



ЗАБОЛОТСКИХ ГЕОРГИЙ ЭДУАРДОВИЧ

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ
БИОМИНЕРАЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ**

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вятский государственный университет»

Научный руководитель: **Плотников Сергей Александрович** – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров

Официальные оппоненты: **Картошкин Александр Петрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург

Макаров Владимир Сергеевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные и дорожные машины»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина», г. Вологда

Защита диссертации состоится «01» июля 2025 года в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета У.2.4.7.36 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences.html> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат диссертации разослан "____" _____ 2025 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
У.2.4.7.36, д.т.н., доцент

Барсков Виктор Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В сложившейся внешней политической ситуации президент РФ неоднократно обращал внимание на экономическую, промышленную, продовольственную независимость России от других стран. 22 августа 2023 года на Заседании Совета по стратегическому развитию он призвал к укреплению технологического суверенитета нашей страны. Предпосылки для создания такового были заложены ранее, наиболее полное отражение они находят в актуальной на сегодняшний день Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 1734-р от 22.11.2008 г.

В этом документе определены рекомендации в области развития транспорта, особое внимание уделяется исследованиям в области альтернативных топлив. Среди прочего речь идет о доведении доли транспортных средств на альтернативных видах топлива в общем объеме грузоперевозок до 30 процентов.

Одним из направлений исследований ДВС может быть использование биоминеральных топливных смесей. Это приведет к увеличению многотопливности дизелей, приближению рабочих качеств биологических топлив к аналогичным качествам минерального топлива.

Связь с планами научных исследований.

Научные исследования, на основе которых подготовлена настоящая диссертация, были выполнены в Вятском государственном университете и Белорусской государственной сельскохозяйственной академии в 2021...2024 годах. Исследования выполнялись в соответствии с планами НИР ВятГУ и договором о научно-техническом сотрудничестве между ВятГУ и БГСХА № 1 от 01.01.2021.

Цель и задачи исследования.

Цель работы: Улучшение экологических показателей автотракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 путем применения биоминеральных топливных смесей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Теоретически обосновать и экспериментально подтвердить способ улучшения экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5, путем применения биоминеральных топливных смесей.

2. Разработать методику оценки седиментационной устойчивости и реологических свойств БМТС различного состава.

3. Усовершенствовать методику определения характеристик впрыскивания и распыливания биоминеральных топливных смесей.

4. Разработать методику расчета показателей фазы быстрого горения биоминеральных топливных смесей в дизеле.

5. Лабораторным и микроскопическим путем исследовать физико-химические свойства БМТС, стабильность БМТС, фракционный состав БМТС, предложить новые составы БМТС с улучшенными экологическими свойствами.

6. Экспериментально определить оптимальные регулировки системы питания дизеля, исследовать показатели процесса сгорания, эффективные и экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на БМТС.

7. Разработать программы расчета на ЭВМ максимального давления цикла, жесткости процесса сгорания, характеристик впрыскивания АТ и показателей ФБГ в цилиндре автотракторного дизеля при работе на БМТС.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден способ улучшения экологических показателей автотракторного дизеля путем применения биоминеральных топливных смесей.
2. Впервые разработана методика оценки седиментационной устойчивости и реологических свойств БМТС различного состава.
3. Усовершенствована методика определения характеристик впрыскивания и распыливания биоминеральных топливных смесей.
4. Впервые разработана методика расчета показателей фазы быстрого горения биоминеральных топливных смесей в дизеле.
5. Результаты лабораторных исследований реологических свойств БМТС, микроскопии, стабильности, результаты исследований фракционного состава БМТС, новые составы БМТС с улучшенными экологическими свойствами.
6. Определены оптимальные регулировки системы питания дизеля, получены показатели процесса сгорания, эффективные и экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на БМТС.
7. Программы расчета на ЭВМ максимального давления цикла, жесткости процесса сгорания, характеристик впрыскивания АТ, показателей фазы быстрого горения в цилиндре автотракторного дизеля при работе на БМТС.

Новизна предложенных решений подтверждена 1 патентом РФ на изобретение и 4 авторскими свидетельствами РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Объекты исследований: биоминеральные топливные смеси, дизель 4ЧН 11,0/12,5.

Предмет исследования: рабочий процесс двигателя, влияние биоминеральных топливных смесей на экологические показатели.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ улучшения экологических показателей автотракторного дизеля путем применения биоминеральных топливных смесей.
2. Методика оценки седиментационной устойчивости и реологических свойств БМТС различного состава.
3. Методика определения характеристик впрыскивания и распыливания биоминеральных топливных смесей.
4. Методика расчета показателей фазы быстрого горения биоминеральных топливных смесей в дизеле.
5. Новые составы БМТС с улучшенными экологическими свойствами.

Квалификационная формула работы. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основе проведенных исследований изложены положения, квалифицируемые как совокупность новых научно обоснованных технических решений, заключающихся в обосновании и улучшении экологических показателей автотракторного дизеля путем применения биоминеральных топливных смесей.

Предложен новый способ улучшения экологических показателей автотракторного дизеля путем применения новых составов БМТС. Использование данного способа позволяет влиять на рабочий процесс дизеля за счет изменения характеристик сгорания и тепловыделения топлива.

Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при совершенствовании рабочего процесса дизелей.

Практическая ценность. Результаты исследований позволяют существенно улучшить экологические показатели автотракторных дизелей, уже находящихся в эксплуатации, за счет применения БМТС. Разработанные методики оценки седиментационной устойчивости, реологических свойств и характеристик впрыскивания БМТС позволяют адаптировать существующие дизели к работе на альтернативных топливах без значительных конструктивных изменений. Программы для ЭВМ (зарегистрированные в Роспатенте) по расчету параметров сгорания, давления цикла и характеристик впрыскивания ускоряют процесс настройки двигателей под БМТС, сокращая затраты времени и средств на исследования. Технические решения апробированы на автотранспорте АО «Газпром газораспределение Киров», подтвердив их эффективность. Патент на биоминеральную смесь обеспечивает правовую защиту и возможность масштабирования технологии.

Материалы диссертации интегрированы в учебные программы ВятГУ и Белорусской ГСХА, формируя компетенции будущих инженеров в области экологически чистых технологий. Реализация результатов работы способствует переходу к устойчивому развитию транспорта и сельского хозяйства, снижая экологический ущерб и повышая экономическую эффективность предприятий.

Личный вклад автора. Автор выполнял работу самостоятельно, осуществлял планирование и проведение экспериментов, обобщал полученные результаты. Им в соавторстве подготовлены и опубликованы материалы диссертационных исследований, а также предложены технические и технологические разработки, защищенные охранными документами РФ.

Апробация работы. Основные результаты и материалы диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» в 2022-2024 гг., (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева); на Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации» в 2022 г. (г. Киров, ВятГУ); на Международной научно-практической конференции «Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства» в 2021-2024 гг. (г. Горки, БГСХА); на VI Международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения» в 2022 г. (г. Гродно, ГрГУ им. Янки Купалы); на Международной научно-практической конференции «Автомобиле- и тракторостроение» в 2023-2024 гг. (г. Минск, БНТУ); на Международной научной конференции студентов и магистрантов «Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства» в 2024 г. (г. Горки, БГСХА).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 26 печатных работах, среди которых 3 публикации в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по искомой специальности, 3 публикации в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, 13 публикаций в сборниках конференций РИНЦ, получено 4 свидетельства РФ о регистрации программ для ЭВМ, а также 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, общие выводы, список сокращений, список литературы. Общий объём диссертации составляет 149 страниц, включая 124 страницы основного текста, 43 рисунка, 11 таблиц. Список литературы включает 131 наименование, в том числе 19 на иностранных языках. В приложениях приведены документы, отражающие уровень практического использования результатов исследований, копии патентов, сертификатов, дипломов, авторских свидетельств.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы улучшения экологических показателей автотракторных дизелей, сформулированы научная новизна, цель, задачи, практическая ценность работы, основные положения и результаты исследований, выносимых на защиту.

В первой главе проведен обзор отечественных и зарубежных научно-исследовательских работ по применению биотоплив в ДВС. Рассмотрены вопросы дальнейшего улучшения их экологических показателей. Проанализированы известные конструктивно-технологические схемы по приготовлению и подаче смесей АТ в дизель. Отмечено, что данной проблеме посвящены исследования Бирюкова А.Л., Данилова А.М., Девянина С. Н., Захарова Л. А., Камфера Г. М., Карташевича А. Н., Картошкина А. П., Маркова В.А., Николаенко А. В., Плотникова С. А., Ложкина В. Н., Галышева Ю. В., Кавтарадзе Р. З., Патрахальцева Н. Н., Смольникова М.В. и других ученых.

Тем не менее, недостаточно работ по применению многокомпонентных составов АТ в ДВС, оценке их влияния на физико-механические свойства топлива, характеристики их топливоподачи, показатели процесса сгорания. Это означает, что выбранное направление – улучшение экологических показателей автотракторного дизеля путем применения биоминеральных топливных смесей – является актуальной научной проблемой.

Во второй главе представлены теоретические предпосылки влияния биоминеральных топливных смесей на работу дизеля.

При использовании в качестве моторного топлива биоминеральная топливная смесь обладает рядом улучшенных экологических свойств. В сравнении с работой дизеля на чистом ДТ уменьшается дымность ОГ и содержание твердого углерода, снижаются выбросы монооксида углерода и несгоревших углеводородов.

Дизельное топливо (ДТ) обладает важнейшими признаками, отличающими его от истинных растворов - гетерогенностью и дисперсностью. То есть, уже изначально, дизельное топливо – это простая топливная дисперсная система (ДС), включающая дисперсные фазы (ДФ) и дисперсионную среду (ДС) (Рисунок 1).

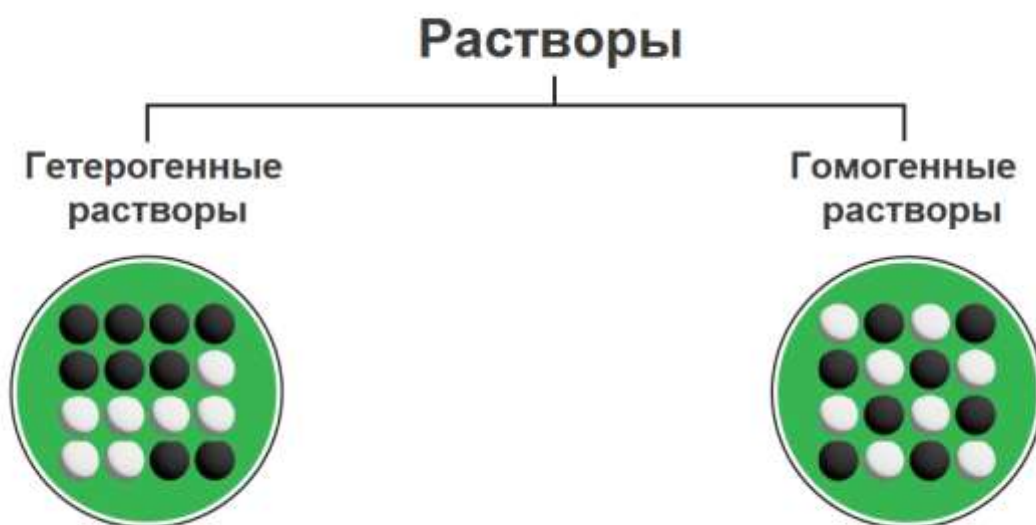


Рисунок 1 - Вид гетерогенных и гомогенных растворов

Дисперсная смесь из ДТ, сурепного масла (СурМ) и этанола (Э) в общем виде характеризуется, как микрогетерогенная грубодисперсная концентрированная эмульсия, причем, обратного типа - «вода в масле», у которой полярная ДФ находится в неполярной ДС.

Проведем оценку седиментационной устойчивости полидисперсных систем (БМТС различного состава) по величине значений гипсометрической высоты. В качестве стабилизатора используем катионоактивное поверхностно-активное вещество – сукцинимид С-5А. Для расчетов воспользуемся известной формулой:

$$\Delta h_{1/2} = RT \ln 2 / r g N_A (\rho - \rho_0), \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная;

T – температура системы, К;

r – радиус частицы, мм;

g – ускорение свободного падения;

N_A – число Авогадро;

ρ – плотность дисперсной фазы, кг/м³;

ρ_0 – плотность дисперсионной среды, кг/м³.

Тогда теоретическое значение гипсометрической высоты для БМТС-10 составит $\Delta h_{1/2} = 2,791 \times 10^{-19}$ м, а для БМТС-25 $\Delta h_{1/2} = 45,214 \times 10^{-19}$ м. Это означает, что с повышением доли сурепного масла и этанола от 10% до 25% относительная термодинамическая стабильность снижается в 16,2 раза. Очевидно, это связано с увеличением плотности дисперсной фазы и увеличением радиуса частиц.

Расчетные значения гипсометрической высоты при добавке 1,0% ПАВ для БМТС-10 составит $\Delta h_{1/2} = 1,935 \times 10^{-19}$ м, а для БМТС-25 $\Delta h_{1/2} = 6,579 \times 10^{-19}$ м. Как видно, добавка ПАВ уменьшает радиус частиц дисперсной фазы, что ведет к повышению относительной термодинамической стабильности составов БМТС.

Согласно современным представлениям реологии, в процессе коагуляции происходит взаимодействие коллоидных частиц с образованием пространственной структуры, характер которой и определяет реологические свойства системы - вязкость. В нашем случае вероятно возникновение структуры из частиц трехмерной фазы. А.Эйнштейном было показано, что введение в дисперсионную среду частиц дисперсной фазы в отсутствие их взаимодействия ведет к увеличению вязкости пропорционально объемной доле дисперсной фазы. Сама зависимость вязкости от концентрации дисперсной фазы описывается уравнением А. Эйнштейна:

$$\eta = \eta_0 \times (1 + \alpha \varphi), \quad (2)$$

где η_0 – вязкость дисперсионной среды;

φ – объемная доля дисперсной фазы, %;

α – коэффициент формы частиц, равный 2,5 для сферических частиц.

Расчеты показывают, что для БМТС-10 имеет место увеличение вязкости до $\eta = 3,05 \times 10^{-3}$ Па·с, то есть в 1,45 раза. Для БМТС-25 соответствующее значение вязкости составит $\eta = 6,2 \times 10^{-3}$ Па·с, то есть, рост в 4,1 раз.

Таким образом, в отсутствие взаимодействия частиц рассматриваемая дисперсная система ведет себя, как Ньютоновская жидкость, подчиняющаяся закону вязкого трения Ньютона таким образом, что касательное напряжение и градиент скорости в ней линейно зависимы, но, в нашем случае, она обладает несколько большей, по сравнению с дисперсионной средой, вязкостью.

Увеличение вязкости и изменение других физико-химических свойств БМТС в сравнении с аналогичными свойствами ДТ, несомненно, окажут свое влияние на характеристики впрыскивания и распыливания топлива.

При разработке модели процесса топливоподачи БМТС воспользуемся зависимостями, предложенными А.С. Лышевским и уточненными Н.Ф. Разлейцевым. Определим длину струи впрыскиваемого топлива l_T , угол распыливания φ и диаметр капель d_T для составов БМТС с использованием плотности топлива ρ_T , динамической вязкости η_T и поверхностного натяжения σ_T . У ДТ, этанола и су-репного масла возьмем справочные данные, у БМТС - из условий аддитивности.

Тогда изменение времени достижения струи впрыскиваемого топлива стенки камеры сгорания (КС) при переходе от ДТ к БМТС выразится, как:

$$\frac{\tau_{AT}}{\tau_{DT}} = \left(\frac{\rho_{AT}}{\rho_{DT}} \right)^{0.37} \cdot \left(\frac{\sigma_{AT}}{\sigma_{DT}} \right)^{0.37} \cdot \left(\frac{\eta_{AT}}{\eta_{DT}} \right)^{-0.32} \quad (3)$$

Относительное изменение диаметра капель распыливаемого топлива при переходе от ДТ к БМТС можно определить по выражению:

$$\frac{d_{kAT}}{d_{kDT}} = \left(\frac{\rho_{AT}}{\rho_{DT}} \right)^{0.4587} \cdot \left(\frac{\sigma_{AT}}{\sigma_{DT}} \right)^{0.1927} \cdot \left(\frac{\eta_{AT}}{\eta_{DT}} \right)^{0.1466} \quad (4)$$

И, наконец, относительное изменение угла раскрытия топливной струи при переходе от ДТ к БМТС определится, как:

$$\frac{tg\left(\frac{\gamma_{AT}}{2}\right)}{tg\left(\frac{\gamma_{DT}}{2}\right)} = \left(\frac{\rho_{AT}}{\rho_{DT}} \right)^{-0.75} \cdot \left(\frac{\sigma_{AT}}{\sigma_{DT}} \right)^{-0.25} \cdot \left(\frac{\eta_{AT}}{\eta_{DT}} \right)^{-0.14} \quad (5)$$

Таблица 1 – Влияние свойств БМТС на характеристики топливоподачи

Показатель	БМТС-10	БМТС-25
1. Относительное изменение времени впрыскивания топлива $\tau_{S AT} / \tau_{S DT}$	0,88	0,71
2. Относительное изменение диаметра капель впрыскиваемого топлива $d_{k AT} / d_{k DT}$	1,06	1,17
3. Относительное изменение угла распыляемого топлива $\gamma_{AT} / \gamma_{DT}$	0,95	0,86

Как видно, для БМТС в сравнении с аналогичными величинами для ДТ, уменьшается время достижения струи стенки КС. Это влечет снижение количества испарившегося топлива в объеме КС и снижение «жесткости» работы дизеля.

При применении БМТС-10 средний диаметр капли топлива увеличивается в 1,06 раза по сравнению с ДТ, а при применении БМТС-25 - в 1,17 раза. Это может вызвать ухудшение процессов их испарения и смесеобразования. Рост диаметра капель вызовет также увеличение дальнобойности струи топлива, что несколько компенсирует ухудшение процессов испарения и смесеобразования капель БМТС.

При впрыскивании в цилиндр двигателя БМТС, угол раскрытия струи топлива и ее боковая поверхность несколько уменьшаются; для БМТС-10 он умень-

шается в 0,95 раза, для БМТС-25 – в 0,86 раза. Это должно вызвать уменьшение количества испарившегося топлива за ПЗВ и более «мягкую» работу двигателя.

Установлено, что добавление к базовому топливу двух компонентов - высококорреакционного и высококалорийного топлива - повышает энергетические характеристики смеси - снижает длительность ПЗВ. Учитывая, что физико-химические свойства смеси этанола с растительным маслом приблизительно соответствуют свойствам бензина, для расчета параметров фазы быстрого горения (ФБГ) используем зависимости, справедливые для случая подачи в цилиндры дизеля ДТ с бензином, но с учетом характерных особенностей БМТС.

Для максимального давления цикла:

$$P_z = P_c + 1,8 \times 10^{-4} \times (m_{v,i} \times H_u + q_{u,эм} \times H_{u,эм} + q_{u,СурМ} \times H_{u,СурМ}) / V_c \quad (6)$$

Для максимальной и средней скорости нарастания давления:

$$\left(\frac{dp}{d\varphi} \right)_{max} = \frac{1,5 \cdot n \cdot 10^{-3}}{(\sqrt{K_T} \cdot d_{20,Э}^{20})} \cdot P_z \cdot P' \cdot \left(\frac{m_{v,i}}{q_{ц}} \cdot \frac{1 + q_{ц,БИО} / (q_{ц} \cdot \alpha)}{1 + q_{ц,БИО} / q_{ц}} \cdot \frac{100}{ЦЧ_{\Sigma}} \right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{\Delta p}{d\varphi} \right)_{cp} = (P_z - P'_c) \cdot (\varphi_z + \Theta_{впр}^p - \varphi_i) \quad (8)$$

Для угла достижения максимального давления цикла:

$$\varphi_z = \Theta_{впр}^p + \left(\frac{ЦЧ_{\Sigma}}{100} \right) \cdot d_{20,Э}^{20} \cdot \varphi_{впр} \quad (9)$$

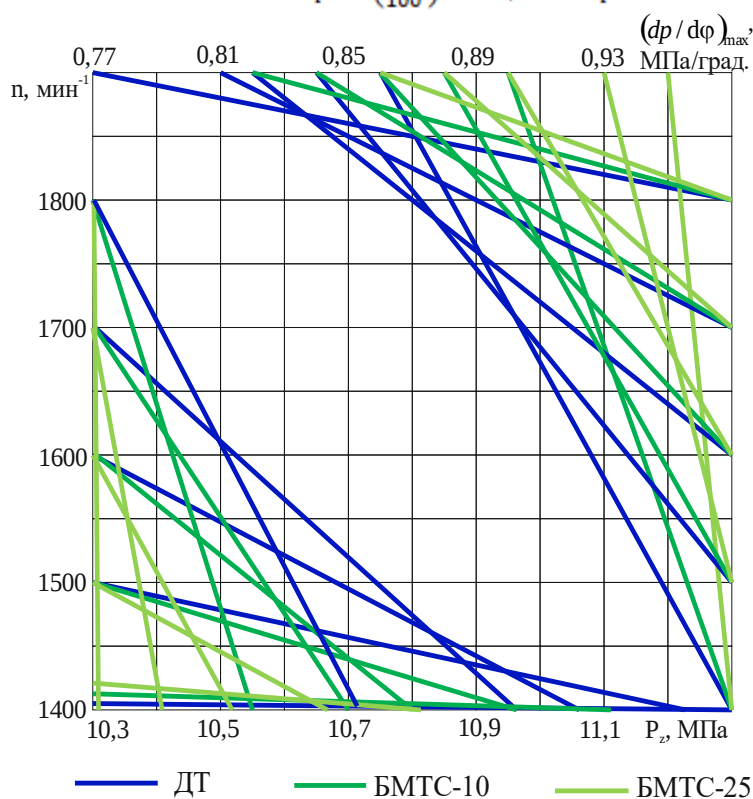


Рисунок 2 - Показатели ФБГ в дизеле при работе на БМТС

Максимальное значение давления цикла P_z при работе дизеля на БМТС изменяется незначительно, жесткость работы дизеля повышается на 6% и 12%, угол φ_z увеличивается вместе с ростом биотоплива в смеси и составляет 27 градусов для чистого ДТ, 30 градусов для БМТС-10 и 29 градусов для БМТС-25.

В третьей главе изложены методики исследований. На первом этапе проводились исследования физико-химических свойств БМТС различного состава. Разрабатывались новые составы БМТС (Рисунок 3).

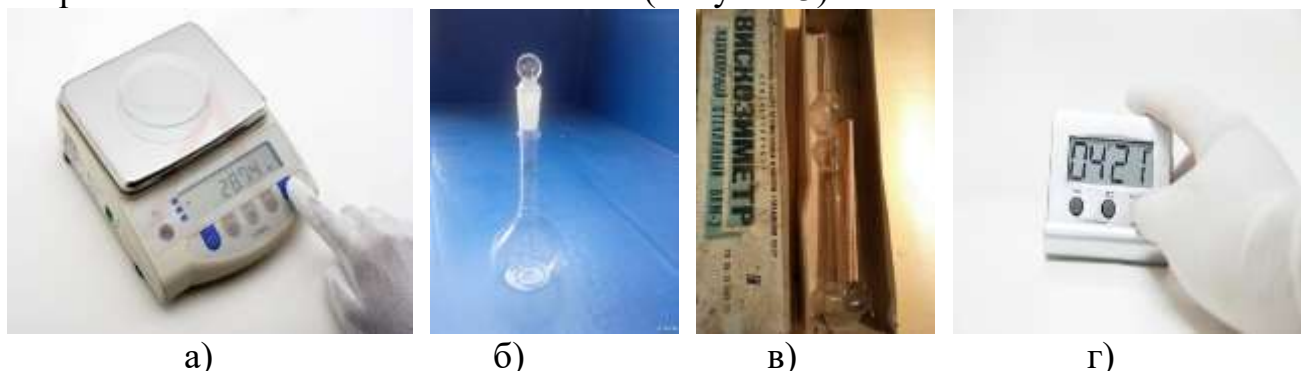


Рисунок 3 – Приборы для оценки физико-химических свойств БМТС: весы лабораторные VIBRAAJH-620CE (а); пикнометр ПЖ2-10-КШ 7/16 (б); вискозиметр ВПЖ-2 (в); электронный секундомер ТЛ-301 (г)

На втором этапе проводилась микроскопия наиболее пригодных по физико-химическим свойствам образцов смесевых топлив. Целью исследования было наблюдение за динамикой изменения величины капель дисперсной фазы образцов БМТС во времени без добавления сукцинимидной присадки С-5А и с таковой.

На третьем этапе исследовался фракционный состав БМТС для оценки соответствия среднего содержания составу товарному ДТ (Рисунок 4,а).

Целью четвертого этапа явилось исследование параметров рабочего процесса дизеля, его эффективных и экологических показателей на основных режимах при работе на БМТС. Рабочий процесс дизеля исследовался путем индицирования. В испытаниях использовался нагрузочный электродвигательный стенд RAPIDO SAK N670 с балансирной маятниковой машиной (Рисунок 4, б,в).



Рисунок 4 – Экспериментальные установки: прибор для определения фракционного состава (а); стенд RAPIDO SAK N670 (б); датчик динамического давления PS-01 (в)

При исследовании рабочего процесса путем индицирования использовались: датчик динамического давления PS-01 с пьезокварцевым чувствительным элементом и датчик индуктивного типа – отметчик положения поршня в цилиндре двигателя в положении ВМТ. Датчик PS-01 устанавливался в КС (Рисунок 4,в).

В четвертой главе представлены результаты лабораторных и стендовых исследований. В таблице 2 показаны данные физико-химических свойств БМТС.

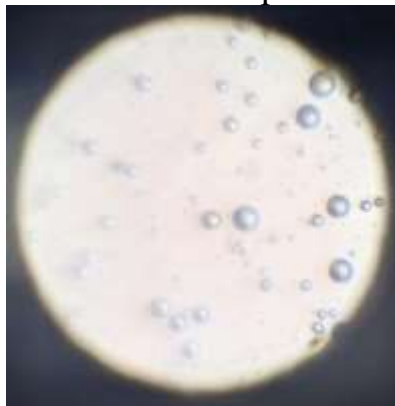
Таблица 2 – Данные физико-химических свойств БМТС

ДТ, %	СурМ, %	Э, %	ν , сСт			ρ , г/см ³			T , мин		
			б/п	0,5% С-5А	1,0% С-5А	б/п	0,5% С-5А	1,0% С-5А	б/п	0,5% С-5А	1,0% С-5А
90	5	5	3,25	3,32	3,25	0,82	0,82	0,82	>75	78	66
80	10	10	3,84	3,86	3,72	0,81	0,82	0,82	>75	60	52
70	15	15	4,64	4,56	4,44	0,82	0,82	0,83	40	40	33
60	20	20	5,6	5,85	5,66	0,82	0,83	0,83	7	16	18
50	25	25	7,13	7,16	7,47	0,83	0,83	0,83	4,7	11	15

На основе лабораторных исследований удалось разработать два новых состава смесей - БМТС-10 и БМТС-25 (10 % и 25% содержания сурепного масла и этанола в смеси). Эти составы БМТС имеют близкие к ДТ физико-химические свойства и максимальное время стабильности.

После исследований физико-химических свойств БМТС проводилась микроскопия наиболее пригодных к применению образцов смесевых топлив.

Рисунок 5,а показывает, что после 3 минут наблюдения за образцом БМТС-10 начинается видимое слияние капель ДФ (коалесценция). Видно большое количество мелких пузырей ДФ (этанола) со средним диаметром $d_{к(ср)} \approx 0,27$ мм. После добавления в состав 1% (масс.) присадки С-5А и такого же времени ожидания отмечено снижение количества пузырей в видимой области и увеличение их среднего диаметра до $d_{к(ср)} \approx 0,44$ мм (Рисунок 5,б). Таким образом, внесение присадки для БМТС-10 ведет к преждевременному началу коалесценции, увеличивая гетерогенность смеси и снижая время стабильности.



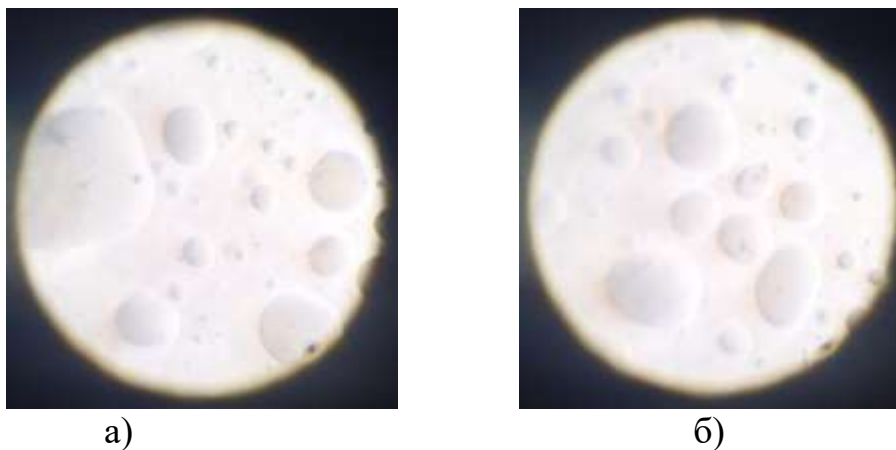
а)



б)

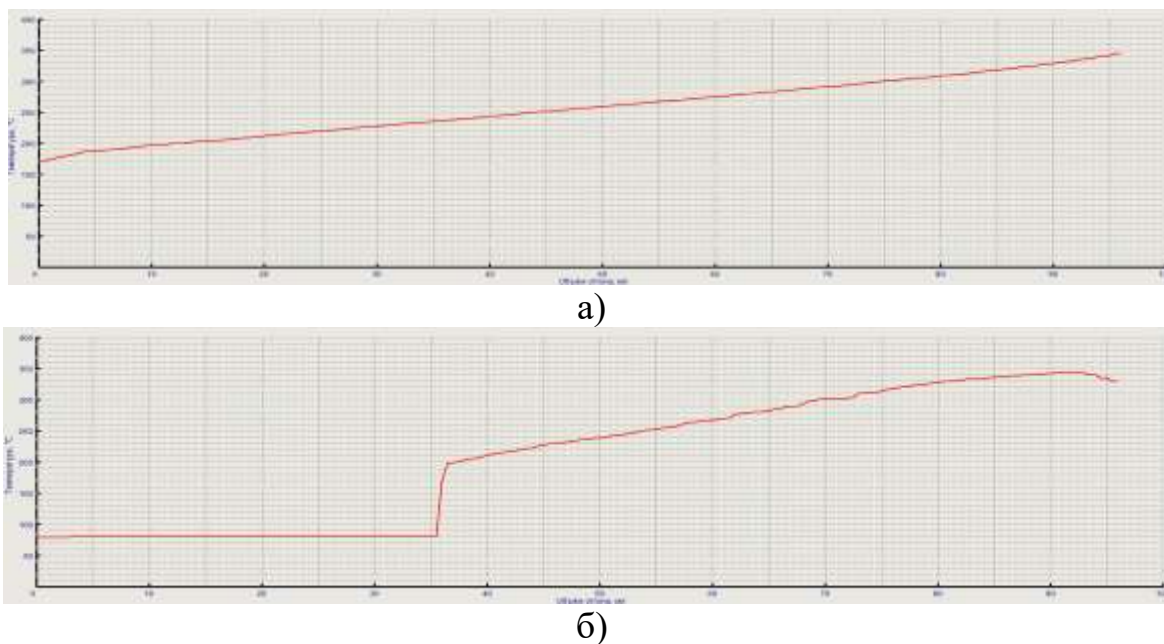
Рисунок 5 – БМТС-10: без присадки (а); с 1 % присадки С-5А (б)

Для БМТС-25 видимая коалесценция пузырей ДФ началось спустя 50 секунд наблюдения. Видны крупные пузыри со средним диаметром $d_{к(ср)} \approx 0,94$ мм. После добавления в образец 1% (масс.) присадки и ожидания в течение 50 секунд (Рисунок 6,б) замечено большое количество пузырей с меньшим диаметром, среднее значение которого составляет $d_{к(ср)} \approx 0,68$ мм.



а) б)
Рисунок 6 – БМТС-25: без присадки (а); с 1 % присадки С-5А (б)

Микроскопия БМТС показывает, что присадка С-5А оказывает положительное влияние на стабильность БМТС-25, на что указывает снижение среднего диаметра пузырей ДФ в 1,4 раза. Для БМТС-10 присадка дает обратный эффект, снижая стабильность так, что средний диаметр капель увеличивается в 1,6 раза.



а) б)
Рисунок 7 - Зависимости температуры кипения от количества отогнанного продукта (скриншот из программы): для ДТ (а); для БМТС (б)

Оценка испаряемости ДТ (Рисунок 7,а) показала, что начало кипения ДТ начинается при $t_{k(min)}=170\text{ }^{\circ}\text{C}$, а заканчивается при $t_{k(max)}=340\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зависимость имеет правильный линейный характер, что указывает на равномерность его испарения. Средняя температура кипения, таким образом составляет $t_{k(ср)}=255\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рисунок 7,б представляет собой процесс фракционной перегонки БМТС. Компоненты испаряются неравномерно. Первым начинает испаряться Э ($t_k=79\text{ }^{\circ}\text{C}$), затем испаряется ДТ при $t_k=200\ldots 340\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве самой тяжелой фракции выступает СурМ ($t_k=345\text{ }^{\circ}\text{C}$). Таким образом средняя температура кипения биологических компонентов (Э и СурМ) составляет $t_{ck}=212\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя температура кипения БМТС, в целом, $t_{ck(БМТС)} = 233,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приближается к значениям ДТ.

Оценка влияния БМТС на значения оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива производилась на основе анализа регулировочных характеристик (Рисунок 8).

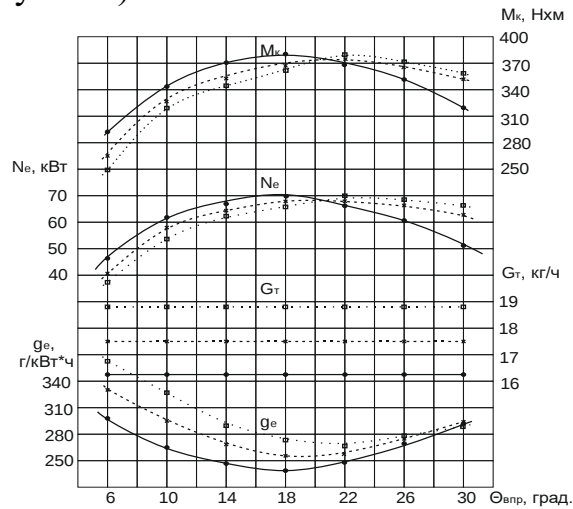


Рисунок 8 – Регулировочные характеристики дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$: $\circ$ — $\circ$ дизельное топливо; $\times$ — $\times$ БМТС-10; $\square$ — $\square$ БМТС-25.

Видно, что при работе дизеля на чистом ДТ оптимальным углом опережения впрыскивания топлива является $\theta_{впр}=18^\circ$. При этом самое низкое значение $g_e=228,4 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ и самое высокое значение $N_{\text{emax}} = 70,2 \text{ кВт}$. При работе дизеля на БМТС-10, максимальные значения эффективной мощности и крутящего момента достигаются при $\theta_{впр}=20^\circ$, минимум удельного эффективного расхода топлива равен $g_{e \text{ БМТС-10}}=261,4 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$. При работе на БМТС-25 значение оптимального угла смещается до $\theta_{впр} = 22^\circ$. При этом значении $g_e = 268,7 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$.

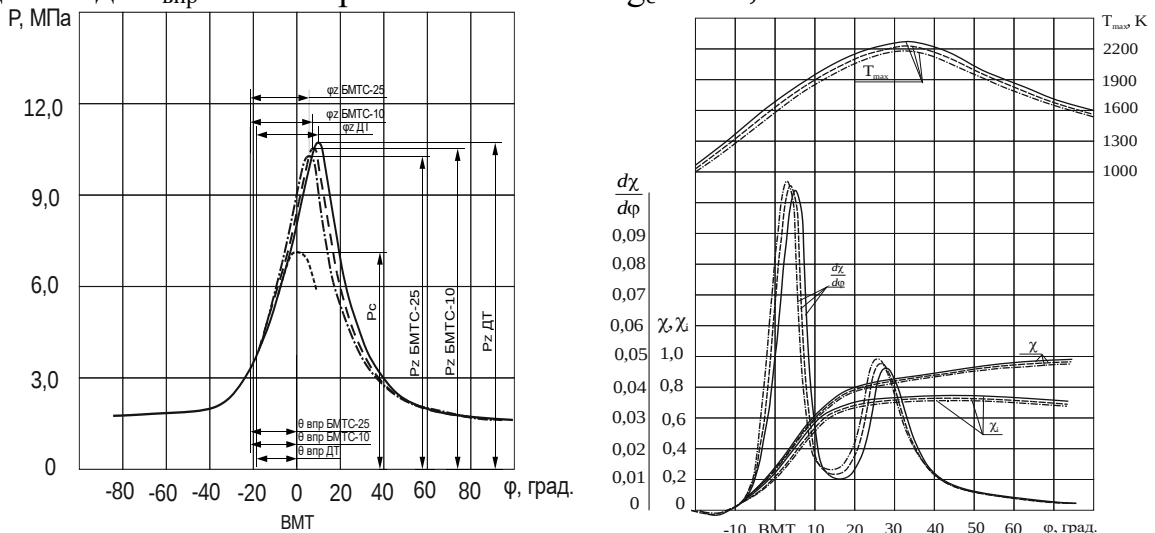


Рисунок 9 – Совмещенные индикаторные диаграммы (а) и характеристики тепловыделения (б) дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$
— ДТ; ---- БМТС-10; -.-.- БМТС-25

Анализ индикаторных диаграмм (Рисунок 9) показывает, что рост количества Э и СурМ в БМТС ведёт к некоторому снижению максимального давления цикла P_z . Так, $P_{z \text{ ДТ}} = 10,658 \text{ МПа}$, $P_{z \text{ БМТС-10}} = 10,507 \text{ МПа}$, $P_{z \text{ БМТС-25}} = 10,262 \text{ МПа}$. Однако, достижение максимального давления цикла P_z для БМТС начинается

раньше, значения угла значения равны: $\varphi_z \text{ ДТ} = 27$ град., $\varphi_z \text{ БМТС-10} = 30$ град., $\varphi_z \text{ БМТС-25} = 29$ град. Это позволяет сохранить энергоэффективность процесса сгорания.

Расчеты показывают, что работа дизеля на БМТС сопровождается незначительным повышением жесткости работы: $(dp/d\varphi)_{\text{ДТ}} = 0,77$ МПа/град., $(dp/d\varphi)_{\text{БМТС-10}} = 0,82$ МПа/град., $(dp/d\varphi)_{\text{ДТ}} = 0,86$ МПа/град.

Характер кривых выделения теплоты χ и активного тепловыделения χ_i свидетельствует о том, что сгорание БМТС начинается раньше чем ДТ (Рисунок 9,б). Вначале имеет место рост скорости тепловыделения $(d\chi/d\varphi)_{\text{max ДТ}} = 0,104$, $(d\chi/d\varphi)_{\text{max БМТС-10}} = 0,106$, $(d\chi/d\varphi)_{\text{max БМТС-25}} = 0,108$. Затем заметно замедление горения до значений близких к ДТ, вероятно, из-за присутствия в смеси СурМ.

Применение БМТС ведет к снижению максимальной температуры цикла T_{max} на 50 ... 100 градусов, что позволяет снизить теплонапряжённость, а, значит, повысить надежность и долговечность двигателя

Влияние новых составов БМТС на эффективные показатели работы дизеля оценивалось по нагрузочным характеристикам, снятым на номинальном скоростном режиме 1800 мин^{-1} и на частоте вращения 1400 мин^{-1} (Рисунок 10).

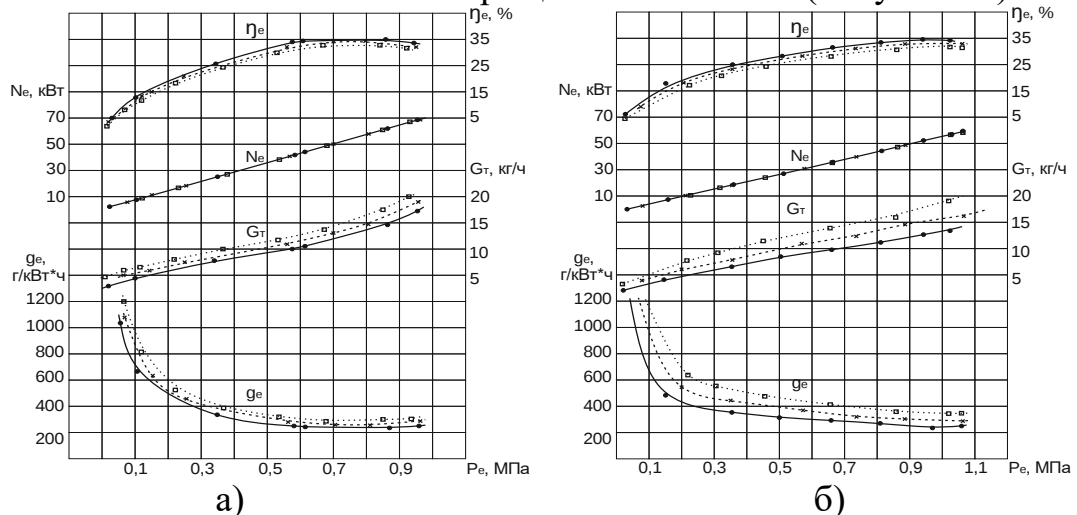


Рисунок 10 – Нагрузочные характеристики дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ (а), при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ (б):

○ — дизельное топливо; × — — × БМТС-10; □ — — — □ БМТС-25

Как видно, во всём диапазоне изменения нагрузки растёт суммарный часовой расход топлива при работе на БМТС, а расход самого ДТ уменьшается.

Так, при работе дизеля $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ на нагрузке $p_{e \text{ min}} = 0,02$ МПа суммарный часовой расход топлива равен $G_{\text{ДТ}}=3,3$ кг/ч, $G_{\text{БМТС-10}} = 3,9$ кг/ч, $G_{\text{БМТС-25}} = 4,2$ кг/ч. При нагрузке $p_e = 0,95$ МПа он возрастал и составил $G_{\text{ДТ}}=17,1$ кг/ч, $G_{\text{БМТС-10}} = 19$ кг/ч, $G_{\text{БМТС-25}} = 20$ кг/ч. Экономия же самого ДТ составила 11,1% и 41,5%.

При работе дизеля на частоте $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ часовой расход топлива для ДТ, БМТС-10, БМТС-25 составлял 15 кг/ч, 17,15 кг/ч и 18,4 кг/ч, соответственно. При этом экономия ДТ составляла 8,6% для случая БМТС-10 и 38,7% для случая БМТС-25, соответственно. Показатели эффективного КПД при работе на БМТС также близки к соответствующим значениям при работе дизеля на чистом ДТ.

Из графиков скоростных характеристик видно, что работа дизеля на БМТС не меняет его эффективных показателей (Рисунок 11).

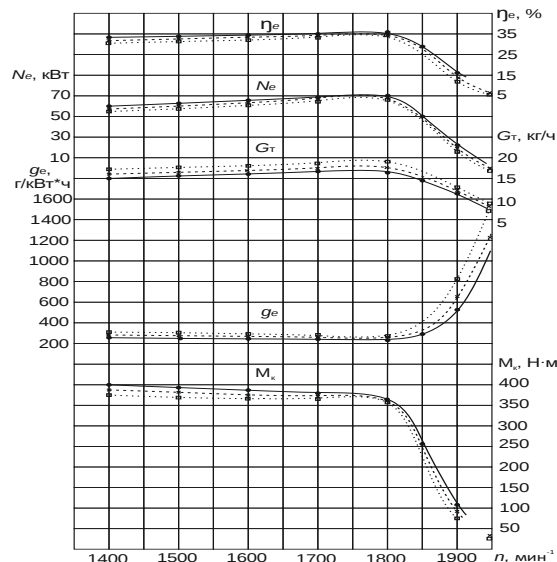


Рисунок 11 – Скоростные характеристики дизеля 4ЧН 11,0/12,5:
 ○—○ дизельное топливо; ✕ – ✕ БМТС-10; ■ – ■ БМТС-25

Часовой расход самого ДТ при работе на БМТС снижается во всём диапазоне частот вращения. Так, при частоте вращения $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ $G_{\text{Т(ДТ)}} = 15 \text{ кг/ч}$, $G_{\text{Т(БМТС-10)}} = 15,9 \text{ кг/ч}$, $G_{\text{Т(БМТС-25)}} = 17,1 \text{ кг/ч}$ (экономия ДТ равна 15...43 %), а при частоте вращения при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ $G_{\text{Т(ДТ)}} = 16,4 \text{ кг/ч}$, $G_{\text{Т(БМТС-10)}} = 17,6 \text{ кг/ч}$, $G_{\text{Т(БМТС-25)}} = 18,9 \text{ кг/ч}$ (экономия ДТ равна 14...42 %).

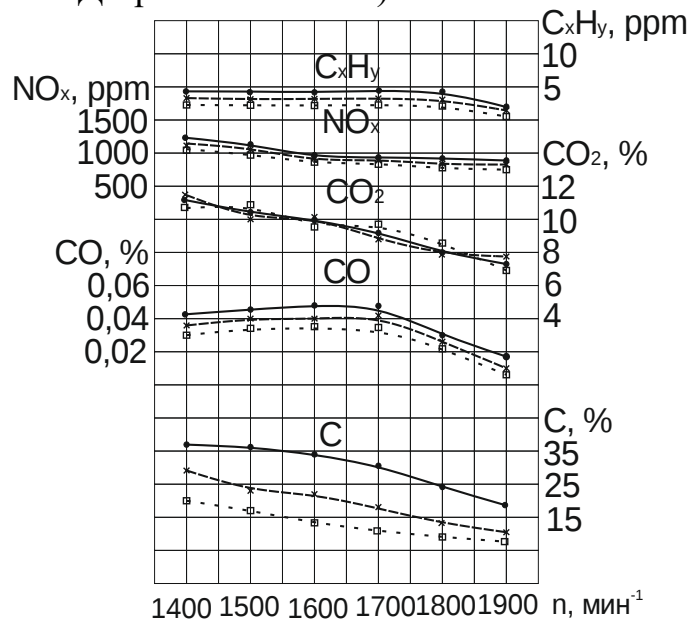


Рисунок 12 – Экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5:
 ○—○ дизельное топливо; ✕ – ✕ БМТС-10; ■ – ■ БМТС-25

Измерение экологических показателей дизеля проводилось согласно ГОСТ 18509-88. Результаты представлены на графике (Рисунок 12).

Анализ экологических показателей показывает, что работа дизеля на БМТС-10 и БМТС-25 в номинальном режиме позволяет снизить выбросы сажи в ОГ на 41...62%, оксидов азота на 6...16%, суммарных углеводородов C_xH_y на 20...40%, монооксида углерода на 33%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден способ улучшения экологических показателей автотракторного дизеля путем применения биоминеральных топливных смесей.

Разработаны рекомендации по применению биоминеральных топливных смесей в автотракторных дизелях.

2. Разработана методика оценки седиментационной устойчивости и реологических свойств БМТС различного состава. Установлено, что для БМТС-10 значения гипсометрической высоты равны $\Delta h_{1/2} = 1,935 \times 10^{-19}$ м, а для БМТС-25 $\Delta h_{1/2} = 6,579 \times 10^{-19}$ м, соответственно. Установлено, что для БМТС-10 значение вязкости равно $\eta = 3,05 \times 10^{-3}$ Па $\times$ с, а для БМТС-25 $\eta = 6,2 \times 10^{-3}$ Па $\times$ с

3. Усовершенствована методика определения характеристик впрыскивания и распыливания биоминеральных топливных смесей. Установлено, что для БМТС-10 по отношению к ДТ изменение времени впрыскивания составляет 0,88, изменение диаметра капель 1,06, изменение угла распыливания 0,95, а для БМТС-25 изменение времени впрыскивания составляет 0,71, изменение диаметра капель 1,17, изменение угла распыливания 0,86, соответственно.

4. Впервые разработана методика расчета показателей фазы быстрого горения биоминеральных топливных смесей в дизеле. Установлено, что применение БМТС-10 и БМТС-25 не вызывает заметного изменения максимального давления цикла P_z . При этом максимум P_z несколько смещается за ВМТ и составляет 27 градуса для чистого ДТ, 30 градуса для БМТС-10 и 29 градуса для БМТС-25. Максимальная и средняя скорость нарастания давления в цилиндре дизеля не превышают допустимых значений, установленных заводом-изготовителем.

5. Экспериментально установлено, что добавление 1% присадки С-5А вызывает снижение среднего диаметра частиц дисперсной фазы в 1,4 раза и увеличение времени стабильности, в среднем, на 5 минут.

Экспериментально установлено, что при добавке этанола и сурепного масла кинематическая вязкость и плотность БМТС изменяются прямо пропорционально.

Экспериментально установлено, что, в сравнении с ДТ, имеет место сокращение времени фракционной разгонки для БМТС в 0,92 раза.

Предложен новый состав БМТС (пат. РФ № 2827416) с улучшенными экологическими свойствами.

6. Экспериментально установлено, что оптимальным установочным углом опережения впрыскивания топлива при работе дизеля на чистом ДТ следует считать $\Theta_{впр} = 18^\circ$, а при работе на БМТС-10 и БМТС-25 $\Theta_{впр} = 22^\circ$.

Экспериментально установлено, что применение БМТС позволяет приблизить характер процесса их сгорания к характеру процесса сгорания чистого ДТ. Жесткость процесса сгорания составляет 0,77 МПа/градус для ДТ, 0,82 МПа/градус для БМТС-10 и 0,86 МПа/градус для БМТС-25.

Максимальное давление цикла составляет $P_z = 10,658$ МПа для ДТ, $P_{z10} = 10,507$ МПа для БМТС-10 и $P_{z25} = 10,262$ МПа для БМТС-25.

При частоте вращения 1800 мин^{-1} и работе на чистом ДТ максимальная температура цикла составляет $T_{\max} = 2286\text{К}$, при работе на БМТС-10 $T_{\max10} = 2241\text{К}$, а на БМТС-25, $T_{\max25} = 2149\text{К}$. То есть, применение БМТС на 50...100 градусов снижает максимальную температуру цикла, теплонапряженность деталей цилиндрико-поршневой группы, повышает надежность и долговечность дизеля.

Экспериментально установлено, что работа дизеля на БМТС-10 и БМТС-25 позволяет снизить часовой расход самого ДТ с 16,2 кг/ч до 13,9 кг/ч и 9,4 кг/ч, соответственно (на 14...42%).

Экспериментально установлено, что работа дизеля на БМТС-10 и БМТС-25 позволяет снизить выбросы сажи в ОГ на 41...62%, оксидов азота на 6...16%, суммарных углеводородов C_xH_y на 20...40%, монооксида углерода на 33%.

7. Разработаны программы расчета на ЭВМ максимального давления цикла, жесткости процесса сгорания, характеристик впрыскивания АТ и показателей ФБГ в цилиндре автотракторного дизеля (свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ №№ 2024613086, 2024613184, 2024686009, 2024686935).

Публикации с изложением основных положений диссертации:
Статьи в журналах из перечня ВАК по искомой специальности

1. Исследование эффективных показателей дизельного двигателя на режимах скоростной характеристики при работе на биоминеральных топливных смесях / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, Г. Э. Заболотских, Ю. А. Плотникова // Двигателестроение. – 2024. – № 3(297). – С. 83-91. – EDN FAXEQE.

2. Плотников, С. А. Определение рациональных регулировок топливоподающей аппаратуры дизеля при работе на биоминеральных топливных смесях / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, Г. Э. Заболотских // Грузовик. – 2024. – № 2. – С. 16-20. – DOI 10.36652/1684-1298-2024-2-16-20. – EDN UQCUPO.

3. Расчет периода задержки воспламенения при работе тракторного двигателя на смесях дизельного топлива с сурепным маслом / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, Р. С. Даргель [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 10(775). – С. 96-104. – EDN LWTBGL.

Статьи в журналах из перечня ВАК

4. Исследование свойств новых топлив для автотракторной техники / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских, П. Я. Кантор, М. Н. Втюрина // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 117-125. – DOI 10.36508/RSATU.2022.92.31.014. – EDN JIDORK.

5. Определение сажевыделения в дизеле при работе на смесях дизельного топлива с сурепным маслом / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, Р. С. Даргель [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. – 2024. – № 4(106). – С. 18-28. – EDN QUWKGX.

6. Плотников, С. А. Влияние нагрузки при работе дизеля на биоминеральных топливных смесях / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, Г. Э. Заболотских // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 2(98). – С. 104-109. – EDN EBFSYS.

Статьи в изданиях, рецензируемых базами SCOPUS и Web of Science

7. Плотников, С.А. Исследование составов и способов подачи новых топлив с добавками сурепного масла в дизель / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, Г. Э. Заболотских // Инженерные технологии и системы. – 2023. – Т. 33, № 1. С.100-113. – DOI 10.15507/2658-4123.033.202301.100-113. – EDN VCTHUW.

8. Плотников, С. А. Исследование экологических показателей работы дизеля на биоминеральных топливных смесях / С. А. Плотников, А. Н.

Карташевич, Г. Э. Заболотских // Тракторы и сельхозмашины. – 2024. – Т. 91, № 3. – С. 261-269. – DOI 10.17816/0321-4443-623619. – EDN QCWIOS.

Статьи, индексируемые РИНЦ

9. Влияние кинематической вязкости растительных масел на низшую удельную теплоту сгорания / Г. Э. Заболотских, С. А. Плотников, П. Я. Кантор [и др.] // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : Сборник научных трудов. – Горки : Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. – С. 274-277. – EDN OPXDWA.

10. Заболотских Г. Э. Исследование экологических показателей работы дизельного двигателя на биоминеральных топливных смесях / Г. Э. Заболотских, С. А. Плотников // Будущее технической науки: сборник материалов XXII Всероссийской молодежной научно-техн. Конф.; НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород. 2023 – 817 с. Стр. 370-371.

11. Заболотских. Г. Э. Оценка селиментационной устойчивости биоминеральных топливных смесей / Г. Э. Заболотских. С. А. Плотников. А. Н. Карташевич // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : БГСХА, 2025. – Вып. 10. – С. 253-256.

12. Заболотских, Г. Э. Варианты исследования экологических и эффективных показателей работы дизеля при работе на биоминеральных топливных смесях / Г. Э. Заболотских, С. А. Плотников, М. Н. Втюрина // Будущее технической науки: сборник материалов XXIII Всероссийской молодежной научно-техн. Конф.; НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2024 – 833 с. Стр. 486-488.

13. Заболотских, Г. Э. Исследование смесеобразующих свойств биоминеральных топливных смесей / Г. Э. Заболотских, С. А. Плотников, А. Д. Черепанова // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский, А. С. Поварехо (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – С. 197-203.

14. Заболотских, Г.Э. Скоростная характеристика как способ исследования эффективных показателей работы дизеля на биоминеральных топливных смесях / Г. Э. Заболотских // Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства: Материалы международной научной конференции студентов и магистров / редкол.: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2024. – 137 с. стр. 103-105.

15. Исследование эмиссии вредных веществ дизеля при работе на биоминеральных топливных смесях / Г. Э. Заболотских, С. А. Плотников, М. В. Смольников, А. Н. Карташевич // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : Сборник научных трудов. – Горки : Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2024. – С. 273-279. – EDN WTAOWM.

16. Малышкин. П. Ю. Исследование свойств биоминеральных топливных смесей / П. Ю. Малышкин. Г. Э. Заболотских. С. А. Плотников. А. Н. Карташевич // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : БГСХА, 2025. – Вып. 10. – С. 282-285.

17. Плотников С. А. Методика проведения стендовых испытаний дизеля на смеси растительных масел / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских // Будущее технической науки: сборник материалов XXI Всероссийской молодежной научно-техн. Конф.; НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2022 – 500 с. Стр. 244-245.

18. Плотников, С. А. Анализ физико-химических свойств новых смесевых топлив для автотракторных дизелей / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских // Общество. Наука. Инновации (НПК-2022) : Сборник статей XXII Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах, Киров, 11–29 апреля 2022 года.

Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 435-439. – EDN SIKKJA.

19. Плотников, С. А. Исследование свойств новых составов смесевых топлив для автотракторной техники / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских, М. В. Смольников // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения : сб. материалов VI Междунар. науч. конф. молодых ученых, Гродно, 2 июня 2022 г. / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: А. С. Воронцов (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2022. – 623 с. : 174 рис. на 133 с., 50 табл. на 43 с. – Библиогр.: 563 источника на 141 с. (с. 129-135).

20. Плотников, С. А. Определение оптимального состава биоминеральных топливных смесей / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : Сборник научных трудов. В 2 томах, Минск, 06–08 июня 2023 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2023. – С. 149-155. – EDN IFTLHL.

21. Смольников, М. В. Перспективы использования композиции растительных масел в качестве дизельного топлива / М. В. Смольников, С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : Сборник научных трудов / Редколлегия: В.В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. Том Выпуск 7. – Горки : Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2022. – С. 234-238. – EDN MHUIVK.

Патенты, авторские свидетельства

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613184 Российская Федерация. Расчет жесткости процесса сгорания при работе дизеля : № 2024612203 : заявл. 08.02.2024 : опубл. 08.02.2024 / С. А. Плотников, П. В. Гневашев, Г. Э. Заболотских [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет". – EDN BXQQII.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613086 Российская Федерация. Расчет максимального давления цикла при работе дизеля «Pz – экспресс» : № 2024612149 : заявл. 08.02.2024 : опубл. 08.02.2024 / С. А. Плотников, П. В. Гневашев, Г. Э. Заболотских [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет". – EDN FURAQS.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686009 Российская Федерация. «Расчет характеристик впрыскивания альтернативного топлива» : № 2024685644 : заявл. 05.11.2024 : опубл. 05.11.2024 / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских, А. А. Ошмарин [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет". – EDN LHOJRG.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686935 Российская Федерация. Расчет параметров фазы быстрого горения при работе дизеля на биоминеральных топливных смесях «ФБГ-БМТС» : № 2024686716 : заявл. 13.11.2024 : опубл. 13.11.2024 / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских, А. А. Ошмарин [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет". – EDN FHZZZO.

26. Патент № 2827416 С1 Российская Федерация. МПК C10L 1/10. C10L 1/18. Биоминеральная топливная смесь : № 2023135571 : заявл. 27.12.2023 : опубл. 25.09.2024 / С. А. Плотников, Г. Э. Заболотских, Н. Ю. Кутергин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет". – EDN PJNUME.