реализуемые её конструкцией.

Для проведения экспериментальных исследований на кафедре агроинженерии ФГБОУ ВО Омский ГАУ им. П.А. Столыпина на базе двигателя Д-240 был изготовлен прототип топливной системы для дизеля, функционирующей на газообразном топливе. Для работы двигателя при газодизельном процессе и обеспечения подачи запальной порции дизельного топлива опытная система питания включает штатный топливный насос высокого давления с всережимным центробежным регулятором [61, 112]. Разработана и утверждена на заседании НТС ФГБОУ ВО Омский ГАУ инструкция по переоборудованию тракторов МТЗ для работы на дизельном топливе и сжатом природном газе (приложение 2).

В процессе конвертирования всережимного регулятора топливного насоса высокого давления УТН-5 было осуществлено дополнение механизмами установки запальной порции дизельного топлива и управления дроссельной заслонкой регулирования количества подаваемого газообразного топлива.

Автоматическая подсистема переключения двигателя на газообразное топливо обеспечивает минимальную цикловую подачу запальной дозы дизельного топлива, равную 15-20% от номинала, и подачу газа в соответствии с рабочим режимом системы питания.

Схема опытной системы питания дизеля газообразным топливом представлена на рисунке 3.4.

Опытная система питания дизеля газообразным топливом включает баллон для газообразного топлива 1, который с помощью линии подачи газа, включающей последовательно соединенные элементы (расходный вентиль 3, устройство для заправки 4, фильтр очистки газа 5), соединяется с впускным коллектором 2 двигателя [112].

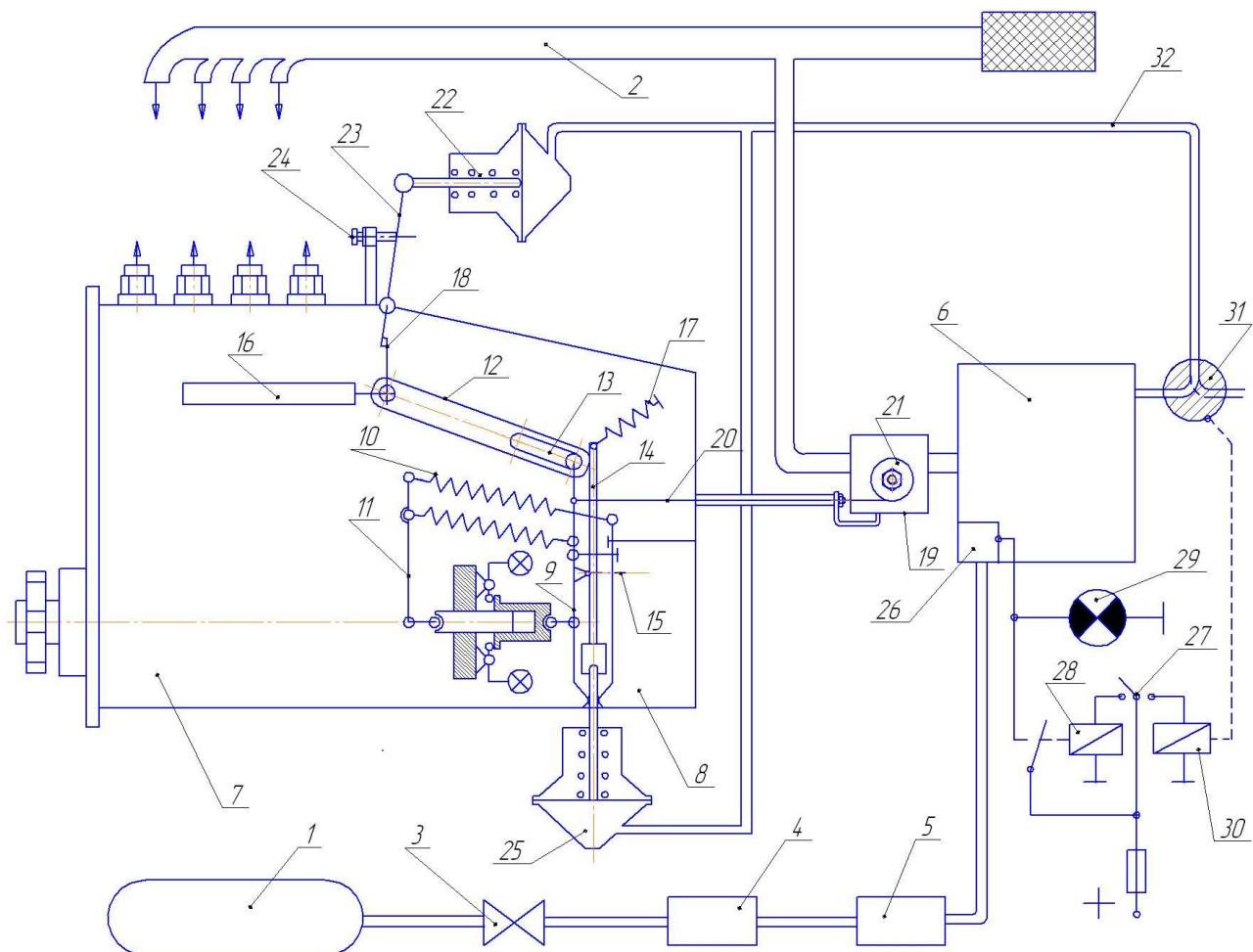


Рисунок 3.4 – Опытная система питания дизеля газообразным топливом

Также система питания газодизеля включает штатную систему питания дизельным топливом, в которую входит ТНВД 7, с центробежным регулятором 8, рычаг 9 которого через главную пружину 10 соединяется с рычагом 11 управления. Через тягу 12 с пазом свободного хода 13 с помощью двуплечего рычага 14, установленного на оси 15, рычаг 9 соединяется с рейкой 16 ТНВД посредством усилия пружины 17. Рейка ТНВД переводится в положение подачи запальной дозы дизельного топлива с помощью подвижного упора 18.

Состоящая из дроссельной заслонки управления подачи газа 19 и входящая в систему питания газодизеля подсистема регулирования подачи газообразного топлива связана кинематически с рычагом регулятора 9 с помощью тросика 20. С целью изменения передаточного числа от рычага регулятора 9 шкив привода 21 дроссельной заслонки управления подачи газа 19 имеет паз в соединении с осью дроссельной заслонки.

Подпружиненный мембранный механизм 22, соединенный кинематически с подвижным упором 18 рейки ТНВД двуплечим рычагом 23, имеющим регулируемый элемент 24 для регулирования запальной дозы дизельного топлива, а также подпружиненный мембранный механизм 25, разъединяющий рычаг 9 и тягу 12 рейки 16 при переключении на газодизельный режим, образуют автоматическую подсистему перевода двигателя на питание газообразным топливом.

Подача газа из газового баллона 1 на вход газового редуктора осуществляется с помощью включения электромагнитного клапана 26. В подсистеме перевода двигателя на питание газообразным топливом: переключатель вида топлива 27, электромагнитное реле 28, лампа сигнализирующая включение подачи газообразного топлива 29, электромагнит 30, клапан 31 подачи газа к управляющим подпружиненным мембранным механизмам 22 и 25 по линии 32 и сброса давления газа при выключении его подачи.

Принцип работы системы питания газодизеля.

При переводе двигателя на работу в газодизельный режим с подачей запальной дозы дизельного топлива с помощью переключателя 27 через электромагнитное реле 28 включают электромагнитный клапан 26, который через электромагнитный клапан 31 и линию 32 осуществляет подачу газа из газового баллона 1 к редуктору 6 и подпружиненным мембранным механизмам 22 и 25. Лампа 29 сигнализирует о включении подачи газообразного топлива. Мембрана подпружиненного механизма 22 под действием давления газа перемещается и воздействует на подвижный упор 18 с помощью двуплечего рычага 23, при этом

рейка 16 перемещается вправо в положение до упора рычага 23 в регулируемый элемент 24, обеспечивая минимально необходимую порцию запальной дозы дизельного топлива, которая составляет 15 – 20% от номинальной подачи. При этом мембрана подпружиненного механизма 25, перемещаясь, воздействует на двуплечий рычаг 14, который, поворачиваясь относительно оси 15, преодолевает усилие пружины 17, разъединяет рычаг 9 с тягой 12 рейки 16 ТНВД.

Подсистема автоматического регулирования подачи газообразного топлива включается в работу с увеличением нагрузки газодизеля. При повороте рычага 9 центробежного регулятора влево его палец свободно перемещается в пазе 13 тяги 12. Всережимное поддержание заданного скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя осуществляется дроссельной заслонкой управления подачей газа 19, соединенной тросиковой связью 20 с рычагом 9 центробежного регулятора автоматически в соответствии с нагрузочным и скоростным режимом работы двигателя.

При переходе двигателя на дизельный режим работы переключателем 27 выключают электромагнитный клапан 26, который питает электромагнит 30 клапана 31, разобщая редуктор 6 с газовым баллоном 1. Происходит сброс газа из линии 32 в атмосферу и возврат мембран подпружиненных механизмов 22 и 25 в исходное положение. Ограничение хода рейки 16 ТНВД отключается за счет подпружиненного мембранного механизма 22, а за счет разгрузки подпружиненного мембранного механизма 25 под действием пружины 17 двуплечим рычагом 14 соединяется с тягой рейки 12 рычаг регулятора 9 ТНВД. Система питания работает в штатном дизельном режиме.

Запуск двигателя осуществляется в обычном режиме работы системы питания – на дизельном топливе. Перед этим необходимо обесточить электромагниты 28 и 30 посредством установки переключателя 27 в нейтральное положение, за счёт чего с помощью электромагнитного клапана 26 произойдет разъединение газового баллона 1 и редуктора 6.

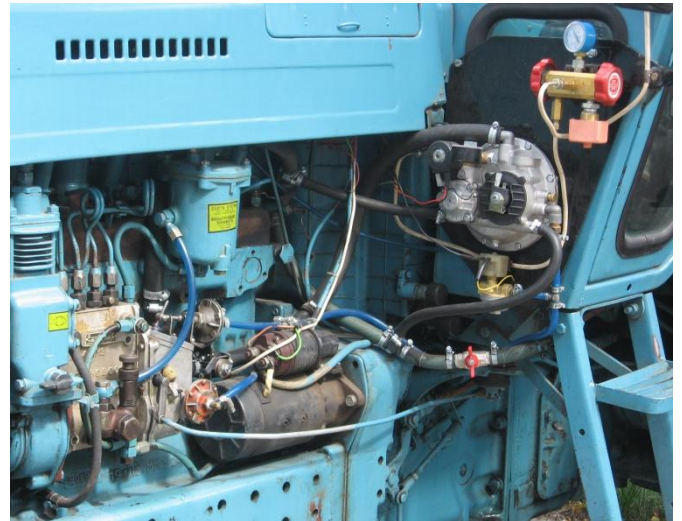
Опытная система питания дизеля газообразным топливом была установлена

на трактор МТЗ-82 (рисунок 3.5).

Сборка системы питания произведена на элементах газобаллонной аппаратуры ООО «МОБИЛЬГАЗ» города Набережные Челны.



а



б

Рисунок 3.5 – Опытный трактор МТЗ-82 с газодизельной системой питания:
а – общий вид; б – моторный отсек

На тракторе МТЗ-82 можно выделить две основные категории газового оборудования, обусловленные спецификой работы:

1) на крыше кабины (Рисунок 3.5, а) установлено специальное оборудование, предназначенное для хранения сжатого газа и его передачи в систему подачи. Система ГБО включает четыре баллона объемом 50 литров, в каждый установлены вентили. Баллоны соединены друг с другом трубопроводами высокого давления, а затем через трубопровод подключены к центральной крестовине;

2) в моторном отсеке (Рисунок 3.5, б) находится газомоторное оборудование, которое осуществляет снижение давления газа до требуемого уровня для нормальной работы газовой аппаратуры. Включает механизм

установки запальной дозы дизельного топлива, установленный на ТНВД УТН-5, дозатор, смеситель газа и трехступенчатый редуктор, расположенный на корпусе кабины с левой стороны по ходу движения трактора. Изменения были внесены в регулятор топливного насоса высокого давления для обеспечения работы газодизеля, сохраняя всережимную характеристику. Для фиксации рейки топливного насоса установлен электромагнитный клапан с целью ограничения запальной дозы дизельного топлива. Установка данного клапана вписывается в компоновку ТНВД.

3.5 Испытания трактора МТЗ-82 с экспериментальной газодизельной системой питания

Испытания экспериментальной системы питания двигателя Д-240 проводились в несколько этапов в рамках программы работы:

- Модернизация трактора установкой экспериментальной газодизельной системы питания.
- Оценка и сравнение полученных по ГОСТ 18509 – 88 [37] внешних регуляторных характеристик паспортными техническими характеристиками.

3.5.1 Методика моторных испытаний

Для проверки работоспособности двигателя с использованием стандартной и экспериментальной газодизельной системы питания, а также для исследования рабочего процесса были проведены моторные испытания на стенде.

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.).

На двигателе Д-240 трактора МТЗ-82 проводили испытания газодизельной системы питания, сравнивая со штатной.

Техническая характеристика двигателя Д-240 представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Техническая характеристика двигателя Д-240

Наименование параметра	Значение
Число цилиндров	4
Рабочий объём цилиндров, л	4,75
Номинальная мощность, кВт	55,15 ^{+3,5}
Номинальная частота, мин ⁻¹	2200
Максимальная частота вращения холостого хода, мин ⁻¹	2380
Номинальный крутящий момент, Н·м	250
Максимальный крутящий момент, Н·м	274,7
Частота вращения при максимальном крутящем моменте, мин ⁻¹	1400
Коэффициент запаса крутящего момента, %	12
Номинальный эффективный расход топлива, г/кВт ч	258
Степень сжатия, ε	16
Угол опережения подачи топлива, ° до ВМТ	26
Давление впрыска топлива, МПа	17,5 – 18

Общее изображение электротормозного нагрузочного стенда RAPIDO представлено на рисунке 3.6.

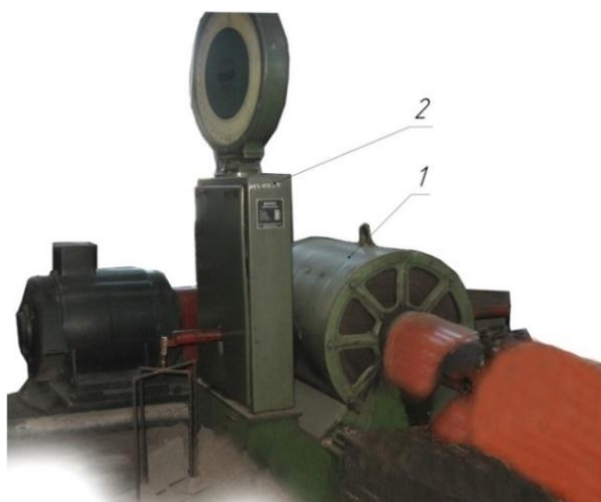


Рисунок 3.6 – Общий вид тормозного стенда: 1 – балансирующая электромашина; 2 – весовой механизм

На рисунке 3.7 изображен пульт управления стендом.



Рисунок 3.7 – Пульт управления электротормозным нагрузочным стендом RAPIDO: 1 – пульт управления; 2 – аппаратура МИВА-С

Микропроцессорная измерительно-вычислительная аппаратура МИВА-С использовалась для регистрации параметров двигателя при испытаниях.

Расход дизельного топлива двигателем при проведении испытаний определяли прибором с автоматическим отсчётом ГСП БА-1005, представленным на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 Прибор ГСП БА-1005

С помощью счётчика газа СГ-4 (G-4), представленного на рисунке 3.9, измерялся расход газа двигателем.

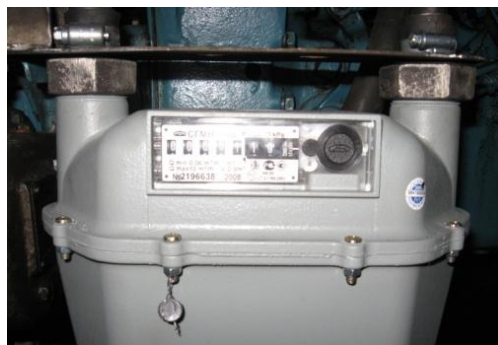


Рисунок 3.9 – Счетчик газа СГ-4

Дистанционный тахометр тормозного стенда с точностью 5 мин^{-1} измеряет частоту вращения коленчатого вала дизеля. Для измерения давления использовался барометр-анероид МД-49-А, цена деления которого составляет 1 мм рт.ст., диапазон измерений от 300 до 820 мм рт. ст. Температура окружающей среды отслеживалась ртутным термометром с ценой деления $0,5^\circ\text{C}$.

Испытаниям предшествовало выполнение работ:

– настройка экспериментального топливного насоса УТН-5 выполнялась на стенде для испытания и регулировки топливных насосов высокого давления

КИ-921М в соответствии с техническими характеристиками, (номинальная частота вращения кулачкового вала – 1100 мин^{-1} , цикловая подача топлива – 69 куб. мм.), был также отрегулирован механизм установки запальной дозы;

– экспериментальная система питания и дополнительное оборудование были установлены на двигатель после проверки технического состояния трактора, регулировки клапанов, смены масла и фильтрующих элементов, а также измерения компрессии.

Трактор МТЗ-82 был установлен в лаборатории для испытания двигателей внутреннего сгорания после проведения необходимых операций и подключен к электротормозному нагрузочному стенду карданной передачей через ВОМ.

В соответствии с методикой проведения моторных испытаний, рекомендованной ГОСТ 18509 – 88, в сравнении при работе со штатной и экспериментальной системами питания, проводили снятие мощностных и экономических показателей двигателя Д-240 по внешней регуляторной характеристике. Результаты испытаний двигателя Д-240 занесены в протоколы испытаний (от 10.10.2023 г. и 17.10.2023 г.), а также по ним построены внешние регуляторные характеристики. Акты и протоколы испытаний приведены в приложении 2 работы.

3.5.2 Методика оценки проведенных моторных испытаний

Для обработки экспериментальных данных применяются статистические методы [27, 102], согласно стандартам ГОСТ 18509 – 88 [37].

Эффективная мощность двигателя (кВт):

$$N_e = \frac{0.001 \cdot P_t \cdot n_{cp}}{\eta_p \cdot 1,36}, \quad (3.1)$$

где P_t – показания весового механизма, кгс.;

η_p – КПД редуктора, принимаем 0,96 – 0,98;

Крутящий момент двигателя (Н·м):

$$M_{\text{д}} = \frac{9550 \cdot N_e}{n_e}. \quad (3.2)$$

Кроме того, крутящий момент (кгс·м):

$$M_{\text{д}} = \frac{P_T \cdot L_T \cdot i_P}{\eta_P}, \quad (3.3)$$

где $L_T = 716,2$ мм длина плеча весового механизма электротормоза.

Среднее эффективное давление (Н/см²):

$$P_e = \frac{900 \cdot N_e \cdot 9.81}{V_h \cdot n_{cp}}, \quad (3.4)$$

где V_h – рабочий объём двигателя, л.

Часовой расход топлива (кг/ч)

$$G_T = \frac{3.6 \cdot \Delta G_T}{t_{on}}, \quad (3.5)$$

где ΔG_T – расход топлива двигателем за опыт, г.

Эффективный удельный расход топлива (г/кВт·ч) находится из выражения:

$$g_e = \frac{1000 \cdot G_T}{N_e}. \quad (3.6)$$

Эффективный КПД двигателя:

$$\eta_e = \frac{632,3 \cdot 1,36 \cdot N_e}{g_e \cdot H_U}, \quad (3.7)$$

где H_U – низшая теплотворность дизельного топлива и смеси, МДж/м³.

Погрешность отклонения математической модели от экспериментальных данных определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (3.8)$$

где N – число экспериментальных точек;

y_i и $\hat{y}_i$ – экспериментальные и вычисленные по математической модели значения параметров в экспериментальных точках соответственно.

3.5.3 Методика производственных испытаний газодизельного трактора МТЗ-82 в составе МТА

Эксплуатационные испытания проводились на газодизельном тракторе МТЗ-82 в составе машинно-тракторного агрегата с культиватором КПС-4Н (ФКУ ИК-7). При эксплуатации составленного МТА обеспечивается загрузка двигателя, близкая к номинальному режиму работы.

Навесной культиватор КПС-4Н производства ФКУ ИК-7 Управления Федеральной службы исполнения наказаний России по Омской области предназначен для сплошной обработки почвы с возможностью выполнения боронования.

Таблица 3.4 – Технические характеристики культиватора КПС-4Н

Показатель	Значение
Тип	Навесной
Ширина захвата, м	4
Рабочая скорость, км/ч	10-12
Производительность за час, га	3,9 - 4,8
Обслуживающий персонал, чел	Тракторист
Глубина обработки, см	5-12
Глубина обработки зубовыми боронами, см	4-8
Агрегатируется с тракторами не менее, класс	1,4

Вид МТА в составе трактора МТЗ-82 и культиватора КПС-4Н представлен на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – МТА в составе трактора МТЗ-82 и культиватора КПС-4Н

При выполнении производственных испытаний контролировались параметры:

- 1) давление газа в баллоне, которое составляло изначально, 20 МПа;
- 2) расход газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$.
- 3) расход дизельного топлива, $\text{кг}/\text{ч}$;
- 4) длина загона l , м;
- 5) время прохождения загона t , с;
- 6) глубина обработки, см.

Полевые исследования проведены на полях учебно-опытного хозяйства ФГБОУ ВО Омский ГАУ.

При проведении производственных испытаний применялись стандартные методики на эксплуатационно-технологические испытания тракторов по ГОСТ 24055 – 88 [38], ГОСТ 24057 – 2016 [44], ГОСТ 24059 – 88 [39], с обязательной регистрацией рабочего времени в контрольных сменах.

В таблице 3.4 представлены значения абсолютных погрешностей измеренных величин (по ГОСТ 14846 – 81) [33].

Таблица 3.5 – Значения абсолютных погрешностей измеренных величин

Измеряемый параметр	Размерность	Погрешность
m – масса трактора	кг	0,005
n – частота вращения коленчатого вала	мин^{-1}	0,005
M – крутящий момент	Нм	0,01
$P_{ш}$ – давление воздуха в шинах	кПа	0,05
S – путь, пройденный трактором за опыт	м	0,005
n_d – число оборотов движителя за опыт	мин^{-1}	0,2
T – продолжительность опыта	с	0,2
$P_{кр}$ – тяговое усилие	Н	0,01
G – расход топлива	$\text{кг}/\text{ч}$	0,02
B – ширина захвата	м	0,01
h – глубина обработки	см	0,05

3.5.4 Определение параметров переходного процесса

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 3.11, а, б, в и г приведены переходные процессы статических, астатических и сложных процессов.

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 А находят искомую величину t .

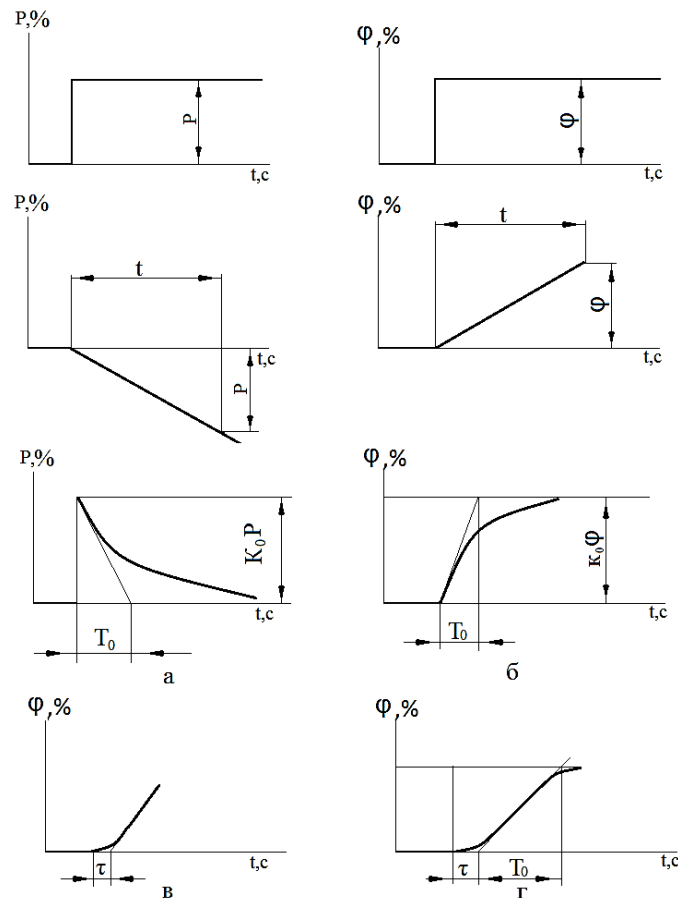


Рисунок 3.11 – Графики кривых переходного процесса: а – при внешнем возмущении ($P_{кр}$); б – при регулирующем воздействии (рейкой топливного насоса); в – сложных процессов без самовыравнивания; г – сложных процессов с самовыравниванием

Постоянная времени T_0 статического объекта определяется проведением касательной к кривой переходного процесса $P(t)$, $\Phi(t)$ в начальной точке и фиксацией точки пересечения этой касательной к прямой нового установившегося значения регулируемого параметра. Время запаздывания τ определяется величиной отрезка от момента нанесения скачкообразного возмущения до точки пересечения касательной, проведенной к кривой переходного процесса, с осью

абсцисс. Как правило, характеристики тракторных двигателей имеют запаздывание, отрицательно сказывающееся на процессе регулирования. Задача определения параметров сложных объектов значительно усложняется ввиду того, что сложные объекты, в отличие от простых, могут иметь различные динамические свойства при разных видах возмущений, т.е. динамические свойства при регулирующем воздействии. Ввиду этого переходные характеристики таких объектов при внешнем возмущении могут значительно отличаться от динамических свойств при регулирующем воздействии. Поэтому переходные характеристики таких объектов снимаются как при регулирующем воздействии, так и при всех видах возмущающих воздействий. Кроме того, независимо от свойств объекта, переходные характеристики из-за возможности получения ошибочных данных при проведении эксперимента снимаются несколько раз.

Таким образом, основными параметрами, характеризующими переходной процесс, являются коэффициент передачи (усиления) объекта K_0 , постоянная времени объекта T_0 , время запаздывания τ , скорость φ .

3.6 Выводы по третьей главе

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана программа и методика проведения моторных и производственных исследований для оценки работоспособности трактора, оснащенного дизельной и газодизельной системами.
2. Для проведения исследований была проведена модернизация системы питания трактора МТЗ-82 для работы на газообразном топливе.
3. Определение мощностных и экономических показателей двигателя Д-240 по внешней регуляторной характеристике выполнялось в сравнении с работой со штатной и экспериментальной системами питания по методике проведения моторных испытаний, рекомендованной ГОСТ 18509 – 88. Испытания проведены в ФГУ «Сибирская МИС» Омской области с регистрацией данных в актах испытаний.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты стендовых испытаний топливного насоса УТН-5

Целью исследования топливного насоса являлось определение его соответствия нормативной документации и снятие характеристики топливоподающей системы по подаче топлива.

В таблице 4.1 и на рисунке 4.1 представлены результаты испытания насоса по подаче топлива.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний насоса по подаче топлива

$n, \text{мин}^{-1}$	Ход рейки топливного насоса h , мм				
	2	3	4	5	6
600	0,133	0,263	0,365	0,553	0,697
700	0,131	0,266	0,365	0,552	0,699
800	0,135	0,265	0,365	0,551	0,696
900	0,133	0,265	0,365	0,550	0,701
1000	0,133	0,264	0,364	0,548	0,701
1100	0,132	0,263	0,361	0,545	0,698
1200	0,130	0,264	0,360	0,547	0,699

Результаты снятия характеристики топливного насоса по подаче топлива в зависимости от положения рейки топливного насоса и частоты вращения представлены на рисунке 4.1.

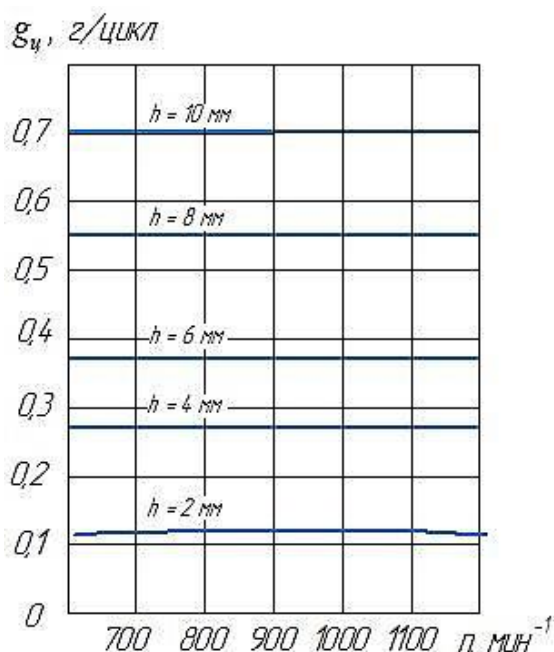


Рисунок 4.1 – Характеристика ТНВД УТН-5 по подаче топлива

Данные таблицы свидетельствуют о том, что ТНВД удовлетворяет требованиям нормативной документации и был использован для дальнейшей установки для испытаний в составе двигателя Д-240.

На скоростной характеристике выделены линейные участки, позволяющие определить коэффициенты усиления.

4.2 Исследование параметров переходных процессов

Решение системы уравнений (2.11) – (2.14) позволило:

- При работе дизеля на дизельном топливе:

Изменение частоты вращения n (мин^{-1}) при переходном процессе [84]:

$$\Delta n = e^{-1.605910^{-6}t} [(2400 - 0,867839 \cdot \kappa_n M_{kc}) + 0,0596 \cdot \kappa_n M_c \sin(1,681628 \cdot t)]. \quad (4.1)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 0,25\%$.

Изменение момента двигателя при переходном процессе:

$$\Delta M_e = 0,687839 \cdot e^{0,126t} \cdot \kappa_n M_c \cdot \cos(0,187839 \cdot t). \quad (4.2)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 1,98\%$.

Изменение мощности двигателя N_e (кВт) при переходном процессе:

$$\Delta N_e = 0,198828 \cdot e^{0,0065t} \cdot \kappa_n M_c \cdot \cos(0,103839 \cdot t). \quad (4.3)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 1,79\%$.

Изменение часового расхода воздуха G_T (кг/ч) при переходном процессе:

$$\Delta G_T = 3,8 + 0,048739 \cdot e^{0,0065t} \cdot \kappa_n M_c \cdot \cos(0,143839 \cdot t). \quad (4.4)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 3,02\%$.

В формулах (4.1) – (4.4):

t – время переходного процесса, с;

κ_n – коэффициент пропорциональности;

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

- При работе дизельного двигателя на газе:

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

$$\Delta n = e^{-1.605910^{-6} \cdot t} [(2400 - 0,867839 \cdot \kappa_n M_{\kappa c}) + 0,0596 \cdot \kappa_n M_c \sin(1,681628 \cdot t)]. \quad (4.5)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 0,25\%$.

Изменение момента двигателя при переходном процессе:

$$\Delta M_e = 0,687839 \cdot e^{0,126t} \cdot \kappa_n M_c \cdot \cos(0,187839 \cdot t). \quad (4.6)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 1,98\%$.

Изменение мощности двигателя N_e (кВт) при переходном процессе:

$$\Delta N_e = 0,198828 \cdot e^{0,0065t} \cdot \kappa_n M_c \cdot \cos(0,103839 \cdot t). \quad (4.7)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 1,79\%$.

Изменение часового расхода газа G_r ($\text{м}^3/\text{ч}$) при переходном процессе:

$$G_r = 0,49 + 0,048739 \cdot e^{0,0065t} \cdot \kappa_n M_c \cdot \cos(0,143839 \cdot t) (6,1485 - M_c^{0,2995}). \quad (4.8)$$

Рассчитанные и экспериментальные параметры переходного процесса при увеличении нагрузки представлены на рисунках 4.2 – 4.6.

На рисунке 4.2 в зависимости от времени переходного процесса и момента сопротивления на валу двигателя представлен график изменения частоты вращения двигателя при увеличении нагрузки.

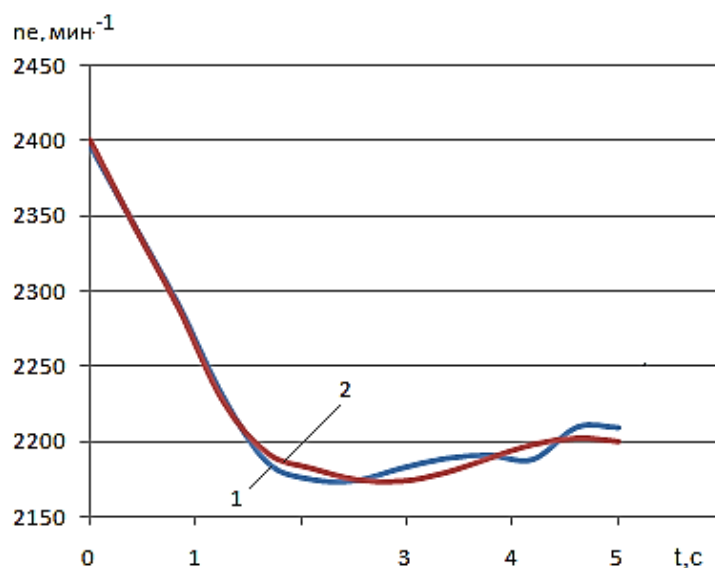


Рисунок 4.2 – График переходного процесса n_e дизельного двигателя в зависимости от времени процесса : 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные данные по модели (4.1)

На рисунке 4.3 в зависимости от времени переходного процесса и момента сопротивления на валу двигателя представлен график изменения момента вращения двигателя при увеличении нагрузки.

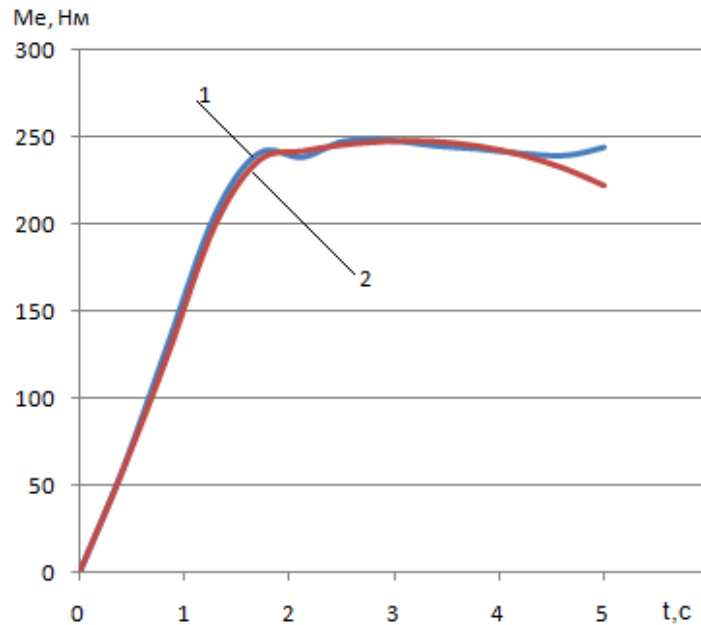


Рисунок 4.3 – График переходного процесса M_e дизельного двигателя в зависимости от времени процесса : 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные данные по модели (4.2)

На рисунке 4.4 в зависимости от времени переходного процесса и момента сопротивления на валу двигателя представлен график изменения мощности двигателя при увеличении нагрузки.

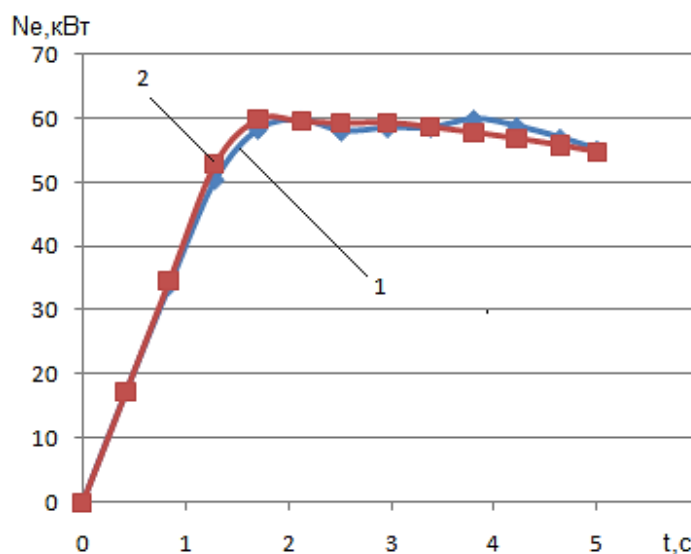


Рисунок 4.4 – График переходного процесса N_e дизельного двигателя в зависимости от времени процесса : 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные данные по модели (4.3)

На рисунке 4.5 в зависимости от времени переходного процесса и момента сопротивления на валу двигателя представлен график изменения расхода топлива двигателя при увеличении нагрузки.

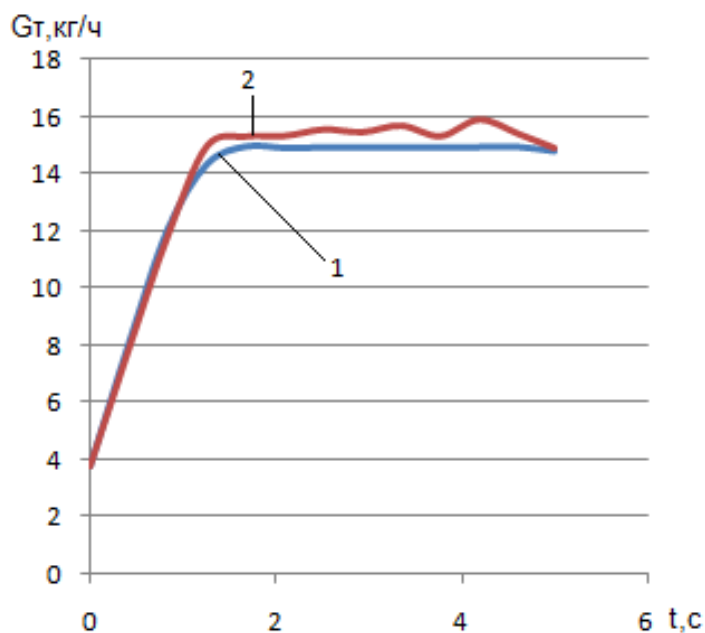


Рисунок – 4.5. График переходного процесса G_T дизельного двигателя в зависимости от времени процесса : 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные данные по модели (4.4)

Представленные на рисунках (4.2 – 4.5) графики показывают высокую сходимость эксплуатационных показателей, полученных в эксперименте и рассчитанных по математическим моделям (4.1) – (4.4).

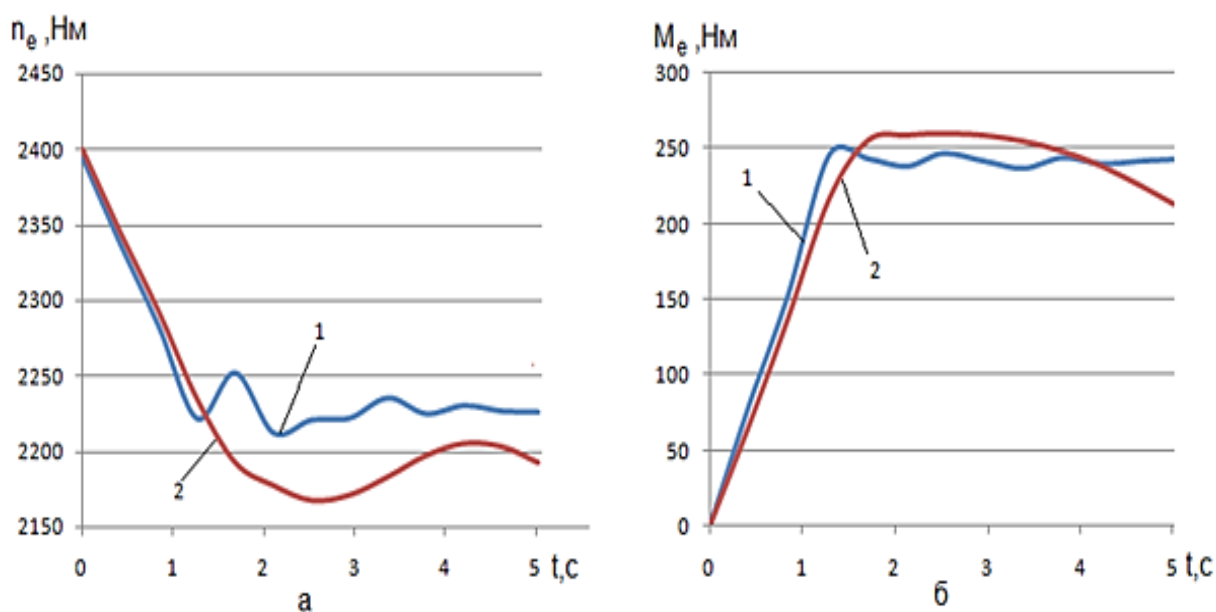


Рисунок 4.6 – Графики переходных процессов газодизельного двигателя в зависимости от времени процесса : а – n_e ; б – M_e ; в – N_e ; г – G_T : 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные по модели (4.5) – (4.8)

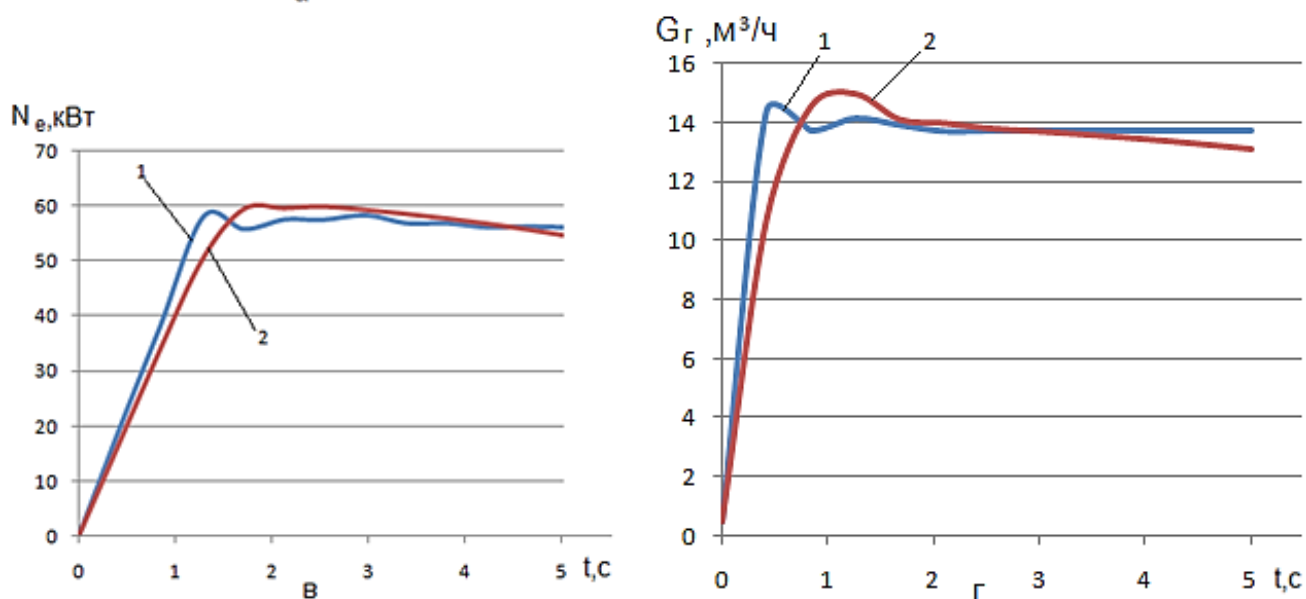


Рисунок 4.6 – окончание

По анализу графиков, построенных по ММ (4.1) – (4.6) 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 – $\varepsilon = 0,25\%$ и наибольшая погрешность у ММ часового расхода газа – $\varepsilon = 4,19\%$. Следовательно, отклонение параметров, рассчитанных по ММ, от экспериментальных не превышает $\varepsilon = 4,19\%$.

Математические модели переходных процессов при уменьшении нагрузки получены благодаря решению системы уравнений (2.11) – (2.14):

- При работе двигателя на дизельном топливе:

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

$$\Delta n = e^{-1.605910^{-6}t} [(2400 - 0,89 \cdot \kappa_n M_{\kappa c}) + 0,0596 \cdot \kappa_n M_c \sin(1,681628 \cdot t)]. \quad (4.9)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 0,28\%$.

Изменение момента двигателя при переходном процессе:

$$\Delta M_e = 0,798839 \cdot e^{-0,53459t} \cdot \kappa_n M_c \cdot \cos(0,287849 \cdot t). \quad (4.10)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 3,69\%$.

Изменение мощности двигателя N_e (кВт) при переходном процессе:

$$\Delta N_e = 0,198839 \cdot e^{0,0065t} \cdot \kappa_H M_c \cdot \cos(0,103839 \cdot t). \quad (4.11)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 3,1\%$.

Изменение часового расхода воздуха G_T (кг/ч) при переходном процессе:

$$\Delta G_T = 0,04874 \cdot e^{0,0065t} \cdot \kappa_H M_c \cdot \cos(0,003839 \cdot t). \quad (4.12)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 4,89\%$.

• При работе двигателя на газе:

$$\Delta n = e^{-1,606110^{-6}t} [(2400 - 0,84763 \cdot \kappa_H M_{kc}) + 0,0589 \cdot \kappa_H M_c \sin(1,681628 \cdot t)]. \quad (4.13)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 0,0,42\%$.

Изменение момента двигателя при переходном процессе:

$$\Delta M_e = 0,80204 \cdot e^{-0,12559t} \cdot \kappa_H M_c \cdot \cos(0,20785 \cdot t). \quad (4.14)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 4,31\%$.

Изменение мощности двигателя N_e (кВт) при переходном процессе:

$$\Delta N_e = 0,1821 \cdot e^{-0,0062t} \cdot \kappa_H M_c \cdot \cos(0,103839 \cdot t). \quad (4.15)$$

Погрешность модели $\varepsilon = 3,26\%$.

Изменение часового расхода воздуха G_T (м³/ч) при переходном процессе:

$$\Delta G_T = 0,04672 \cdot e^{0,000125t} \cdot \kappa_H M_c \cdot \cos(0,003839 \cdot t). \quad (4.16)$$

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных математической моделью (4.16): $\kappa_v = 2,86\%$.

С учётом переходных процессов, определяемых формулами (4.1) – (4.16), эффективные показатели двигателя можно представить формулой:

$$F_e = F_0 \pm \Delta F, \quad (4.17)$$

где F_e, F_0 – эффективное значение эксплуатационного параметра и значение

параметра при установившемся режиме соответственно;

ΔF – изменение значения параметра на переходном процессе.

На рисунке 4.7 представлены графики изменения эксплуатационных параметров двигателя на переходных процессах при уменьшении нагрузки при работе на дизельном топливе.

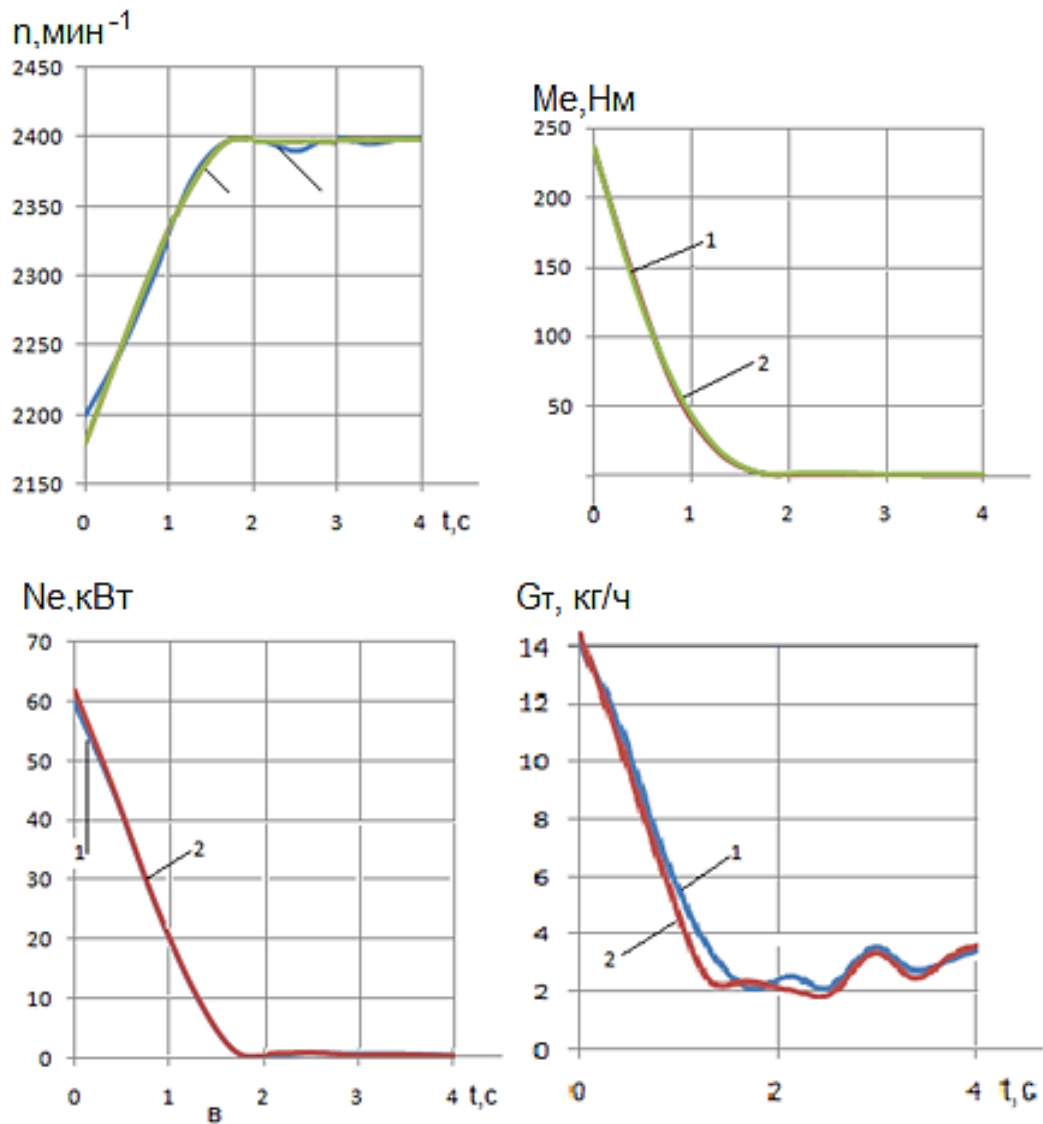


Рисунок 4.7 – Графики переходных процессов дизельного двигателя при уменьшении нагрузки в зависимости от времени процесса: а – n_e ; б – M_e ; в – N_e ; г – G_t : 1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные по модели (4.9) – (4.12)

На рисунке 4.8 показаны графики изменения эксплуатационных параметров газодизельного двигателя при уменьшении нагрузки.

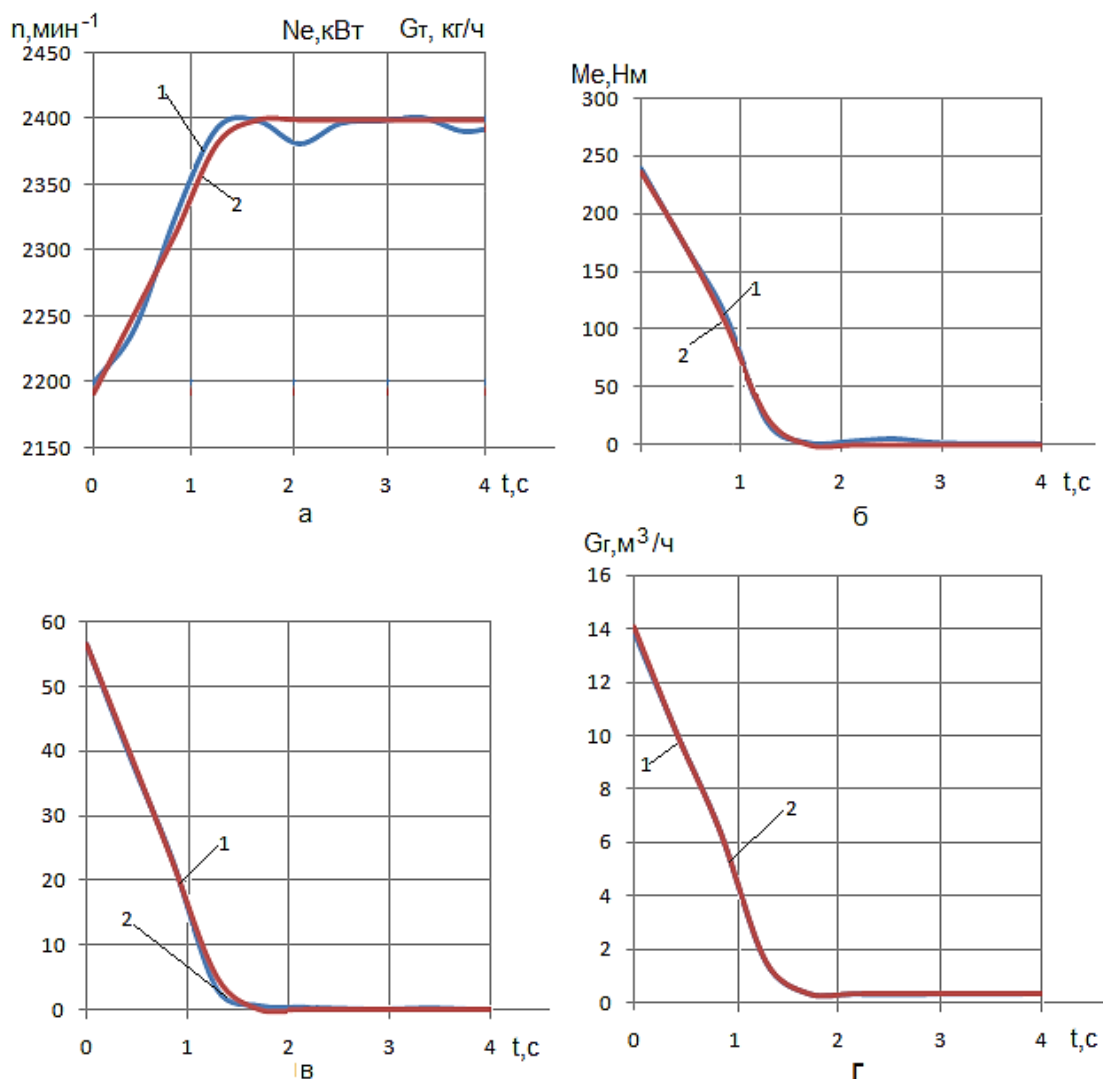


Рисунок 4.8 – Графики переходных процессов газодизельного двигателя при уменьшении нагрузки в зависимости от времени процесса: а – n_e ; б – M_e ; в – N_e ; г – G_v :
1 – экспериментальные данные; 2 – рассчитанные по модели (4.13) – (4.16)

На рисунке 4.9 для сравнения приведены внешние регуляторные характеристики дизельного двигателя Д-240 при осуществлении дизельного и газодизельного процессов [68].

Анализ характеристик показывает, что характеристика газодизельного процесса с предлагаемой системой питания выглядит как и у дизельного процесса. Параметры частоты вращения двигателя (n_e) при работе по газодизельному процессу при изменении крутящего момента ($M_{крэ}$), эффективной мощности (N_e), полученные в результате экспериментов, схожи с параметрами при работе по дизельному процессу, это можно видеть при анализе представленных графиков. При этом средняя погрешность между кривыми не превышает $\varepsilon = 2\%$.

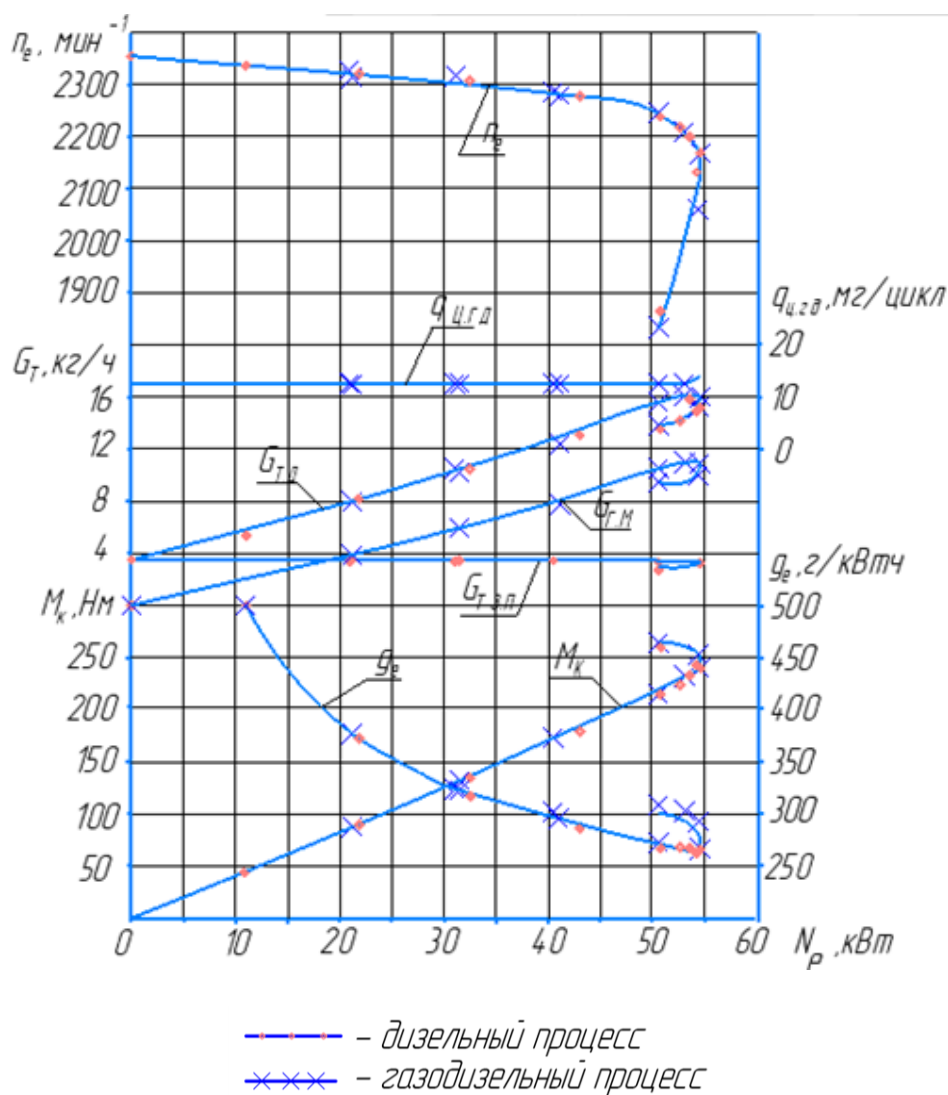


Рисунок 4.9 – Внешняя регуляторная характеристика дизеля Д-240 (4С 11/12,5) при работе по дизельному и газодизельному процессу

Из представленных на рисунке 4.9 графиков видно, что 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 мощность двигателя сохраняются, как и при работе по дизельному процессу 54,6 кВт. Значения крутящего момента M_k и частоты вращения коленчатого вала двигателя n_e практически не изменяются.

Установка рейки топливного насоса на подачу запальной дозы при переходе с дизельного топлива на газообразное происходит автоматически, при этом цикловая подача дизельного топлива $q_{цз.п.}$ равна 12,5 мг/цикл, а обороты

коленчатого вала двигателя соответствуют холостым оборотам.

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 [63]. Частота вращения коленчатого вала двигателя и цикловая подача дизельного топлива оказывают влияние на изменение часовой подачи запальной порции топлива:

$$G_{гзп} = \frac{24g_{цзп}n_e}{200000}, \quad (4.18)$$

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

n_e – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

Во время работы двигателя по газодизельному процессу на регуляторной ветви характеристики часовой расход газообразного топлива $G_{г.м.}$ увеличивается от нуля на холостом ходу до 11 кг/ч на номинальном режиме работы двигателя.

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 $G_{г.д.н.}$, равного 16 кг/ч.

Для оценки регулирования топливоподачи в экспериментальной системе питания газодизеля проводится расчёт относительного коэффициента эффективности изменения крутящего момента K_γ [73]:

$$K_\gamma = \frac{M_{крэ}}{M_{крсв}}. \quad (4.19)$$

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 приводят к подтверждению его соответствия

дополнительным критериям конструкции системы топливоподачи.

Момент сопротивления на коленчатом валу двигателя в зависимости от силы тяги $P_{кр}$, (Н) зависит от многих факторов и может выражаться общей формулой:

$$M_c = F(P_{кр}, P_f, R_k, i_{тр}, \eta_{тр}), \quad (4.20)$$

где $P_{кр}$ – сила тяги на крюке, Н;

P_f – сила сопротивления качению трактора, Н;

R_k – 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 4.2 приведены основные показатели эффективности новой газодизельной системы экспериментального трактора по сравнению с обычной дизельной.

Таблица 4.2 - 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 4.2 показатели свидетельствуют: у двигателя с новой конструкцией системы питания газодизеля происходит повышение эффективности работы.

Средний коэффициент замещения дизельного топлива на компримированный природный газ ($K_{зт}$) в соответствии с данными исследований устанавливался в пределах от 0,30 до 0,80. В результате этого обеспечивается значительное сокращение затрат на ресурсы.

4.3 Определение показателей надёжности системы питания газодизельных тракторов

Компоненты переоборудованного на газодизельное питание трактора МТЗ-82, оснащенного двигателем Д-240, который дополнительно оборудован газовой системой питания представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Компоненты газодизельной системы питания

Наименование	Количество	λ
1. Баллоны для хранения компримированного газа	4	λ_1
2. Расходные вентили	5	λ_2
3. Манометр давления газа в баллонах	1	λ_3
4. Выносное заправочное устройство	1	λ_4
5. Электромагнитный клапан	3	λ_5
6. Редуктор высокого давления для снижения давления газа на первой ступени регулирования	1	λ_6
7. Редуктор низкого давления для снижения давления газа на второй ступени регулирования	1	λ_7
8. Смеситель впускной коллектора двигателя	1	λ_8
9. Датчик давления газа	1	λ_9
10. Датчик температуры охлаждающей жидкости	1	λ_{10}

Для совершенствования системы ТО таких тракторов необходимо, прежде всего, определить показатели надёжности [72, 127, 176].

Изображение графа (рисунок 4.10) может представить переход системы питания газодизеля из работоспособного в неисправное состояние.

$$\begin{aligned}
 H_0 &\xrightarrow{\lambda_1^{(4)}} H_1 \xrightarrow{\lambda_2^{(5)}} H_2 \xrightarrow{\lambda_3} H_3 \xrightarrow{\lambda_4} H_4 \xrightarrow{\lambda_5^{(3)}} \\
 &\rightarrow H_5 \xrightarrow{\lambda_6} H_6 \xrightarrow{\lambda_7} H_7 \xrightarrow{\lambda_8} H_8 \xrightarrow{\lambda_9} H_9 \xrightarrow{\lambda_{10}} H_{10}
 \end{aligned}$$

Рисунок 4.10 – Граф перехода системы питания газодизеля из работоспособного в неисправное состояние: H_i – состояние системы; X_i – интенсивность отказов i -го компонента системы за время t_0 , $\lambda_i^{(j)}$ интенсивность отказов j -го компонента при условии, что i -й уже отказал

Интенсивность потока событий λ является ключевым аспектом при оценке созданного графа [72]:

$$\lambda = \frac{1}{t}, \quad (4.21)$$

где t – средняя наработка на отказ.

Отказ какого-либо компонента системы питания газодизеля повлечет за собой отказ всей системы из-за последовательного включения компонентов. В течение произвольного интервала времени t_0 можно определить вероятность безотказной работы из выражения:

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^m p_i(t_0), \quad (4.22)$$

где $P_i(t_0)$ – вероятность безотказной работы i -го компонента системы за время t_0 ;

m – количество компонентов в системе:

$$p_i(t_0) = e^{-\lambda_i \cdot t_0}, \quad (4.23)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го компонента системы за время t_0 .

Систему поочередно расположенных невосстанавливаемых компонентов на основании выражений (4.22) и (4.23) можно представить в виде:

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^m e^{-\lambda_i \cdot t_0} = e^{-t_0 \sum_{i=1}^m \lambda_i}. \quad (4.24)$$

Оценку работы отдельных элементов системы питания газодизеля выполняли по наблюдению в течение трех лет в ООО «Инициатива» Полтавского района Омской области за тремя тракторами (акт представлен в приложении 2 работы).

Каждый трактор проработал от 1000 до 1200 мото-часов за сезон, выполняя операции боронования, культивации и посева.

Во время наблюдений выявлено: нестабильность в работе двигателя проявлялась примерно при наработке 850 мото-часов, требовалась регулировка ступеней газовых редукторов для каждого трактора. Кроме описанных выше неисправностей и перебоев в работе систем питания двигателей газом, отказы не

выявлены. Иногда возникали мелкие проблемы с отдельными элементами системы питания газодизеля, которые были легко устранены, их влияние на работоспособность было незначительным.

Важно учитывать, во время проведения работ продолжительность рабочей смены составляет 10 часов, поэтому на протяжении всей смены необходимо устанавливать вероятность безотказной работы системы питания. В целом эту вероятность вычисляют по формуле (4.24) после определения вероятности безотказной работы каждого компонента, независимо от остальных, согласно формуле (4.22) (таблица 4.4)

Таблица 4.4 – Показатели вероятности безотказной работы и интенсивности отказов компонентов системы питания газодизеля

Наименование	λ	$p(t)$
1. Баллоны для хранения сжатого газа	0,00029	0,9971
2. Расходные вентили	0,00029	0,9971
3. Манометр давления газа в баллонах	0,00051	0,9949
4. Выносное заправочное устройство	0,00031	0,9969
5. Электромагнитный клапан	0,00055	0,9945
6. Редуктор высокого давления для снижения давления газа на первой ступени регулирования	0,00054	0,9946
7. Редуктор низкого давления для снижения давления газа на второй ступени регулирования	0,00059	0,9941
8. Смеситель впускного коллектора двигателя	0,00045	0,9955
9. Датчик давления газа	0,00026	0,9974
10. Датчик температуры охлаждающей жидкости	0,00044	0,9956

Анализируя данные таблицы 4.4, можно выявить наибольшую вероятность безотказной работы и меньшую интенсивность отказов элементов системы питания газодизельного трактора.

Газодизельная система питания обеспечивает высокую вероятность безотказной работы, которая составляет $p(t) = 0,958$. На основании этого можно сделать заключение, что применение газобаллонного оборудования достаточно надёжно, что также подтверждается испытаниями в производственных условиях.

4.4 Техническое обслуживание трактора при работе с газодизельной системой питания

Для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации тракторов, работающих на компримированном природном газе (КПГ) их техническое обслуживание (ТО) необходимо проводить в сроки, установленные для аналогичных марок тракторов, работающих на дизельном топливе на организованных постах производственных корпусов, за исключением узлов системы питания газообразным топливом.

Тракторы, работающие по газодизельному процессу, запускаются на пункт технического обслуживания, ремонта и проверки технического состояния только после перевода их двигателей на работу на нефтяное топливо. Для мелких предприятий при ежедневном ТО необходимо проводить дополнительные работы по проверке герметичности газоподающей аппаратуры. ТО-1, ТО-2, ТО-3 и ТР необходимо проводить на специализированных предприятиях или станциях ТО.

В крупных предприятиях АПК необходимо организовать следующие посты:

- проверки герметичности;
- выпуска газа и дегазации баллонов;
- участок ТО и ТР газоподающей аппаратуры.

А также обустроить помещения для хранения баллонов для КПГ и площадку для выполнения заправки автотракторной техники.

Для проверки герметичности газобаллонного оборудования используется метод обмыливания соединений мыльной пеной или течеискатель. Важно, чтобы давление в баллонах не опускалось ниже 2,0 МПа. Этот процесс включает проверку всех газовых трубопроводов, резьбы горловины баллонов и другие арматурные узлы.

Проверка герметичности газобаллонного оборудования – неотъемлемая часть планового технического обслуживания трактора. Далее трактор направляют на пост мойки, а после в зону ТО для необходимых процедур (ТО-1, ТО-2 или ТО-3). После выполнения регламентных работ на общих постах и линиях трактор поступает на участок диагностики и ремонта газобаллонного оборудования.

Проведение контрольно-регулирующих работ по газовой системе питания осуществляется во время работы двигателя на газе из одного баллона, где рабочее давление газа не превышает 5,0 МПа. При этом необходимо закрыть вентили всех остальных баллонов. Все помещения для ТО тракторов должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.007 – 76 [32] и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009 – 83 [35].

С целью соблюдения техники безопасности при проведении технического обслуживания трактора следует вначале произвести проверку герметичности арматуры газовых баллонов и газопроводов высокого и низкого давления. В случае обнаружения утечек их следует немедленно устранить, перекрыть подачу газа и перевести двигатель на питание дизельным топливом. ТО газобаллонной аппаратуры трактора необходимо выполнять в безопасных местах, где имеется специальное оборудование.

Работая с газодизельными тракторами на территории предприятия, следует тщательно планировать места для их обслуживания и хранения. Важно учитывать, что при организации участка ТО газобаллонных тракторов возможно образование опасных газов, которые необходимо правильно направлять и использовать.

Это подразумевает наличие специальных систем вентиляции и обеспечения безопасности. Кроме того, при проектировании таких участков стоит рассмотреть возможность установки резервных емкостей для газов или систем сбора и переработки выбросов. Только комплексный подход к организации и обслуживанию газобаллонных тракторов позволит обеспечить безопасные условия работы и снизить риск возможных аварийных ситуаций.

Содержание дополнительных работ, технические требования, а также приборы, инструмент и принадлежности, необходимые при проведении ежесменного, номерных (ТО-1, ТО-2, ТО-3) и сезонного технических обслуживаний, представлены в приложении 7 работы.

Важно помнить про безопасность при работе с системой подачи газа. Высокое давление в этой системе требует особого внимания и осторожности.

Запрещается производить ремонтные работы элементов системы подачи газообразного топлива, находящихся под высоким давлением.

4.5 Выводы по главе

На основании анализа проведенных сравнительных испытаний дизельных и газодизельных тракторов можно сделать заключение об эффективности использования компримированного природного газа в дизельных двигателях как альтернативного вида топлива. Данные выводы подтверждаются следующими положениями:

- для системы подачи газообразного топлива характерны удобство монтажа, гибкость регулировок и простота;
- ресурс двигателя увеличивается до 1,25 – 2 раз за счет уменьшения содержания в продуктах сгорания сульфатов серы (в 5 – 7 раз) и твердых частиц (в 2– 3 раза), а также уменьшения или полного отсутствия разжижения моторного масла топливом, попадающим на стенки камеры сгорания;
- ресурс моторного масла увеличивается в 2 раза, а его расход на угар уменьшается на 30 – 40 %;
- эксплуатационные затраты снижаются на 40 – 50%;
- на 10 – 20% снижается содержание эмиссии оксидов азота в отработавших газах;
- сохранение энергетических показателей в газодизельном режиме на уровне базового дизельного двигателя
- работа, как в газодизельном режиме, так и в штатном дизельном режиме, с мгновенным переходом с одного режима на другой.

Производительность машинно-тракторного агрегата с газодизельным трактором на одинаковом уровне с производительностью МТА с дизельным трактором. При повышении загрузки двигателя происходит существенное увеличение коэффициента замещения дизельного топлива, приводит к снижению затрат на топливо. Например, замещение дизельного топлива газом достигает 80% при работе двигателя на номинальном режиме с 100%-ной загрузкой.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Методика расчета экономической эффективности

Экономическую эффективность определяли по методикам [42, 45] путём сравнения двух вариантов: до и после внедрения [103, 104].

Согласно данной методике расчет суммарных затрат на единицу выработки $Z_{сз}$ можно определить из выражения:

$$Z_{сз} = Z + Z_{кп} + Z_{ут} + Z_{э}, \quad (5.1)$$

где Z – прямые эксплуатационные затраты, руб./га;

$Z_{кп}$ – затраты, отражающие изменение количества и качества продукции, руб./га;

$Z_{ут}$ – затраты, отражающие обеспечение заданного уровня труда, руб./га;

$Z_{э}$ – затраты, отражающие отрицательное воздействие на окружающую среду, руб./га.

Рассчитываем прямые эксплуатационные затраты по формуле:

$$Z = Z_{зп} + Z_{гсм} + Z_{тр} + Z_a + Z_{п}, \quad (5.2)$$

где $Z_{зп}$ – заработная плата рабочих, руб./га;

$Z_{гсм}$ – затраты на топливо и горюче смазочные материалы, руб./га;

$Z_{тр}$ – затраты на проведение технического обслуживания и ремонт, руб./га;

Z_a – амортизационные отчисления, руб./га;

$Z_{п}$ – прочие затраты, руб./га.

Заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{зп} = \frac{N \cdot \tau \cdot K_n}{W_{см}}, \quad (5.3)$$

где N – число лиц обслуживающего персонала, чел;

τ – заработная плата, руб./чел.-ч;

K_n – коэффициент начислений на зарплату;

$W_{см}$ – сменная производительность, га/см.

Производительность $W_{см}$, га/см определяется по формуле:

$$W_{см} = W_0 \cdot K_{см}, \quad (5.4)$$

где W_0 – производительность за 1 ч основного времени, га/ч;

$$K_{см} = \frac{T_0}{T_{см.н}} - \text{коэффициент использования времени смены [40];}$$

T_0 – основное время смены, ч;

$T_{см.н} = 8,3$ ч - продолжительность смены, ч.

Вычисляем T_0 по формуле [129]:

$$T_0 = T_{см.н} - T_{пз} - T_{ето} - T_{лн} - T_{па}, \quad (5.5)$$

где $T_{пз}$ – подготовительно-заключительное время, ч;

$T_{ето}$ – время ежесменного ТО, ч;

$T_{лн}$ – время на отдых и личные надобности, ч;

$T_{па}$ – время на подготовку агрегата, ч.

Входящие в формулу (5.5) значения выбираем по справочной литературе [129, 136].

Рассчитывается производительность за 1 ч основного времени по формуле:

$$W_0 = \frac{W_{0см}}{T_0}, \quad (5.6)$$

где $W_{0см}$ – сменная норма выработки, га/см., определяется по [129].

Затраты труда при выполнении производственного процесса:

$$Z_T = \frac{N}{W_{см}}. \quad (5.7)$$

Результаты расчёта затрат труда и заработной платы приведены в таблице 5.3

Величину удельных затрат при работе на товарном ДТ определяли по формуле:

$$Z_I = \sum_{i=1}^z (C_T \cdot G_T) \cdot K_{смм}, \quad (5.8)$$

где $K_{смм}$ – коэффициент учёта стоимости смазочных материалов;

G_T, G_G – расход дизельного топлива и газа, кг/га, м³/га;

C_T, C_G – цена топлива, руб./кг, руб./м³;

z – количество видов топлива.

Расчёт выполнен в сравнении работы МТА с базовым трактором МТЗ-82 и МТА с газодизельным трактором при выполнении сплошной культивации в агрегате с культиватором КПС-4Н. В качестве единицы наработки принимали 1 га. Для проведения расчётов были взяты данные по стоимости сельскохозяйственной техники, отпускной цене на топливо для сельхозтоваропроизводителей и стоимости услуг по переводу техники на газообразное топливо в условиях Омской области по состоянию на 2024 год.

Таблица 5.1 – Данные для расчёта экономической оценки результатов исследований

№п/п	Показатель	Модель	
		базовая	газодизельная
1	Балансовая стоимость трактора Б, тыс. руб.	300	412
2	Годовая наработка $T_{зг}$, у.эт.га	1205	1205
3	Фактическая наработка T_z , у.эт.га	1012	1012
4	Производительность W_0 , га/ч	3,92	3,92
5	Продолжительность смены $T_{см.}$, ч	8,3	8,3
6	Часовой расход дизельного топлива G_T , кг/га	3,44	0,66
7	Часовой расход КПП G_G , м ³ /га		3,37
8	Стоимость дизельного топлива C_T , руб./кг	54,4	54,4
9	Стоимость КПП C_G , руб./м ³		23,4
10	Ресурс, заявленный заводом изготовителем, лтр, мото-ч	7000	7000
11	Фактический ресурс $\lambda_{фр}$, мото-ч	5600	5600
12	Количество обслуживающего персонала	1	1

Затраты на переоборудование трактора для работы на газообразном топливе представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Затраты на переоборудование трактора МТЗ-82 для работы на газообразном топливе

Параметры	Значения
Затраты на переоборудование всего, руб., в том числе:	112000
– комплект баллонов	52000
– комплект дополнительного оборудования	35000
выполнение монтажно-регулирующих работ	25000

Таблица 5.3 – Результаты расчёта затрат труда и заработной платы

№ п/п	Рассчитываемый показатель	Модель	
		базовая	базовая
1	Заработная плата рабочих Ззп, руб./га	31,19	32,15
2	Основное время смены Т ₀ , ч	6,01	5,83
3	Подготовительно-заключительное время Тпз, ч	1,1	1,1
4	Время ежесменного ТО Т _{ЕТО} , ч	0,74	0,92
5	Время на отдых и личные надобности Тлн, ч	0,25	0,25
6	Время на подготовку агрегата Тпа, ч	0,2	0,2
7	Число лиц обслуживающего персонала N, чел.	1	1
8	Сменная производительность Wсм, га/ч	2,84	2,75
9	Заработная плата т, руб./чел.-ч	68	68
10	Коэффициент начислений на зарплату Кн	1,302	1,302
11	Затраты труда Зт, чел.-ч/ га	0,352	0,364

Численные значения G_T , G_G , входящих в формулу (5.8), получены по измерениям в СПК «Сибиряк» Москаленского района и ООО «Инициатива» Полтавского района Омской области. При работе на чистом ДТ $G_T = 3,44$ кг/га, при работе на газодизеле $G_T = 0,66$ кг/га и $G_G = 3,37$ м³/га. C_T , C_G Стоимость дизельного топлива и газа принимали равными оптовой цене в Омской области: $C_T = 54,4$ руб./кг, $C_G = 23,3$ руб./м³. По данным бухгалтерии хозяйства $K_{СММ} = 1,2$.

После подстановки численных значений величин, входящих в (5.8), получим затраты на ТСМ:

– при работе на ДТ:

$$З_{ТСМ} = 3,44 \cdot 54,4 \cdot 1,2 = 224,56 \text{ руб./га.}$$

– при работе на ДТ и КПГ:

$$З_{ТСМ} = 0,66 \cdot 54,4 \cdot 1,2 + 3,37 \cdot 23,4 \cdot 1,2 = 137,71 \text{ руб./га.}$$

Затраты денежных средств на техническое обслуживание и ремонт определяли по формуле [42]:

$$З_{ТР} = \frac{B \cdot r_{ТР}}{W_{ЭК} \cdot T_{Э}}, \quad (5.9)$$

где B – балансная стоимость машины, руб.;

$r_{ТР}$ – коэффициент отчислений на ТО и ремонт. Для трактора МТЗ-82 $r_{ТР} = 0,09$ [129];

$W_{ЭК}$ – часовая производительность МТА, га/ч;

$T_{\text{э}}$ – фактическая годовая загрузка трактора, ч.

Производительность W_q (га/ч) определяли по формуле [40]:

$$W_q = W_0 \cdot K_{\text{ЭК}}, \quad (5.10)$$

где $K_{\text{ЭК}}$ – коэффициент использования эксплуатационного времени.

По [129] $K_{\text{ЭК}}$ вычисляется по формуле:

$$K_{\text{ЭК}} = \frac{T_0}{T_{\text{ЭКН}}}, \quad (5.11)$$

где $T_{\text{ЭКН}}$ – эксплуатационное время при нормативной продолжительности смены, ч.

Эксплуатационное время $T_{\text{ЭКН}}$ устанавливают по формуле [40]:

$$T_{\text{ЭКН}} = T_{\text{СМН}} + T_{\text{ТОн}}, \quad (5.12)$$

где $T_{\text{ТОн}}$ – время на проведение соответствующего ТО при нормативном времени смены, ч:

$$T_{\text{ТОн}} = T_{\text{СМН}} \left[T'_{\text{ТОн}} \cdot \left(\frac{1}{\Pi_1} - \frac{1}{\Pi_2} \right) + T''_{\text{ТОн}} \cdot \left(\frac{1}{\Pi_2} - \frac{1}{\Pi_3} \right) + \frac{T'''_{\text{ТОн}}}{\Pi_3} \right], \quad (5.13)$$

где $T'_{\text{ТОн}}, T''_{\text{ТОн}}, T'''_{\text{ТОн}}$ – периодичность проведения номерных ТО соответственно, ч;

Π_1, Π_2, Π_3 – время проведения соответствующего ТО, ч.

Для первого ТО привлекается 1 мастер-наладчик, а для второго и третьего ТО - 2. Согласно [129] $T'_{\text{ТОн}} = 2,38 \text{ ч}$, $T''_{\text{ТОн}} = 2,84 \text{ ч}$, $T'''_{\text{ТОн}} = 8 \text{ ч}$ при работе на чистом ДТ; $T'_{\text{ТОн}} = 2,45 \text{ ч}$, $T''_{\text{ТОн}} = 2,98 \text{ ч}$, $T'''_{\text{ТОн}} = 8,4 \text{ ч}$ при работе на ДТ + КПП. На ДТ и на ДТ + КПП $\Pi_1 = 125 \text{ ч}$, $\Pi_2 = 500 \text{ ч}$, $\Pi_3 = 1000 \text{ ч}$. T_3 в таблице 5.1. $T_3 = 1012 \text{ у.эт.га}$. $T_{\text{СМН}} = 8,3 \text{ ч}$. Расчёт $T_{\text{ЭКН}}$ по формулам (5.12) и (5.13) даёт следующие результаты:

– при работе на чистом ДТ: $T_{\text{ЭКН}} = 8,508496 \text{ ч}$;

– при работе на ДТ и КПП: $T_{\text{ЭКН}} = 8,516464 \text{ ч}$.

Коэффициент использования эксплуатационного времени:

– при работе на чистом ДТ: $K_{\text{ЭК}} = 0,706353$;

– при работе на ДТ и КППГ: $K_{ЭК} = 0,705692$.

Производительность $W_{ЭК}$:

– при работе на чистом ДТ: $W_{ЭК} = 3,92 \cdot 0,706353 = 2,766313$ га/ч;

– при работе на ДТ и КППГ: $W_{ЭК} = 3,92 \cdot 0,705692 = 2,76894$ га/ч.

После подстановки в формулу (5.9) численных значений входящих в неё величин получим затраты средств на ТО и Р:

– при работе на чистом ДТ:

$$З_{ТР} = \frac{300 \cdot 0,099}{2,766313 \cdot 1012} = 10,69 \frac{\text{руб}}{\text{га}};$$

– при работе на ДТ + КППГ:

$$З_{ТР} = \frac{412 \cdot 0,099}{2,768904 \cdot 1012} = 14,556 \frac{\text{руб}}{\text{га}}.$$

Затраты средств на амортизацию техники и хозяйственных объектов:

$$З_{ТР} = \frac{B \cdot a}{W_{ЭК} \cdot T_{Э}}, \quad (5.14)$$

где a – коэффициент отчислений на амортизацию, $a = 0,91$ [129].

После подстановки в формулу (5.14) численных значений, входящих в неё величин, получим:

– при работе на чистом ДТ:

$$З_{ТР} = \frac{300 \cdot 0,091}{2,766313 \cdot 1012} = 9,752 \frac{\text{руб}}{\text{га}};$$

– при работе на ДТ + КППГ:

$$З_{ТР} = \frac{412 \cdot 0,091}{2,768904 \cdot 1012} = 13,38 \frac{\text{руб}}{\text{га}}.$$

Прямые эксплуатационные затраты:

– при работе на чистом ДТ:

$$З = 31,9 + 224,56 + 10,609 + 9,752 = 276,111 \text{руб. /га};$$

– при работе ДТ+ КППГ:

$$З = 32,15 + 137,71 + 14,556 + 13,380 = 197,796 \text{руб./га}.$$

Затраты средств, отражающие отрицательное влияние на окружающую среду, определяли по формуле [42]:

$$З_{\varepsilon} = \frac{G_T \cdot H_{OK}}{1000}, \quad (5.15)$$

где H_{OK} – норма денежных отчислений на охрану окружающей среды, руб./1000 кг. При работе на дизельном топливе $H_{OK} = 2,5$ руб./1000 кг. При работе на газе $H_{OK} = 0,7$ руб./1000 кг.

Следовательно, подставляя значения величин, входящих в формулу (5.15), получим:

– при работе на чистом ДТ:

$$З_{\varepsilon} = 3,44 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,0086 \text{ руб./га};$$

– при работе ДТ+ КПП:

$$З_{\varepsilon} = 0,66 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} + 3,37 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,004 \text{ руб./га.}$$

Суммарные затраты:

– при работе на чистом ДТ: $З_{CЗ} = 276,111 + 0,0086 = 276,12 \text{ руб./га};$

– при работе ДТ+ КПП: $З_{CЗ} = 197,796 + 0,004 = 197,8 \text{ руб./га.}$

$$З_{CЗ} = З + З_{КП} + З_{УТ} + З_{\varepsilon}.$$

где $З_{КП}$ – затраты средств, отражающие изменение количества и качества продукции, руб./га, не определялись;

$З_{УТ}$ – затраты, связанные с обеспечением заданного уровня труда, руб./га, не определялись.

Вычисляли удельную остаточную стоимость техники по формуле:

$$Ц_{ост} = \frac{B(\lambda_{TP} - \lambda_{BP})}{\lambda_{TP} \cdot T_3 \cdot W_{ЭК}}, \quad (5.16)$$

где $\lambda_{TP} = 7000$ ч – по данным предприятия-изготовителя технический ресурс техники;

$\lambda_{BP} = 5400\text{ч}$ – фактический ресурс техники по данным эксплуатирующего предприятия.

После подстановки в формулу численных значений величин получим:

– при работе на чистом ДТ:

$$C_{ост} = \frac{300000 (7000 - 5400)}{7000 \cdot 1012 \cdot 2,766313} = 24,494 \text{ руб./га};$$

– при работе ДТ+ КПГ:

$$C_{ост} = \frac{412000 (7000 - 5400)}{7000 \cdot 1012 \cdot 2,766313} = 33,607 \text{ руб./га.}$$

Экономия денежных средств [42]:

$$\mathcal{E}_3 = (\mathcal{E}_{сзб} - C_{остб}) - (3_{сзп} - C_{остп}), \quad (5.17)$$

где $3_{сзб} - C_{остб}$, $3_{сзп} - C_{остп}$ – разность совокупных затрат и остаточной стоимости для базового и переоборудованного вариантов:

$$\mathcal{E}_3 = (276,12 - 24,494) - (197,8 - 33,607) = 87,433 \text{ руб. га.}$$

Срок окупаемости определяли по формуле:

$$T_{ок} = \frac{B_H - B_B}{\mathcal{E}_{гз}}, \quad (5.18)$$

где B_H и B_B – цена переоборудованного и базового трактора соответственно, руб.

Трактор в течение года эксплуатируют на разных работах, поэтому необходимо рассчитать совокупную сумму затрат по всем работам:

$$\mathcal{E}_{гз} = \mathcal{E}_{3y} \cdot T_{3r}, \quad (5.19)$$

где $\mathcal{E}_{3y}$ – экономия на условный гектар:

$$\mathcal{E}_{3y} = \frac{\mathcal{E}_3 \cdot W_{cv}}{K_v}, \quad (5.20)$$

где K_v – коэффициент перевода физических га в условные.

$$\mathcal{E}_{3y} = \frac{87,433 \cdot 2,84}{0,73} = 340,15 \text{ руб./га}$$

По (5.19) $\mathcal{E}_{ГЗ} = 340,15 \cdot 1205 = 409880$ руб./год.

После подстановки соответствующих величин в формулу (5.18) получим:

$$T_{OK} = \frac{412000 - 300000}{409880} = 0,27 \text{ года.}$$

Результаты расчёта сведены в таблицу 5.4

Таблица 5.4 - Показатели эффективности

№ п/п	Показатель	Базовый	Новый
1	Совокупные затраты денежных средств, руб./га	276,12	197,8
2	Затраты труда, чел.-ч/га	0,352	0,364
3	Затраты на заработную плату, руб./га	31,19	32,15
4	Затраты на ТСМ, руб./га	224,56	137,71
5	Затраты на ТО и Р, руб./га	10,609	14,556
6	Годовой экономический эффект, руб.	409880	
7	Срок окупаемости, год	0,27	

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 и 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 установлено: 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 409880 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агафонов, С. А. Дифференциальные уравнения. / С. А. Агафонов, А. Д. Герман, Т. В. Муратова. – Москва : МГТУ, 2011. – 349с. – ISBN 978-5-7038-2484-2. – Текст : непосредственный.
2. Акатов, Е. И. Работа автомобильного двигателя на неустановившихся режимах / Е. И. Акатов, П. М. Белов, Н. Х. Дьяченко, В.С. Мусатов. – Москва ; Ленинград : Машгиз, 1960. – 251с. – Текст : непосредственный.
3. Акопова, Г. С. Перспективы замены дизельного топлива природным газом на транспорте / Г. С. Акопова, Н. Л. Власенко, Р. В. Тетеревлев. – Текст : непосредственный // Вести газовой науки. – 2013. – № 2 (13). – С. 56–62.
4. Аллилуев, В. А. Техническая эксплуатация машинно-тракторного парка / В. А. Аллилуев, А. Д. Ананьин, В. М. Михлин. – Москва : Агропромиздат, 1991. – 367с. – ISBN 5-10-001525-X. – Текст : непосредственный.
5. Аникеев, В. В. Автомобильные эксплуатационные материалы : учебное пособие / В. В. Аникеев, М. В. Шестакова, А. С. Кревер. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. – 188 с. – ISBN 978-5-9961-0845-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/64523> (дата обращения: 14.12.2023).
6. Аникин, Г. В. К вопросу о режимах нагружения двигателей гусеничных тракторов, агрегирующихся с землеройными машинами. / Г. В. Аникин, Г. К. Михайлов, А. Н. Енюхин. – Текст : непосредственный // Труды ЧИМЭСХ. Выпуск 44. – Челябинск, 1970. – С. 17.
7. Антипин, В. П. Исследование работы двигателя на неустановившихся нагрузках / В. П. Антипин. – Текст : непосредственный // Материалы международного научно-технического семинара, посвящённого столетию со дня рождения вице-президента ВАСХНИЛ В. Н. Болтинского 22 - 25 сентября 2003 года. Академия наук РТ. – Казань, 2004. – С. 15–23.
8. Антипин, В. П. Исследование работы двигателя трелёвочного трактора на неустановившихся режимах : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. Н. Антипин. – Ленинград, 1970. – 118с. – Текст :

непосредственный.

9. Антипин, В. П. Характер влияния расхода топлива на изнашиваемость двигателя при работе в неустановившемся режиме. / В. П. Антипин. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1987. – № 3. – С. 46–50.

10. Архангельский, В. М. Работа автотракторных двигателей на неустановившихся режимах / В. М. Архангельский, Г. Н. Злотин – Москва : Машиностроение, 1979. – 215 с. – Текст : непосредственный.

11. Архангельский, В. М. Работа карбюраторных двигателей на неустановившихся режимах / В. М. Архангельский, Г. Н. Злотин. – Москва : Машиностроение, 1979. – 118 с. – Текст : непосредственный.

12. Астахов, И. В. Топливные системы и экономичность дизелей / И. В. Астахов, Л. Н. Голубков. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с. – ISBN 5-217-00478-9. – Текст : непосредственный.

13. Багиров, Д. Д. Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин. / Д. Д. Багиров, А. В. Златопольский. – Москва : Машиностроение, 1974. – 137с. – Текст : непосредственный.

14. Бебенин, Е. В. Совершенствование топливной системы тракторных дизелей для работы по газодизельному циклу (на примере трактора РТМ-160) : специальность 05.20.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бебенин Евгений Викторович. – Саратов, 2009. – 23 с. – Текст : непосредственный.

15. Березин, Л. В. Сопротивление почв лесостепной зоны Омской области при отвальной пахоте : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Л. В. Березин. – Омск, 1966. – 22с. – Текст : непосредственный.

16. Болтинский, В. Н. Работа тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке / В. Н. Болтинский. – Москва : ОГИЗ-Сельхозгиз 1949. – 216 с. – Текст : непосредственный.

17. Брук, М. А. Работа дизеля в нестационарных условиях / М. А. Брук, А. С. Вискман, Г. Х. Левин. – Ленинград : Машиностроение, 1981. – 208с. – Текст :

непосредственный.

18. Булычева З. Ю. Дизель и газодизель, соревнование равных / З. Ю. Булычева, А. Н. Семенихин, М. Г. Соколов. – Текст : непосредственный // Автомобильная промышленность. – 1992. – № 2. – С. 13–14.

19. Васильев, Ю.Н. Газовые и газодизельные двигатели / Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский, С. И. Ксенофонов ; Государственный газовый концерн «Газпром». – Москва : ВНИИ экономики, организации производства и технико-экономической информации в газовой промышленности, 1992. – 127 с. – Текст : непосредственный.

20. Васильев, И. П. Экологически чистые направления получения и использования топлив растительного происхождения в двигателях внутреннего сгорания / И. П. Васильев. – Текст : непосредственный // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2005. – № 1. – С. 19–25.

21. Васильев, Ю. Н. Газозаправка транспорта. / Ю. Н. Васильев, А. И. Гриценко, К. Ю. Чириков. – Москва : Недра, 1995. – 447с. – ISBN 5-247-03535-6. – Текст : непосредственный.

22. Виноградов, Н. Н. Проблемы топливоснабжения и перспективы использования альтернативных топлив в дизельных ДВС / Н. Н. Виноградов, А. Д. Зайцев, С. В. Захаров. – Текст : электронный // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК : сборник всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 05 февраля 2020 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. – С. 59–63. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/200205/sbornik200205.pdf> (дата обращения: 10.10.2023).

23. Володин, В. М. Использование газа в качестве топлива для тракторов : обзорная информация / В. М. Володин, П. Д. Лупачев, В. В. Карницкий. – Москва : ЦНИИТЭ Итракторосельхозмаш, 1989. – 28 с. – Текст : непосредственный.

24. Гайворонский, А. И. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях / А. И. Гайворонский, В. А. Марков, Ю. В. Илатовский. – Москва : ИРЦ «Газпром», 2007. – 480 с. – Текст :

непосредственный.

25. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. – Москва : Машиностроение, 1977. – 193 с. – Текст : непосредственный.

26. Гиттис, В. Ю. Влияние неустановившегося режима на некоторые показатели ДВС / В. Ю. Гиттис. – Текст : непосредственный // Сгорание и смесеобразование в дизелях : сборник. – Москва : АН СССР, 1960. – С. 73–79.

27. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для вузов / В. Е. Гмурман. – 12-е изд. – Москва : Юрайт, 2025. – 479 с. – ISBN 978-5-534-00211-9. – Текст : непосредственный.

28. Гольверк, А. А. Влияние переменной нагрузки на топливную экономичность тракторных двигателей / А. А. Гольверк. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986. – № 5. – С. 7–9.

29. Гольяпин, В. Я. Использование природного газа в качестве моторного топлива в энергетических средствах сельскохозяйственного назначения / В. Я. Гольяпин. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 40 с. – Текст : непосредственный.

30. Горбачев, С. П. Оценка эффективности производства СПГ на газораспределительных станциях / С. П. Горбачев. – Текст : непосредственный // Технические газы. – 2005. – № 5. – С. 35–40.

31. Гольперин, А. С. Влияние неустановившегося режима на износ деталей тракторных двигателей / А. С. Гольперин, Б. Г. Нефедов. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроителей. – 1961. – № 4.

32. ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 10.03.76 № 579 : дата введения 1977-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200233> (дата обращения: 25.03.2024).

33. ГОСТ 14846–81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых

испытаний : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24.06.81 № 3117 : дата введения 1982-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009997> (дата обращения: 10.10.2023).

34. ГОСТ 305–82. Топливо дизельное. Технические условия : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31.03.82 № 1386 : дата введения 1983-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001406> (дата обращения: 10.12.2023).

35. ГОСТ 12.4.009–83. Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.- Госстандарт СССР. –7с. : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 10.10.83 № 4882 : дата введения 1985-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003611> (дата обращения: 25.03.2024).

36. ГОСТ 10578–86. Насосы топливные дизелей. Правила приёмки и методы испытаний : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30.03.88 № 893 : дата введения 1986-06-24. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010760> (дата обращения: 10.12.2023).

37. ГОСТ 18509–88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24.03.88 № 694 : срок действия с 01.01.90. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010002> (дата обращения: 10.12.2023).

38. ГОСТ 24055–88. Методы эксплуатационно - технологической оценки.

Общие положения : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30.03.88 № 893 : дата введения 1989-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010760> (дата обращения: 10.12.2023).

39. ГОСТ 24059–88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно - технологической оценки транспортных средств на этапе испытаний : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30.03.88 № 893 : срок действия с 01.01.89. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010767> (дата обращения: 10.12.2023).

40. ГОСТ Р 52778-2007. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы эксплуатационно - технологической оценки : утвержден и введен в действие : дата введения 2008-07-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200057687> (дата обращения: 20.05.2024).

41. ГОСТ 5288–2007. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2007 г. № 424-ст. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067090> (дата обращения: 15.11.2023).

42. ГОСТ Р 53056–2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2008 г. № 434-ст : дата введения 2009-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200068708> (дата обращения: 20.05.2024).

43. ГОСТ 17479.1–2015. Масло моторное. Классификация и обозначение :

утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2015 г. № 2153-ст : дата введения 2017-01-01 – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128312> (дата обращения: 10.10.2023).

44. ГОСТ 24055-2016. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 марта 2017 г. N 168-ст : дата введения 2018-01-01 – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144754> (дата обращения: 10.10.2023).

45. ГОСТ 34393-2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. Межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Росстандарта от 07.12.2018 № 1081-ст : дата введения 2019-09-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161745> (дата обращения: 20.05.2024).

46. ГОСТ 27577-2022. Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия (с Поправками ред. от 01.11.2023) : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 августа 2022 г. № 725-ст : дата введения 2023-07-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200192505> (дата обращения: 10.10.2023).

47. ГОСТ 5542–2022. Газ природный промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 апреля 2022 г. № 201-ст : дата введения 2023-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183891> (дата обращения: 10.10.2023).

48. ГОСТ 34858-2022. Межгосударственный стандарт. Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия» : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 августа 2022 г. № 763-ст : дата введения 2024-07-01 – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL:<https://docs.cntd.ru/document/1200192644> (дата обращения: 10.10.2023).

49. Григорян, К. Б. Экологическая ситуация при использовании мазута и угля взамен природного газа / К. Б. Григорян, Ю. М. Никитина. – Текст : непосредственный // Экология в газовой промышленности. Приложение к журналу «Газовая промышленность». – 1998 – № 7 – С. 8-13.

50. Гришин, Г. Д. Исследование рабочего процесса автомобильного дизеля на режимах разгона при серийной и ступенчатой подачах топлива : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г. Д. Гришин. – Ленинград, 1970. – 189с. – Текст : непосредственный.

51. Гусев, В. Г. Эффективность использования природного газа в качестве моторного топлива в сельскохозяйственном производстве / В. Г. Гусев . – Текст : непосредственный // Агробизнес и пищевая промышленность. – 2006. – № 4 (70). – С. 48.

52. Девятьяров, Р. Р. Улучшение эффективных показателей тракторного дизеля 4Ч11,0/12,5 (Д-240) путём применения природного газа и оптимизации процессов сгорания и тепловыделения : специальность 05.04.02 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Девятьяров, Руслан Раифович. – Санкт-Петербург, 2003. – 228с. – Текст : непосредственный.

53. Дьяченко, Н. Х. Исследование автомобильного двигателя при переменных режимах : специальность 05.00.00 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дьяченко Николай Харитонович. – Ленинград, 1957. – 450 с. – Текст : непосредственный.

54. Дрюпин, П. В. Повышение долговечности плунжерных пар топливного насоса высокого давления тракторных дизельных двигателей : специальность 05.20.030 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

/ Дрюпин Павел Валерьевич. – Омск, 2012. – 143 с. – Текст : непосредственный.

55. Ерохов, В. И. Газобаллонные автомобили (конструкция, расчет, диагностика) : учебник / В. И. Ерохов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2012. – 598 с. – ISBN 978-5-9912-0201-5. – Текст : непосредственный.

56. Завгородний, Б. В. Приготовление сжигания топливных смесей, модифицированных мазутов, водотопливной эмульсии в энергетических установках / Б. В. Завгородний. – Текст : непосредственный // Энергосбережение. – 2004. – № 7. – С. 10–14.

57. Захаров, С. В. Получение водородсодержащего газа из аммиака и использование его в качестве топлива для ДВС / С. В. Захаров. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2007. – № 2 (56). – С. 158–161.

58. Захаров, С. В. Перспективы применения природного газа в автотракторных дизелях / С. В. Захаров, Л. Г. Ковалев. – Текст : непосредственный // Реализация Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия: инновации, проблемы, перспективы : материалы международного научно - технического форума. – Омск : ФГБОУ ВПО ОмГАУ, 2009. – С. 320–323.

59. 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.

60. Захаров, С. В. Природный газ - как альтернативный вид топлива для мобильной техники в агропромышленном комплексе / С. В. Захаров, В. П. Квашин, О. В. Захарова. – Текст : непосредственный // Перспективы технического сервиса для предприятий АПК : материалы Региональной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО ОмГАУ им. П.А. Столыпина, Омск, 28 февраля 2013 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2013. – С. 17–19.

61. 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. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/160428/sbornik160428.pdf> (дата обращения: 05.12.2024).

62. Захаров, С. В. Теоретические предпосылки повышения эффективности газодизельных тракторов / С. В. Захаров, В. В. Комендантов. – Текст : непосредственный // Новая наука: стратегии и векторы развития : международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (19 апреля 2016г. г. Ижевск). В 3 ч. – Стерлитамак : АМИ, 2016. – Ч.2. – 192с.

63. 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. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/index.php/2017/1> (дата обращения: 28.01.2024).

64. Захаров, С. В. Результаты тормозных испытаний двигателей, форсированных сжиженным газом / С. В. Захаров, В. П. Квашин, А. С. Союнов. – Текст : электронный // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития : сборник материалов Национальной научно-практической конференции, Омск, 06 апреля 2017 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2017. – С. 38-42. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/170406/sbornik170406.pdf> (дата обращения: 22.06.2023).

65. Захаров, С. В. Газ - как альтернатива дизельному топливу / С. В. Захаров, М. А. Брянцев. – Текст : электронный // Сборник материалов XXIII

научно-технической конференции обучающихся ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, 24 мая 2017 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2017. – С. 18-21. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/170524/sbornik170524.pdf> (дата обращения: 15.10.2023).

66. Захаров, С. В. Повышение эксплуатационных и экономических показателей дизельных двигателей путем перевода их на сжатый 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. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/180419/sbornik180419.pdf> (дата обращения: 10.03.2024).

67. 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. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/191129/sbornik191129.pdf> (дата обращения: 13.10.2023).

68. 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. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/191129/sbornik191129.pdf>

journal.omgau.ru/images/conf/191129/sbornik191129.pdf (дата обращения: 22.11.2024).

69. Захаров, С. В. Перевод двигателей на сжатый природный газ - один из путей экономии топливно-энергетических ресурсов, повышение эксплуатационных, экологических и экономических показателей дизелей / 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. 120–123. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/191129/sbornik191129.pdf> (дата обращения: 10.10.2023).

70. 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.

71. 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). – URL: <https://e-journal.omgau.ru/index.php/vyp-rus/2023-god/vypusk-3-34-iyul-sentyabr-2023-g> (дата обращения: 02.04.2024).

72. 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.

73. Измайлов, А. Ю. Рекомендации по использованию сжатого

природного газа в качестве моторного топлива для транспортно-энергетических средств сельскохозяйственного назначения / А. Ю. Измайлов, В. Н. Потапов, Л. С. Орси́к. – Москва : ВИМ, 2006. – 103 с. – Текст : непосредственный.

74. Износ деталей двигателей при неустановившихся режимах его работы / М. А. Григорьев, Н. И. Понамарёв, В. А. Метелькин, В. И. Новиков. – Текст : непосредственный // Теория, расчёт и конструкция двигателей и их агрегатов и деталей : сборник трудов НАМИ. Вып.147. – Москва, 1974.

75. Ильина, М. Н. Подготовка попутного нефтяного газа к сжиганию в условиях автономного энергообеспечения нефтепромыслов : специальность 05.14.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ильина Марина Николаевна. – Красноярск, 2009. – 162с. – Текст : непосредственный.

76. Иофинов, С. А. Эксплуатация тракторов и автомобилей на транспортных работах в сельском хозяйстве / С. А. Иофинов, А. А. Цирлин. – Ленинград : Колос, 1975. – 220с. – Текст : непосредственный.

77. Иофинов, С. А. Средние значения энергетических показателей работы МТА при вероятностном характере нагружения / С. А. Иофинов, Л. Е. Агеев, Е. М. Демченко. – Текст : непосредственный // Труды Ленинградского СХИ. – 1969. – Т. 140, Вып.1. – С.44–55.

78. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В. А. Марков, С. Н. Девянин, В. Г. Семенов [и др.]. – Москва : НИЦ «Инженер» (Союз НИО), «Онико-М», 2011. – 536 с. – ISBN 978-5-7013-0120-5. – Текст : непосредственный.

79. Исследование динамических характеристик автомобильных дизелей. / Н. И. Веревкин, Л. И. Крепе, С. А. Лепин, И. А. Петров. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1988. – № 8. – С.29–31.

80. Канарчук, В. Е. Долговечность износа двигателей при динамических режимах / В.Е. Канарчук. – Киев : Наукова думка, 1978. – С. 80–90. – Текст : непосредственный.

81. Капустин, А. А. Улучшение эксплуатационных показателей

транспортных дизелей на основе научного обоснования с разработкой газодизельного процесса и методов фильтрации отработавших газов : специальность 05.20.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Капустин Александр Александрович. – Санкт - Петербург, 2000. – 283с. – Текст : непосредственный.

82. Каримов, Р. Х. Изменение эффективных показателей двигателя мобильного агрегата в условиях эксплуатации при неустановившейся нагрузке : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каримов, Рабис Хурматович. – Челябинск, 1970. – 170с. – Текст : непосредственный.

83. 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.

84. Керученко, Л. С. Работа газодизельного двигателя при неустановившейся нагрузке / Л. С. Керученко, С. В. Захаров. – 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. 149–152. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/191129/sbornik191129.pdf> (дата обращения: 22.11.2024).

85. Кириллов, Н. Г. Сжиженный природный газ как универсальное моторное топливо XXI века: технология производства и системы долгосрочного хранения : обзор. Серия Газификация. Природный газ в качестве моторного топлива. Использование газа / Н. Г. Кириллов. – Москва : И РЦ «Газпром» , 2002. – 63с. – Текст : непосредственный.

86. Ковалев, Л. Г. Возможности использования аммиака - носителя водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания / Л. Г. Ковалев, С. В. Захаров. – Текст : непосредственный // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 4. – С. 158–163.

87. Коклин, И. М. Переоборудование трактора К-700 А для работы на сжатом природном газе. Результаты его испытаний / И. М. Коклин, М. И. Лагашкин. – Текст : непосредственный // Газовая промышленность : научно-технический сборник. – Москва : ИРЦ Газпром, 1999. – № 1. – 24 с. – Текст : непосредственный.

88. Коклин, И. М. Эксплуатационные испытания тракторов, переоборудованных для работы на компримированном природном газе / И. М. Коклин, О. П. Наумов, Г. С. Савельев. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – №10. – С. 24–29.

89. Колесник, Ю. И. Усовершенствование системы подачи газа автомобильного газодизеля и определение ее рациональных параметров : специальность 05.05.03 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Колесник Юлиана Игоревна. – Киев : 2001. – 21 с. – Текст : непосредственный.

90. Комплексный подход к обеспечению сельхозпроизводителей газомоторным топливом. / Г. С. Савельев, М. Н. Кочетков, Е. В. Овчинников, И. М. Коклин. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 3. – С. 47–50.

91. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – Москва : Машиностроение, 1989. – 416 с. – ISBN 5-217-00341-3. – Текст : непосредственный.

92. Крутов, В. И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект / В. И. Крутов. – Москва : Машиностроение, 1978. – 472 с. – Текст : непосредственный.

93. Кухаренко, П. М. Повышение технико-эксплуатационных характеристик машинно-тракторных агрегатов применением газодизельных энергетических средств : специальность 05.05.11 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кухаренко Петро Михайлович. – Глеваха, 2002. – 21 с. – Текст : непосредственный.

94. Лиханов, В. А. Снижение токсичности и улучшение эксплуатационных

показателей тракторных дизелей путём применения метанола / В. А. Лиханов. – Текст : непосредственный // Рабочие процессы в ДВС : тезисы всесоюзной НТК. – Москва, 1982. – С. 87–88.

95. Латыпов, К. М. Газовое моторное топливо - в сельскохозяйственном производстве / К. М. Латыпов // Использование динамических характеристик рабочего процесса тепловых двигателей для проектирования, эксплуатации, диагностирования и ремонта. Материалы международного научно-технического семинара, посвящённого столетию со дня рождения вице-президента ВАСХНИЛ В.Н. Болтинского 22 - 25 сентября 2003 года. Академия наук РТ. – Казань: 2004. – С.192-195.

96. Латыпов, К. М. Исследование динамических характеристик газодизельного двигателя : специальность 05.04.02 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Латыпов Камиль Мусалимович. – Казань, 2008. – 16 с. – Текст : непосредственный.

97. Лурье, А. В. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А. В. Лурье. – 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Колос, 1981. – 382 с.

98. Лютко, В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В. Н. Луканин, А. С. Хачиян. – Москва : МАДИ(ТУ), 2000. – 311 с. – ISBN 5-7962-0011-9. – Текст : непосредственный.

99. Мариненко, Е. Е. Биогаз и его рациональное использование в тепловых установках : специальность 05.23.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мариненко Елена Егоровна. – Ленинград, 1991. – Текст : непосредственный.

100. Марков, В. А. Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей / В. А. Марков, С. И. Козлов – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2000. – 296 с. – ISBN 5-7038-1565-7. – Текст : непосредственный.

101. Медиатекст : национальная служба информации : [сайт]. – URL: www.mediatext.ru (дата обращения: 22.11.2024). – Текст : электронный.

102. Мельников, С. В. Планирование эксперимента сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Ленинград : Колос,

1980. – 170 с. – Текст : непосредственный.

103. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских, работ новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – Москва : Колос, 1980. – 111 с. – Текст : непосредственный.

104. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / А. В. Шпилько, В. И. Драгайцев, П. Ф. Тулапин [и др.]. – Москва : Колос, 1998. – Ч. 2. – 252 с. – Текст : непосредственный.

105. Мустафаев, М. Г. Обеспечение экологической безопасности газодизельного процесса(на примере трактора Т-25А) : специальности 05.20.01, 05.20.03 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мустафаев Мурад Гусейнович. – Москва, 2004. – 19 с. – Текст : непосредственный.

106. Наумов, О. П. Повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов на операциях обработки почвы газодизельными энергосредствами : на примере трактора К-701 : специальность 05.20.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Наумов Олег Павлович. – Ставрополь, 2010. – 156 с. – Текст : непосредственный.

107. Наумов, О. П. Теоретический метод комплексной оценки эффективности тракторных битопливных систем / О. П. Наумов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2009. – № 4. – С. 20-24.

108. Наумов, О. П. Пути повышения эксплуатационно-технических параметров сельскохозяйственных газодизельных тракторов : обзорная информация / О. П. Наумов, И. М. Коклин. – Москва : «Газпром экспо», 2009. – 87 с. – Текст : непосредственный.

109. Николаенко, А. В. Повышение эффективности использования тракторных дизелей в сельском хозяйстве / А. В. Николаенко, В. Н. Хватов. – Ленинград : Агропромиздат, 1986. – 190с. – Текст : непосредственный.

110. Основные задачи при переводе дизеля на газообразное топливо / Л. Л. Фалькович, С. В. Захаров, Л. С. Керученко, Д. Е. Кузьмин. – Текст : электронный

// Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК : сборник Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 18 февраля 2021 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 487–490. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/210218/sbornik210218.pdf> (дата обращения: 22.11.2024).

111. Орлин, А. С. Двигатели внутреннего сгорания: Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. / А. С. Орлин, Д. Н. Вырубов, И. И. Ивин. – Москва : Машиностроение, 1971. – 400 с. – Текст : непосредственный.

112. 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.

113. Патент № 2137937 RU, МПК7 F02D19/08. Способ подачи и дозирования топлива в газодизеле и устройство для подачи и дозирования топлива № 98103970/06 : заявл. 1998.03.03 : опубл. 20.09.1999 / К. П. Седелев, Е. А. Лазарев, А. Н. Лаврик [и др.] ; заявитель и патентообладатель Челябинский государственный технический университет. – 8 с. – Текст : непосредственный.

114. Патент № 2182248 RU, МПК F02D19/08. Система регулирования газового дизеля № 2000118999 : заявл. 17.07.2000 : опубл. 10.05.2002 / А. Стадник ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства – 3 с. – Текст : непосредственный.

115. Патрахальцев, Н. И. Возможности организации газодизельного процесса с внутренним смесеобразованием на базе двигателя 8Ч13/14 / Н. И. Патрахальцев, С. В. Гусаков, Е. В. Медведев. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 2004. – № 3 (217). – С. 10–12.

116. Переход автотранспорта на природный газ : нормативно-справочное пособие / РАО «ГАЗПРОМ». – Москва, 1995. – 86 с. – Текст : непосредственный.

117. 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.

118. Подосинников, В. В. Потребительские качества газодизелей и пути их улучшения / В. В. Подосинников, В. А. Демидов, И. Л. Дьяченко. – Текст : непосредственный // Научные труды ВИМ.– Москва : ГНУ ВИМ 2002. – Т. 139. – 156 с.

119. Повышение мощности дизельных двигателей сжиженным газом / С. В. Захаров, С. С. Карпов, Н. Н. Виноградов, А. О. Яковлева. – Текст : электронный // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития : материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Омский ГАУ, Омск, 27 апреля 2023 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2023. – С. 83–88. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/2023/270423/sbornik270423.pdf> (дата обращения: 23.11.2024).

120. Повышение эффективных и эксплуатационных показателей дизелей / С. В. Захаров, Е. Ю. Мирошник, Д. Н. Виноградов, Я. Д. Высоцкий. – Текст : электронный // 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. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/140422/sbornik140422.pdf> (дата обращения: 23.11.2024).

121. Пожароопасность альтернативных топлив / С. В. Захаров, Е. Ю. Мирошник, Н. Н. Виноградов, Д. Е. Кузьмин. – Текст : электронный // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях : сборник международной научно-исследовательской конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (МЕХ ФАК), Омск, 26 ноября 2020 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. – С. 394–398. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/2020/26112020/sbornik26112020.pdf> (дата обращения: 23.11.2024).

journal.omgau.ru/images/conf/201026/sbornik201026.pdf (дата обращения: 23.11.2024).

122. Потапов, В. Н. Опыт внедрения технологии использования природного газа в качестве моторного топлива в сельском хозяйстве / В. Н. Потапов. – Текст : непосредственный // Научные труды ВИМ. – Москва : ГНУ ВИМ, 2003. – Т. 150. – С. 66–76.

123. Применение газовых топлив в двигателях внутреннего сгорания / Л. В. Виноградов, В. В. Горбунов, Н. Н. Патрахальцев, В. Л. Стативко. – Москва : ИРЦ Газпром, 1996. – 198 с. – Текст : непосредственный.

124. Природный газ как моторное топливо на тракторе / Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко, Ю. Н. Васильев Л. С. Золотаревский. – Москва : Недра, 1986. – 255 с. – Текст : непосредственный.

125. Пути организации рабочего процесса дизельного двигателя при работе на альтернативных топливах / С. В. Захаров, Е. Ю. Мирошник, Е. М. Биказинов, Л. С. Керученко. – Текст : электронный // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях : сборник международной научно-исследовательской конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (Мех ФАК), Омск, 26 ноября 2020 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. – С. 390–394. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/201026/sbornik201026.pdf> (дата обращения: 03.11.2024).

126. Пути повышения эффективности использования двигателей внутреннего сгорания автомобилей и машинно-тракторных агрегатов в условиях эксплуатации / А. К. Юлдашев, В. М. Медведев, С. А. Сеницкий, К. М. Латыпов. – Текст : непосредственный // Журнальный Вестник. – 2007. – № 1 (21). – С. 114–116.

127. 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). – URL: <https://e-journal.omgau.ru/index.php/vyp-rus/2023-god/vypusk-3-34-iyul-sentyabr-2023-g> (дата

обращения: 23.11.2024).

128. Руководство по организации и проведению переоборудования тракторов для работы на компримированном природном газе : ВРД 39-1.20-019-2000. – Москва : ВНИИГАЗ, 2000. – 78 с. – Текст : непосредственный.

129. Сборник нормативных материалов на работы, выполняемые машинно - технологическими станциями (МТС) / В. М. Михлин, Л. И. Кушнарёв, Н. М. Хмелева, [и др.]. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 190с. – Текст : непосредственный.

130. Семёнов, В. Г. Альтернативные топлива растительного происхождения / В. Г. Семёнов, А. А. Зинченко. – Текст : непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 2005. – № 1. – С. 29–34.

131. Семёнов, В. Г. Влияние физико-химических показателей биодизельного топлива на параметры дизеля и его эколого-эксплуатационные характеристики / В. Г. Семёнов, С. В. Рудаченко. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 1. – С. 8–10.

132. Сидыганов, Ю. Н. Использование каталитических устройств сжигания при анаэробной переработке органических отходов / Ю. Н. Сидыганов, А. А. Медяков, А. Д. Каменских. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2015. – 292 с. – ISBN 978-5-8158-1493-6. – Текст : непосредственный.

133. Сеницкий, С. А. Определение динамических потерь двигателя Д-240 при разгоне МТА по регуляторной ветви / С. А. Сеницкий, В. Г. Патока, А. К. Юлдашев. – Текст : непосредственный // Труды КГСХА. Проблемы механизации сельского хозяйства. – Казань, 2000. – 383с.

134. Сеницкий, С. А. Влияние неустановившейся нагрузки на показатели двигателя МТА / С. А. Сеницкий. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы механизации сельского хозяйства : материалы юбилейной научно-практической конференции «Высшему агроинженерному образованию в Удмуртии 50 лет». – Ижевск, 2005. – С.127–130.

135. Способы уменьшения образования токсичных компонентов в

отработавших газах ДВС / С. В. Захаров, Н. Н. Олейник, Ю. А. Захарова, Л. С. Керученко. – Текст : электронный // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях : сборник международной научно-исследовательской конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (Мех ФАК), Омск, 26 ноября 2020 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. – С. 402–406. – URL: <https://e-journal.omgau.ru/images/conf/201026/sbornik201026.pdf> (дата обращения: 06.11.2024).

136. Справочник инженера-механика сельскохозяйственного производства / под редакцией: В. В. Нунгезера, Ю. Ф. Лачуги, В. Ф. Федоренко. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. – Ч. 2. – 489 с. – ISBN 978-5-7367-0886-4. – Текст : непосредственный.

137. Сравнительная оценка эффективности применения растительных топлив в дизельном двигателе / А. П. Марченко, А. А. Прохоренко, А. А. Осетров [и др.] – Текст : непосредственный // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 1. – С. 46–51.

138. Сравнительный анализ способов конвертации жидкотопливных двигателей в двигатели, питаемые природным газом / В. Н. Луканин, А. С. Хачиян, В. Е. Кузнецов [и др.]. – Текст : непосредственный // Сборник трудов НАМИ. – Москва, 1998. – 153 с.

139. Стадник, А. В. Повышение эффективности сельскохозяйственных газодизельных тракторов и автомобилей : специальности 05.04.02, 05.20.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Стадник Артем Владимирович. – Москва, 2002. – 19 с. – Текст : непосредственный.

140. 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.

141. Хачиян, А. С. Перевод дизелей на питание природным газом / А. С. Хачиян, И. Г. Багдасаров. – Москва : Труды МАДИ. – 1993. – 157 с. – Текст : непосредственный.

142. Хрящев, Ю. Е. Об управлении внешней скоростной характеристикой дизеля / Ю. Е. Хрящев, Е. П. Слабов, Л. П. Матросов. – Текст : непосредственный // Автомобильная промышленность. – 1999. – № 11. – С. 7–10.

143. Хитрюк, З. А. Практикум по автотракторным двигателям : учебное пособие / З. А. Хитрюк, Е. С. Цехов. – Минск : Урожай, 1989. – 143с. – ISBN 5-7860-0244-6. – Текст : непосредственный.

144. Ченцов, Н. А. Обоснование использования комплекса средств для заправки газобаллонных тракторов природным газом / Н. А. Ченцов. – Текст : непосредственный // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : материалы Международного научно-технического семинара имени В.В. Михайлова, Саратов, 14–15 мая 2014 года. Вып. 27. – Саратов : Буква, 2014. – С. 201–204.

145. Шкаликова, В. Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях / В. Н. Шкаликова, Н. Н. Патрахальцев. – Москва : РУДН, 1993. – 64 с. – ISBN 5-209-00473-2. – Текст : непосредственный.

146. A comparative exergetic performance and emission analysis of pilot diesel dual-fuel engine with biogas, CNG and hydrogen as main fuels / S. Verma, L. M. Das, S. S Bhatti [et al.]. – Text : direct // Conv. Manage. 1 – 2017. – № 51. – P. 764–777.

147. A numerical and experimental study of dual fuel diesel engine for different injection timings / M. C. Cameretti, R. Tuccillo, L. De Simio [et al.]. – Text : direct // Applied Thermal Engineering. – 2016. – T. 101. – P. 630–638.

148. A strategy of intake gas control for diesel dual fuel engine with natural gas and diesel fuel (in Japanese) / H. Kojima, A. Yoshida, T. Tsujimura, [et al.]. – Text : electronic Trans. Soc. Autom. Eng. Jpn. – (2016). 47. – P. 889–894. – URL: doi: 10.11351/jsaeronbun.47.889.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaeronbun/47/4/47_20164417/_article/-char/en (date of access: 18.12.2024).

149. Abdelaal, M. M. Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR / M. M. Abdelaal, A. H. Hegab. – Text : electronic // Energy conversion and management. – 2012. – T. 64. – P. 301–312. – URL: https://www.sciencedirect.com/unsupported_browser (date of access: 18.12.2024).

150. Abdul Muhaimin, Performance Analysis of A Spark Ignition Engine Using Compressed Natural Gas (CNG) as Fuel / M. Musthafah, M .S. Tahir, M. A. Ali [et al.]. – Text : direct // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 68. – P. 355–362.

151. Alimardanov, R. Teoreticheskoye issledovaniye adaptatsii sistemy upravleniya dvigatelem avtotraktornykh mashin, perekhodyashchikh s dizelya na szhatyy prirodnyy gaz / R. Alimardanov, I. Ibotov, I. Abdurashidov. – Text : direct // Universum: tekhnicheskaya nauka. – 2023. – № 2-5 (107). – P. 65–68.

152. Al-Maidi, A. A. H. Study of a combined device to reduce the toxicity of exhaust gases of diesel engines, agricultural technology / A. A. H. Al-Maidi, D. A. Cher-netsov, E. S. Vdovina. – Text : electronic // Iraqi Journal of Agricultural Sciences. – 2019. – № 50 (5). – P. 1259–1268. – URL: <https://jcoagri.uobaghdad.edu.iq/index.php/intro/article/view/791> (date of access: 18.12.2024).

153. Analysis of the characteristics of natural gas as fuel for vehicles and agricultural tractors / A. A. H. Al-Maidi, D. A. Chernetsov, Y. V. Rodionov [et al.]. – Text : electronic // Plant archives(international journal of plant research). – 2019. – Vol. 19 no. 1 april. – P. 1213–1218. – URL: <https://systems.uomisan.edu.iq/cv/uploads/files/i35vryf9s8ac1g2.pdf> (date of access: 05.08.2024).

154. An emission and performance comparison of the natural gas Cummins Westport Inc. C-Gas Plus versus Diesel in heavy : SAE paper 2002-01-2737. – Text : electronic // SAE International : [website]. – U.S. and Canada, 2025. – URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2014-01-2737/> (date of access: 12.09.2024).

155. Bari, S. Performance of a diesel engine run on diesel and natural gas in dual-fuel mode of operation / S. Bari, S. N. Hossain. – Text : electronic // Energy Procedia. –

2019. – T. 160. – P. 215–222. – URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019EnPro.160..215B/abstract> (date of access: 10.09.2024).

156. Bartunek, B. Direct induction natural gas (DING): a diesel-derived combustion system for low emissions and high fuel economy. / B. Bartunek, U. Hilger. – Text : electronic // SAE Technical Paper Series. – 2001. – № 2000. – № 01Г.-2827. – P. 1. – URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2000-01-2827/> (date of access: 11.09.2024).

157. Boretti, A. Numerical analysis of high-pressure direct injection dual-fuel diesel-liquefied natural gas (LNG) engines / A. Boretti. – Text : electronic // Processes. – 2020. – T. 8. – №. 3. – P. 261. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/3/261> (date of access: 20.12.2023).

158. Chen, S. K. Gas Engine Combustion Principles and Applications / S. K. Chen, N. J. Beck. – Text : direct // SAE Technical Paper Series. – 2001. – Vol. 01. – P. 1-10.

159. Chunhua, Z. Effects of combustion duration characteristic on the brake thermal efficiency and NO_x emission of a turbocharged diesel engine fueled with diesel-LNG dual-fuel / Z. Chunhua, Y. Sh. Ao, L. Q. Sh. Yangyang. – Text : electronic // Applied Thermal Engineering. December 2017. – Vol. 127, 25. – P. 312–318. – URL: https://www.sciencedirect.com/unsupported_browser (date of access: 20.12.2023).

160. Effect of equivalence ratio on combustion and emissions of a dual-fuel natural gas engine ignited with diesel / J. Zheng, W. Jinhua, Z. Zhibo, [et al.]. – Text : electronic // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 146. – P. 738-751. – URL: https://www.sciencedirect.com/unsupported_browser (date of access: 05.06.2025).

161. Effect of the pilot quantity on the ultrafine particle emissions and the combustion characteristics of a biodiesel pilot-ignited natural-gas dual-fuel engine. / Y. Liu, L. B. Sun [et al.]. – Text : direct // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering. – 2015. – Vol. 29. – P. 1060–1069.

162. Efficiency and Emissions Characteristics of Partially Premixed Dual-Fuel

Combustion by Co-Direct Injection of NG and Diesel Fuel (DI2) / R. Florea, G. Neely, Z. Abidin, J. Miwa. – Text : electronic // SAE Paper. – 2016. – № 01-0779. – URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2016-01-0779/> (date of access: 05.06.2025).

163. Energy efficiency improvements and CO₂ emission reduction by CNG use in medium- and heavy-duty spark-ignition engines / D. Prasad, H. Xiaoye, Z. Xiaoxi [et al.]. – Text : direct // Energy. – 2023. – Vol. 263. – P. 125769.

164. Environmental Efficiency of Using Alternative Types of Fuel in Power Facility of Railway Transport / , D. Ya. Nosyrev, L. S. Kurmanova, S. A. Petukhov [et al.]. – Text : direct // Ecology and Industry of Russia. – 2019. – Vol. 23. – P. 19.

165. Experimental and computational study on the effects of injection timing on thermodynamics, combustion and emission characteristics of a natural gas (NG)-diesel dual fuel engine at low speed and low load / J. Shu, J. Fu, J. Liu [et al.]. – Text : electronic // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 160. – P. 426–438. https://www.sciencedirect.com/unsupported_browser (date of access: 04.06.2025).

166. Exploring the potential of ethanol, CNG, and syngas as fuels for lean spark-ignition combustion / R. Zhongnan, H. Deivanayagam, L. Benjamin [et al.]. – Text : direct // An experimental study, Energy. – 2020. – Vol. 191. – P. 116520.

167. Gartung, I. S. Technical and economic indicators of an engine operating on cng using the example of Toyota Camry / I. S. Gartung // , 25–26 апреля 2024 года, 2024. – P. 199-200.

168. Gupta, A. K. Model for predicting air-fuel mixing and combustion for direct injection diesel engine / A. K. Gupta, P. S. Mehta, C. P. Gupta. – Text : direct // SAE transactions. – 1986. – P. 503–521.

169. Harrington, J. Direct Secion of Natural Gas in a Heavy-Duty Diesel Engine / J. Harrington, S. Munshi, C. Nedelcu [et al.]. – Text : direct // SAE Technical Paper Series. – 2002. – № 2002-01-1630. – P. 1-10.

170. Ibotov, I. Ch. A theoretical study of adaptation of the engine control system in autotractor machines switched from diesel to compressed natural gas / I. Ch. Ibotov. – Text : direct // Bulletin of Science and Education. – 2022. – №. 10-2 (130). – P. 16–

20.

171. Improving the Supply System Gas Engine to Improve Energy Efficiency / R. Khakimov, O. Didmanidze, E. Parlyuk [et al.]. – Text : electronic // MATEC web of conferences : The VI International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Management of Transport Systems» (ITMTS 2020). EDP Sciences, 2021. – Vol. 334. – P. 02016. – URL: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2021/10/contents/contents.html> (date of access: 03.06.2025).

172. Jamrozik, A. An Experimental Study on the Performance and Emission of the diesel/CNG Dual-Fuel Combustion Mode in a Stationary CI Engine. – Text : electronic / A. Jamrozik, W. Tutak, K. Grab-Rogaliński // Energies. 2019. – Vol.12. – P. 3857. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/20/3857> (date of access: 06.06.2025).

173. Litzke, W. L. Natural Gas as a Future Fuel for Heavy-Duty Vehicles / W. L. Litzke, J. Wegrzyn. – Text : direct // SAE Technical Paper Series. – 2001. – № 2001-01-2067. – P. 1–4.

174. Kalsi, S. S. Experimental investigations of effects of EGR on performance and emissions characteristics of CNG fueled reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine / S. S. Kalsi, K. A Subramanian. – Text : direct // Energy Conversion and Management. – 2016. – T. 130. – P. 91–105.

175. Karim, G. A. Dual-Fuel Diesel Engines / G. A. Karim, – 1st ed. – London ; New York : CRC Press. 2015. – Text : direct.

176. 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.

177. Khakimov, R. T. Improving the supply system gas engine to improve energy efficiency / R.T. Khakimov, O.T. Didmanidze. – Text : direct // Transportation Research Procedia. – 2017. – P. 183–191.

178. Khakimov, R. T. Research of heat generation indicators of gas engines / R. T. Khakimov, O. N. Didmanidze, A. S. Afanasyev. – Text : direct // Electromechanics

and Mechanical Engineering. Journal of Mining Institute. – 2018. – Vol. 229. – P. 50–55.

179. Natural Gas Engines For Truck And Bus : Bulletin 4103996. – U.S.A. : Cummins Westport Inc., 2011. – 6 p

180. Nitschke-Kowsky, P. Methane number an important parameter for natural gas quality: Ruhrgas present / P. Nitschke-Kowsky. – Text : direct // Вести газовой науки. – 2015. – №. 1. – P. 86–97.

181. Novorodjin, D. Studiul utilizarii combustibilului la motoarele cu aprindere prin comprimare / D. Novorodjin, P. Voleac. – Text : direct // Conferintei stiintifice «Impactul transporturilor asupra mediului ambient». – Chisinau : The State Agrarian University of Moldova, 2008. – P.16.

182. Performance, combustion and emission characteristics investigations on a diesel engine fueled with diesel/ethanol/n-butanol blends / Z. Zhiqing, Li. Jiangtao, J. Tian [et al.]. – Text : direct // Energy. – 2022. – T. 249. – P. 123733.

183. Romanyuk, V. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas / V. Romanyuk, V. A. Likhanov, O. P. Lopatin. – Text : direct // Theoretical and Applied Ecology. – 2018. – №. 3. – P. 27–32.

184. Ryu, K. Effects of Pilot Injection Quantity on the Combustion and Emissions Characteristics in a Diesel Engine using Biodiesel-CNG Dual Fuel / K. Ryu. – Text : direct // Journal of ILASS-Korea. – 2016. – Vol. 21. – P. 95–103.

185. Sombatwong, P. Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance and Emission of a Dual Producer Gas–Diesel Engine / P. Sombatwong, P. Thaiyasuit, K. Pianthong. – Text : direct // Energy Procedia. – 2013. – Vol. 34. – P. 218–227.

186. Syniawa L. L. Simulation of CNG Engine in Agriculture Vehicles. Part 2: Coupled Engine and Exhaust Gas Aftertreatment Simulations Using a Detailed TWC Model / L. Larisa, R. B. Siddareddy, S Prehn. [et al.]. – Text : electronic // SAE Technical Paper, 2023. – №. 2023-24-0112. – URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2023-24-0112/> (date of access: 03.06.2025).

187. Titov, I. L. The investigation of self-sustained fluctuations of voltage

frequency of gas diesel generators / I. L. Titov, S. N. Frolova, M. A. Osipova. – Text : direct // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2022. – №. 4. – P. 229–240.

188. Thomas, D. G. Essais de Moteurs Diesel Alimentes aГ Huile Vegetale et au Gas Naturel / D. G. Thomas, J. Darque, P. Delval. – Text : direct // Entropie. – 1985. – Vol. 21, № 122. – P. 7–10.

189. Toshitaka, M. Natural gas engine and operation method for natural gas engine. US6550430B2 EP / Toshitaka Minami, Isuzu Motors, Ltd. – CIIA ; CN JP, 2003. – Text : direct.

190. Voleac, P. Rezultatele încercărilor de laborator a motorului diesel 4DC-125/110 alimentat cu combustibili alternativi / P. Voleac, M. Gadibadi, N. Daraduda / P. Voleac. – Text : direct // The International Scientific Symposium «Achievements and Perspectives in Agricultural Engineering and Auto Transport» dedicated to the 85 th anniversary of the State Agrarian University of Moldova. – Chisinau : The State Agrarian University of Moldova, 2018. – P. 348.

191. Voleac, P. Particularitatile utilizarii kombustibilului gazos la motoarele cu aprindere prin comprimare / P. Voleac, S. Chernobrisov. – Text : direct // Materialele conferintei Internationale «Sisteme de transport shi logistica». – Chisinau : Evrica, 2007. – P. 28.

192. Whitehouse, H. D. Advances in British dual fuel and gas engines / Whitehouse H.D. – Text : direct // Diesel Eng. and Esers Assoc. – 1973. – № 353. – P. 1–11.

193. Xu, S. Quasi-Dimensional Multi-Zone Modeling of Methane-Diesel Dual-Fuel Combustion / S. Xu, Z. Filipi. – Text : electronic // Peredniy mekhanik-inzhener. – 2020. – 6:46. – URL:<https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2020.00046/full> (date of access: 20.03.2025).

194. Yousefi, A. An experimental and numerical study on diesel injection split of a natural gas/diesel dual-fuel engine at a low engine load / A. Yousefi, H. Guo, M. Birouk. – Text : electronic // Fuel. – 2018. – T. 212. – P. 332–346. – URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018Fuel..212..332Y/abstract> (date of access: 20.03.2025).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 88070

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЯ

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ "ОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009112639

Приоритет полезной модели 06 апреля 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 27 октября 2009 г.

Срок действия патента истекает 06 апреля 2019 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **88 070** (13) **U1**(51) МПК
F02M 43/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ (титульный лист)

(21), (22) Заявка: 2009112639/22, 06.04.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.04.2009

(45) Опубликовано: 27.10.2009 Бюл. № 30

Адрес для переписки:
644008, г.Омск, Институтская пл., 2, ФГОУ
ВПО ОмГАУ, отдел патентной работы и НТИ

(72) Автор(ы):

Ковалев Леонид Григорьевич (RU),
Захаров Сергей Васильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

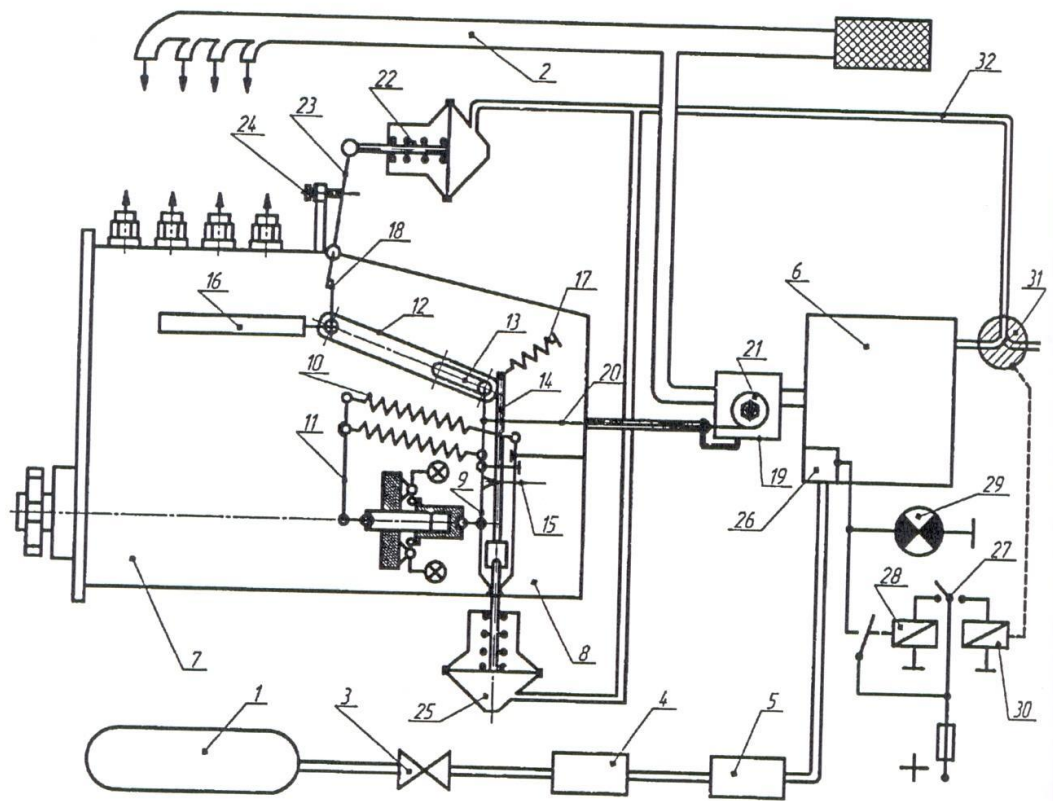
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ "ОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (RU)

(54) СИСТЕМА ПИТАНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЯ

(57) Формула полезной модели

Система питания газодизеля, содержащая линию подачи газа, сообщающую источник газового топлива с впускным коллектором двигателя, линию питания жидким топливом с насосом высокого давления, имеющим рейку с подвижным упором и центробежным регулятором, рычаг которого через главную пружину связан с рычагом управления и с тягой рейки, подпружиненные мембранные механизмы, один из которых кинематически связан с подвижным упором рейки, отличающаяся тем, что система снабжена дроссельной заслонкой дозатора подачи газа, кинематически соединенной с рычагом центробежного регулятора, причем шкив привода дроссельной заслонки дозатора подачи газа выполнен с пазом соединения его с осью дроссельной заслонки с возможностью регулирования передаточного числа ее привода от рычага регулятора, а рычаг регулятора связан с тягой рейки с возможностью свободного хода и снабжен подпружиненным двухплечим рычагом, соединенным с подпружиненным мембранным механизмом отключения рычага регулятора от тяги рейки, линия подачи газа к подпружиненным мембранным механизмам снабжена электромагнитным клапаном разгрузки линии.

RU
88 070 U1



RU 88070 U1

Документы, подтверждающие практическое использование результатов исследований

 **УТВЕРЖДАЮ**
Директор ФГБУ «Сибирская МИС»
В.Н. Тимофеев
«20» октября 2023

АКТ ИСПЫТАНИЯ

Системы питания дизеля газообразным топливом.

Комиссия в составе главного инженера ФГБУ «Сибирская МИС» Сорокина П.В., начальника отдела испытаний ФГБУ «Сибирская МИС» Гунько А.Г., представителей ФГБОУ ВО Омский ГАУ: заведующего кафедрой технического сервиса, механики и электротехники факультета технического сервиса в АПК д-ра техн. наук Редреева Г.В., старшего преподавателя кафедры агроинженерии факультета технического сервиса в АПК Захарова С.В. составили настоящий акт о том, что в ФГБУ «Сибирская государственная зональная машиноиспытательная станция» Таврического района Омской области проведены испытания системы питания дизеля газообразным топливом (компримированным природным газом) на базе двигателя Д-240 трактора МТЗ-82.

На испытания был представлен опытный образец системы питания дизеля газообразным топливом (компримированным природным газом) выполненный на базе топливной системы питания двигателя Д-240, разработанный в ФГБОУ ВО Омский ГАУ на основе патента RU88070U1.

В процессе испытания выполнены следующие работы:

1. Регулировка топливного насоса высокого давления 4УТНИ-1111005-20 (УТН-5) с конвертированным всережимным регулятором выполнена на стенде КИ - 921М в соответствии с техническими условиями (номинальная частота вращения кулачкового вала 1100 мин⁻¹, цикловая подача топлива на номинальной частоте вращения 62 мм³/цикл и т.д.) и настройка цикловой подачи запальной порции дизельного топлива (15 – 20 % от номинальной) при переходе на газодизельный процесс.

2. Установка экспериментальной системы питания газообразным топливом на трактор МТЗ-82. Подготовка трактора, проверка его технического состояния (измерение компрессии, регулировка клапанов, смена масла и фильтрующих элементов).

3. Проведены моторные испытания по методике определенной ГОСТ 18509-88 на электротормозном стенде RAPIDO, оборудованном необходимой измерительной и регистрирующей аппаратурой. Сняты мощностные и экономические показатели дизеля Д-240 по внешней регуляторной характеристике на дизельном и газодизельном процессах.

4. По результатам сравнительных испытаний дизеля Д-240 на дизельном и газодизельном процессах (протоколы испытаний от 10.10.2023 и 17.10.2023) построены внешние регуляторные характеристики в зависимости от мощности.

В результате проведенных испытаний получено:

- при переводе дизеля на газодизельный процесс рейка топливного насоса автоматически посредством пневматической камеры переводится в положение подачи запальной порции дизельного топлива. Подача запальной порции дизельного топлива соответствует работе дизеля на холостом ходу, при этом часовой расход дизельного топлива $G_{ТЗ.П.} = 3,5 \text{ кг/ч}$, а цикловая подача $q_{ЦЗ.П.} = 12,5 \text{ мг/цикл.}$;

- по мере нагружения двигателя цикловая подача запальной порции дизельного топлива сохраняется постоянной, а часовой расход ее уменьшается до $2,75 \text{ кг/ч}$ в конце перегрузки вследствие уменьшения частоты вращения двигателя;

- при работе двигателя на компримированном природном газе по газодизельному процессу, максимальная или номинальная мощность двигателя сохраняется равной при работе на дизельном топливе и соответствует $54,6 \text{ кВт}$ (75 л.с.). Частота вращения коленчатого вала и крутящий момент двигателя сохраняются равными дизельному режиму;

- при работе по газодизельному процессу часовой расход компримированного природного газа (метана) $G_{Г.М.}$ на регуляторной ветви повышается от нуля на холостом ходу до 11 кг/ч на номинальном режиме работы дизеля;

– номинальный часовой расход метана $G_{Г.М.Н.} = 11 \text{ кг / ч}$ меньше номинального расхода дизельного топлива $G_{Т.Д.Н.} = 16 \text{ кг / ч}$ вследствие большей массовой теплотворной способности метана и подачи запальной порции дизельного топлива.

– приведенный к дизельному часовой и удельный расход топлива при газодизельном процессе в пределах погрешности измерений соответствует работе двигателя на дизельном топливе по внешней скоростной характеристике;

– отмечена стабильность показателей работы экспериментальной системы;

– отмечается удобство монтажа, простота обслуживания и гибкость регулировок системы подачи газообразного топлива.

Представители ФГБУ «Сибирская МИС»:

Главный инженер

 Н.В. Сорокин

Начальник отдела испытаний

 А.Г. Гунько

Представители ФГБОУ ВО Омский ГАУ:

Заведующий кафедрой технического сервиса, механики и электротехники, д-р техн. наук, доцент

 Г.В. Редреев

Старший преподаватель кафедры агроинженерии

 С.В. Захаров

Протокол испытаний
 внешняя регуляторная характеристика дизеля
 Трактор МТЗ - 82. Двигатель Д - 240. Зав № 849360. Дата 10.10.2023.
 Температура воздуха 16 °С. Влажность 58%. Барометрическое давление 752 мм. рт. ст.
 Температура топлива $t_{\text{топ}}=8^{\circ}\text{C}$. Плотность топлива $\gamma=0,835 \text{ г/см}^3$. $\eta_{\text{тр.ВМ}} = 0,902$

№ опыта	Частота вращения тормоза	Показания тормоза	Крутящий момент	Время опыта	Мощность на тормозе	Расход топлива			Мощность двигателя	Частота вращения двигателя	Цикловая подача	Мощность приведенная	Момент приведенный $M_{\text{КН}}$	Приведенный удельный расход
						За опыт	Часовой расход	Удельный расход						
	n_T	P_m	M_K	t_{on}	N_T	Q	$G_{\text{ДТ}}$	q_e	N_e	n_e	q_u	N_{eo}	M_o	q_{eo}
	мин^{-1}	кВт	Н·м	с.	кВт	г	кг/ч	г/кВт·ч	кВт	мин^{-1}	мг/цикл	кВт	Н·м	г/кВт·ч
1	1541	29	254	28,55	44,7	100	12,6	254	49,6	1865	56,3	50,75	260	248
2	1761	27,2	238	25,28	47,9	100	14,24	268	53,1	2131	55,7	54,3	243,5	262
3	1795	26,8	234,5	25,88	48,1	100	14,52	272	53,33	2172	55,7	54,6	240	266
4	1792	26,8	234,6	24,79	48,16	100	14,26	267	53,4	2174	54,7	54,63	240	261
5	1805	26,5	231,9	24,85	47,83	100	14,39	271	53,03	2184	54,9	54,25	237	265
6	1818	26	227,5	25,08	47,27	100	14,35	274	52,4	2200	54,35	53,6	232,7	267
7	1857	25	219	25,48	46,43	100	14,13	274,4	51,5	2246	52,43	52,7	224	268
8	1865	24	210	27,46	44,76	100	13,1	264	49,62	2257	48,37	50,76	215	258
9	1890	20	175	30,3	37,8	100	11,88	282	42	2287	43,3	43,0	179	276
10	1910	15	131	36,1	28,65	100	9,98	314	31,76	2311	36	32,5	135	307
11	1926	10	87,5	44,1	19,26	100	8,16	382	21,35	2330	29,2	21,85	89,5	373
12	1934	5	43,75	89,5	9,67	100	5,35	500	10,72	2340	19	11,0	44,7	486
13	1943	0	0	68	0	100	3,5	∞	0	2351	12,4	0	0	∞

Протокол испытаний

внешняя регуляторная характеристика газодизеля

Трактор МТЗ - 82. Двигатель Д - 240. Зав № 849360. Дата 17.10.2023.

Температура воздуха 16 °С. Влажность 58%. Барометрическое давление 752 мм. рт. ст.

Температура топлива $t_{\text{топ}}=8^{\circ}\text{C}$. Плотность топлива $\gamma=0,835 \text{ г/см}^3$. $\eta_{\text{тр.ВOM}} = 0,902$

<i>№ опыта</i>	<i>Частота вращения тормоза</i>	<i>Показания тормоза</i>	<i>Время опыта</i>	<i>Часовой расход ДТ</i>	<i>Расход газа за опыт</i>	<i>Масса газа за опыт</i>	<i>Часовой расход газа</i>	<i>Приведенный к ДТ суммарный расход газа</i>	<i>Мощность на тормозе</i>	<i>Мощность двигателя</i>	<i>Частота вращения двигателя</i>	<i>Момент двигателя</i>	<i>Приведенный удельный расход</i>	<i>Цикловая подача запальной порции ДТ</i>
	n_T	P_m	$t_{оп}$	$G_{ДТ}$	$V_{Г}$	$M_{Г}$	$G_{Г..M}$	$G_{ГΣ}$	N_T	N_e	n_e	M_K	$q_{eΣ}$	$q_{ц}$
	<i>мин⁻¹</i>	<i>кГ</i>	<i>с.</i>	<i>кГ/ч</i>	<i>м³</i>	<i>кГ</i>	<i>кГ/ч</i>	<i>кГ/ч</i>	<i>кВт</i>	<i>кВт</i>	<i>мин⁻¹</i>	<i>Н·м</i>	<i>г/кВт·ч</i>	<i>мг/цикл</i>
1	1512	30,2	98,72	2,75	0,362	0,26	9,45	13,8	45,7	50,6	1830	264	272,7	12,52
2	1693	29	78,96	3,07	0,3	0,214	9,77	14,5	49,1	54,43	2049	253	266,4	12,48
3	1791	27,5	71,49	3,25	0,302	0,216	10,9	16	49,25	54,6	2167	240	293	12,5
4	1808	26,5	70,08	3,28	0,3	0,214	11,0	16,1	47,9	53,1	2188	232	303	12,49
5	1819	25,1	67,24	3,3	0,273	0,2	10,5	15,6	45,6	50,6	2201	220	308	12,49
6	1826	25,0	67,39	3,37	0,272	0,195	10,45	15,6	45,7	50,6	2246	215	308	12,5
7	1856	20,0	66,09	3,41	0,197	0,14	7,7	12,4	37,1	41,15	2278	173	301	12,42
8	1863,5	20,0	70,09	3,4	0,21	0,15	7,7	12,4	37,3	41	2255	175	302	12,56
9	1883	15,1	62,81	3,41	0,141	0,1	5,8	10,2	28,4	31,5	2276	132	323	12,48
10	1871	15,0	70,28	3,4	0,156	0,111	5,72	10,1	28,1	31,1	2263	132	324	12,56
11	1881	10,0	63,42	3,41	0,135	0,096	5,5	9,8	18,8	20,9	2276	88	468	12,5
12	1911	10,0	68,18	3,47	0,103	0,073	3,9	8,0	19,1	21,2	2312	87,5	377	12,52
13	1942	0	105	3,5	0	0	0	3,5	0	0	2350	0	∞	12,5

УТВЕРЖДАЮ
 Председатель СПК «Сибиряк»
 Москаленского района
 Омской области

 А.П. Шачнев
 «16» декабря 2024 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационного исследования «Повышение эффективности эксплуатации тракторов с газодизельными двигателями на переходных режимах путем совершенствования системы топливоподачи»

16.12.2024г. комиссия в составе председателя: инженера-механика СПК «Сибиряк» Иванова О.Н. и членов комиссии: механика СПК «Сибиряк» Прокопьева Н.А., старшего преподавателя кафедры агроинженерии факультета технического сервиса в АПК ФГБОУ ВО Омского ГАУ Захарова С.В. и заведующего кафедрой технического сервиса, механики и электротехники факультета технического сервиса в АПК ФГБОУ ВО Омского ГАУ Редреева Г.В. составили настоящий акт о том, что в СПК «Сибиряк» Москаленского района Омской области внедрена «Система питания газодизеля».

1. В процессе внедрения выполнены следующие работы:

1.1. Установлена на двух тракторах МТЗ-82.1 система питания газодизеля, разработанная в ФГБОУ ВО Омский ГАУ.

1.2. Проведена сравнительная оценка эксплуатационных показателей работы тракторов при работе по дизельному и газодизельному процессам. Испытания проводились в течение календарного года.

2. Техничко-экономические показатели внедрения:

2.1. Расход топлива при выполнении технологических операций составил: при работе на чистом дизельном топливе $DTG_T = 3,44$ кг/га, при работе по газодизельному процессу $G_T = 0,66$ кг/га и $G_T = 3,37$ м³/га.

2.2. За отчетный период выполнения испытаний один календарный год

при выполнении технологических операций: боронование, посев и культивация пропашных культур, наработка тракторов за сезон составила 800-850 мото-час. из расчёта на один трактор.

2.3. Экономия затрат на топливо при работе по газодизельному процессу составила 87 руб./га при работе одного трактора.

3. Предложение о дальнейшем внедрении работы и другие замечания:

3.1. За время работы тракторов отказов экспериментальной системы не наблюдалось.

3.2. Возможно переоборудование тракторов других марок для работы по газодизельному процессу.

Председатель комиссии



О.Н. Иванов

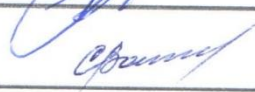
Члены комиссии



Н.А. Прокопьев



Г.В. Редреев



С.В. Захаров

Утверждаю

директор ООО «Инициатива»

Омская область, Полтавский район

р.п. Полтавка, ул. Ленина, 11

Панченко А.А.

30.05.2019 г.



Акт

о проведении испытаний систем подачи газообразного топлива.

Настоящий акт составлен комиссией в составе инженера ООО «Инициатива» Ю.В. Блохина и сотрудников ФГБОУ ВО Омского ГАУ им. П.А. Столыпина: заведующего кафедрой агроинженерии к.т.н., доцента В.В. Мяло, к.т.н., доцента кафедры агроинженерии Л.С. Керученко, старшего преподавателя кафедры агроинженерии С.В. Захарова в том, что в соответствии с соглашением между кафедрой агроинженерии ФГБОУ ВО Омский ГАУ им. П.А. Столыпина и ООО «Инициатива» с 21.05.16 по 28.05.19 проводились испытания на надёжность элементов системы подачи газообразного топлива на пяти тракторах МТЗ - 80.

В результате проведения испытаний были получены данные о зависимостях интенсивности потока отказа λ и вероятности отказа, которые приведены в таблице приложения.

Инженер ООО «Инициатива»

Зав. кафедрой агроинженерии

К.т.н., доцент кафедры агроинженерии

Старший преподаватель кафедры агроинженерии

Ю.В. Блохин

В.В. Мяло

Л.С. Керученко

С.В. Захаров

Утверждаю

директор ООО «Инициатива»

Омская область, Полтавский район

р.п. Полтавка, ул. Ленина, 11

Панченко А.А.

30.05.2019г.



Приложение к акту о проведении испытаний системы подачи газообразного топлива

Надёжность элементов системы питания двигателя газом

Наименование	λ	$p(t)$
1. Газовые баллоны для хранения сжатого природного газа	0,00029	0,9971
2. Вентили для обеспечения возможности обслуживания газовой аппаратуры при заправленных баллонах и на случай аварийной ситуации	0,00029	0,9971
3. Манометр для оценки количества газа в баллонах	0,00051	0,9949
4. Заправочное устройство для заправки баллонов газом	0,00031	0,9969
5. Электромагнитный клапан	0,00055	0,9945
6. Редуктор высокого давления для снижения давления газа на первой ступени регулирования	0,00054	0,9946
7. Редуктор низкого давления для снижения давления газа на второй ступени регулирования	0,00059	0,9941
8. Впускные коллекторы двигателя	0,00045	0,9955
9. Датчик давления газа	0,00026	0,9974
10. Датчик температуры охлаждающей жидкости	0,00044	0,9956

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности

ФГБОУ ВО Омский ГАУ

С.Ю.Комарова

«20» октября 2024г.

Мы, ниже подписавшиеся,
председатель комиссии: декан факультета технического сервиса в АПК, канд. техн.
наук, доцент Демчук Е.В.,

члены комиссии:

заведующий кафедрой агроинженерии, канд. техн. наук, доцент Мяло В.В.,

заведующий кафедрой технического сервиса, механики и электротехники, д-р техн.
наук, доцент Редреев Г.В.,

председатель методической комиссии по направлению подготовки 35.03.06
Агроинженерия, старший преподаватель Кулаева А.Г.,

председатель методической комиссии по направлению подготовки 23.03.03
Эксплуатация транспортно технологических машин и комплексов, канд. техн. наук, доцент
Биткина Е.Е.

составили настоящий акт о том, что в федеральном государственном образовательном
учреждении высшего образования «Омский государственный образовательный университет
имени П.А. Столыпина» внедрены результаты научно- исследовательской работы,
выполненной Захаровым С.В. в рамках диссертационных исследований на тему: «Повышение
эффективности эксплуатации тракторов с газодизельными двигателями на переходных
режимах путем совершенствования системы топливоподачи».

Результаты работы используются в учебном процессе при преподавании дисциплин
«Теория и расчёт двигателя», «Организация технического обслуживания и ремонта
газобаллонного оборудования автомобилей», «Техническое обслуживание транспортных
средств с альтернативными видами топлива».

Председатель комиссии

Е.В. Демчук

Члены комиссии

В.В.Мяло

Г.В. Редреев

А.Г. Кулаева

Е.Е. Биткина

Председатель научно - технического
совета ФГБОУ ВО Омский ГАУ,
профессор, доктор сельскохозяйственных наук,
профессор кафедры «Математическое моделирование в агроинженерии»

Протокол № 1 заседания ИТС
от «30» января 2025 г.

В условиях эксплуатации автотракторной техники установка на них газобаллонного оборудования для работы на КПГ проводится в соответствии с требованиями действующих государственных стандартов и иных нормативных актов.

Установка всех агрегатов и узлов газобаллонного оборудования (ГБО) на трактор должна выполняться в соответствии с требованиями нормативно-технической документации изготовителя комплекса ГБО, а также в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 34491-2018 «Переоборудование тракторов и машин сельскохозяйственных для работы на газомоторном топливе.

Установка производится в следующем порядке.

1. Подготовить трактор к установке ГБО

При подготовке трактора к установке ГБО выполняются следующие работы:

- помыть трактор (моторный отсек, кабину, раму и т.д.);
- слить дизельное топливо из топливного бака и трубопроводов системы питания, если по технологии установки ГБО требуется снятие топливного бака.

В местах крепления ГБО не должно иметься трещин, механических повреждений и сквозной коррозии.

2. Провести электромонтажные работы

Электромонтажные работы проводятся согласно следующих требований:

- закрепленные провода не должны поворачиваться относительно клемм приборов;
- провода, идущие в моторный отсек к датчику низкого давления газа, механизму установки запальной дозы дизельного топлива, электромагнитному газовому клапану, электромагнитному пусковому клапану и другим элементам электрооборудования газобаллонной аппаратуры, не должны касаться нагреваемых деталей;
- запрещается касание металлических деталей конвертируемой техники с токоведущими клеммами приборов и наконечниками проводов;
- провода не должны располагаться на острых кромках и ребрах деталей;
- изоляционные трубки должны быть плотно посажены на наконечники проводов;
- не допускаются резкие перегибы проводов, а также перекручивание и натяг их после присоединения к электрооборудованию.

Выключатель «массы» должен быть установлен в кабине в удобном для водителя месте.

3. Установить механизм регулирования запальной дозы дизельного топлива

Установка и регулировка механизма регулирования запальной дозы дизельного топлива на топливный насос высокого давления должна выполняться в соответствии с технической документацией модели двигателя.

4. Установить газовые баллоны

Установку баллонов необходимо производить с помощью грузоподъемных устройств, предварительно убедившись в отсутствии газа в баллонах. Устанавливаемые баллоны для КПП должны быть из одной марки стали, и иметь одинаковые сроки освидетельствования. При установке таких баллонов необходимо выдерживать соответствующие технической документации расстояния от горловины до элементов конструкции. В местах крепления баллонов должны быть проложены резиновые прокладки. Баллоны должны

крепиться так, чтобы исключалась возможность их проворачивания и перемещения.

5. Установить газопроводы и различного рода газовую арматуру

Перед установкой газопроводов высокого давления необходимо продуть их сжатым воздухом и осмотреть (запрещается наличие трещин и повреждений).

Устанавливая различного рода газовую арматуру (зависит от комплектации установки) на баллоны, нужно придерживаться следующих требований:

- баллоны должны отвечать требованиям Ростехнадзора, утвержденными в установленном порядке;
- для обеспечения герметичности конические резьбы должны быть смазаны (свинцовым глетом, жидким стеклом или свинцовым суриком);
- усилие при затяжке конической резьбы переходников и вентилей должно соответствовать 450-500 Н (45-50 кгс), для чего используются динамометрические ключи;
- при монтаже переходников и вентилей баллон должен быть установлен в специальное зажимное устройство, препятствующее его проворачиванию;
- вновь ввернутые в баллон переходники и вентили должны иметь не более 2-3 витков резьбы, не вошедших в резьбовые гнезда горловины баллона.

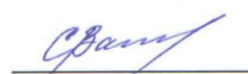
6. Проверить газовую систему на герметичность

После установки ГБО газовая система питания проверяется на герметичность согласно требованиям ГОСТ 34492-2018.

В дальнейшем трактор должен эксплуатироваться согласно требованиям инструкции по эксплуатации, прилагаемой к комплекту газобаллонного оборудования.

Разработчик:

старший преподаватель
кафедры агроинженерии
ФГБОУ ВО Омский ГАУ



С.В. Захаров

Графики изменения переменной составляющей величины затрат на переоборудование дизеля

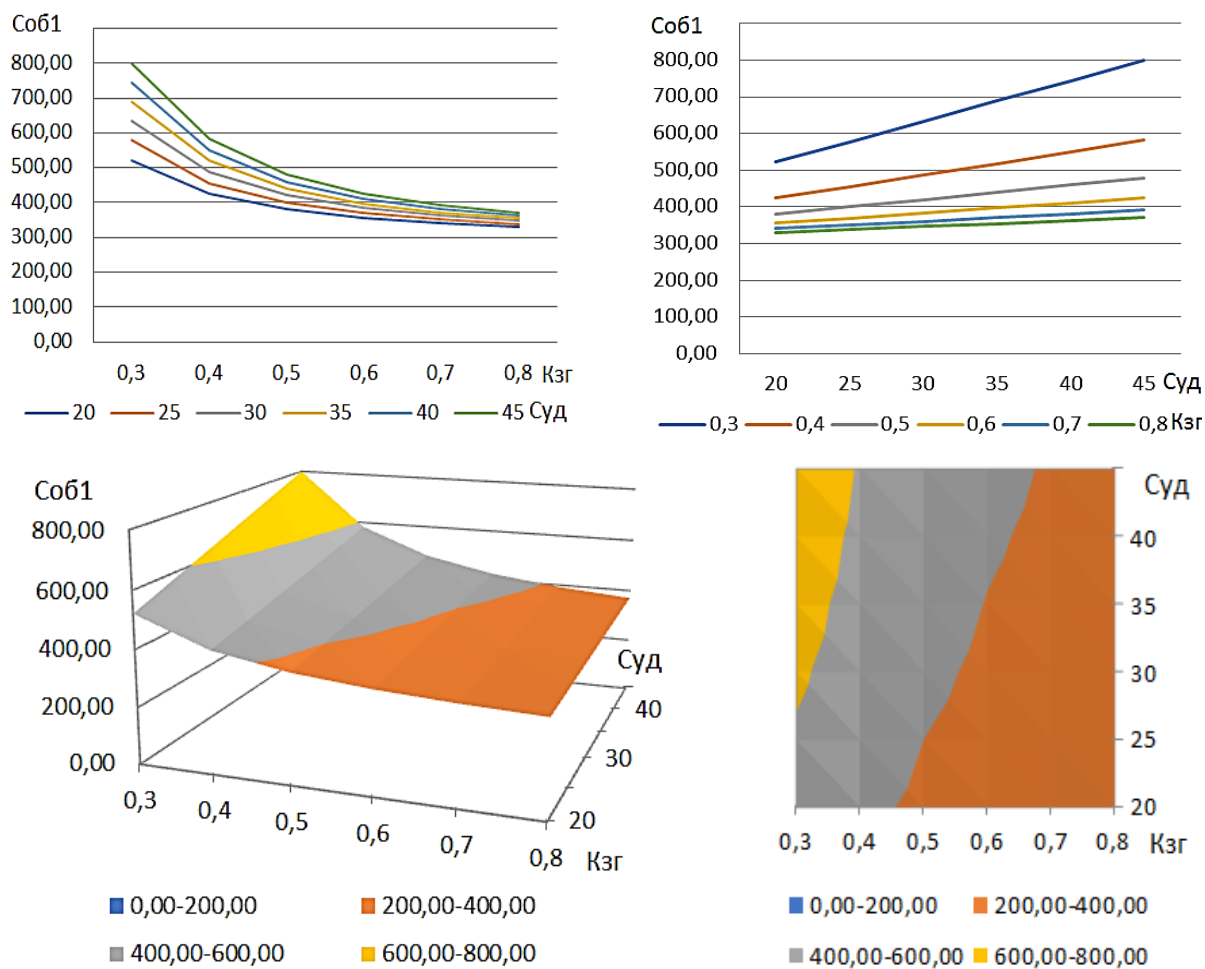


Рисунок 1 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля
 $\Delta C = 300$ руб.; $C_{уд} = 20 - 45$ руб./час; $K_{зг} = 0,3 - 0,8$

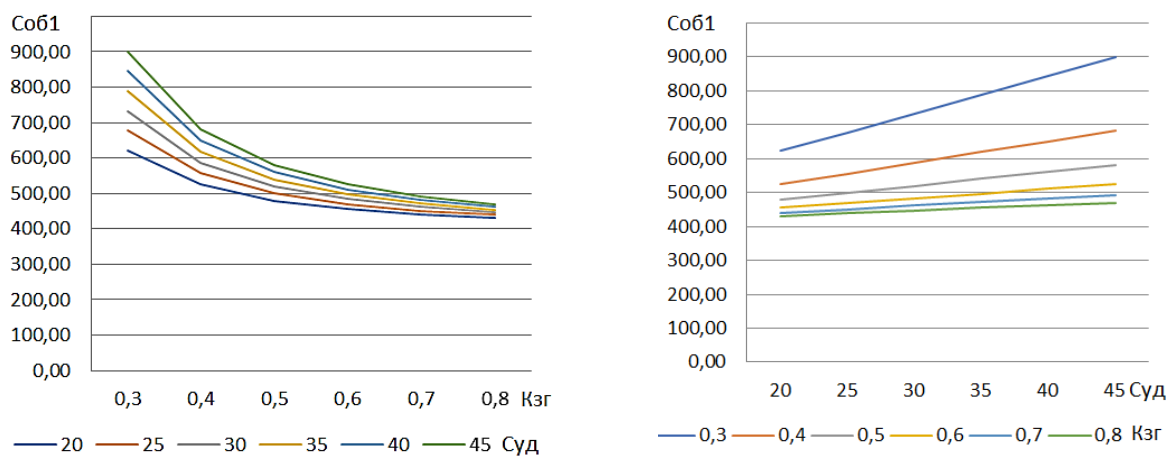
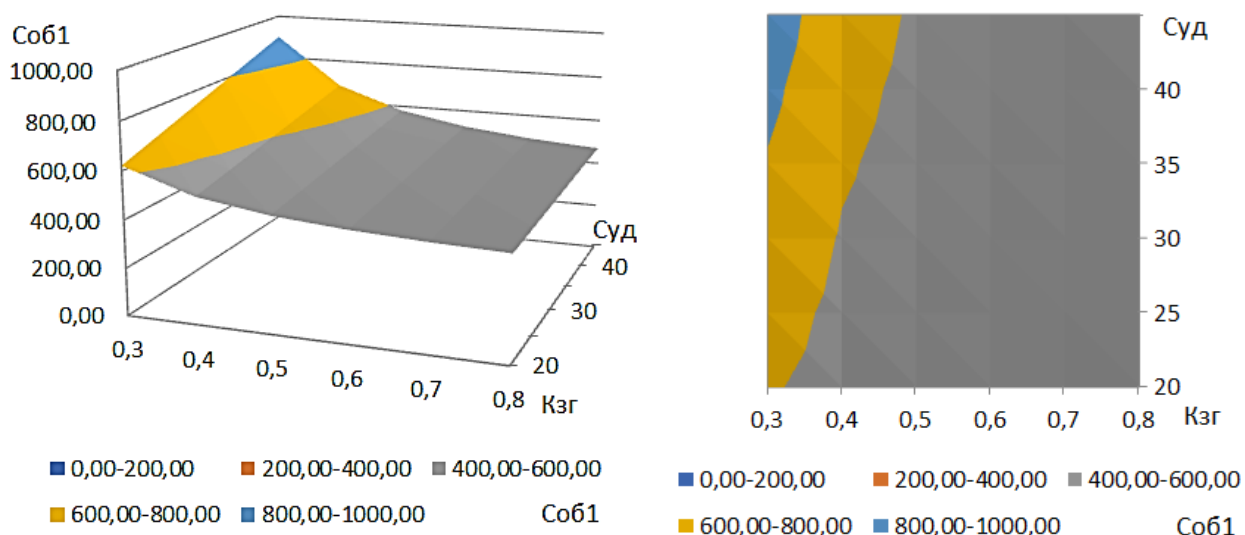


Рисунок 2 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля
 $\Delta C = 400$ руб.; $C_{уд} = 20 - 45$ руб./час; $K_{зг} = 0,3 - 0,8$



Продолжение рисунка 2 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля
 $\Delta C = 400$ руб.; $C_{уд} = 20 - 45$ руб./час; $K_{зг} = 0,3 - 0,8$

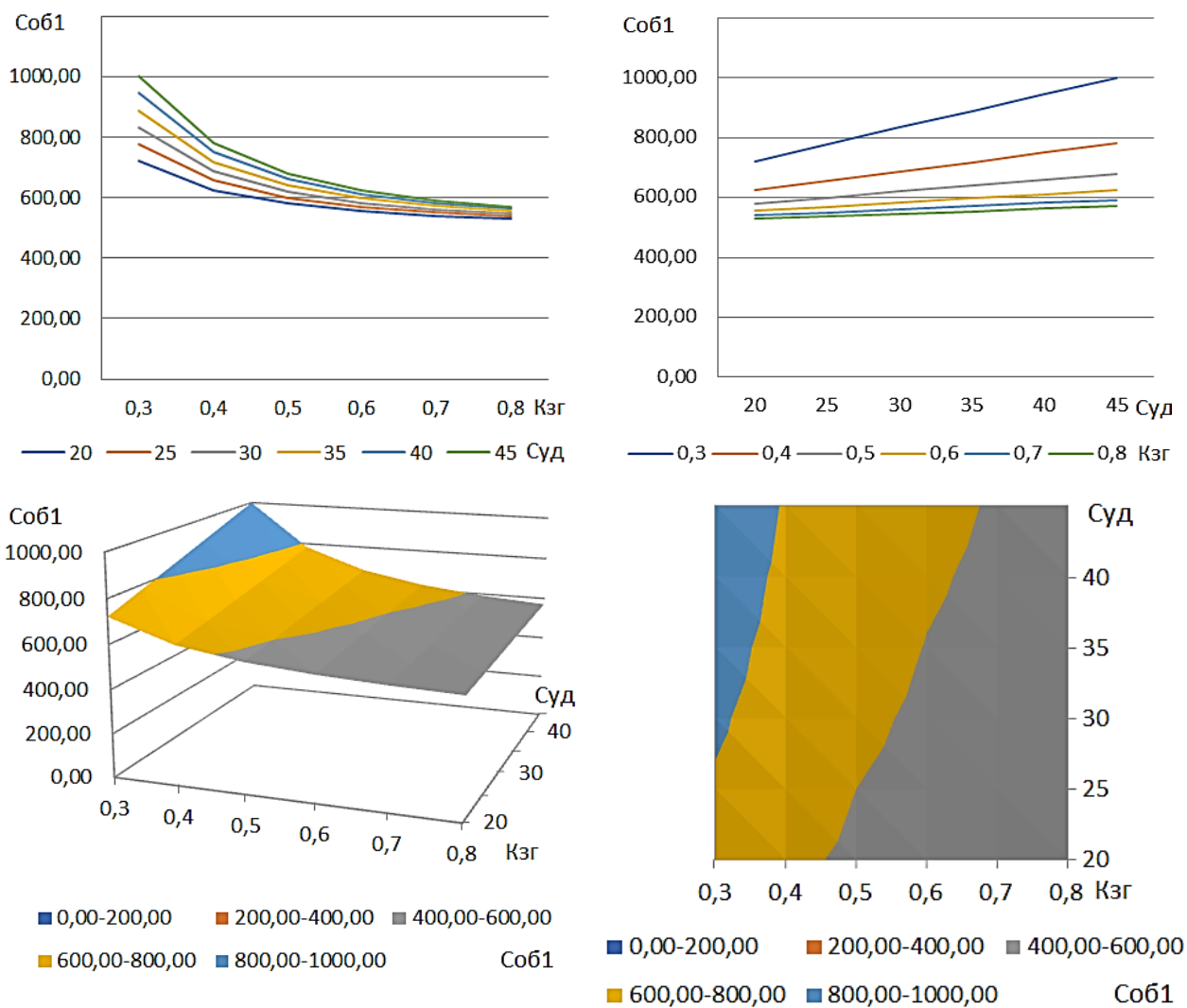


Рисунок 3 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля
 $\Delta C = 500$ руб.; $C_{уд} = 20 - 45$ руб./час; $K_{зг} = 0,3 - 0,8$

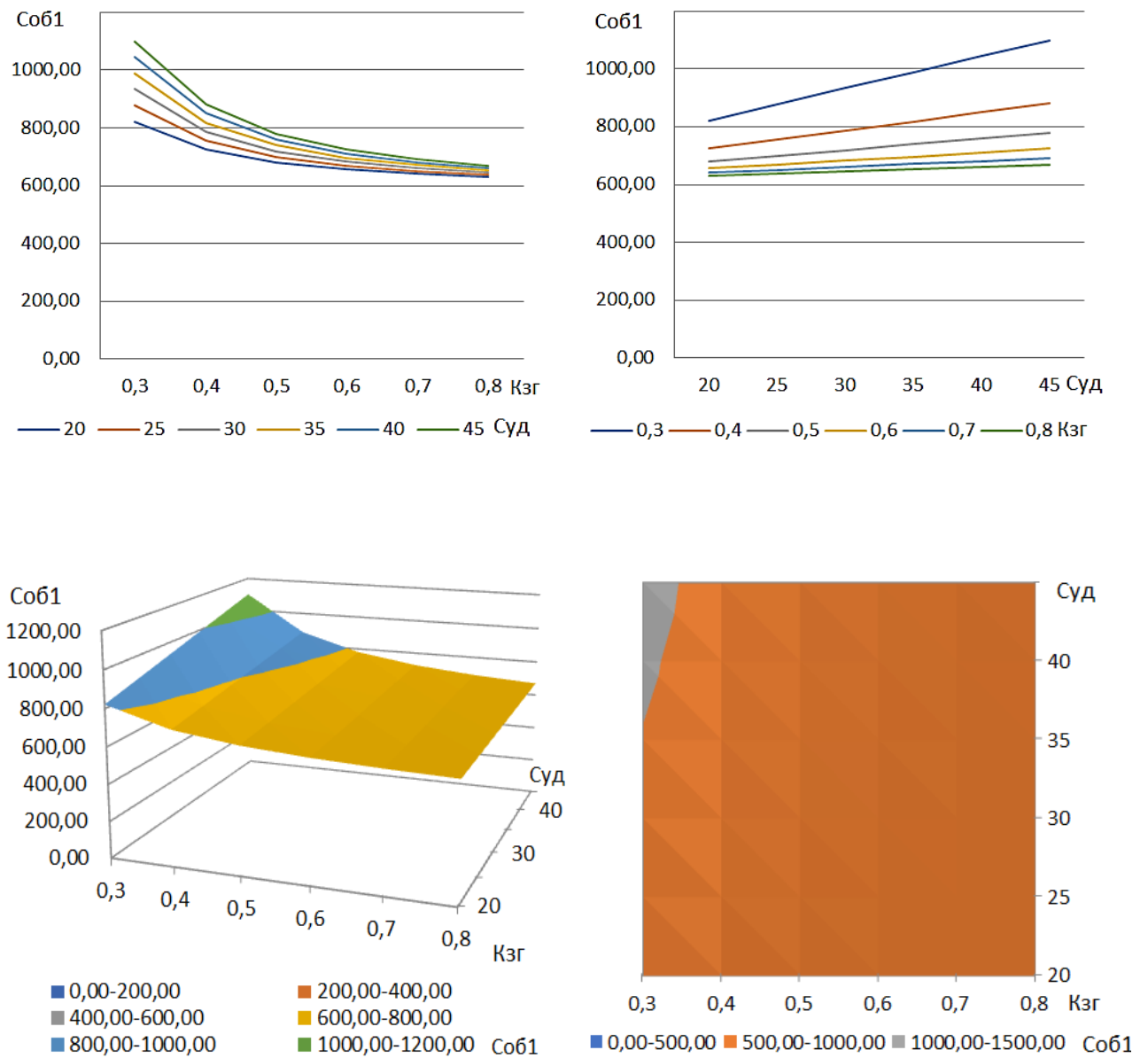


Рисунок 4 – Изменение величины затрат на переоборудование дизеля

$\Delta C = 600$ руб.; $C_{уд} = 20 - 45$ руб./час; $K_{3r} = 0,3 - 0,8$.

Стоимость комплектующих газового оборудования

№ пп	Наименование	Коли- чество	Производитель	Стоимость за единицу, руб.	Минималь- ная стоимость, руб	Максималь- ная стоимость, руб
1	Газовые баллоны для хранения сжатого природного газа, 50 л	4	Баллоны класса КПП-1 «MILLIY METAL SANOAT», Узбекистан	15000 – 22500	60000	90000
			Орский Машиностроительный Завод, Россия	15000 - 18700	60000	74800
			Первоуральский Новотрубный Завод КПП-1, Россия	9500 - 21779	38000	87116
			Уральский завод газового и противопожарного оборудования (УЗГПО), Россия	12000 - 15944	48000	63776
			Anhui (Китай)	22500	90000	90000
2	Вентили баллонные метановые	4	Tomasetto Achille SPA, Италия	3600		14400
			Алтайский завод агрегатов, Россия	2220 -	8800	
3	Трубка газовая стальная в оплетке для метана	8*1мм/ 6м	ОАО Новогрудский завод газовой аппаратуры (НЗГА), Россия	1850	1850	1850
4	Манометр для оценки количества газа в баллонах	1	CNGauge, Китай	700 - 920	700	920
5	Заправочное устройство для заправки баллонов газом	1	ОАО Новогрудский завод газовой аппаратуры (НЗГА), Россия; EMER, Италия	3650 - 4900	3650	4900
6	Электромагнитный клапан	1	ОАО Новогрудский завод газовой аппаратуры (НЗГА), Россия	1480	1480	1480
7	Редуктор метановый	1	Барнаульский аппаратно- механический завод – БМЗ)	7950 - 31500	7950	31500
			landi Renzo (Италия)	14400 - 39700	14400	39700
			LOVATO, Италия	8200 - 12650	8200	12650
8	Фильтр газовый	1	ОАО Новогрудский завод газовой аппаратуры (НЗГА), Россия	250 - 350	250	350
9	Дроссельная заслонка подачи газа	1	ОАО Новогрудский завод газовой аппаратуры (НЗГА), Россия	10000	10000	10000
10	Смеситель газовый	1	ОАО Новогрудский завод газовой аппаратуры (НЗГА), Россия	650-1500	650	1500
11	Переключатель вида топлива	1	ОАО Новогрудский завод газовой аппаратуры (НЗГА), Россия	970 - 2850	970	970
			DIGITRONIC, Италия	2850	2850	2850
					96380	157250

**Результаты лабораторных испытаний двигателей, работающих на
дизельном и газодизельном топливе при меняющейся интенсивности
нагрузки.**

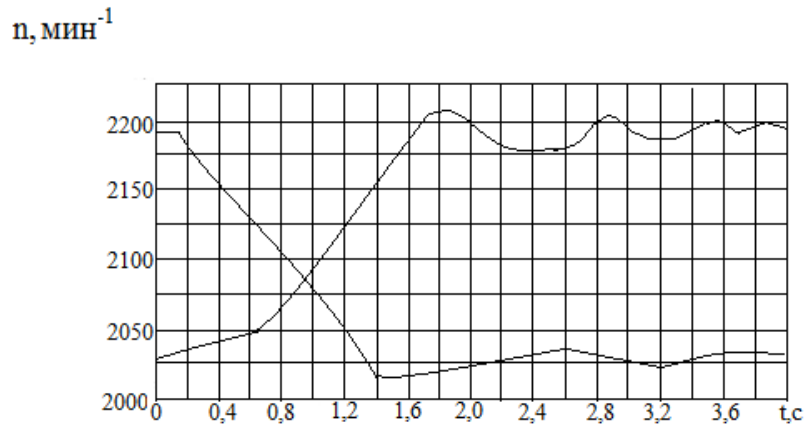


Рисунок 1 – Зависимость угловой скорости коленчатого вала двигателя от переходного режима [96].

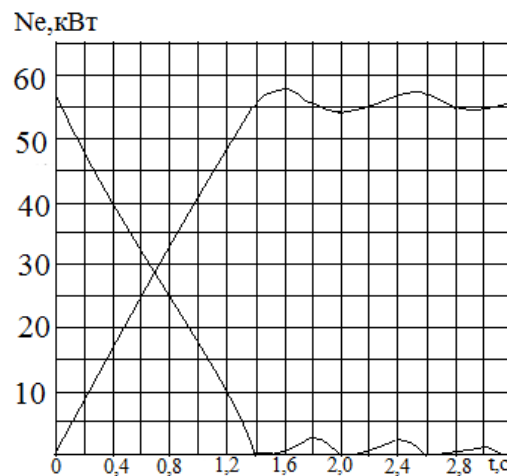


Рисунок 2 – Зависимость мощности двигателя от переходного режима [96].

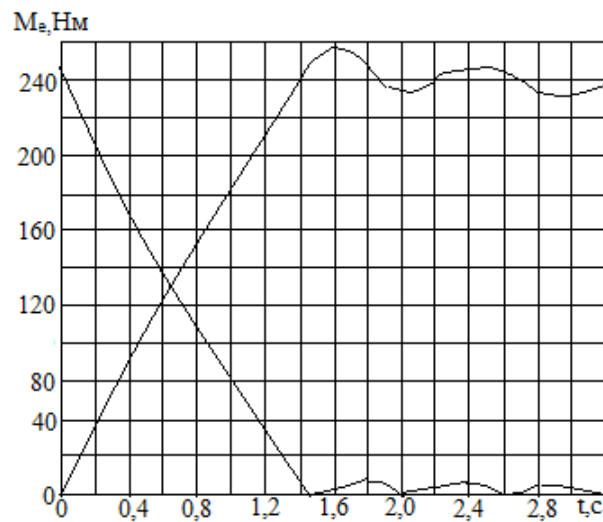


Рисунок 3 – Изменение крутящего момента на переходном режиме [96].

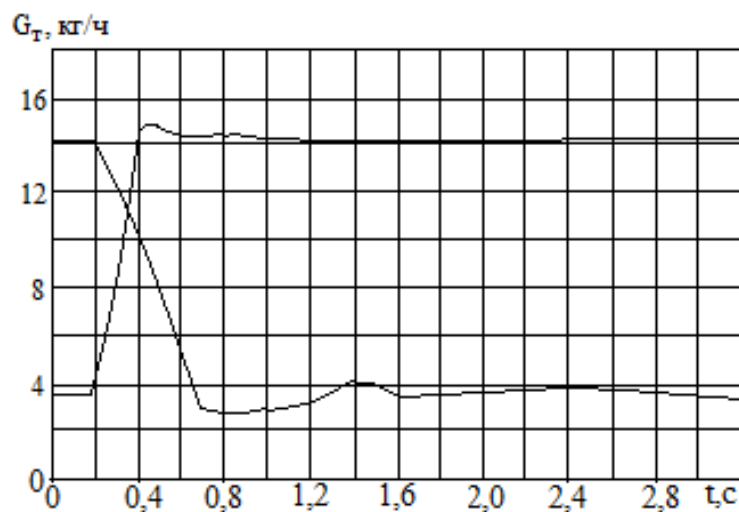


Рисунок 4 – Изменение часового расхода на переходном режиме [96].

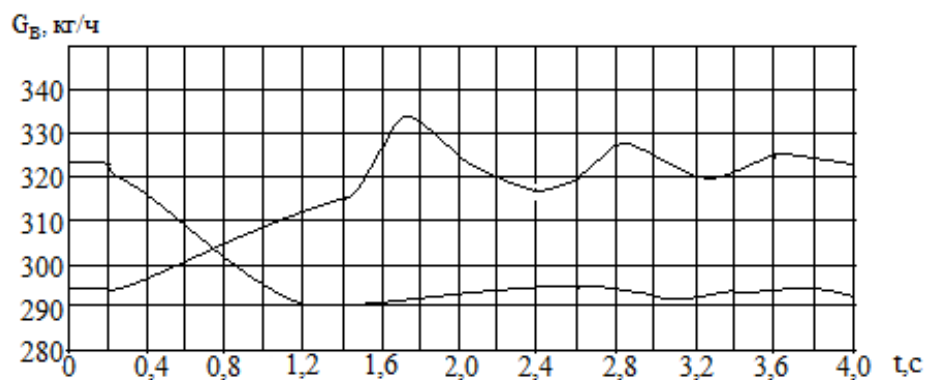


Рисунок 5 - Изменение часового расхода воздуха на переходном режиме [96].

Таблица 1 - Значения коэффициентов дифференциальных уравнений [96]

Коэффициент	Значение коэффициента для данного параметра, с			
	Угловая скорость коленчатого вала	Цикловая подача топлива	Часовой расход воздуха	Расход газа
Увеличение нагрузки				
T_1	0,58451	0,26375	0,52288	0,20307
T_2	0,45754	0,17046	0,38152	0,14427
Уменьшение нагрузки				
T_1	0,83040	1,02534	0,63419	0,43769
T_2	0,66008	0,24925	0,51454	0,33566

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Протокол испытания топливной аппаратуры двигателя №1

Наименование организации: ФГБОУ ВО Омский ГАУ.

Место испытаний: Лаборатория топливной аппаратуры.

Дата проведения опытов: 20.01.21г.

Марка двигателя: Д-240 (№ 849360).

Марка топливного насоса 4УТНИ-1111005-20.

Марка форсунки: ФД - 22

Наименование характеристики: Регуляторная характеристика топливного насоса
 Давление окружающего воздуха 735 мм. рт. ст. Температура окружающего воздуха 17°C.

Результаты снятия регуляторной характеристики топливного насоса

№ опыта	Частота вращения, мин ⁻¹	Подача топлива по секциям, мл					Кол-во циклов, n _ц	q _ц , мл/ц	δ, %
		V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	$\sum_{i=1}^4 V_i$			
1	600	37	38	36	37	37,0	500	0,249	5,4
2	700	38	39	39	38	38,5	500	0,259	2,6
3	800	39	38	38	37	38,0	500	0,255	5,3
4	900	38	38	39	38	38,25	500	0,257	2,6
5	1000	36	37	37	37	36,75	500	0,247	2,7
6	1100	35	36	36	35	35,5	500	0,239	2,8
7	1150	21	20	21	21	20,75	500	0,139	4,8
8	1200	5	5	5	4	4,75	500	0,032	21,1
9	1210	0	0	0	0	0	500	0	0

Содержание работ технического обслуживания

Таблица 1. Перечень операций, проводимых при ежедневном техническом обслуживании (ЕТО)

Содержание работ	Технические требования	Приборы, инструмент, принадлежности
Контрольный осмотр перед выездом		
Проверить крепление газовых баллонов и кронштейнов	Баллоны и кронштейны должны быть надежно закреплены	Ключи 17, 19 мм
Уход за трактором по окончании работы		
Очистить от пыли и грязи арматуру баллонов, агрегаты газового оборудования и составные части системы	Составные части газовой системы питания должны быть чистыми	Щетка
Проверить герметичность арматуры баллонов, трубопроводов и агрегатов газовой системы, особенно расположенных под капотом	Утечки газа не допустимы	Мыльная эмульсия
Поставить переключатель вида топлива в положение «Дизель», закрыть расходный вентиль, выключить питание.	Наличие давления газа в газовой системе не допускается	

Таблица 2. Перечень операций, проводимых при первом техническом обслуживании (ТО-1)

Содержание работ	Технические требования	Приборы, инструмент, принадлежности
Перед постановкой трактора на пост ТО проверить герметичность арматуры газовых баллонов и трубопроводов высокого давления	Тракторы, имеющие утечку газа через арматуру баллонов, на пост ТО не допускаются	Мыльная эмульсия
Закрывать магистральные вентили на баллонах, выработать газ из системы и закрыть расходный вентиль. Перевести двигатель в дизельный режим. Выполнить все работы ТО- 1 согласно «Руководства по эксплуатации» серийного трактора	Давление в системе не допускается	По манометру
Проверить состояние и крепление баллонов и кронштейнов	Ослабленные соединения подтянуть, поврежденные места окраски подкрасить	Ключи 14, 17, 19 мм; эмаль красная
Проверить состояние и крепление агрегатов газовой системы (расходного и наполнительного)	Ослабленные гайки и болты подтянуть, соединения трубопроводов надежно закрепить.	Ключи 8-22 мм.

Проверить герметичность газовой системы. Воздух или инертный газ подавать через наполнительный вентиль	Утечка из соединений системы, повреждения трубопроводов не допускаются. Трубопроводы не должны иметь вмятин, скручивания и других деформаций	Мыльная эмульсия
--	--	------------------

Таблица 3. Перечень операций, проводимых при втором техническом обслуживании (ТО-2)

Содержание работ	Технические требования	Приборы, инструмент, принадлежности
Выполнить работы относящиеся к ТО-1. Выполнить все работы ТО-2 согласно «Руководства по эксплуатации» базового трактора	См. таблицу ТО-1	См. таблицу ТО-1
Проверить состояние фильтрующего элемента РВД, герметичность клапана редуцирующего узла и толкатель, при необходимости отрегулировать давление на выходе РВД	Фильтр промыть, продуть или заменить новым. Продавливание, забоины, царапины полиамидного уплотнения клапана не допускаются. Разбирать и регулировать клапан следует в специализированной мастерской	Ключи 17-22 мм; растворитель No646
Проверить состояние элемента во входном штуцере редукторов-подогревателей	Фильтрующий элемент промыть, при необходимости, заменить новым	Емкость с керосином
Проверить и, при необходимости, отрегулировать давление в первой и второй ступенях редукторов-подогревателей		
Проверить работу указателя давления и его датчика	Неисправный прибор заменить	

Таблица 4. Перечень операций, проводимых при сезонном обслуживании (СО) при подготовке трактора к зимней эксплуатации.

Содержание работ	Технические требования	Приборы, инструмент, принадлежности.
Выполнить работы относящиеся к ТО-1	См. таблицу ТО-1	См. таблицу ТО-1
Снять и разобрать РВД, все детали промыть и продуть сжатым воздухом, негодные детали заменить новыми. Собрать РВД, отрегулировать рабочее давление срабатывания предохранительного клапана, проверить на герметичность	Все операции с редуктором следует выполнять в специализированной мастерской	
Снять с трактора газовый редуктор, разобрать, очистить, промыть. При необходимости заменить негодные детали, продуть сжатым воздухом, собрать, отрегулировать давление в первой и второй ступенях редуктора	Все операции с газовым редуктором выполняются в специализированном помещении квалифицированным персоналом	Ключи 14, 17, 22, 24,36,41 мм, ветошь, мыльная эмульсия, кисточка, отвертка, пассатижи, компрессор, манометры, ванна для мойки деталей
Проверить работу электромагнитных клапанов	Перемещение сердечника с запорным устройством должно быть без заеданий в любых положениях при Напряжении 10-15В	
Проверить газовый редуктор на герметичность		
Снять крышки магистральных, расходного и наполнительного вентилей (не вывертывая корпусов), осмотреть детали, негодные заменить	Вращение штоков по резьбе должно быть свободным, без заеданий	
Смазать резьбы штоков		Графитовая смазка
Перед указанными операциями газ из баллонов должен быть стравлен		
Продуть газопроводы сжатым воздухом или инертным газом	После установки всех узлов газовой системы отпрессовать систему	Компрессор
Снять ТНВД и форсунки с двигателя. Проверить и отрегулировать ТНВД с регулятором и механизмом ограничения запальной дозы		