

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,  
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **УЛУЧШЕНИЕ МОТОРНЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАПСОВОГО МАСЛА**

*Монография*

Горки  
Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия  
2025

УДК 620.98:621.436.12

**Улучшение моторных свойств топлив с добавками рапсового масла** : монография / А. Н. Карташевич, А. А. Рудашко, С. А. Плотников [и др.]. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2025. – 147 с.: ил. – ISBN 978-985-882-743-4.

В монографии приведены данные о применении рапсового масла в различных энергетических установках, улучшении моторных свойств топлив с добавками рапсового масла и их влиянии на основные процессы работы дизеля. Подробно рассмотрены теоретические аспекты использования рапсового масла и методика исследований его применения в автотракторных двигателях. Описаны результаты экспериментальных исследований по определению физико-химических свойств топлив с добавками рапсового масла, влияние присадок на эти свойства. Исследованы механизмы влияния топлив на работу топливной аппаратуры, эффективные и экологические показатели работы дизеля и эксплуатационные характеристики машинно-тракторного агрегата.

Монография является научным изданием по результатам совместных исследований ученых Республики Беларусь и Российской Федерации в рамках договора о сотрудничестве Белорусской государственной сельскохозяйственной академии и Вятского государственного университета.

Авторами монографии являются ученые Белорусской государственной сельскохозяйственной академии: доктор технических наук, профессор А. Н. Карташевич, кандидат технических наук, доцент А. А. Рудашко и Вятского государственного университета: доктор технических наук, профессор С. А. Плотников, кандидаты технических наук П. Н. Черемисинов, И. С. Козлов.

Для руководителей и специалистов сельскохозяйственных предприятий агропромышленного комплекса, слушателей курсов повышения квалификации, специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией автотракторной техники, студентов, магистрантов и аспирантов.

Табл. 27. Ил. 52. Библиогр.: 229 назв.

Одобрено Научно-техническим советом  
Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.  
Протокол № 10 от 30 декабря 2024 г.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Белорусской государственной сельскохозяйственной академии В. С. Астахов;  
доктор технических наук, профессор ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» П. А. Савиных

**ISBN 978-985-882-743-4**

© Карташевич А. Н., Рудашко А. А.,  
Плотников С. А., Черемисинов П. Н.,  
Козлов И. С., 2025

© Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия, 2025

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$n$  – частота вращения коленчатого вала дизеля,  $\text{мин}^{-1}$ ;  
 $p_e$  – среднее эффективное давление, МПа;  
 $N_e$  – эффективная мощность дизеля, кВт;  
 $M_k$  – крутящий момент дизеля, Н · м;  
 $G_T$  – часовой расход топлива, кг/ч;  
 $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  
 $\eta_v$  – коэффициент наполнения;  
 $g_e$  – удельный эффективный расход топлива, г/кВт · ч;  
 $\eta_e$  – эффективный коэффициент полезного действия;  
 $t_T$  – температура отработавших газов, °С;  
 $\phi$  – угол поворота коленчатого вала, градус;  
 $\theta_{\text{впр}}$  – установочный угол опережения впрыскивания топлива, градус;  
 $\tau_i$  – период задержки воспламенения;  
 $p_c$  – давление конца сжатия, МПа;  
 $p_z$  – максимальное давление сгорания в цилиндре, МПа;  
 $dp/d\phi$  – скорость нарастания давления в цилиндре, МПа/градус;  
 $\chi$  – относительное тепловыделение от сгорания топлива;  
 $\chi_i$  – активное тепловыделение;  
 $d\chi/d\phi$  – относительная скорость активного тепловыделения, 1/градус;  
 $T$  – осредненная температура цикла, К;  
 $\text{NO}_x$  – оксиды азота, мг/л, ppm, %;  
 $\text{CO}$  – оксид углерода, мг/л, ppm, %;  
 $\text{CO}_2$  – диоксид углерода, мг/л, ppm, %;  
 $\text{C}$  – сажа, %;  
 $\text{CH}_x, \text{C}_x\text{H}_y$  – суммарные углеводороды;  
 $i$  – число цилиндров;  
 $V_h$  – рабочий объем цилиндра;  
 $\varepsilon$  – степень сжатия;  
 $\nu$  – кинематическая вязкость, сСт;  
РМ – рапсовое масло;  
СТ – смесевое топливо;  
ВМТ – верхняя мертвая точка;  
ДТ – дизельное топливо;  
ДВС – двигатель внутреннего сгорания;  
КС – камера сгорания;  
МТА – машинно-тракторный агрегат;  
АПК – агропромышленный комплекс;  
ОГ – отработавшие газы;  
ОС – окружающая среда;  
п.к.в. – поворот коленчатого вала;  
ЦЧ – цетановое число.

## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом увеличивается парк автотракторной техники, растет мощность и расширяется сфера применения машин. В процессе эксплуатации техника ухудшает экологию ОС, выбрасывая с ОГ более 1000 токсичных компонентов. Доказано, что концентрация таких вредных веществ, как оксиды азота  $\text{NO}_x$ , оксид углерода CO, диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , сажа C, углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_m$ , полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) в кабинах тракторов и автомобилей в несколько раз превышают допустимые нормы.

В качестве основного источника энергии для автотракторной техники используют ДВС, которые разделяются на бензиновые и дизельные. Специфика дизелей обуславливает их широкое распространение в автотракторной, сельскохозяйственной, дорожной и строительной технике. Плюсы дизелей по сравнению с бензиновыми двигателями: лучшая, на 30...60 % топливная экономичность, меньший выброс оксида углерода и углеводородов вследствие работы дизелей на бедных смесях ( $\alpha > 1$ ), большая мощность при меньшей частоте вращения коленчатого вала [81]. Дизели более адаптивны к работе на топливах с различными физико-химическими свойствами. Это означает, что альтернативные топлива легче реализовать на базе дизельных двигателей, чем бензиновых. Работа дизеля на более легких топливах (смесях ДТ с бензинами и керосинами) возможна при некоторых изменениях в конструкции двигателя. Сжигание тяжелых и легких топлив в дизелях при высоких степенях сжатия и больших коэффициентах избытка воздуха более эффективно, чем в двигателях с принудительным воспламенением [91].

Во многих странах принимают нормативные акты и реализуют государственные программы, направленные на решение этой проблемы. Существует Киотский протокол, согласно которому каждый участник должен выполнить определенные обязательства по ограничению и сокращению выбросов парниковых газов в окружающую среду [78]. Вопросы применения альтернативных топлив отражены в федеральном законе № 28-ФЗ от 03.04.96 «Об энергосбережении». Федеральная целевая программа «Энергоэффективная экономика», утвержденная постановлением правительства РФ № 796 от 17.11.2001 года ставит в качестве одной из главных целей «...снижение негативного воздействия энергетического сектора на окружающую природную среду» и «эффективное

энергообеспечение регионов...на основе использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии». При реализации энергетической стратегии, утвержденной распоряжением правительства РФ от 28.08.2003 г. № 1234-р предусматривается, в частности, формирование топливно-энергетического баланса на основе «...расширения использования экономически выгодных возобновляемых источников энергии при более широком использовании заменителей нефтепродуктов».

В России издан указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». В нем имеется пункт: «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе». В указе отмечается: в качестве перспективного направления разработка технологий энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе, надежное обеспечение страны топливно-энергетическими ресурсами, повышение эффективности их использования и снижение антропогенного воздействия топливно-энергетического комплекса на окружающую среду.

В постановлении Правительства Российской Федерации № 717 от 14 июня 2012 г. «О государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынка сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия 2013–2020 годы» отмечается важность снижения затрат, в том числе топливно-энергетических, на производство продукции.

Основными путями снижения загрязнения окружающей среды при работе автотракторной техники являются: улучшение качества рабочего процесса ДВС, снижение расхода топлива, увеличение техники, работающей на альтернативных возобновляемых видах топлива. Развитие топлив идет по следующим направлениям: совершенствование технологий переработки нефти, создание новых добавок к топливам, а также применение альтернативных топлив. Новейшие технологии должны отвечать ужесточающимся нормам по охране ОС, это является основной целью совершенствования свойств топлив [84].

Уменьшить негативное воздействие тракторов на ОС можно, применяя смесевые топлива на основе растительных масел. Они получают из возобновляемых источников и позволяют полностью или частично заменить топливо из нефтяных ресурсов, являются биоразлагаемыми. Использование биотоплив положительно влияет на парниковый эффект, снижает выбросы токсичных веществ с ОГ.

В природных условиях Беларуси и России наиболее эффективно выращивать и использовать в качестве биотоплива рапсовое масло. При работе дизеля на рапсовом масле, кроме того, имеется возможность обеспечить энергоавтономность сельского хозяйства и снизить себестоимость продукции.

Использование в двигателях автомобилей и тракторов РМ в чистом виде вызывает некоторые ограничения. Исследователями этой проблемы отмечается, что показатели рабочего процесса двигателя связаны с особенностями процессов смесеобразования, испарения и сгорания РМ. В работах данной тематики отмечается, что использование чистого РМ требует конструктивных изменений в двигателях, в частности: увеличение проходных сечений топливоподающей аппаратуры, использование добавочных фильтров, более частая их замена, усиление топливopодкачивающего насоса, подогрев масла, установка в камере сгорания модернизированных форсунок.

Анализируя данные научных исследований по применению альтернативных топлив в области российского двигателестроения, видно, что учеными нашей страны в разное время проводились исследования в области их применения. Эти вопросы отражены в трудах А. А. Абрамзона, В. С. Азева, Ю. П. Алейникова, Д. Г. Алексеева, В. И. Балакина, А. К. Болотова, А. Б. Виппера, В. А. Гладких, Л. В. Грехова, А. А. Гуреева, А. М. Данилова, С. Н. Девянина, Р. З. Кавтарадзе, Г. М. Камфера, А. Н. Карташевича, А. П. Картошкина, А. П. Кудряша, С. П. Кулманакова, М. О. Лернера, В. А. Лиханова, В. Льотко, Р. В. Малова, В. А. Маркова, В. З. Махова, А. В. Николаенко, С. Н. Онойченко, Н. Н. Патрахальцева, С. А. Плотникова, В. М. Попова, Н. Ф. Разлейцева, Р. Н. Сафиуллина, А. С. Хачияна, и других.

Анализ литературы показывает, что большинство исследований проводились с целью определения возможности работы дизеля на АТ, исследований процесса сгорания, либо улучшения эффективных показателей дизелей.

Недостаточно работ, направленных на разработку новых АТ с улучшенными эксплуатационными свойствами, приближающимися к свойствам ДТ. Их реализация позволит расширить топливную базу дизелей, находящихся в эксплуатации. Это значит, что данное направление является актуальной научной проблемой. Кроме того, необходимо дальнейшее совершенствование систем питания дизелей и их элементов для работы на АТ. Однако, большинство исследований проводилось с целью определения возможности работы дизеля на АТ,

оценки мероприятий по переводу дизелей для работы на АТ. Недостаточно внимания уделялось вопросам разработки и применения новых АТ с заданными физико-механическими свойствами, приближенными к свойствам ДТ.

Недостаточно работ, направленных на разработку адаптивных систем питания, регулирования и топливоподачи жидких альтернативных топлив, элементов и агрегатов систем топливоподачи и регулирования. Очень мало работ, доведенных до создания опытных образцов и проведения полевых испытаний.

Имеющиеся данные по разработке и исследованию новых видов и составов альтернативных топлив, влиянию нестандартных свойств топлив на показатели работы ТПА, процесса сгорания, мощностные, экономические и токсические показатели работы дизеля противоречивы и разнородны. Это свидетельствует о том, что создание новых альтернативных топлив с приближенными физико-механическими свойствами к свойствам товарного дизельного топлива, либо их адаптация к требованиям серийного дизеля, является актуальной научной проблемой современности.

## 1. ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАПСОВОГО МАСЛА

### 1.1. Общие вопросы улучшения эффективных показателей дизеля и трактора

Основой сельскохозяйственного производства как в растениеводстве, так и в животноводстве является тракторный парк. От его функционирования в решающей степени зависит производительность труда, эффективность использования МТА и всего АПК в целом. Эффективность работы МТА определяется в основном производительностью и расходом топлива на единицу выполненной работы при соблюдении агротехнических требований к выполняемой операции.

Одними из основных направлений совершенствования автотракторных дизелей в настоящее время являются повышение их литровой и удельной мощности, повышение экономичности, надежности и снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателей.

Вместе с тем, дизели тракторов и автомобилей являются одними из основных источников загрязнения окружающей среды. Ведутся многочисленные работы по снижению выбросов вредных веществ с ОГ двигателя. Получили широкое распространение каталитические и жидкостные нейтрализаторы, являясь эффективным средством уменьшения выбросов вредных веществ с отработавшими газами, увеличивают насосные потери на газообмен, работают в относительно узком интервале температур, а многие весьма недешевы, так как содержат драгоценные и редкоземельные металлы [132].

Сейчас многие легковые дизельные автомобили оборудуются простым окисляющим нейтрализатором, который гарантирует полное окисление выбросов до водяного пара и  $\text{CO}_2$ , несмотря на то, что выбросы  $\text{CH}$  и  $\text{CO}$  и так невелики и надо позаботиться о других оставшихся вредных веществах. Более важна проблема выбросов  $\text{NO}_x$ , хотя их уровень уже уменьшен насколько возможно системой рециркуляции выхлопных газов (EGR), которая устанавливается на большинство современных дизелей. Поток рециркулирующих газов иногда пропускается через собственный интеркулер (отдавая тепло в систему охлаждения двигателя), таким образом, они не влияют на выходную мощность уменьшением коэффициента наполнения камеры сгорания [57].

Исследовательские группы также работают над системой, использующей принцип Siemens  $\text{SiNO}_x$ , заключающейся во впрыскивании



специальных добавок в отработавший газ, которые реагируют с  $\text{NO}_x$  в специальном узле выпускной системы.

Peugeot-Citroen разработала улавливающую систему, в которой добавки в топливо уменьшают температуру, необходимую для регенерации, кроме того, впрыскивание дополнительного топлива, когда улавливатель подает сигнал, что он забит, повышает температуру и дает возможность осуществить контролируемое «дожигание». Renault предложил комплексную систему снижения выбросов дизелей, которая использует чрезвычайно высокую степень рециркуляции, им удалось снизить выбросы  $\text{NO}_x$  и получить высокий уровень частиц, которые могут быть задержаны в уловителе.

Все вышеописанные способы улучшения эксплуатационных показателей дизеля являются действенными, но имеют свои минусы и, в общем случае, требуют изменения конструкции или установки новых элементов систем, что ведет к удорожанию конструкции дизеля. К тому же в современном мире, при стремительно повышающихся ценах на ДТ, на первое место выходят показатели расхода топлива и экологические показатели. Поэтому необходимо снижать расход ДТ, без ухудшения других эксплуатационных показателей. Одним из способов снижения расхода ДТ является увеличение предела применимости альтернативных топлив в автотракторных дизелях.

## **1.2. Перспективы применения альтернативных топлив в ДВС**

Все страны мира давно осознали, что использование автомобилей и тракторов значительно ухудшает окружающую среду. Одним из главных направлений снижения выбросов токсичных компонентов, является применение альтернативных видов топлива для их силовых агрегатов. Большая часть двигателей тракторов и огромная доля автомобилей являются дизелями. На базе дизельного двигателя проще расширять список применяемых топлив [128].

Во многих странах мира существуют программы по внедрению альтернативных топлив.

Использование альтернативных видов топлива в Европе стимулируется межправительственными законодательными актами. В 2003 г. в Европейском Союзе была принята Директива 2003/30/ЕС, в которой основной целью было увеличение доли возобновляемого топлива в общем топливном балансе стран. Необходимость увеличения доли использования биотоплива на транспортных средствах указана в Белой

Книге ЕС по стратегии в области энергетики (1997). В Зеленой Книге ЕС (2000) отмечена ценность биомассы в обеспечении надежности энергоснабжения [171]. Межправительственные соглашения в области биологического топлива были поддержаны национальной политикой отдельных стран ЕС. Шесть стран: Германия, Италия, Франция, Австрия, Испания, Швеция стали производить биотопливо на коммерческой основе. Механизмы, способствующие увеличению производства и использования альтернативных видов топлива, существуют и в других странах: Финляндии, Бельгии, Дании, Греции, Нидерландах, Ирландии, Великобритании. В Финляндии в качестве топлива используется смесь, содержащая 1/3 РМ и 2/3 ДТ, она обозначается как R33. Фирмой Caterpillar в Бразилии рекомендуется к использованию смесь растительного масла (подсолнечное, соевое или из земляных орехов) с дизельным топливом в соотношении 1:9 [1].

В России издан указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». В нем имеется пункт: «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе».

На первом этапе перехода на новые виды топлив необходимо изучить возможность расширения способов получения ДТ из нефти путем включения тяжелых и легких фракций. Но при этом следует учитывать, что этот путь не сможет устранить дефицит нефти в целом.

Другим вариантом сокращения потребления ДТ является его частичная замена путем применения различных добавок: природного газа, воды, спиртов, аммиака, растительных масел и некоторых других [22, 73, 80, 122].

Существуют два основных направления влияния на процессы сгорания топлива в двигателях: изменение процесса сгорания топлива и изменение его состава. Первая проблема решается путем введения присадок-катализаторов горения топлива, вторая — введения в состав топлива различных добавок, улучшающих его экологические характеристики. Долгое время оптимизация процесса сгорания топлива считалась главным направлением исследований. Однако развитие его и по сей день ограничивается отсутствием надежных числовых методов расчета параметров самого процесса сгорания.

В наше время имеется опыт применения высокодисперсных водотопливных эмульсий в судовых дизелях [29]. Однако, большое их

практическое применение не велико из-за отсутствия дешевого эффективного эмульгатора и простого способа получения эмульсии. Увеличение присутствия воды в эмульсии негативно сказывается на эффективных показателях дизеля. Снижается максимальное давление цикла, растут жесткость процесса сгорания и расход ДТ [59]. Таким образом, экономия ДТ малозаметна.

Перспективным является применение газовых конденсатов, получаемых из газа, в смеси с ДТ. Физико-химические свойства газовых конденсатов близки к характеристикам ДТ. Минусом является невысокое ЦЧ (30...43), что вызывает увеличение периода задержки воспламенения, и меньшую плотность, что вызывает снижение мощности дизеля. Для ее поддержания на заданном уровне необходимо увеличение цикловой подачи топлива [8].

Перспективу может иметь применение биогаза. Но для этого необходима его определенная подготовка, включающая очистку от  $\text{CO}_2$ , обессеривание, абсорбционную очистку, компримирование. По данным [116], общие затраты, связанные с применением биогаза, выше стоимости ДТ в 3...4 раза. В то же время проведенные исследования доказали возможность использования биогаза в качестве топлива для дизелей современных тракторов и получения при этом существенной экономии ДТ.

Вполне возможными заменителями традиционных нефтяных топлив могут выступать спирты – этанол и метанол. Это связано, прежде всего, с тем, что спирты являются жидким топливом, а большинство серийно выпускаемых дизелей ориентированы для работы на жидком топливе. Объемная и массовая энергоемкость (теплота сгорания) спиртов на 40...50 % ниже, чем нефтяного топлива. Но при этом теплопроизводительность спиртовоздушных и топливовоздушных смесей при их сгорании в двигателе различается незначительно.

Для России перспективным представляется использование растительных масел.

В целом перспективность таких топлив обусловлена следующим:

- вырабатывается из возобновляемых источников и позволяет полностью или частично заменить топливо из природных ресурсов и имеет способность к быстрому биоразложению;
- обеспечивается возможность создания энергоавтономных сельскохозяйственных предприятий, независимых от поставок нефтяных топлив;

– применение биотоплив положительно влияет на парниковый эффект, снижает выбросы токсичных веществ с ОГ;

– при производстве биотоплива на основе растительных масел удовлетворяются потребности животноводства в белковом концентрате в виде шрота при экструдировании маслосемян.

В табл. 1.1 приведены некоторые возможные виды топлив и их источники [22, 120].

Таблица 1.1. **Некоторые возможные виды топлива и их источники**

Сырье	Продукт	Способ производства
Вода	Водород	Электролиз
Природный газ	Метанол	Каталитическая конверсия метана с водяным паром
	Жидкий природный газ	Компримирование и охлаждение природного газа
Нефть	Жидкий нефтяной газ	Перегонка и компримирование
	Автомобильный бензин	Перегонка
	Керосин	Перегонка и очистка
	Прочие дистилляты	Перегонка
	Котельные топлива	Остаток после перегонки
	Остаточные топлива	Остаток после перегонки
Уголь	Синтетический природный газ	Пиролиз угля
	Синтетический бензин	Гидрогенизация угля
	Синтетические дистилляторы	Процесс Фишера-Тропша или гидрогенизация
	Креозоты, получаемые из смолы	Пиролиз и перегонка
	Кокс	Остаток после перегонки
	Метанол	Газификация и синтез
	Смеси парафиновых углеводородов	Газификация и синтез
	Биоэтанол	Гидратация или гидролиз
Технические, масличные культуры	Растительные масла	Спиртовое брожение органических продуктов Прессование или экстракция
	Моноэфиры	Трансэтерификация

Анализ структуры имеющейся сырьевой базы России и методы получения альтернативного топлива показывает, что наиболее вероятным источником его получения могут стать растительные масла.

### 1.3. Перспективы и проблемы применения растительных масел

В последнее время все более широкое применение в качестве топлива для дизелей находят топлива, производимые из растительных масел [2, 79, 91, 95, 130]. Эти топлива рассматриваются в качестве реальной альтернативы нефтяным моторным топливам в различных регионах мира – в Европе, США, странах центральной и Латинской Америки, в странах юго-восточной Азии [33, 34, 67, 79, 164]. Причем, указанные биотоплива используются в различных отраслях – на автомобильном транспорте [27, 85, 174, 210], в сельском хозяйстве [60, 95, 99, 159], на железнодорожном транспорте [57, 160, 228], в энергетике [79, 122]. Это объясняется простотой и экологичностью процесса получения растительных масел, их сравнительно невысокой стоимостью и приемлемой воспламеняемостью в условиях камеры сгорания дизеля.

Растительные масла отличаются повышенными плотностью, вязкостью и плохой испаряемостью, поэтому их использование в качестве топлива для бензиновых двигателей проблематично. Однако, эти масла по многим физико-химическим свойствам достаточно близки к нефтяным дизельным топливам, что позволяет использовать их в качестве топлива для дизелей [79, 95]. При этом растительные масла могут применяться как самостоятельное топливо для дизелей, в смесях с дизельным топливом, перерабатываться в метиловый, этиловый или бутиловый эфиры, которые используются как самостоятельные биотоплива или как смесевые топлива (в смеси с дизельным или другими альтернативными топливами).

Метиловый эфир обычно получают методом, известным как «трансэтерификации». Молекула глицерольного эфира жирной кислоты расщепляется на молекулы метилового эфира. При этом масла и жиры реагируют со спиртом, а катализатором является натриевый или содовый гидроксид. В результате этой реакции получают метиловый эфир рапсового или другого масла и глицерин. В процессе реакции для получения 1 т метилового эфира расходуется 980 кг масла, 125 кг метилового спирта, 14,2 кг катализатора [177, 213]. Метиловый эфир может подаваться в двигатель как в чистом виде, так и в смеси с ДТ через штатную топливоподающую систему. Необходима лишь замена некоторых уплотнительных материалов, к которым эфир агрессивен. По сравнению с ДТ МЭРМ имеет ряд достоинств: высокое цетановое число, высокую температуру вспышки, лучшие смазывающие свойства [163].

К основным проблемам, имеющим место при работе на МЭРМ, следует отнести: ухудшение запуска ДВС при температуре ниже 8 °С; размягчение и расслоение резиновых изделий; отрицательное воздей-

ствие на гибкость топливopоводов; разрушение лакокрасочных покрытий; запах, раздражающий пассажиров и водителей; необходимость более частой замены топливных фильтров.

Присутствие кислорода в метиловом эфире (до 11 %) улучшает процесс сгорания, что приводит к уменьшению выбросов  $C_nH_m$  на 10–56 %, CO – на 10–43 %,  $CO_2$  и сажи – на 50–55 %. В связи с почти полным отсутствием в МЭРМ серы (10–15 ppm) и ароматических соединений в ОГ дизеля практически нет оксидов серы и ПАУ. При этом наблюдается возрастание эмиссии  $NO_x$  на 10 %. В совокупности выхлоп дизеля становится на 60–90 % менее токсичен. Однако если учесть количество углекислого газа, выделяемого в атмосферу при промышленном производстве биодизеля, то экологические преимущества получаются практически нулевыми. При учете выбросов углеводородов во время производства метилового эфира суммарное их количество оказывается на 35 % выше, чем при применении ДТ [159, 163, 213]. Эмиссия токсичных компонентов дизелей при работе на ДТ и МЭРМ показана на рис. 1.1.

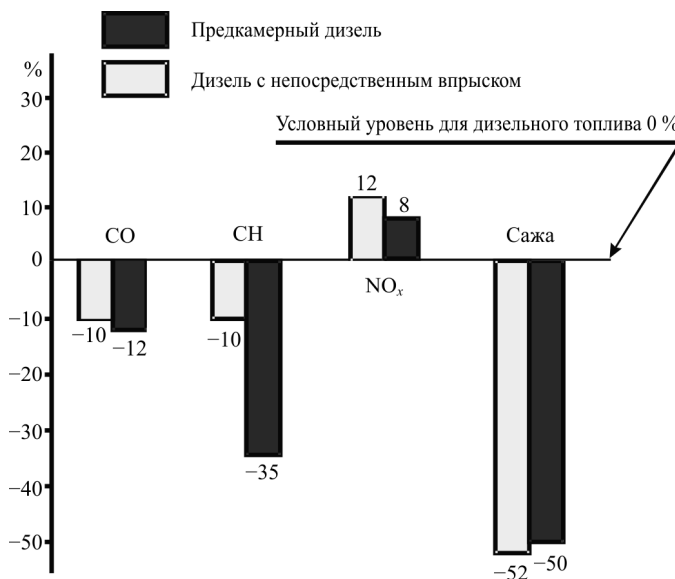


Рис. 1.1. Эмиссия токсичных компонентов дизелей при работе на ДТ и МЭРМ

Масличные растения, являющиеся сырьем для производства растительных масел и их эфиров, культивируются в нескольких климатических зонах. Наибольшее промышленное значение имеют следующие виды масел: рапсовое, бобовое (соевое), подсолнечное, пальмовое, пальмоядровое, кокосовое, арахисовое, кукурузное (маисовое), хлопковое [79].

Начиная с 90-х гг. прошлого века в связи с производством биотоплив из рапса его значимость в Европе постоянно возрастала. В настоящее время в некоторых странах Западной Европы посевные площади, отведенные под рапс, составляют 20 % пахотных земель. Причем, рапс используется не только для производства биодизельного топлива, но и как добавка в нефтяному ДТ. Так, в 2002 г. в Англии поступил в продажу новый вид топлива, представляющий собой смесь обычного дизельного топлива (95 %) и рапсового масла (5 %). Данный вид топлива был разработан компанией *Greenergy* и получил название *Global Diesel* [79].

Сравнительный анализ возможностей использования соевого, рапсового и подсолнечного масел в качестве моторных топлив показывает, что по урожайности эти масличные культуры весьма схожи: с 1 гектара посевных площадей собирают до 3 тонн семян рапса, 1600–2700 килограммов сои (в зависимости от региона выращивания), урожай семян подсолнечника составляет 2400–3200 килограммов с гектара [79]. При этом рапс является сельскохозяйственной культурой, хорошо приспособленной к умеренному климату нашей страны, хорошо произрастает в Черноземье, Нечерноземье, Урале, Сибири, Алтайском крае, на Дальнем Востоке. За последние десять-пятнадцать лет посевные площади, отведенные под эту культуру, и валовой сбор рапса в России выросли практически в десять раз (рис. 1.2 и 1.3) [22]. Это позволяет рассматривать рапс как одну из наиболее перспективных сельскохозяйственных культур с точки зрения определения сырьевого ресурса для производства биотоплив [78, 79, 205].

Поскольку растительные масла представляют собой смеси различных ацилглицеридов (эфиров глицерина и различных жирных кислот), то их состав не может быть выражен простыми химическими формулами. Это относится и к традиционным дизельным топливам, содержащим большое количество различных насыщенных и ненасыщенных углеводородов.

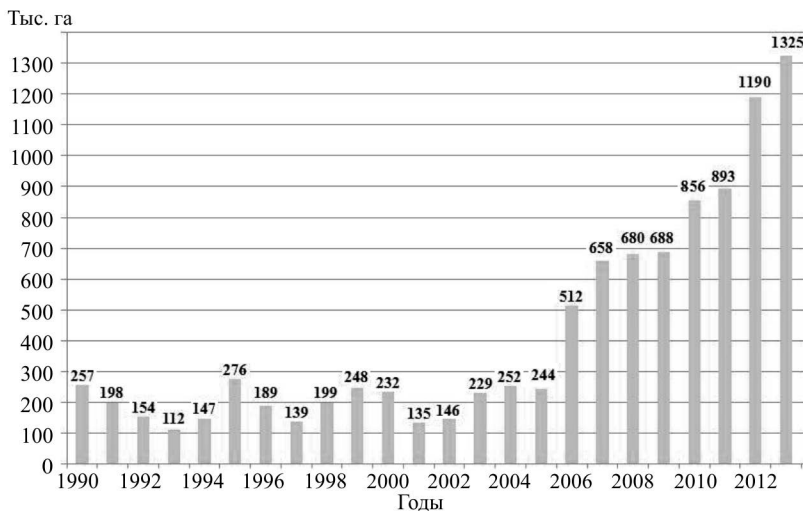


Рис. 1.2. Динамика изменения посевных площадей озимого и ярового рапса в России

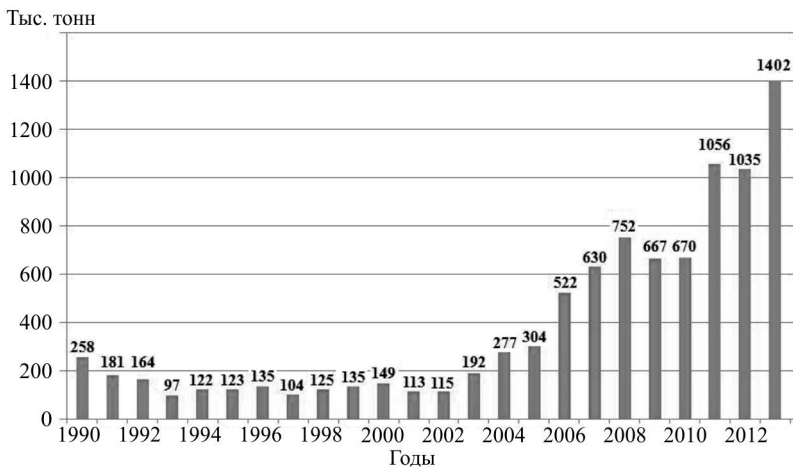


Рис. 1.3. Динамика изменения валовых сборов рапса в России

Для таких топлив содержание в них отдельных элементов определяется путем химического анализа и обычно дается в массовых долях (табл. 1.2) [79, 204]. При этом основными элементами являются углерод С, водород Н, кислород О. Содержание кислорода в нефтяных мо-



торных топливах обычно мало и им часто пренебрегают. В молекулах биотоплив на основе растительных масел обычно содержится значительное количество атомов кислорода (около 10 %), что благоприятно сказывается на экологических показателях дизельных двигателей, работающих на этих топливах. Но при этом несколько снижается их теплотворная способность. Преимуществом этих топлив является и практическое отсутствие в них серы S (в дизельных топливах содержание серы достигает 0,2 % по массе). Усредненная условная формула элементарного состава дизельного топлива Л с молярной массой 223,30 кг/кмоль имеет вид  $C_{16,2}H_{28,5}$  [189]. По данным работы [79], молярная масса низкоэрукового рапсового масла равна 883,04 кг/моль, его приближенная суммарная формула  $C_{57,0}H_{101,6}O_6$ . Молярная масса метилового эфира низкоэрукового рапсового масла равна 312,52 кг/кмоль, приближенная суммарная формула  $C_{20,2}H_{37,6}O_2$ . Наконец, молярная масса этилового эфира низкоэрукового рапсового масла равна 326,55 кг/кмоль, приближенная суммарная формула  $C_{21,2}H_{39,6}O_2$ .

Таблица 1.2. Элементарный состав дизельного топлива и различных растительных масел

Элементарный состав	Топливо и растительные масла			
	Дизельное топливо	Рапсовое масло	Подсолнечное масло	Соевое масло
Углерод С	0,867	0,779	0,776	0,775
Водород Н	0,133	0,118	0,115	0,115
Кислород О	0	0,103	0,109	0,110

Примечание. Указаны массовые доли углерода, водорода и кислорода в молекулах топлив.

Вместе с тем при использовании растительных масел в качестве топлива для дизелей возникает ряд проблем. В первую очередь – это ухудшение качества процессов впрыскивания, распыливания топлива и смесеобразования, вызванное повышенными вязкостью, плотностью и поверхностным натяжением растительных масел, а также их плохой испаряемостью [60, 79, 91]. В частности, при впрыскивании из-за увеличения длины струй распыливаемого масла часть его попадает на относительно холодные стенки цилиндра и не сгорает полностью. Следствием этого является возможная потеря подвижности поршневых колец. Попадание значительного количества растительного масла в моторное масло может привести к ухудшению его смазывающих свойств, образованию густого осадка, необходимости частой замены

моторного масла. Эта проблема характерна для малоразмерных дизелей (с диаметром цилиндра менее 100 мм), в которых длина струй распыливаемого топлива превышает расстояние от распыливающих отверстий до стенок цилиндра.

Наиболее значительное влияние на процессы топливоподачи и распыливания топлива оказывает высокая вязкость растительных масел (в 12–15 раз большая, чем у нефтяного дизельного топлива). При использовании в качестве топлива для дизелей таких растительных масел желательно увеличивать давление в подкачивающей топливной магистрали или осуществлять подогрев масла [165, 185]. Более эффективное решение этой проблемы достигается при использовании смесей растительных масел с легкими топливами (дизельным топливом, бензином, диметиловым эфиром и др. [79].

Проведены многочисленные исследования дизелей, работающих на растительных маслах и топливах на их основе. Исследованы следующие растительные масла: рапсовое [31, 56, 68], подсолнечное [3, 28, 142], соевое [70, 141], пальмовое (кокосовое) [66, 67, 126, 197], арахисовое [185, 198], оливковое [176], кукурузное [74, 114, 159, 174], хлопковое [175, 198], горчичное [178], сафлоровое [198] и другие. Привлекательным представляется использование масел, уже использованных для приготовления пищи (фритюрные масла) [68, 162, 204].

В статье [110] представлены результаты исследований дизеля фирмы DMS Dieselmotoren und Geratebau GmbH, работающего на рапсовом масле. Испытан дизель модели MF-4RTA размерности  $S/D = 14,5/12,8$  с непосредственным впрыскиванием топлива, турбонаддувом и охлаждением наддувочного воздуха. Исследования дизеля на рапсовом масле и нефтяном дизельном топливе (рис. 1.4) показали, что при работе дизеля на рапсовом масле на номинальном режиме ( $N_e = 160$  кВт при  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>) удельный эффективный расход топлива составил  $g_e = 240$  г/кВт · ч, а на режиме наилучшей экономичности –  $g_e = 221$  г/кВт · ч. Соответствующие значения удельного эффективного расхода дизельного топлива были равны 206 и 190 г/кВт · ч.

Обширные исследования работы дизелей на растительных маслах и их смесях с дизельным топливом проведены в России и других странах бывшего СССР проведены. Причем исследованы дизели как с разделенными камерами сгорания, так и с полуразделенными и неразделенными КС. Ряд проблем, возникающих при работе дизелей на чистых растительных маслах, можно решить при их сжигании в дизелях с разделенными камерами сгорания.

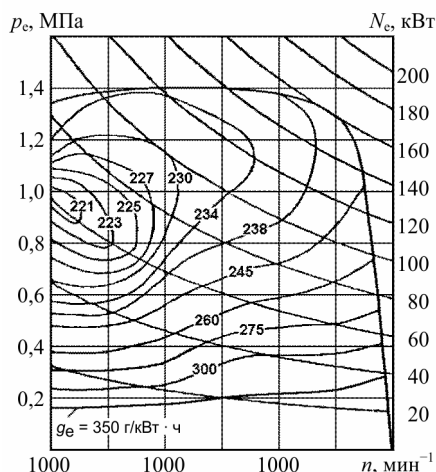


Рис. 1.4. Многопараметровая характеристика дизеля фирмы DMS Dieselmotoren und Gerätebau GmbH, работающего на рапсовом масле

Особенностью этих дизелей является меньшая чувствительность к изменению свойств применяемого топлива, в частности, к несколько худшей самовоспламеняемости растительных масел.

Как отмечено выше, работа дизелей с неразделенными КС и объемным смесеобразованием на растительных маслах сопровождается ухудшением качества процесса смесеобразования, обусловленным повышенными значениями плотности, вязкости и поверхностного натяжения этих масел. В результате увеличения длины струй распыливаемого масла часть его попадает на относительно холодные стенки камеры сгорания и не сгорает полностью, возможна потеря подвижности поршневых колец и загрязнение моторного масла. В дизелях с разделенными камерами сгорания первоначальное впрыскивание растительного масла в предкамеру или вихревую камеру, изолированные от основной камеры сгорания, позволяет исключить попадание растительного масла на стенки цилиндра, улучшить условия работы деталей цилиндропоршневой группы и исключить загрязнение моторного масла. Еще одной проблемой обеспечения работы дизелей на растительных маслах является отложение кокса на распылителе форсунки, обусловленное повышенной коксуемостью этих масел из-за значительного содержания в них смолистых веществ. Использование в дизелях с раз-

деленной КС штифтовых форсунок с подвижным штифтом и достаточно большой изменяемой площадью распыливающего отверстия препятствует закоксовыванию распыливающего отверстия.

Следует отметить, что показатели токсичности ОГ дизелей, работающих на топливах на основе растительных масел, в значительной степени зависят от конструктивных особенностей двигателя, в первую очередь – от организации процессов распыливания топлива и смесеобразования. При этом использование в качестве топлива для дизелей чистого РМ может сопровождаться ростом вредных выбросов. Об этом свидетельствуют результаты исследований, проведенных в АлтГТУ [82].

Испытания дизелей при работе на биотопливе были проведены на Минском моторном заводе. Согласно отчету главного конструктора ОАО ММЗ, исследовалась работа двигателей на ДТ и топливах с добавлением МЭРМ в количестве 5 и 30 %. При работе на режимах внешней скоростной характеристики на топливе с содержанием 5 % МЭРМ по сравнению с работой на ДТ изменений отмечено не было, однако при переходе на топливо с содержанием 30 % МЭРМ наблюдалось снижение мощности дизеля на 2,5 % и увеличение удельного расхода топлива на 2,5 % [65].

В качестве моторного топлива в мировой практике использовались различные растительные масла: арахисовое, хлопковое, соевое, подсолнечное, рапсовое, кокосовое, пальмовое. В Европе наиболее перспективными считают топлива, полученные из рапсового масла, так как рапс относительно зимостоек и неприхотлив при выращивании. США является ведущей страной, производящей соевое масло. В странах Азии имеются большие сырьевые ресурсы соевого и арахисового масел. Свойства растительных масел приведены в табл. 1.3.

Растительные масла имеют повышенную вязкость по сравнению с ДТ, поэтому показатели впрыска топлива у них значительно хуже. Однако снизить вязкость возможно путем подогрева масел.

На безнаддувном двигателе Komatsu 10-105 были проведены исследования по влиянию подогрева РМ на характеристики впрыскивания топлива и показатели работы дизеля. Подогрев топлива производился в нагнетательном трубопроводе перед форсункой в диапазоне температур от 40 до 400 °С. Повышение температуры рапсового масла с 50 до 300 °С, которая была выбрана за оптимальную, привело к уменьшению среднего диаметра капель на 60 %, увеличению угла факела более чем в два раза, снижению периода задержки воспламенения, уменьшению длительности фазы быстрого сгорания и соответ-

ственно удельного расхода топлива, шумности работы двигателя и дымности ОГ. Однако произошло увеличение в ОГ количества окислов азота. При превышении температуры подогрева РМ свыше 300 °С наблюдается заметное ухудшение большинства характеристик двигателя [199].

Таблица 1.3. Свойства растительных масел, применяемых в качестве топлива в дизелях

Свойства	Ед.изм.	ДТ летнее	РМ	Подсол- нечное	Коко- со- вое	Соевое	Хлоп- ко- вое
Элементарный Состав С:Н:О	кг/кг	86:14:0	78:10: 12	78,3:12,8: 8,75	—	—	—
Плотность при 20 °С	кг/м <sup>3</sup>	860	916... 917	923	910... 921	923... 924	919
Кинематическая вязкость при 20 °С	сСт	3...6	75...76	63...65,2	—	57,2	84
Низшая расчет. теплота сгорания	МДж/к г	42,5	37,3	36...39,8	40,2	36...39	34
Теплотворная способность	кДж/кг	42,5	39,4	39,4	39,4	37,1	38,2
Коксуемость 10 % остатка	% по массе	0,2	0,4	0,52	—	0,44	0,23
Содержание серы	% по массе	0,2	—	0,01	—	—	—
Температура помутнения	°С	—5	—9	—6,7	—	—	—
Температура застывания	°С	—10	—23	—16	—	—12	—4... —18
Цетановое число	единиц	45	36	37	—	38	41
Температура самовоспламе- нения	°С	250	317... 318	316... 320	320... 324	318... 330	316... 320
Температура вспышки	°С	Более 55	305	320	—	220	318
Содержание масла	%	—	43	42	—	22	—
Выход масла	л/кг	—	0,37	0,25	—	0,07	—
Извлечение масла	%	—	72,1	65,6	—	32,3	—
Затраты энергии	Вт/кг	—	47	118,3	—	178,4	—

К настоящему времени выполнен определенный объем научно-исследовательской работы в области использования альтернативных

видов топлива на основе рапсового масла в силовых установках тракторов.

Теплотворная способность РМ ниже, чем у ДТ. Этот факт должен привести к снижению мощности дизеля и ухудшению тяговых качеств трактора при использовании РМ, однако масло имеет повышенную вязкость, которая приводит к увеличению цикловой подачи топлива и соответственно компенсирует ухудшению тяговых качеств.

В своих исследованиях ученые обосновывают различные оптимальные концентрации смесевых топлив на основе рапсового масла: 25 % ДТ + 75 % РМ [12, 14, 15], 70 % ДТ + 30 % РМ [39, 129], 60 % ДТ + 40 % РМ [122]. Более подробно рассмотрим результаты испытаний силовых установок и тракторов при работе на смесевых топливах на основе РМ.

По исследованиям, проведенным С. П. Кулманаковым, Д. Д. Матиевским, А. В. Шашевым на двигателе УК-2, представляющем собой одноцилиндровый отсек двигателя серии Д-440 и Д-460, которые устанавливались на тракторах ДТ-75Т, Т-4А и др., при переходе на чистое РМ, без принятия мер по оптимизации рабочего процесса наблюдается ухудшение экономичности (удельный индикаторный расход топлива увеличивается на 20–30 %, индикаторный КПД уменьшается на 15...20 %). [63].

«Vasola» в Финляндии совместно с фирмой «Valmet» провел испытания тракторов «Valmet-702» и «Volvo Bm valmet 605-4» на смесевом топливе R33, состоящем из 1/3 РМ и 2/3 ДТ. При работе на смеси номинальная мощность силовой установки трактора V605 увеличилась на 1,4 %, частота вращения – на  $49 \text{ мин}^{-1}$ , при этом удельный расход топлива повысился на 0,75 %. Изменение показателей второго трактора V702 имели такую же направленность: номинальная мощность повысилась на 2,8 %, удельный расход топлива – на 2,12 % [177].

Рассмотренные примеры исследований показывают, что авторы сходятся во мнениях: при использовании РМ возрастают часовой и удельный расходы топлива, при этом за счет снижения утечек растительного топлива через неплотности плунжерных пар увеличивается мощность двигателя и соответственно растет сила тяги трактора.

Согласно результатам комплексных исследований, проведенных в ГНУВИМ на силовой установке трактора МТЗ-80 при использовании в качестве топлива смеси, содержащей 75 % РМ и 25 % ДТ, было отмечено снижение содержания  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  и твердых частиц в ОГ в 2 раза, однако произошло увеличение на 8 % выбросов  $\text{NO}_x$  [124].

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что введение до 10 % биодизельного топлива в традиционное дизельное практически не оказывает влияния на эффективные показатели работы дизеля. Для поддержания технико-экономических показателей на существующем уровне при применении больших концентраций добавок необходима интенсификация процессов впрыскивания, смесеобразования и сгорания. Положительное влияние оказывает подогрев топлива до 70 °С. Увеличение давления впрыскивания до 80 МПа уменьшит диаметр капель впрыскиваемого топлива. Для улучшения процессов испарения и смесеобразования требуется интенсификация турбулизации воздушного заряда.

В биодизельное топливо, которое не используется сразу после его приготовления, необходимо добавлять антибиотик (антиокислительную присадку) во избежание роста микроорганизмов. Дело в том, что в биотопливе микроорганизмы растут значительно быстрее, чем в обычном дизельном топливе. Фирма Вауег, например, предлагает для этой цели экологически безопасный продукт – присадку Ваупох.

Экспресс-анализ отечественных литературных источников показал, что, помимо всего прочего, РМ и МЭРМ могут быть использованы в виде смазок и детергентных (моющих) присадок к маслам. Применение растительных масел в качестве смазочных объясняется их полной биоразлагаемостью. Для придания рапсовому маслу свойств нефтяного смазочного масла в него добавляют присадки, разработанные для нефтяных масел.

Возможен вариант использования рапсового масла в качестве рабочей жидкости в гидросистемах сельскохозяйственной техники. Установлено, что рапсовое масло почти не влияет на плодородие почвы, так как на 98 % разлагается через неделю и на 100 % через 3 недели. А вот минеральное масло разлагается на 25 % через неделю, на 45 % через 3 недели, а дальнейшее разложение может длиться не один год.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УЛУЧШЕНИЯ МОТОРНЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАПСОВОГО МАСЛА

### 2.1. Анализ возможности улучшения эксплуатационных свойств утяжеленных ДТ

При применении утяжеленных ДТ необходимо гарантировать безотказную работу системы топливоподачи дизеля как в теплое, так и в холодное время года.

Наибольшее влияние на процесс топливоподачи утяжеленных топлив может оказать его повышенная в сравнении с дизельным топливом кинематическая вязкость – свойство частиц жидкости оказывать сопротивление взаимному перемещению под действием внешней силы. Кинематическая вязкость является удельным коэффициентом внутреннего трения. Значение кинематической вязкости ДТ при 20 °С должно находиться в пределах 1,5...6,0 сСт, по ГОСТ 305–2013. В то же самое время вязкость рапсового масла на порядок выше этого показателя и при 20 °С составляет 78 сСт (при 40 °С составляет 34 сСт).

К основным факторам, определяющим работоспособность системы топливоподачи, следует отнести:

- разрежение, создаваемое топливоподкачивающим насосом;
- наибольшее гидравлическое сопротивление системы.

Оценку работоспособности системы следует производить с учетом следующих условий:

- участок от бака до топливоподкачивающего насоса (всасывающая линия) работает в режиме разрежения и наиболее подвержен влиянию температуры окружающей среды;
- участок от топливоподкачивающего насоса до ТНВД работает в режиме избыточного давления и наибольшее влияние на работоспособность оказывает гидравлическое сопротивление тракта.

Согласно [28], разрежение, создаваемое топливоподкачивающим насосом, равное 0,1 МПа, может быть определено по выражению:

$$H_{\text{н}} = \frac{128 \cdot \nu \cdot C_{\text{ср}} \cdot l \cdot 10^{-6}}{d \cdot 2g}, \quad (2.1)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость, сСт;

$C_{\text{ср}}$  – средняя скорость топлива в системе, м/с;

$l = 2,5$  м – длина топливопровода;

$d = 0,08$  м – диаметр топливопровода;



$g$  – ускорение свободного падения.

Средняя скорость топлива в системе может быть определена, как:

$$C_{\text{ср}} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}, \quad (2.2)$$

где  $Q = 0,005 \text{ м}^3/\text{с}$  – расход топлива.

Подставляя выражение для скорости топлива в выражение (2.1), получим окончательно значение вязкости:

$$\nu = \frac{H_n \cdot \pi \cdot g \cdot d^3}{256 \times 10^{-6} \cdot Q \cdot l}. \quad (2.3)$$

Расчет по выражению (2.3) показал, что для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 предельное значение вязкости составит  $\nu = 49,2$  сСт. В случае применения смесового утяжеленного топлива с добавками РМ такую вязкость при  $t = 20^\circ\text{C}$  имеет смесь из 65 % рапсового масла и 35 % дизельного топлива. Смеси с более высокой концентрацией рапсового масла вряд ли будут прокачиваться по всасывающей линии. Понижение температуры окружающего воздуха до  $t = 0^\circ\text{C}$  вызовет дополнительный рост вязкости суммарного топлива. Расчеты показывают, что в этом случае содержание рапсового масла в суммарном топливе не должно превышать 40 %. Таким образом, из условий работоспособности всасывающей линии, без применения специальных средств, содержание рапсового масла в смесовом топливе следует ограничить на уровне 40...45 % массы. На рис. 2.1 представлены расчетные зависимости кинематической вязкости различных составов смесевых топлив от температуры.

Жидкие топлива нефтяного происхождения представляют собой смеси различных углеводородов и не могут быть выражены простыми химическими формулами. Для таких топлив содержание в них отдельных элементов определяют путем химического анализа и обычно дают в массовых долях. Дизельные топлива содержат следующие группы углеводородов: парафиновые, нафтеновые, олефиновые, диеновые и ароматические.

Растительные масла по своему химическому строению представляют собой смесь триглицеринов с повышенной молекулярной массой и увеличенной длиной углеводородной цепи по сравнению с ДТ.

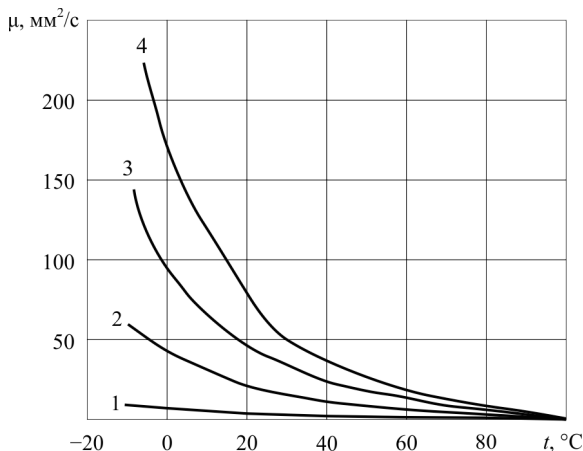


Рис. 2.1. Зависимости вязкости смесевых топлив от температуры:  
 1 – ДТ; 2 – 50 % РМ + 50 % ДТ; 3 – 75 % РМ + 25 % ДТ; 4 – РМ

От группового состава углеводородов и жирных кислот в этих видах топлив зависят все их свойства, а от свойств топлива, показатели работы дизеля [28, 45]. Для случая применения рапсового масла имеем следующий состав, представленный в табл. 2.1.

Положительным эффектом от повышения вязкости является улучшение смазывания плунжерных пар, увеличение их долговечности и снижение утечек через неплотности прецизионных пар, что способствует обеспечению давления впрыска топлива 17,5...20 МПа и выше. Но при этом увеличиваются нагрузки на детали ТНВД, снижается пропускная способность фильтров и возрастает гидродинамическое сопротивление трубопроводов.

Снижение вязкости утяжеленных ДТ облегчает их применение, что само по себе уже приводит к экономии ДТ. Тем не менее, это остается нерешенным вопросом химмотологического характера вследствие сложности коагуляционных и седиментационных процессов.

Улучшить физико-химические и моторные свойства ДТ можно химическим путем, путем введения в него присадок [33]. Наибольшее внимание нужно уделить многофункциональным присадкам. Наличие в них соединений многих функциональных групп позволяет одновременно улучшать несколько показателей, увеличивая ресурс двигателя и повышая его топливную экономичность.

Таблица 2.1. Состав рапсового масла

Наименование и обозначение жирной кислоты		Массовая доля в рапсовом масле, %	
		С массовой долей эруков кислоты до 5 %	С массовой долей эруков кислоты более 5 %
Тетрадекановая (миристиновая) $C_{14}H_{28}O_2$	$C_{14:0}$	До 0,3	–
Гексадекановая (пальмитиновая) $C_{16}H_{32}O_2$	$C_{16:0}$	2,5...6,5	1,0...6,5
Гексадеценновая (пальмитолеиновая) $C_{16}H_{30}O_2$	$C_{16:1}$	До 0,6	До 2,5
Октадекановая (стеариновая) $C_{18}H_{36}O_2$	$C_{18:1}$	0,8...2,5	До 2,5
Октадеценновая (олеиновая) $C_{18}H_{34}O_2$	$C_{18:1}$	50,0...65,0	7,5...60,0
Октадекадиеновая (линолевая) $C_{18}H_{32}O_2$	$C_{18:2}$	15,0...25,0	11,0...23,0
Октадекатриеновая (линоленовая) $C_{18}H_{30}O_2$	$C_{18:3}$	7,0...15,0	5,0...12,5
Эйкозановая (арахиновая) $C_{20}H_{40}O_2$	$C_{20:0}$	0,1...2,5	До 3,0
Эйкозеновая (гондолеиновая) $C_{20}H_{38}O_2$	$C_{20:1}$	0,1...4,0	3,5...6,0
Эйкозациеновая $C_{20}H_{36}O_2$	$C_{20:2}$	До 1,0	0,5...1,0
Докозановая (бегеновая) $C_{22}H_{44}O_2$	$C_{22:0}$	До 1,0	0,6...2,5
Докозеновая (эруковая) $C_{22}H_{42}O_2$	$C_{22:1}$	До 5,0	Св. 5,0 до 60,0
Докозациеновая $C_{22}H_{40}O_2$	$C_{22:2}$	До 0,5	0,6...2,5
Тетракозановая (лигноцериновая) $C_{24}H_{48}O_2$	$C_{24:0}$	До 0,2	До 2,0
Тетракозеновая (селахолевая) $C_{24}H_{46}O_2$	$C_{24:1}$	До 0,5	До 3,5

Очень часто одно и то же вещество выполняет несколько функций, и всегда одну и ту же функцию способны выполнять вещества различного химического строения. По мнению многих авторов, целесообразна классификация присадок, основанная на том, какие свойства присадки должны улучшать: физические, физико-химические или химические.

Ассортимент многофункциональных присадок достаточно велик. Оценка выбора присадок для снижения вязкости утяжеленных топлив может быть осуществлена по двум критериям [2]:

- значение поверхностной активности присадки;
- объемные свойства присадки.

Для регулирования вязкости необходимы присадки, в том числе не обладающие поверхностной активностью. Кроме того, известно, что, чем выше поверхностные свойства, тем хуже объемные свойства присадки (рис. 2.2) [34].

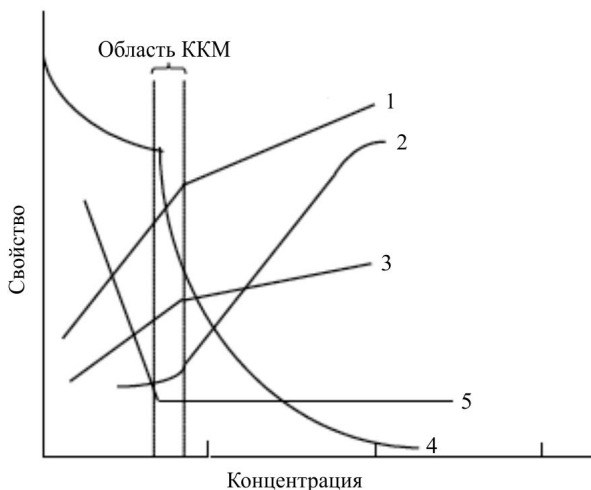


Рис. 2.2. Изменение свойств ПАВ в зависимости от концентрации:  
 1 – показатель мутности; 2 – показатель преломления; 3 – осмотическое давление;  
 4 – эквивалентная электропроводность; 5 – поверхностное натяжение

В состав дизельного топлива входят низко- и высокомолекулярные парафиновые, ароматические и наftenовые углеводороды, представляя собой связнодисперсную систему. Заметное влияние на вязкость оказывает кристаллообразование парафина при различных температурных и динамических условиях. Присадка – жидкий реагент, должна улучшать реологические свойства нефтяного топлива. Молекулы присадки, имея длинные алкильные радикалы, встраиваются в парафиновые кристаллы углеводородов с самых ранних стадий образования зародышей. При этом полярные функциональные группы присадки тормозят объединение парафиновых углеводородов в структурную решетку. В процессе объемного действия молекулы присадки формируют ассоциаты и мицеллы при температурах выше температуры ассоциатообразования молекул нормальных парафинов. Образование мицелл происходит только при достижении критической концентрации мицеллообразования (ККМ). Мицеллы, или агрегаты из молекул ПАВ, содержат в своем составе полярные группы внутри ассоциата, а алифатические радикалы направлены в дисперсную среду. Это обстоятельство приводит к сольватации мицелл молекулами парафиновых углеводородов и способствует образованию аморфизированных структур.

Таким образом, анализ специальных источников показывает, что наиболее эффективными для снижения вязкости могут быть депрессорные присадки [34, 35], обладающие повышенными объемными свойствами.

Аналитический расчет поверхностной активности различных ПАВ можно попытаться предварительно оценить по формуле [36]:

$$g = (\delta_0 - \delta_{\text{ККМ}}) / C_{\text{ККМ}}, \quad (2.4)$$

где  $g$  – поверхностная активность, (Н/м) / (моль/л);

$\delta_0$  и  $\delta_{\text{ККМ}}$  – значения поверхностного натяжения без присадки и при ККМ присадки;

$C_{\text{ККМ}}$  – критическая концентрация мицеллообразования, моль/л.

Принимаем для ДТ  $\delta_0 = 30,80 \times 10^{-3}$  Н/м,  $\delta_{\text{ККМ}} = 27,7$  Н/м, для РМ, соответственно,  $\delta_0 = 33,0 \times 10^{-3}$  Н/м,  $\delta_{\text{ККМ}} = 30,36$  Н/м. Значения  $\delta_0$  и  $\delta_{\text{ККМ}}$  для состава утяжеленного топлива, содержащего 55 % ДТ и 45 % РМ определяем по методу аддитивности.

Расчет  $g$  для некоторых основных типов доступных присадок также показал, что наименьшие ее значения присущи депрессорным присадкам (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Расчетные значения показателя поверхностной активности

Тип присадки	Критическая концентрация мицеллообразования при 50 °С, моль/л [84]	Значение показателя $g$
Моющая «Автомаг»	$2,0 \times 10^{-3}$	1,44
Диспергирующая «Keropur»	$2,4 \times 10^{-3}$	1,21
Противопенная «ПМС-200А»	$2,1 \times 10^{-3}$	1,38
Депрессорная «супер антигель HG3427»	$3,4 \times 10^{-3}$	0,85
Антиокислительная «ДФ-1»	$2,8 \times 10^{-3}$	1,03
Промотор «Difron H372»	$1,95 \times 10^{-3}$	1,48

В настоящее время выпускается многочисленное количество присадок отмеченного выше класса. Для проведения дальнейших исследований эффективности их действия нами был выбран ряд депрессорных присадок различных марок:

- «антигель ASTROhim» (№ 1);
- «супер антигель HG3427» (№ 2);
- «антигель Sapfire» (№ 3);
- «Diesel antigenel YUKO» (№ 4) [36].

Оценка эффективности снижения вязкости утяжеленных топлив может вестись по известным зависимостям. Существует ряд эмпирических формул для выражения зависимости вязкости от температуры [2]:

$$\lg \frac{\nu_t}{\nu_{20}} = \frac{c}{t - 20}, \quad (2.5)$$

$$\nu_t = \frac{1}{A + B \cdot t + C \cdot t^2}, \quad (2.6)$$

$$\lg \nu_t = \frac{A}{t + 92,8} + B, \quad (2.7)$$

где  $\nu_{20}$  – кинематическая вязкость топлива при 20 °С, мм<sup>2</sup>/с;

$A, B, C$  – эмпирические коэффициенты;

$t$  – температура топлива, °С.

Примененные в формулах эмпирические коэффициенты  $A, B, C$  для различных топлив различны, для утяжеленных составов ДТ и РМ неизвестны, что является их существенным недостатком.

В. Я. Колупаевым была предложена для расчета зависимости вязкости от температуры формула без эмпирических коэффициентов [64]:

$$\nu_{t1} = \nu_{20} + (1,1 \cdot \nu_{20} - 0,3) \cdot (1,3 - \lg t). \quad (2.8)$$

Формула является наиболее универсальной и может быть использована для широкого диапазона топлив. Для дизельных топлив с вязкостью  $\nu_t \leq 4$  мм<sup>2</sup>/с в диапазоне температур 0...100 °С погрешность расчета не превышает 6 %. Однако при добавлении в топливо высоковязких компонентов формула дает погрешность.

Результаты расчетов, приведенных в табл. 2.3, свидетельствуют о том, что формула (2.8) может быть применима для предварительного расчета вязкости ДТ. При этом максимальная погрешность составляет 5,7 %, однако при расчете для смесового топлива максимальная погрешность увеличивается. В нашем случае высоковязкое топливо содержит до 45 % рапсового масла, погрешность составляет 24 %, что не позволяет непосредственно использовать указанную зависимость.

Наибольшую точность для расчета вязкости высоковязких смесовых топлив на основе рапсового масла дает следующая эмпирическая формула [107]:

Таблица 2.3. Расчетные значения вязкости смесевых топлив при различных температурах

Температура, °С	Дизельное топливо (ДТ)					55 % ДТ + 45 % РМ				
	Опытное значение	Расчетный метод				Опытное значение	Расчетный метод			
		$\nu_{11}$	погрешность, %	$\nu_{12}$	погрешность, %		$\nu_{11}$	погрешность, %	$\nu_{12}$	погрешность, %
10	5,25	5,16	1,71	5,11	2,64	20,76	19,46	6,26	20,42	1,64
20	3,88	3,88	0	3,88	0	14,63	14,62	0,07	14,62	0,07
30	3,03	3,12	3,10	3,17	4,46	10,97	11,78	6,88	10,93	0,37
40	2,48	2,59	4,47	2,64	6,44	8,61	9,77	11,87	8,79	2,05
50	2,17	2,18	0,33	2,23	2,81	6,70	8,21	18,39	7,16	6,43
60	1,74	1,84	5,70	1,90	8,99	5,29	6,94	23,78	5,83	9,26
70	1,52	1,55	2,21	1,61	6,13	4,94	5,86	15,70	4,72	4,45
80	1,31	1,31	0,30	1,37	4,41	4,01	4,93	18,66	3,76	6,23

$$\nu_{12} = \nu_{20} + (1,1 \cdot \nu_{20} - 0,3) \cdot (1,3 - \lg t) - (0,1174 \cdot \nu_{20} - 0,5102) \cdot \sqrt[3]{\ln\left(\frac{t}{20}\right)}. \quad (2.9)$$

Максимальная погрешность расчета по формуле (2.8) составляет 9 %, при этом температура смесевого топлива может находиться в пределах  $t = 0 \dots 80$  °С, а концентрация РМ в топливе может составлять  $C_{\text{PM}} = 0 \dots 45$  %.

Предложенная формула (2.9) позволяет рассчитывать вязкость смесевых топлив с погрешностью до 10 % в температурном диапазоне от 0...80 °С.

Проведенный расчет эффективности снижения вязкости смесевых утяжеленных топлив с присутствием 25 % и 45 % рапсового масла при добавке различных марок депрессорных присадок по формуле (2.9) показал следующие данные (табл. 2.4).

Результаты расчетов показывают, что улучшение эксплуатационных свойств утяжеленных топлив возможно химическим путем. Введение в состав до 5 % присадки № 2 «супер антигель HG3427» позволяет на 22 % снизить значение кинематической вязкости смесевого топлива. Однако, результаты расчетов нуждаются в экспериментальной проверке.

Таблица 2.4. **Расчетные значения вязкости смесевых топлив с депрессорными присадками**

Температура, °C	Вязкость, мм <sup>2</sup> /с							
	72,5 % ДТ + 22,5 % РМ + 5 % ПР				52,5 % ДТ + 42,5 % РМ + 5 % ПР			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
10	11,33	10,75	11,70	12,52	26,17	24,49	27,00	31,60
20	8,28	7,87	8,54	9,11	18,63	17,46	19,21	22,42
30	6,38	6,09	6,57	6,98	13,82	12,98	14,23	16,54
40	5,21	4,98	5,36	5,68	11,05	10,39	11,38	13,19
50	4,32	4,14	4,44	4,69	8,95	8,43	9,21	10,64
60	3,59	3,45	3,69	3,89	7,25	6,84	7,45	8,59
70	2,98	2,87	3,05	3,21	5,82	5,50	5,98	6,86
80	2,46	2,37	2,51	2,63	4,59	4,35	4,71	5,37

Разработанная методика улучшения эксплуатационных свойств утяжеленных топлив позволяет производить предварительный выбор и оценку пригодности многофункциональных присадок для снижения кинематической вязкости топлив с добавками РМ на основе расчета значения поверхностного натяжения.

## 2.2. Улучшение низкотемпературных свойств топлив с добавкой рапсового масла

При использовании вместо чистого ДТ топлив с добавками РМ необходимо соблюдение условия обеспечения бесперебойной подачи топлива [5], определяющее работоспособность системы питания [146], а именно непрерывное, надежное и полное поступление топлива в камеру сгорания дизеля в соответствии с заданным законом топливоподачи [5]. Нарушение этого закона приводит к нарушению процесса смесеобразования и сгорания.

На подачу топлив влияют конструкция системы питания, условия эксплуатации дизеля и физико-химические свойства применяемых топлив [5]. Конструкция систем питания влияет на величину гидравлических потерь через местные сопротивления, создаваемые элементами самой системы. Условия эксплуатации выражаются параметрами внешней среды, а именно температурой, давлением и влажностью. Также учитываются физико-химические свойства топлива в частности прокачиваемость и фильтруемость, которые в большей мере относятся к низкотемпературным свойствам.

Прокачиваемость характеризует результат и особенности процесса прокачки топлива по элементам системы питания дизеля, а фильтруе-



мость, как частный случай прокачиваемости, представляет из себя способность топлива проходить через фильтр.

Основной причиной нарушений в топливopодаче, особенно при прохождении фильтров, является наличие в топливе твердой фазы различного происхождения. Основными характеристиками прокачиваемости топлив являются текучесть и фильтруемость, определяемые через температуры замерзания, помутнения, кристаллизации [133], а также предельную температуру фильтруемости [5, 134], определяемые как низкотемпературные свойства топлив. В случае использования ДТ с добавками РМ в значительной степени ухудшаются такие свойства, как фильтруемость и прокачиваемость, так как РМ по сравнению с ДТ имеет большую вязкость [146]. В исследованиях, проведенных ранее, было установлено значительное влияние температуры на вязкость РМ. В результате при добавлении РМ в ДТ в значительной степени увеличивается вязкость такого топлива с понижением температуры. Данное обстоятельство приводит к ухудшению низкотемпературных свойств такого топлива и накладывает определенные ограничения на концентрацию добавки самого РМ в ДТ и возможность его применения в качестве топлива в автотракторных дизелях.

Для расширения пределов применения топлив с добавками РМ необходимо соблюдение ряда условий, таких как:

Обеспечение возможности прокачиваемости топлива по системе питания для осуществления бесперебойной работы в широком температурном диапазоне.

Обеспечение фильтруемости топлива для возможности его механической очистки от всевозможных примесей в таком же температурном диапазоне работы что и для чистого ДТ.

Обеспечить эти условия для топлив с добавками РМ можно путем улучшения их низкотемпературных свойств. В настоящее время существует два основных способа улучшения низкотемпературных свойств с добавками РМ [75]:

создание топлив с добавками РМ с заданными низкотемпературными свойствами;

воздействие на свойства топлив с добавками РМ в процессе его получения.

Первый способ состоит в том, что перед добавкой РМ в ДТ задаются нужные показатели низкотемпературных свойств и только после этого проходит процесс его смешения [75].

Второй способ сводится к добавлению различных присадок целенаправленного принципа действия, которые повышают прокачиваемость

и, как следствие, текучесть и фильтруемость, тем самым улучшая низкотемпературные свойства [30, 41]. Однако эффективность действия данных присадок зависит от их концентрации в топливе с добавками РМ, его состава и наличия в нем поверхностно-активных веществ.

Из ранее проведенных исследований [75] известно, что температуру помутнения и замерзания ДТ можно определить по количеству кристаллов *n*-алканов. Так, при температуре, равной температуре помутнения, их объемное количество составляет примерно 50 %, а при температуре замерзания приближается к 80 %. В случае РМ температуру помутнения и замерзания можно оценить по процентному содержанию количества кристаллов воска [166–168].

Также целый ряд исследователей [30, 41, 44, 64] утверждает, что на образование достаточного количества кристаллов в топливах с добавкой РМ косвенно указывает резкое увеличение вязкости. Поэтому определить начало образования, а также зависимость роста этих кристаллов *n*-алканов для ДТ и восков для РМ, от количества последнего в топливе, можно по скорости изменения вязкости в зависимости от температуры; т. е. повышение скорости увеличения вязкости топлива с добавками РМ в зависимости от температуры и будет напрямую определять температуру помутнения и предельную температуру фильтруемости.

В работах, проведенных ранее [30, 41], был исследован ряд различных депрессорно-диспергирующих присадок. На основании проведенных исследований выбрана присадка DIFRON H372, оказывающая наибольшее влияние на вязкость смесового топлива при ее наименьшей концентрации.

Расчет свойств состава смесового топлива с добавками РМ и присадки через взвешенное среднее текучести компонентов обычно приводил к результатам, в несколько раз отличающимся от экспериментальных данных. Зависимость вязкости смесового топлива от доли РМ и концентрации присадки DIFRON H372 при нормальной температуре представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Зависимость свойств топлива от доли РМ и концентрации присадки

Доля РМ, С, %	Вязкость топлива с добавками РМ, $\nu$ , $\text{м}^2/\text{с}$ , при концентрации присадки $C_d$ , %			
	0	0,5	1,0	2,0
0	$4,524 \cdot 10^{-6}$	$4,492 \cdot 10^{-6}$	$4,455 \cdot 10^{-6}$	$4,405 \cdot 10^{-6}$
10	$6,008 \cdot 10^{-6}$	$5,945 \cdot 10^{-6}$	$5,873 \cdot 10^{-6}$	$4,811 \cdot 10^{-6}$
20	$7,885 \cdot 10^{-6}$	$7,739 \cdot 10^{-6}$	$7,633 \cdot 10^{-6}$	$7,123 \cdot 10^{-6}$
30	$10,264 \cdot 10^{-6}$	$10,096 \cdot 10^{-6}$	$9,984 \cdot 10^{-6}$	$9,860 \cdot 10^{-6}$
40	$13,899 \cdot 10^{-6}$	$13,468 \cdot 10^{-6}$	$13,270 \cdot 10^{-6}$	$12,968 \cdot 10^{-6}$
50	$17,894 \cdot 10^{-6}$	$17,692 \cdot 10^{-6}$	$17,400 \cdot 10^{-6}$	$16,985 \cdot 10^{-6}$

Данные концентрационных зависимостей позволяют допустить зависимость между кинематической вязкостью и долей РМ в смесевом топливе при условии аппроксимации полиномом третьей степени с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,99$  (рис. 2.3).

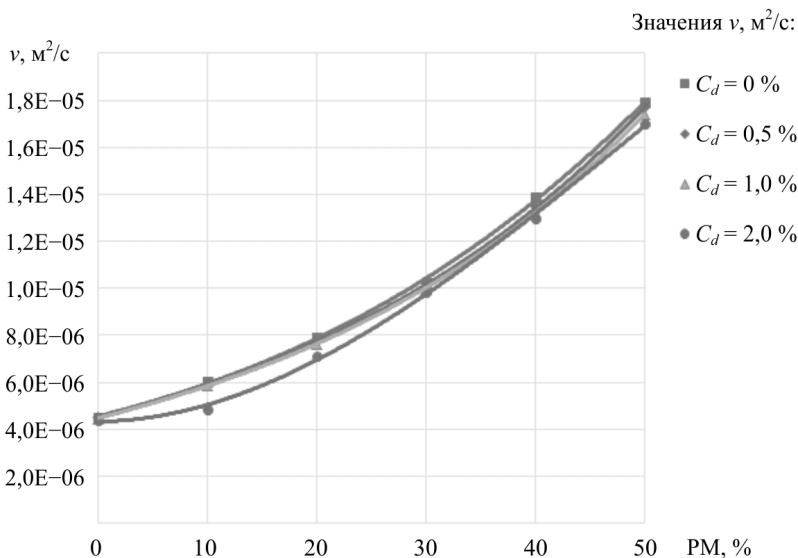


Рис. 2.3. Зависимости вязкости топлива от доли РМ  $C$ , % при различной концентрации присадки в топливе  $C_d$ , %

Как показал анализ представленных на рис. 2.1 зависимостей, вязкость можно выразить следующей полиномиальной зависимостью:

$$\nu_{C_d} = a_C C^3 + b_C C^2 + d_C C + e_C, \quad (2.10)$$

где  $a_C$ ,  $b_C$ ,  $d_C$ ,  $e_C$ , – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов для различных долей РМ при различных концентрациях присадки DIFRON H372 в топливе представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Значения эмпирических коэффициентов зависимостей вязкостей топлив с добавками РМ от концентрации присадки

Концентрация присадки DIFRON H372, $C_d$ , %	Значения эмпирических коэффициентов			
	$a_c$	$b_c$	$d_c$	$e_c$
0	$2 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,060 \cdot 10^{-9}$	$4,920 \cdot 10^{-6}$
0,5	$4 \cdot 10^{-11}$	$10,0 \cdot 10^{-10}$	$1,080 \cdot 10^{-7}$	$4,020 \cdot 10^{-6}$
1,0	$3 \cdot 10^{-11}$	$9,7 \cdot 10^{-10}$	$1,104 \cdot 10^{-7}$	$4,037 \cdot 10^{-6}$
2,0	$-5 \cdot 10^{-11}$	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$-0,350 \cdot 10^{-7}$	$3,850 \cdot 10^{-6}$

Тогда, согласно выражению (1), с учетом значений, представленных в табл. 2.6, можно составить систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{0,0} = 2 \cdot 10^{-11} C^3 + 1,6 \cdot 10^{-9} C^2 + 1,060 \cdot 10^{-9} C + 4,920 \cdot 10^{-6} \\ v_{0,5} = 4 \cdot 10^{-11} C^3 + 10,0 \cdot 10^{-10} C^2 + 1,080 \cdot 10^{-7} C + 4,020 \cdot 10^{-6} \\ v_{1,0} = 3 \cdot 10^{-11} C^3 + 9,7 \cdot 10^{-10} C^2 + 1,104 \cdot 10^{-7} C + 4,037 \cdot 10^{-6} \\ v_{2,0} = -5 \cdot 10^{-11} C^3 + 7,5 \cdot 10^{-9} C^2 - 0,350 \cdot 10^{-7} C + 3,850 \cdot 10^{-6} \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

Представляя значения эмпирических коэффициентов в виде матрицы можно определить их зависимость от концентрации присадки при интервале варьирования доли РМ в топливе от 0 до 50 %. При этом их зависимости определяются полиномом третьей степени и могут быть представлены в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_c = -25,466 \cdot 10^{-12} C_d^3 - 0,997 \cdot 10^{-11} C_d^2 - 1,973 \cdot 10^{-11} C_d + 1,664 \cdot 10^{-11} \\ b_c = 3,638 \cdot 10^{-9} C_d^3 - 6,008 \cdot 10^{-9} C_d^2 + 1,008 \cdot 10^{-8} C_d + 0,209 \cdot 10^{-8} \\ d_c = -25,466 \cdot 10^{-9} C_d^3 - 78,559 \cdot 10^{-9} C_d^2 + 2,488 \cdot 10^{-7} C_d + 0,08 \cdot 10^{-7} \\ e_c = -7,276 \cdot 10^{-7} C_d^3 + 3,094 \cdot 10^{-6} C_d^2 - 3,832 \cdot 10^{-6} C_d - 10,26 \cdot 10^{-6} \end{array} \right\} \quad (2.12)$$

Подставляя систему уравнений (2.12) в систему (2.11), можно получить уравнение вязкости в зависимости от доли РМ и концентрации присадки DIFRON H372 в топливе в виде выражения (2.10).

Также из данных концентрационных зависимостей (табл. 2.6) видно, что зависимость между кинематической вязкостью и концентрацией присадки DIFRON H372 в топливе при различных долях РМ можно также выразить полиномом третьей степени с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,99$  (рис. 2.4).

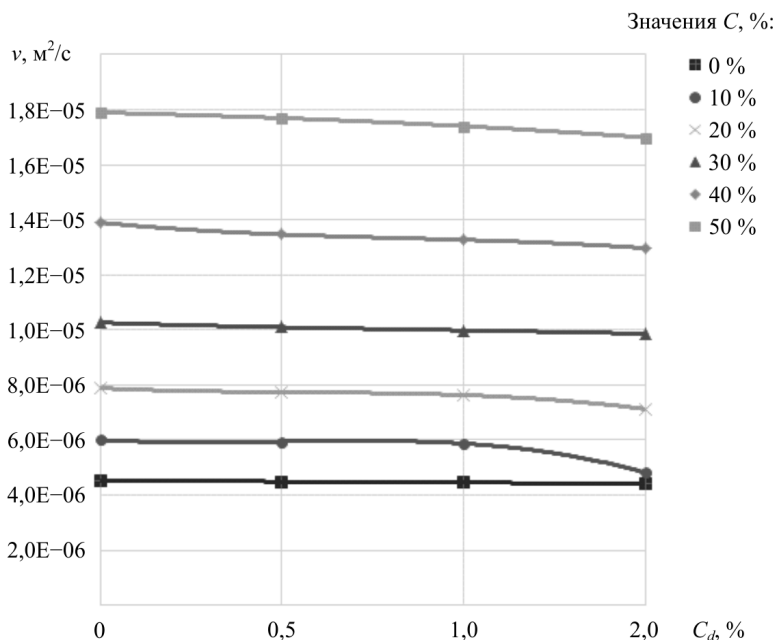


Рис. 2.4. Зависимости вязкости от концентрации присадки в топливе при различной доле РМ

Как показал анализ представленных на рис. 2.4 зависимостей, вязкость можно выразить следующей полиномиальной зависимостью:

$$\nu_C = a_{C_d} C_d^3 + b_{C_d} C_d^2 + d_{C_d} C_d + e_{C_d}, \quad (2.13)$$

где  $a_{C_d}, b_{C_d}, d_{C_d}, e_{C_d}$  – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов для различной концентрации присадки DIFRON H372 в топливе при различных долях РМ представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Значения эмпирических коэффициентов зависимостей вязкости топлив от доли добавки РМ

Доля РМ, С, %	Значения эмпирических коэффициентов			
	$a_{C_d}$	$b_{C_d}$	$d_{C_d}$	$e_{C_d}$
0	$-3,641 \cdot 10^{-9}$	$6,002 \cdot 10^{-9}$	$-3,408 \cdot 10^{-8}$	$4,960 \cdot 10^{-6}$
10	$-7,282 \cdot 10^{-7}$	$0,728 \cdot 10^{-6}$	$-0,754 \cdot 10^{-6}$	$5,716 \cdot 10^{-6}$
20	$-25,487 \cdot 10^{-8}$	$6,095 \cdot 10^{-7}$	$-0,193 \cdot 10^{-6}$	$8,404 \cdot 10^{-6}$
30	$-3,641 \cdot 10^{-8}$	$1,547 \cdot 10^{-7}$	$-3,215 \cdot 10^{-7}$	$0,966 \cdot 10^{-5}$
40	$-21,846 \cdot 10^{-9}$	$-7,282 \cdot 10^{-8}$	$-2,261 \cdot 10^{-7}$	$1,989 \cdot 10^{-5}$
50	$-21,846 \cdot 10^{-8}$	$6,914 \cdot 10^{-7}$	$-0,131 \cdot 10^{-6}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$

Тогда согласно выражению (2.13), с учетом значений, представленных в табл. 2.3 можно составить систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_0 = -3,641 \cdot 10^{-9} C_d^3 + 6,002 \cdot 10^{-9} C_d^2 - 3,408 \cdot 10^{-8} C_d + 4,960 \cdot 10^{-6} \\ v_{10} = -7,282 \cdot 10^{-7} C_d^3 + 0,728 \cdot 10^{-6} C_d^2 - 0,754 \cdot 10^{-6} C_d + 5,716 \cdot 10^{-6} \\ v_{20} = -25,487 \cdot 10^{-8} C_d^3 + 6,095 \cdot 10^{-7} C_d^2 - 0,193 \cdot 10^{-6} C_d + 8,404 \cdot 10^{-6} \\ v_{30} = -3,641 \cdot 10^{-8} C_d^3 + 1,547 \cdot 10^{-7} C_d^2 - 3,215 \cdot 10^{-7} C_d + 0,966 \cdot 10^{-5} \\ v_{40} = -21,846 \cdot 10^{-8} C_d^3 - 7,282 \cdot 10^{-8} C_d^2 - 2,261 \cdot 10^{-7} C_d + 1,989 \cdot 10^{-5} \\ v_{50} = -21,846 \cdot 10^{-9} C_d^3 + 6,914 \cdot 10^{-7} C_d^2 - 0,131 \cdot 10^{-6} C_d + 1,111 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\} \quad (2.14)$$

Представляя значения эмпирических коэффициентов в виде матрицы, можно определить их зависимость от доли РМ при интервале концентрации присадки в топливе от 0 до 2,0 %. При этом их зависимости определяются полиномом третьей степени и могут быть представлены в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{C_d} = -0,006 \cdot 10^{-8} C^3 + 0,088 \cdot 10^{-7} C^2 - 0,078 \cdot 10^{-6} C - 0,24 \cdot 10^{-6} \\ b_{C_d} = 0,001 \cdot 10^{-7} C^3 - 0,007 \cdot 10^{-6} C^2 + 0,13 \cdot 10^{-6} C + 0,1 \cdot 10^{-6} \\ d_{C_d} = -0,003 \cdot 10^{-8} C^3 + 0,031 \cdot 10^{-7} C^2 - 0,029 \cdot 10^{-6} C + 0,33 \cdot 10^{-6} \\ e_{C_d} = -0,007 \cdot 10^{-7} C^3 + 0,091 \cdot 10^{-6} C^2 - 0,27 \cdot 10^{-5} C + 6,3 \cdot 10^{-6} \end{array} \right\} \quad (2.15)$$

Подставляя систему уравнений (2.15) в систему (2.14), можно получить уравнение вязкости в зависимости от доли РМ и концентрации присадки DIFRON H372 в топливе в виде выражения (2.13).

Сопоставляя выражения (2.10) и (2.13) и приравняв их между собой удалось определить расхождение между экспериментальными и вычисленными по полиномам третьей степени значениями вязкости, которые не превышали 3 %. Графическая интерпретация полученной зависимости вязкости от доли РМ и концентрации присадки DIFRON H372 в топливе представлена на рис. 2.5.

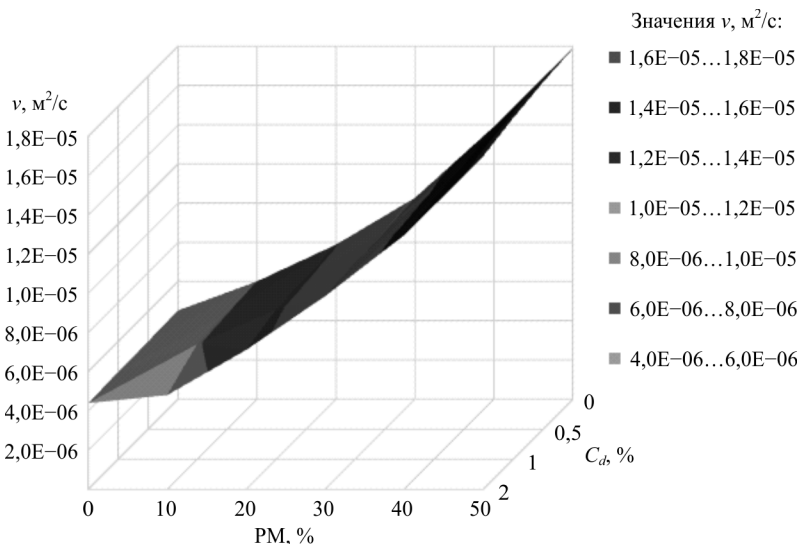


Рис. 2.5. Зависимость вязкости топлива от доли РМ и концентрации присадки

На основании ранее проведенных исследований была предложена формула для расчета вязкости высоковязких смесевых топлив [147], в которой температура, выраженная в градусах Цельсия, нами была замена на температуру, выраженную в градусах Кельвина:

$$v = v_0 + (1,1v_0 - 0,3)(1,3 - \lg(T - 273,15)) - (0,1172v_0 - 0,5101) \sqrt[3]{\ln\left(\frac{T - 273,15}{20}\right)}, \quad (2.16)$$

где  $\nu_0$  – значение вязкости, полученное по выражениям (2.10) и (2.13),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$T$  – температура топлива с добавками РМ и присадкой, К.

Определим скорость изменения вязкости в зависимости от температуры топлива с добавками РМ и присадкой. Для этого нужно найти частную производную вязкости от температуры:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nu}{\partial T} = & (\nu_0)'_T + (1,43\nu_0)'_T - (1,1\nu_0 \lg(T-273,15))'_T - (0,39)'_T + (0,3 \lg(T-273,15))'_T - \\ & - \left( 0,1172\nu_0 \sqrt[3]{\ln\left(\frac{T-273,15}{20}\right)} \right)'_T - \left( 0,5101 \sqrt[3]{\ln\left(\frac{T-273,15}{20}\right)} \right)'_T. \end{aligned} \quad (2.17)$$

После нахождения производных правой части уравнения (2.17) и некоторых преобразований получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nu}{\partial T} = & 1,1 \frac{\nu_0}{\ln 10 \cdot (T-273,15)} + \frac{0,3}{\ln 10 \cdot (T-273,15)} - \frac{0,039\nu_0}{\sqrt[3]{\ln^2\left(\frac{T}{20} - 273,15\right) \cdot (T-273,15)}} - \\ & - \frac{0,17}{\sqrt[3]{\ln^2\left(\frac{T}{20} - 273,15\right) \cdot (T-273,15)}}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Для определения максимальной скорости увеличения вязкости топлива с добавками РМ для выражения (2.18) необходимо определить экстремумы этой функции, а именно определить вторую производную. Для этого продифференцируем выражение (2.18) второй раз по переменной  $\partial T$ :

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \nu}{\partial T} \right)' = & 1 \left( 1,1 \frac{\nu_0}{\ln 10 \cdot (T-273,15)} \right)' + \left( \frac{0,3}{\ln 10 \cdot (T-273,15)} \right)' - \\ & - \left( \frac{0,039\nu_0}{\sqrt[3]{\ln^2\left(\frac{T}{20} - 273,15\right) \cdot (T-273,15)}} \right)' - \left( \frac{0,17}{\sqrt[3]{\ln^2\left(\frac{T}{20} - 273,15\right) \cdot (T-273,15)}} \right)'. \end{aligned} \quad (2.19)$$

После преобразований получим:



$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)' = & \frac{39v_0 \left[ \frac{1}{\sqrt[3]{\ln\left(\frac{T}{20} - 273,15\right)} \cdot \left(\frac{T}{20} - 273,15\right)} \cdot (0,033T - 9,104) + \sqrt[3]{\ln^2\left(\frac{T}{20} - 273,15\right)} \right]}{1000 \ln^{\frac{4}{3}}\left(\frac{T}{20} - 273,15\right) \cdot (T - 273,15)^2} + \\
& + \frac{17 \left[ \frac{1}{\sqrt[3]{\ln\left(\frac{T}{20} - 273,15\right)} \cdot \left(\frac{T}{20} - 273,15\right)} \cdot (0,033T - 9,104) + \sqrt[3]{\ln^2\left(\frac{T}{20} - 273,15\right)} \right]}{100 \ln^{\frac{4}{3}}\left(\frac{T}{20} - 273,15\right) \cdot (T - 273,15)^2} - \\
& - \frac{1,1v_0}{\ln 10 \cdot (T - 273,15)^2} - \frac{0,3}{\ln 10 \cdot (T - 273,15)^2}.
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Для определения температуры помутнения, при которой достигается максимальная скорость изменения вязкости в зависимости от доли РМ и концентрации присадки DIFRON H372 необходимо, чтобы вто-

рая производная  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)' = 0$ . Приравняв правую часть выражения (2.20)

к нулю и совершив преобразования, можно определить температуру помутнения.

После подстановки в выражение (2.20) переменных их табл. 2.1 определили температуры помутнения  $T_n$  в зависимости от доли РМ и концентрации присадки в топливе. Полученные расчетные значения представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Значение температур помутнения  $T_n$  топлива с добавками РМ и присадки DIFRON H372

Доля РМ, С, %	Концентрация присадки $C_d$ , %			
	0	0,5	1,0	2,0
0	275,1	274,1	273,6	273,1
10	275,25	274,5	273,85	273,35
20	275,6	275,1	274,35	273,55
30	276,7	275,75	274,75	273,75
40	277,4	276,65	274,75	273,95
50	278,1	277,6	275,8	274,1

По полученным расчетным значениям, представленным в табл. 2.8, построен трехмерный график зависимости температур помутнения топлив от доли РМ и концентрации присадки DIFRON H372 (рис. 2.6).

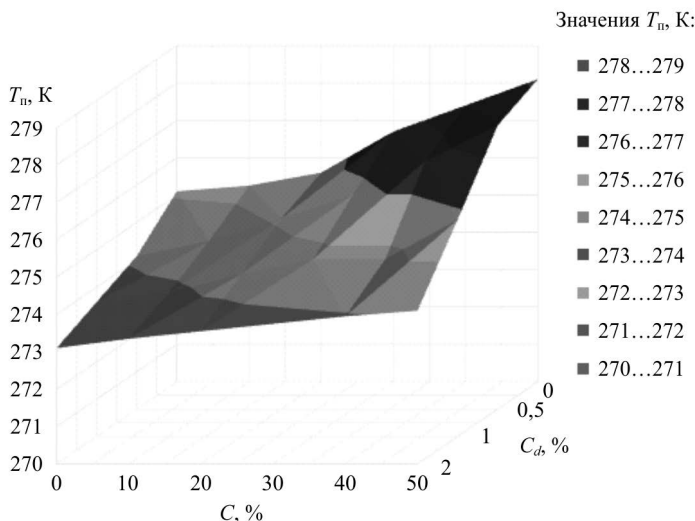


Рис. 2.6. Зависимость температуры помутнения  $T_n$  топлива от доли добавки РМ  $C$ , % и концентрации присадки DIFRON H372  $C_{ds}$ , %

Расчеты, представленные в табл. 2.8 и на рис. 2.6, показывают, что значения температур помутнения топлив уменьшаются с 279 до 270 К со снижением добавки РМ от 50 до 0 % и повышением концентрации присадки DIFRON H372 от 0 до 2 %.

Так, для нормальной работы дизеля в условиях низких температур на топливе с добавками РМ целесообразно применение многофункциональной присадки DIFRON H372 до 2 % с целью улучшения низкотемпературных свойств.

### 2.3. Определение влияния применения смесового топлива на механизмы процесса сгорания

При впрыскивании смесового топлива, состоящего из ДТ, РМ и присадки целенаправленного действия, в камеру сгорания дизеля происходят изменения показателей процесса сгорания, которые характе-

ризуются смещениями кривой давления на индикаторных диаграммах как по абсциссе, так и по ординате. Данные изменения обусловлены наличием определенной доли присадки целенаправленного действия, входящей в состав смесового топлива, вызывающей изменения структуры и механизма протекания гетерогенных химических реакций, связанных с его окислением. Эти обстоятельства можно объяснить некоторыми особенностями химической кинетики протекающих реакций на основе сложных превращений в виде цепочки последовательности элементарных актов [81, 91].

Горение присадки целенаправленного действия совместно со смесевым топливом в камере сгорания дизеля обусловлено сложным физико-химическим процессом их взаимодействия с окислителем, сопровождающимся изменениями показателей тепловыделения.

Этот сложный химический процесс сопровождается рядом физических явлений, таких как испарение присадки, диффузия ее паров, воздуха и продуктов сгорания, движение газа и тепло- массообмен. Согласно фундаментальной теории химической кинетики, скорость сгорания определяется как скорость химической реакции. В связи с этим на скорость сгорания смесового топлива будут оказывать влияние тип и концентрация присадки.

Химический процесс сгорания впрыснутого смесового топлива, содержащего присадку, можно рассмотреть на принципах деструкции и рекомбинации молекул, т.е. первоначально уменьшению их молекулярных масс и размеров, а также перераспределению атомов между молекулами.

Рассмотрим более подробно данный процесс. Прежде всего высокое давление и температура свежего заряда в камере сгорания в конце такта сжатия приводит к деструкции молекул впрыскиваемого смесового топлива, т.е. уменьшению их молекулярных масс и размера, в том числе и присадки целенаправленного действия [81].

Процесс деструкции молекул смесового топлива происходит по цепному механизму. С нарастанием давления и температуры в камере сгорания дизеля процессы рекомбинации молекул впрыснутого смесового топлива начинают происходить быстрее чем процессы деструкции, это обстоятельство можно выразить следующим условием:

$$\alpha - \beta > 0, \quad (2.21)$$

где  $\alpha$  – вероятность рекомбинации молекул впрыснутого смесового топлива, %;

$\beta$  – вероятность деструкции молекул впрыснутого смесового топлива, %.

В общем виде уравнение скорости рекомбинации молекул впрыснутого смесового топлива имеет вид:

$$\frac{dn}{d\varphi} = \omega_0 + \alpha n - \beta n, \quad (2.22)$$

где  $n$  – количество рекомбинированных молекул впрыснутого смесового топлива;

$\varphi$  – угол поворота коленчатого вала дизеля, град. п.к.в.;

$\omega_0$  – скорость рекомбинации молекул впрыснутого смесового топлива.

При изменении внешних факторов таких как температура и давление происходит изменение величин  $\alpha$  и  $\beta$ , однако  $\alpha$  в большей степени зависит от температуры чем  $\beta$ . Этот факт объясняется тем, что вероятность деструкции молекул впрыснутого топлива не связана с энергией их активации [91]. Учитывая данный факт, уравнение определения количества рекомбинированных молекул принимает следующий вид:

$$n = \frac{\omega_0}{\alpha - \beta} [\exp((\alpha - \beta)\varphi) - 1]. \quad (2.23)$$

В результате химических реакций рекомбинации молекул впрыснутого смесового топлива получается  $a$  количества молекул конечного продукта, поэтому скорость рекомбинации будет выглядеть:

$$\omega = a\alpha n = a\alpha \frac{\omega_0}{\alpha - \beta} [\exp((\alpha - \beta)\varphi) - 1], \quad (2.24)$$

где  $a$  – количество, молекул конечного продукта, образующегося в результате рекомбинации молекул впрыснутого смесового топлива.

Разность величин  $\alpha$  и  $\beta$  является фактором определения момента и степени самоускорения химической реакции. Согласно выражению

(2.10), реакция протекает с положительным ускорением  $\frac{d\omega}{d\varphi} > 0$ , от-

сюда можно выделить две основные стадии химической реакции.

На первой стадии скорость химической реакции небольшая и ее невозможно измерить. Химическая реакция с такой скоростью продолжается в течение времени  $\tau_i$  за угол п.к.в., равный  $\varphi_i$ , называемый пе-

риодом индукции теплового взрыва [91]. На второй стадии скорость химической реакции увеличивается до значений  $\omega = \max$ . Таким образом, период индукции теплового взрыва – это угол п.к.в., за время  $\tau_i$ , которое необходимо для накопления во впрыснутой порции смесового топлива такого количества рекомбинированных молекул, при котором скорость реакции принимает  $\omega = \min$ .

Текущее давление в камере сгорания дизеля в определенный момент времени  $\tau_i$  за угол п.к.в., равный  $\phi_i$ , имеет вид:

$$P = nkT, \quad (2.25)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,380\,648\,52(79) \cdot 10^{-23}$ , Дж/К;

$T$  – текущая температура в камере сгорания дизеля, К.

В связи с этим в присутствии присадки будет наблюдаться увеличение общего количества рекомбинированных молекул впрыснутого топлива.

Этот факт можно объяснить тем, что превышение давления в камере сгорания дизеля в процессе крекинга имеет следующий вид:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{n}{n_0}, \quad (2.26)$$

где  $P_0$  – текущее давление в камере сгорания дизеля в определенный момент времени  $\tau_i$  за угол п.к.в., равный  $\phi_i$ , без присадки в смесовом топливе, МПа;

$n_0$  – количество рекомбинированных молекул впрыснутого смесового топлива без присадки в смесовом топливе, шт.

Анализ выражения (2.26) показывает пропорциональную зависимость изменения ординаты кривой давления на индикаторной диаграмме от количества рекомбинированных молекул впрыснутого смесового топлива. Так как количество рекомбинированных молекул впрыснутого смесового топлива находится в прямо пропорциональной зависимости от концентрации присадки целенаправленного действия, таким образом можно определить изменение давления на индикаторной диаграмме. Отсюда следует, что при введении в состав смесового топлива доли присадки целенаправленного действия приведет к увеличению на эту самую долю давления в цилиндре дизеля.

Для объяснения дальнейших особенностей изменения кривых давления на индикаторных диаграммах необходимо проанализировать изменение константы скорости химической реакции, как следствие произошедшей деструкции молекул впрыснутого смесового топлива.

В связи с этим рассмотрим два случая:

1. Непосредственное влияние деструкции молекул впрыснутого топлива содержащего присадку целенаправленного действия на протекающие химические реакции.

2. Косвенное влияние уменьшения размеров молекул впрыснутого смесового топлива на энергию активации химической реакции их окисления.

Известно, что температура свежего заряда в камере сгорания дизеля, куда впрыскивается порция смесового топлива, содержащего присадку целенаправленного действия, оказывает влияние на скорость химической реакции окисления топлива. Степень влияния можно определить на основании уравнения Аррениуса, позволяющего определить константу скорости химической реакции [84]:

$$K(T) = K_0 \exp\left[-\frac{E}{RT}\right], \quad (2.27)$$

где  $K_0$  – предэкспоненциальный множитель;

$E$  – энергия активации впрыснутой порции смесового топлива, содержащего присадку целенаправленного действия, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,3144598(48)$ , Дж/моль · К;

$T$  – текущая температура заряда в цилиндре дизеля, К.

Согласно кинетической теории газов, предэкспоненциальный множитель  $K_0$  характеризует количество взаимодействий молекул смесового топлива с окислителем, в связи с этим уравнение Аррениуса принимает следующий вид:

$$\frac{z_E}{z_0} = \exp\left[-\frac{E}{RT}\right], \quad (2.28)$$

где  $z_E$  – количество активных взаимодействий молекул смесового топлива;

$z_0$  – количество полных взаимодействий молекул смесового топлива.

На количество активных и полных столкновений молекул смесового топлива впрыснутого в камеру сгорания дизеля будет оказывать влияние химическая реакция окисления доли присадки целенаправленного действия содержащейся в смесовом топливе. Кинетика данного процесса обуславливается многомолекулярной химической реакцией, состоящей из совокупности элементарных стадий, т. е. различных

реакций имеющих в основном би- и тримолекулярный характер [143]. Большинство химических реакций горения смесевых топлив с добавлением многофункциональных присадок являются сложными. Порядок таких сложных химических реакций может быть дробным и не совпадать с молекулярностью реакций, определяемых стехиометрическими уравнениями. Таким образом, определение самого порядка химической реакции в соответствие с методом Вант-Гоффа справедливо только для элементарных реакций стехиометрических смесей. Сложные химические реакции протекают как би- и тримолекулярные, это происходит, когда определяющая часть реакции медленная.

Так как в состав смесевое топлива входят три компонента, такие как дизельное топливо (ДТ), РМ и присадка целенаправленного действия, то и рассмотреть сложную химическую реакцию имеет смысл как тримолекулярную.

При рассмотрении тримолекулярной химической реакции начинают проявляться силы отталкивания между молекулами. При этом нормальная составляющая кинетической энергии взаимодействующих частиц переходит в потенциальную и затрачивается на деструкцию первоначальных связей в молекулах [142]. Эти связи разрушаются при условии возникновения потенциальной энергии, превышающей энергию активации:

$$\frac{mu_H^2}{2} \geq E, \quad (2.29)$$

где  $m$  – приведенная масса молекул, кг;

$u_H$  – нормальная составляющая относительной скорости молекул, км/ч.

Приведенная масса молекул:

$$m = \frac{m_1 m_2 m_3}{m_1 + m_2 + m_3}, \quad (2.30)$$

где  $m_1, m_2, m_3$  – массы молекул  $A_1, A_2$  и  $A_3$ , соответственно, кг.

Распределение молекул по скоростям в состоянии термодинамического равновесия подчиняется распределению Максвелла и количество взаимодействий молекул  $A_1, A_2$  и  $A_3$  за единицу времени в единице объема равно:

$$z_0 = u \sigma_{1,2,3} n_{A1} n_{A2} n_{A3}, \quad (2.31)$$

где  $u$  – средняя тепловая скорость молекул при температуре  $T$ ;  
 $\sigma_{1,2,3}$  – сечение взаимодействия молекул;  
 $n_{A1}n_{A2}n_{A3}$  – концентрации молекул  $A1$ ,  $A2$  и  $A3$  соответственно.  
Средняя тепловая скорость молекул при температуре  $T$  равна:

$$u = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \quad (2.32)$$

Скорость реакции с учетом уравнения Аррениуса и подстановки выражений (2.31), (2.32) выглядит следующим образом:

$$z_g = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \pi \sigma_{1,2,3} n_{A1} n_{A2} n_{A3} \exp\left[-\frac{\varepsilon}{RT}\right]. \quad (2.33)$$

Множитель  $\exp\left[-\frac{E}{RT}\right]$  представляет собой долю молекул, скорость которых превышает минимальную скорость  $u_n$  и удовлетворяет условию (2.29).

Рассматривая взаимодействие молекул, необходимо понимать, что не все взаимодействия, при которых кинетическая энергия превышает энергию активации, могут привести к химическим реакциям. Для протекания химической реакции необходимо, чтобы взаимодействующие молекулы были сориентированы должным образом между собой.

Тогда константа скорости химической реакции будет выглядеть:

$$K = P \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \pi \sigma_{1,2,3} \exp\left[-\frac{\varepsilon}{RT}\right], \quad (2.34)$$

где  $P$  – стерический фактор,  $P \in [1, 10^{-7}]$ .

После прохождения порции топливного заряда, состоящего из смеси ДТ, рапсового масла и присадки целенаправленного действия через фазу деструкции средний размер молекул уменьшается за счет присутствия присадки и, вследствие этого, должно уменьшаться и сечение  $\sigma_{1,2,3}$  [61]. Оценку уменьшения этого параметра можно сделать на основе предположения о том, что параметр уменьшается на долю  $1/q$ . Тогда сечение взаимодействия молекул запишется:

$$\sigma_{1,2,3} = \left[ \left( 1 - \frac{1}{q} \right) \sigma_0 \right]^2, \quad (2.35)$$



где  $\sigma_0$  – сечение взаимодействия молекул без действия присадки.

Отсюда следует, что сечение взаимодействия молекул после де-струкции под действием присадки будет равно (рис. 2.7):

при  $q = 2$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,25\sigma_0$ ;

при  $q = 3$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,44\sigma_0$ ;

при  $q = 4$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,56\sigma_0$ ;

при  $q = 5$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,64\sigma_0$ ;

при  $q = 6$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,69\sigma_0$ ;

при  $q = 7$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,73\sigma_0$ ;

при  $q = 8$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,76\sigma_0$ ;

при  $q = 9$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,79\sigma_0$ ;

при  $q = 10$ :  $\sigma_{1,2,3} = 0,81\sigma_0$ .

Анализ зависимости, представленной на рис. 2.7, показывает, что соответствующее увеличение тепловой скорости молекул не может компенсировать уменьшение константы скорости химической реакции.

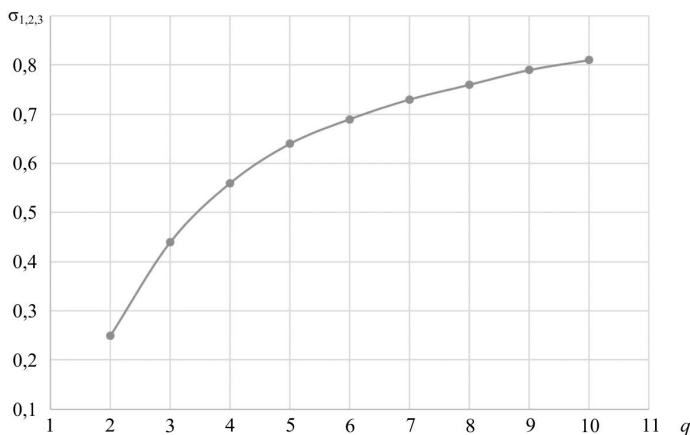


Рис. 2.7. Зависимость изменения сечения молекул  $\sigma_{1,2,3}$  после прохождения топливного заряда через фазу деструкции от действия присадки

Действительно, если также в первом приближении считать, что уменьшение приведенной массы молекул будет аналогичным, то:

$$m = \left(1 - \frac{1}{q}\right) m_0, \quad (2.36)$$

где  $m_0$  – приведенная масса молекул без присадки, кг.

Отсюда следует приведенная масса молекул после деструкции под действием присадки будет равно (рис. 2.8):

при $q = 2$ :	$m = 0,5m_0$ ;
при $q = 3$ :	$m = 0,66m_0$ ;
при $q = 4$ :	$m = 0,75m_0$ ;
при $q = 5$ :	$m = 0,8m_0$ ;
при $q = 6$ :	$m = 0,83m_0$ ;
при $q = 7$ :	$m = 0,85m_0$ ;
при $q = 8$ :	$m = 0,87m_0$ ;
при $q = 9$ :	$m = 0,88m_0$ ;
при $q = 10$ :	$m = 0,9m_0$ .

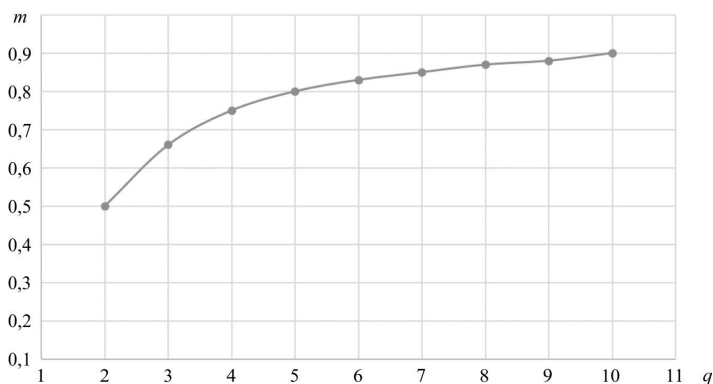


Рис. 2.8. Зависимость изменения приведенной массы молекул  $m$  после прохождения топливного заряда через фазу деструкции от действия присадки

Зависимость, представленная на рис. 2.8, показывает, что с уменьшением доли сечения молекул уменьшается и их масса.

С учетом соотношения (2.32) имеет место также и увеличение средней тепловой скорости молекул после деструкции под действием присадки по сравнению с исходной величиной  $u_0$  (рис. 2.9):

при  $q = 2$ :  $\bar{u} = 1,486\bar{u}_0$ ;

при  $q = 3$ :  $\bar{u} = 1,293\bar{u}_0$ ;

при  $q = 4$ :  $\bar{u} = 1,213\bar{u}_0$ ;

при  $q = 5$ :  $\bar{u} = 1,175\bar{u}_0$ ;

при  $q = 6$ :  $\bar{u} = 1,153\bar{u}_0$ ;

при  $q = 7$ :  $\bar{u} = 1,139\bar{u}_0$ ;

при  $q = 8$ :  $\bar{u} = 1,126\bar{u}_0$ ;

при  $q = 9$ :  $\bar{u} = 1,120\bar{u}_0$ ;

при  $q = 10$ :  $\bar{u} = 1,107\bar{u}_0$ .

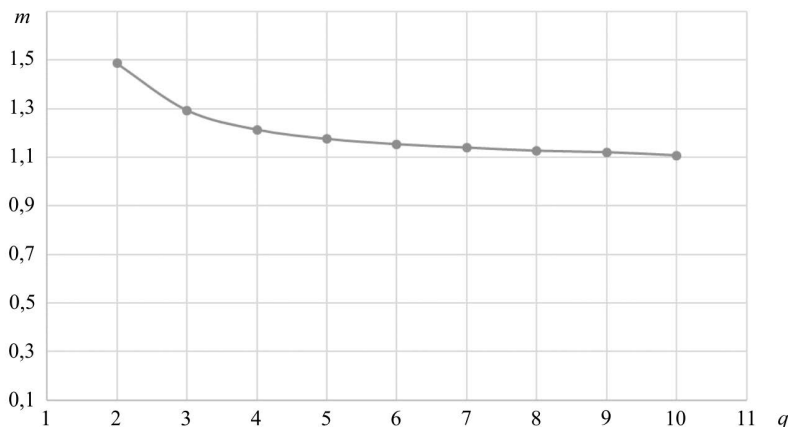


Рис. 2.9. Зависимость изменения средней тепловой скорости молекул  $\bar{u}$  после прохождения топливного заряда через фазу деструкции от действия присадки

Анализ зависимости (рис. 2.9) также показывает, что средняя тепловая скорость молекул увеличивается с уменьшением доли сечения

молекул. Отсюда следует, что имеет место самоускорения химических реакций под действием присадки целенаправленного действия.

Данные обстоятельства приводят к соответствующему суммарному уменьшению предэкспоненциального множителя константы скорости химической реакции (рис. 2.10):

при  $q = 2$ :  $K = 0,37K_0$ ;

при  $q = 3$ :  $K = 0,57K_0$ ;

при  $q = 4$ :  $K = 0,68K_0$ ;

при  $q = 5$ :  $K = 0,75K_0$ ;

при  $q = 6$ :  $K = 0,80K_0$ ;

при  $q = 7$ :  $K = 0,83K_0$ ;

при  $q = 8$ :  $K = 0,86K_0$ ;

при  $q = 9$ :  $K = 0,88K_0$ ;

при  $q = 10$ :  $K = 0,90K_0$ .

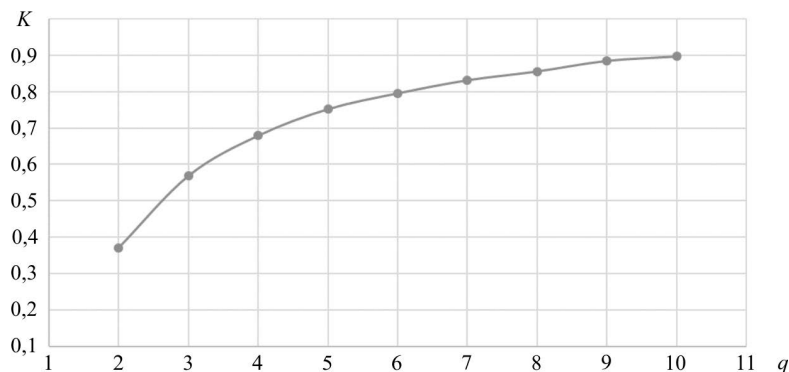


Рис. 2.10. Зависимость изменения предэкспоненциального множителя константы скорости химической реакции  $K$  после прохождения топливного заряда через фазу деструкции от действия присадки

Как видно из рис. 2.10, значение предэкспоненциального множителя уменьшается под действием присадки целенаправленного действия совместно с снижением доли сечения взаимодействия молекул.

Данный механизм относится к разветвленным цепным химическим реакциям. Если параллельно или последовательно с этим механизмом будут протекать реакции и по тепловому механизму, то константа скорости химической реакции будет уменьшаться также и за счет увеличения энергии активации [102].

В этом случае уменьшение молекулярной массы будет приводить к увеличению энергии активации и, как следствие, к еще большему ингибированию последующих химических реакций. Поэтому на индикаторной диаграмме будет наблюдаться смещение точки отрыва давления от линии сжатия к более поздним углам п.к.в. в зависимости от концентрации присадки целенаправленного действия в смесевом топливе.

Также данное обстоятельство ряд авторов [102,103] объясняет, как увеличение периода индукции вспышки топливной смеси вследствие прошедшей серии предпламенных химических реакций.

В уравнении Тодеса с учетом выражения Аррениуса [152], адиабатический период индукции вспышки можно выразить с учетом размеров сечения взаимодействия молекул и их средней тепловой скорости:

$$\tau = B(\sigma_{1,2,3}u)^{-1} e^{\frac{E}{RT}}, \quad (2.37)$$

где  $B$  – параметр, связывающий скорости реакции, теплофизические свойства среды и условия теплоотдачи.

Из анализа выражения (2.37) видно, что с увеличением энергии активации и уменьшением произведения  $\sigma_{1,2,3}u$  должен увеличиться и период индукции теплового взрыва. Однако, как видно из выше проведенного анализа, увеличение средней тепловой скорости молекул происходит за счет уменьшения доли размеров сечения взаимодействия молекул (рис. 2.5), тем самым при наличии присадки целенаправленного действия произведение  $\sigma_{1,2,3}u$  изменяется незначительно по сравнению с энергией активации. Отсюда следует, что период индукции вспышки топливной смеси, состоящей из ДТ, РМ и присадки целенаправленного действия в значительной мере зависит только от энергии активации последнего.

Изменения угла наклона кривой давления относительно угла п.к.в. на индикаторной диаграмме под действием присадки целенаправлен-

ного действия объясняется изменениями процессов воспламенения в топливном заряде и формировании фронта пламени [61].

В связи с этим скорость распространения фронта пламени по Зельдовичу с учетом выражений для средней тепловой скорости молекул и доли размеров сечения взаимодействия молекул будет иметь следующий вид:

$$U = \sqrt{\frac{4\lambda\sigma_{1,2,3}u \exp^{\frac{E}{RT}} n_i}{\rho Q(T_1 - T_0)} \left( \frac{RT_1}{E} \right)}, \quad (2.38)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$n_i$  – концентрация компонентов, %;

$\rho$  – плотность среды в камере сгорания дизеля, кг/м<sup>3</sup>;

$T_0$  – начальная температура среды в камере сгорания дизеля в ВМТ, К;

$T_1$  – температура горения газовойоздушной среды, К;

$Q$  – низшая расчетная теплота сгорания смесового топлива, Дж/кг.

Как видно из соотношения (2.38), скорость сгорания прямо пропорционально зависит от константы скорости химической реакции, которая уменьшается при сгорании смесового топлива с присадкой целенаправленного действия. Это приведет к тому, что в температурном поле уменьшится мощность источников тепла при сохранении теплоотдачи на прежнем уровне, что увеличит во времени процесс рекомбинации молекул топливного заряда и приведет к уменьшению всех локальных градиентов и температур. Снизится жесткость процесса сгорания и уменьшится максимальное давления цикла дизеля. Уменьшение мощности источников тепловыделения при сохранении интенсивности теплоотдачи на неизменном уровне обуславливает уменьшение и максимальной и средней температуры над поршнем.

Механизм действия присадки в смесовом топливе, состоящем из ДТ и РМ можно будет подтвердить особенностями на индикаторной диаграмме. Отличия на индикаторной диаграмме позволят сделать вывод о том, что присутствие присадки в прогретой топливной смеси вызывает крекинг молекул топлива в процессе впрыскивания.

Для подтверждения теоретических предпосылок необходимо рассмотрение экспериментальных индикаторных диаграмм дизеля.

## 2.4. Образование оксидов азота в дизеле 4ЧН 11,0/12,5 при применении топлив с добавками рапсового масла с улучшенными низкотемпературными свойствами

В камере сгорания дизеля оксиды азота образуются путем окисления азота воздуха и азота содержащегося в молекулах топлива [7], так как при сгорании топлива с добавками РМ доля азотсодержащих молекул топлива ничтожно мала [91]. В этой связи рассматривать будем только окисление атмосферного азота.

Окисление азота происходит с повышением температуры среды в замкнутом объеме более 2000 К путем химического взаимодействия с кислородом воздуха и топлива с образованием преимущественно оксида NO [7].

Механизм образования NO по Зельдовичу наиболее распространен. Согласно этому механизму, наиболее важными реакциями кинетической модели образования NO являются следующие [55]:



Поскольку большая часть реакций является эндотермической, то определяющее воздействие на эмиссию NO в продуктах сгорания дизеля оказывает температура. Также эмиссия NO зависит от скорости охлаждения продуктов сгорания. При температурах ниже 650...700 °К вне цилиндров дизеля в выпускной системе и атмосферном воздухе NO начинает окисляться до диоксида NO<sub>2</sub> [82]:



Установлено [53, 54, 203, 221], что в процессе расширения при  $\alpha > 1$ , когда температура газов в цилиндре уменьшается, концентрация оксида азота не снижается до равновесного, а остается на уровне максимальной [7]. На большинстве рабочих режимов работы дизеля температура продуктов сгорания вышеуказанных значений, поэтому большая часть оксидов азота NO<sub>x</sub> приходится на долю NO [53].

Одними из параметров, оказывающих влияние на эмиссию NO в продуктах сгорания, являются низкотемпературные свойства применяемого топлива, а также изменение температуры и концентрации кислорода в сгоревших газах при горении на начальной стадии такта расширения [188].

При сгорании в дизеле, где смесь почти всегда бедная и значение  $\alpha$  всегда существенно больше единицы, образование NO определяется количеством РМ в топливе и температурой ее сгорания [7]. В этих условиях наиболее интенсивно окисление азота происходит до момента достижения максимальной температуры цикла, что соответствует углу поворота коленчатого вала до ВМТ  $\varphi = 360 \dots 380^\circ$  [53]. Содержание NO в продуктах сгорания дизеля составляет в среднем 90 % всех NO<sub>x</sub>. Дальнейшее доокисление NO в NO<sub>2</sub> происходит уже в атмосферном воздухе и может длиться в течение десятков часов [7].

На механизм образования NO оказывает влияние цетановое число применяемого топлива, которое напрямую связано с его низкотемпературными свойствами. С увеличением цетанового числа концентрация NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания уменьшается, так как уменьшается длительность периода задержки воспламенения, вызывая меньшее испарение топлива и перемешивание в зонах бедных смесей [183].

В работах [32, 46] для расчета количественной зависимости содержания NO<sub>x</sub> в отработавших газах дизеля использовалось выражение, позволяющее рассчитать количественное значение NO<sub>x</sub> в зависимости от доли испарившегося за время периода задержки воспламенения  $\tau_i$

топлива  $\frac{m_{vi}}{\alpha}$  :

$$\frac{NO_x}{\rho_{ог}} = \exp \left[ \frac{K_T \cdot \rho_T \cdot m_{vi}}{2 \cdot q_{ц} \cdot \sqrt[3]{T_{50} \cdot \alpha}} \right], \quad (2.45)$$

где  $\rho_{ог}$  – плотность ОГ дизеля, кг/м<sup>3</sup>;

$K_T$  – характеристический фактор, характеризующий свойства топлива, K<sup>1/3</sup>·м<sup>3</sup>/кг;

$\rho_T$  – плотность применяемого топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$m_{vi}$  – масса испарившегося топлива за период задержки воспламенения, кг;

$q_{ц}$  – цикловая подача топлива, кг/цикл;



$T_{50}$  – среднеобъемная температура выкипания 50 % фракций топлива с добавками РМ и присадки, К;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

Так как содержание  $\text{NO}_x$  в выражении (2.45) имеет размерность плотности или массы (концентрации) в единице объема,  $\text{кг/м}^3$ , то для представления ее в ppm (частей на миллион) провели ряд преобразований:

$$\text{NO}_x = \exp \left[ \frac{K_T \cdot \rho_T \cdot m_{vi}}{2 \cdot q_{ic} \cdot \sqrt[3]{T_{50}} \cdot \alpha} \right] \cdot \rho_{or} \cdot \frac{V_{m\text{NO}_x}}{M_{r\text{NO}_x}} \cdot 10^6, \quad (2.46)$$

где  $V_{m\text{NO}_x}$  – молярный объем  $\text{NO}_x$  при определенной температуре и давлении ОГ дизеля,  $\text{м}^3/\text{моль}$ ;

$M_{r\text{NO}_x}$  – молярная масса  $\text{NO}_x$ ,  $\text{кг/моль}$ .

Как было сказано ранее [54], содержание NO в продуктах сгорания дизеля составляет в среднем 90 % всех  $\text{NO}_x$ . Исходя из этого нашли:

$$V_{m\text{NO}_x} = 0,9 \cdot V_{m\text{NO}} + 0,1 \cdot V_{m\text{NO}_2}, \quad (2.47)$$

$$M_{r\text{NO}_x} = 0,9 \cdot M_{r\text{NO}} + 0,1 \cdot M_{r\text{NO}_2}, \quad (2.48)$$

где  $V_{m\text{NO}}$ ,  $V_{m\text{NO}_2}$ ,  $M_{r\text{NO}}$ ,  $M_{r\text{NO}_2}$  – молярные объемы при определенной температуре и давлении ОГ дизеля,  $\text{м}^3/\text{моль}$ , молярные массы NO и  $\text{NO}_2$ ,  $\text{кг/моль}$  соответственно.

Плотность ОГ дизеля определили [37]:

$$\rho_{or} = \frac{G_{mew}}{G_{vew}}, \quad (2.49)$$

где  $G_{mew}$  – массовый часовой расход влажных ОГ дизеля,  $\text{кг/ч}$ ;

$G_{vew}$  – объемный часовой расход ОГ дизеля,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Массовый часовой расход влажных ОГ дизеля находили:

$$G_{mew} = G_b + G_m, \quad (2.50)$$

где  $G_b$  – массовый часовой расход влажного воздуха дизелем,  $\text{кг/ч}$ ;

$G_m$  – часовой расход топлива дизелем,  $\text{кг/ч}$ .

Объемный часовой расход ОГ дизеля находили:

$$G_{vev} = G_{vaw} + f_{fw} \cdot G_m, \quad (2.51)$$

где  $G_{vaw}$  – объемный часовой расход влажного воздуха дизелем, м<sup>3</sup>/ч;  
 $f_{fw}$  – суммарный дополнительный объем ОГ дизеля, образующий при сгорании 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг.

Объемный часовой расход воздуха дизелем определили:

$$G_{vaw} = G_{vad} + G_{vH_2Oaw}, \quad (2.52)$$

где  $G_{vad}$  – объемный часовой расход воздуха дизелем, м<sup>3</sup>/ч;  
 $G_{vH_2Oaw}$  – объемный часовой расход воды дизелем, содержащейся во влажном воздухе, м<sup>3</sup>/ч.

Объемный часовой расход воздуха дизелем находили:

$$G_{vad} = \frac{G_{mad}}{\rho_v}, \quad (2.53)$$

где  $G_{mad}$  – массовый часовой расход сухого воздуха дизелем, кг/ч;  
 $\rho_v$  – плотность сухого воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Массовый часовой расход сухого воздуха дизелем, определили:

$$G_{mad} = \frac{G_b}{1 + H_a}, \quad (2.54)$$

где  $H_a$  – массовая абсолютная влажность воздуха, (кг воды)/(кг сухого воздуха).

Объемный часовой расход воды дизелем, содержащейся во влажном воздухе, находили:

$$G_{vH_2Oaw} = \frac{G_{mad} \cdot H_a \cdot V_{mH_2O}}{M_{rH_2O}}, \quad (2.55)$$

где  $V_{mH_2O}$  – молярный объем воды, м<sup>3</sup>/моль;  
 $M_{rH_2O}$  – молярная масса воды, кг/моль.

Плотность сухого воздуха, определили:

$$\rho_v = \frac{p \cdot M_{r\text{возд}}}{R \cdot T_B}, \quad (2.56)$$

где  $p$  – абсолютное атмосферное давление, Па;

$M_{r\text{возд}}$  – молярная масса сухого воздуха, кг/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);

$T_B$  – температура воздуха, К.

Массовую абсолютную влажность воздуха, находили:

$$H_a = \frac{f}{\rho_v}, \quad (2.57)$$

где  $f$  – абсолютная влажность воздуха, кг/м<sup>3</sup>, определяемая как

$$f = \varphi_B \cdot \rho_{\text{нп}}, \quad (2.58)$$

где  $\varphi_B$  – относительная влажность воздуха, %;

$\rho_{\text{нп}}$  – плотность насыщенного пара, кг/м<sup>3</sup>, находили:

$$\rho_{\text{нп}} = \frac{p_{\text{нп}} \cdot M_{r\text{H}_2\text{O}}}{R \cdot T_B}, \quad (2.59)$$

где  $p_{\text{нп}}$  – парциальное давление насыщенного пара, Па, определяли согласно правилам Федерального Регистра:

$$p_{\text{нп}} = \left[ \begin{aligned} &4,856884 + 0,2660089(T_B + 273,15) + \\ &+ 0,01688919(T_B + 273,15)^2 - \\ &- 7,477123 \cdot 10^{-5}(T_B + 273,15)^3 + \\ &+ 8,10525 \cdot 10^{-6}(T_B + 273,15)^4 - \\ &- 3,115221 \cdot 10^{-8}(T_B + 273,15)^5 \end{aligned} \right] \cdot \frac{1013,2}{760} \cdot 10^3. \quad (2.60)$$

Молярный объем воды, определяли:

$$V_{m\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{r\text{H}_2\text{O}}}{\rho_B}, \quad (2.61)$$

где  $\rho_b$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ , определяемая по зависимости

$$\rho_b = \frac{\rho_0}{1 + \beta_T (T_b - T_0)}, \quad (2.62)$$

где  $\rho_0$  – плотность воды при температуре воздуха  $T_0$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\beta_T$  – температурный коэффициент объемного расширения,  $K^{-1}$ .

Тогда, после подстановки выражений (2.62) в (2.61) и преобразований, получили:

$$V_{mH_2O} = \frac{M_{rH_2O} (1 + \beta_T (T_b - T_{b0}))}{\rho_0}. \quad (2.63)$$

Затем, подставив (2.60) в (2.59), далее в (2.58) и в (2.57) с учетом (2.56) и преобразовав, определили:

$$H_a = \frac{\varphi_b \cdot p_{\text{нп}} \cdot M_{rH_2O}}{p \cdot M_{r\text{возд}}}. \quad (2.64)$$

Рассмотрев (2.54) с учетом (2.64) и (2.63) в (2.55), преобразовав, получили:

$$G_{vH_2Oav} = \frac{G_b}{1 + \frac{\varphi_b \cdot p_{\text{нп}} \cdot M_{rH_2O}}{p \cdot M_{r\text{возд}}}} \cdot \frac{\varphi_b \cdot p_{\text{нп}} \cdot M_{rH_2O}}{p \cdot M_{r\text{возд}}} \cdot \frac{(1 + \beta_T (T_b - T_{b0}))}{\rho_0}. \quad (2.65)$$

Решая (2.54) и (2.56) с учетом (2.64) и некоторых преобразований, нашли:

$$G_{vad} = \frac{G_b \cdot R \cdot T_b}{1 + \varphi_b \cdot p_{\text{нп}} \cdot M_{rH_2O}}. \quad (2.66)$$

Подставив (2.66) и (2.65) в (2.52) и преобразовав, определили:

$$G_{vav} = G_b \left( \frac{R \cdot T_b}{1 + \varphi_b \cdot p_{\text{нп}} \cdot M_{rH_2O}} + \frac{1}{1 + \frac{\varphi_b \cdot p_{\text{нп}} \cdot M_{rH_2O}}{p \cdot M_{r\text{возд}}}} \right) \cdot \frac{\varphi_b \cdot p_{\text{нп}} \cdot M_{rH_2O}}{p \cdot M_{r\text{возд}}} \cdot \frac{(1 + \beta_T (T_b - T_{b0}))}{\rho_0} \quad (2.67)$$

Поле подстановки (2.67) в (2.51), преобразовав, нашли:

$$G_{\text{вех}} = G_{\text{в}} \left( \frac{R \cdot T_{\text{в}}}{1 + \Phi_{\text{в}} \cdot p_{\text{ин}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{1}{1 + \frac{\Phi_{\text{в}} \cdot p_{\text{ин}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{p \cdot M_{\text{сводд}}}} \right) \cdot \frac{\Phi_{\text{в}} \cdot p_{\text{ин}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{p \cdot M_{\text{сводд}}} \cdot \frac{(1 + \beta_T (T_{\text{в}} - T_{\text{н0}}))}{\rho_0} + f_{\text{фв}} \cdot G_{\text{м}}. \quad (2.68)$$

После подстановки (2.68) и (2.50) в (2.49) и некоторых преобразований окончательно определили:

$$\rho_{\text{ог}} = \frac{G_{\text{в}} + G_{\text{м}}}{G_{\text{в}} \left( \frac{R \cdot T_{\text{в}}}{1 + \Phi_{\text{в}} \cdot p_{\text{ин}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{1}{1 + \frac{\Phi_{\text{в}} \cdot p_{\text{ин}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{p \cdot M_{\text{сводд}}}} \right) \cdot \frac{\Phi_{\text{в}} \cdot p_{\text{ин}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{p \cdot M_{\text{сводд}}} \cdot \frac{(1 + \beta_T (T_{\text{в}} - T_{\text{н0}}))}{\rho_0} + f_{\text{фв}} \cdot G_{\text{м}}}. \quad (2.69)$$

Суммарный дополнительный объем ОГ дизеля, образующийся при сгорании 1 кг топлива, равен:

$$f_{\text{фв}} = V_{\text{H}_2} \cdot W_{\text{ALF}} + V_{\text{C}_2} \cdot W_{\text{BET}} + V_{\text{S}_2} \cdot W_{\text{GAM}} + V_{\text{N}_2} \cdot W_{\text{DEL}} + V_{\text{O}_2} \cdot W_{\text{EPS}}, \quad (2.70)$$

где  $V_{\text{H}_2}$ ,  $V_{\text{C}_2}$ ,  $V_{\text{S}_2}$ ,  $V_{\text{N}_2}$ ,  $V_{\text{O}_2}$  – дополнительные объемы газа, образующиеся при окислении водорода, углерода, серы, азота и кислорода содержащегося в топливе, м<sup>3</sup>/кг;

$W_{\text{ALF}}$ ,  $W_{\text{BET}}$ ,  $W_{\text{GAM}}$ ,  $W_{\text{DEL}}$ ,  $W_{\text{EPS}}$  – массовые доли водорода, углерода, серы, азота и кислорода в 1 кг топлива с добавками РМ и присадкой.

Дополнительные объемы газов:

$$\text{сгорание водорода: } \text{H}(\text{топливо}) + \frac{1}{4} \text{O}_2(\text{воздух}) \rightarrow \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}(\text{ог});$$

$$\text{по массе: } 1[\text{кгH}] + \frac{1}{4} \frac{M_{\text{O}_2}}{A_{\text{rH}}} [\text{кгO}_2] \rightarrow \frac{1}{2} \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{A_{\text{rH}}} [\text{кгH}_2\text{O}];$$

$$\text{по объему: } \frac{V_{m\text{O}_2}}{4A_{\text{rH}}} [\text{м}^3\text{O}_2] \rightarrow \frac{1}{2} \frac{V_{m\text{H}_2\text{O}}}{A_{\text{rH}}} [\text{м}^3\text{H}_2\text{O}];$$

$$\text{объем водорода: } V_{\text{H}_2} = \frac{2V_{m\text{H}_2\text{O}} - V_{m\text{O}_2}}{4A_{\text{rH}}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кгH}} \right]. \quad (2.71)$$

Сгорание углерода:  $C(\text{топливо}) + O_2(\text{воздух}) \rightarrow CO_2(\text{ог})$ ;

по массе:  $1[\text{кгC}] + \frac{M_{rO_2}}{A_{rC}}[\text{кгO}_2] \rightarrow \frac{M_{rCO_2}}{A_{rC}}[\text{кгCO}_2]$ ;

по объему:  $\frac{V_{mO_2}}{A_{rC}}[\text{м}^3O_2] \rightarrow \frac{V_{mCO_2}}{A_{rC}}[\text{м}^3CO_2]$ ;

объем углерода:  $V_{C_2} = \frac{V_{mCO_2} - V_{mO_2}}{A_{rC}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кгC}} \right]$ . (2.72)

Дополнительно:  $C(\text{топливо}) + \frac{1}{2}O_2(\text{воздух}) \rightarrow CO(\text{ог})$ ;

по массе:  $1[\text{кгC}] + \frac{1}{2} \frac{M_{rO_2}}{A_{rC}}[\text{кгO}_2] \rightarrow \frac{M_{rCO}}{A_{rC}}[\text{кгCO}]$ ;

по объему:  $\frac{1}{2} \frac{V_{mO_2}}{A_{rC}}[\text{м}^3O_2] \rightarrow \frac{V_{mCO}}{A_{rC}}[\text{м}^3CO]$ ;

объем углерода:  $V_{C_2} = \frac{2V_{mCO} - V_{mO_2}}{2A_{rC}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кгC}} \right]$ . (2.73)

Общий объем углерода с учетом выражений (2.70) и (2.71):

$$V_{C_2} = \frac{(V_{mCO_2} + V_{mCO})}{A_{rC}} - \frac{3V_{mO_2}}{2A_{rC}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кгC}} \right]. \quad (2.74)$$

Сгорание серы:  $S(\text{топливо}) + O_2(\text{воздух}) \rightarrow SO_2(\text{ог})$ ;

по массе:  $1[\text{кгS}] + \frac{M_{rO_2}}{A_{rS}}[\text{кгO}_2] \rightarrow \frac{M_{rSO_2}}{A_{rS}}[\text{кгSO}_2]$ ;

по объему:  $\frac{V_{mO_2}}{A_{rS}}[\text{м}^3O_2] \rightarrow \frac{V_{mSO_2}}{A_{rS}}[\text{м}^3SO_2]$ ;

объем серы:  $V_{S_2} = \frac{V_{mSO_2} - V_{mO_2}}{A_{rS}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кгS}} \right]$ . (2.75)

Окисление азота:  $N(\text{топливо}) + O_2(\text{воздух}) \rightarrow NO_2(\text{ог})$ ;

по массе:  $1[\text{кг}N] + \frac{M_{rO_2}}{A_{rN}}[\text{кг}O_2] \rightarrow \frac{M_{rNO_2}}{A_{rN}}[\text{кг}NO_2]$ ;

по объему:  $\frac{V_{mO_2}}{A_{rN}}[\text{м}^3O_2] \rightarrow \frac{V_{mNO_2}}{A_{rN}}[\text{м}^3NO_2]$ ;

объем азота:  $V_{N_2} = \frac{V_{mNO_2} - V_{mO_2}}{A_{rN}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}N} \right]$ . (2.76)

Дополнительно:  $N(\text{топливо}) + \frac{1}{2}O_2(\text{воздух}) \rightarrow NO(\text{ог})$ ;

по массе:  $1[\text{кг}N] + \frac{1}{2} \frac{M_{rO_2}}{A_{rN}}[\text{кг}O_2] \rightarrow \frac{M_{rNO}}{A_{rN}}[\text{кг}NO]$ ;

по объему:  $\frac{1}{2} \frac{V_{mO_2}}{A_{rN}}[\text{м}^3O_2] \rightarrow \frac{V_{mNO}}{A_{rN}}[\text{м}^3NO]$ ;

объем азота:  $V_{N_2} = \frac{2V_{mNO} - V_{mO_2}}{2A_{rN}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}N} \right]$ . (2.77)

Учет азота:  $N(\text{топливо}) \rightarrow N_2(\text{ог})$ ;

по массе:  $1[\text{кг}N] \rightarrow 1[\text{кг}N_2]$ ;

по объему:  $\frac{V_{mN_2}}{M_{rN_2}}[\text{м}^3N_2]$ ;

объем азота:  $V_{N_2} = \frac{V_{mN_2}}{M_{rN_2}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}N_2} \right]$ . (2.78)

Общий объем азота с учетом выражений (2.76), (2.77) и (2.78):

$$V_{N_2} = \frac{V_{mNO_2} + V_{mNO}}{A_{rN}} - \frac{3V_{mO_2}}{2A_{rN}} + \frac{V_{mN_2}}{M_{rN_2}}. \quad (2.79)$$

Учет кислорода в топливе:  $O(\text{топливо}) \rightarrow O_2(\text{ог})$ ;

по массе:  $1[\text{кгO}] \rightarrow 1[\text{кгO}_2]$ ;

по объему:  $\frac{V_{mO_2}}{M_{rO_2}} [\text{м}^3\text{O}_2]$ ;

$$\text{объем кислорода: } V_{O_2} = \frac{V_{mO_2}}{M_{rO_2}} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кгO}_2} \right], \quad (2.80)$$

где  $V_{mO_2}$ ,  $V_{mN_2}$ ,  $V_{mH_2O}$ ,  $V_{mCO}$ ,  $V_{mNO}$ ,  $V_{mCO_2}$ ,  $V_{mSO_2}$ ,  $V_{mNO_2}$  – молярные объемы кислорода, азота и воды, монооксидов углерода и азота, диоксидов углерода, серы и азота, соответственно,  $\text{м}^3/\text{моль}$ ;

$A_{rH}$ ,  $A_{rC}$ ,  $A_{rS}$ ,  $A_{rN}$  – молярная атомная масса водорода, углерода, серы и азота, соответственно,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;

$M_{rN_2}$ ,  $M_{rO_2}$  – молярная масса молекулы азота и кислорода, соответственно,  $\text{кг}/\text{моль}$ .

После подстановки выражений (2.80), (2.79), (2.75), (2.74) и (2.68) в (2.70), а затем в (2.69) получим окончательное выражение для определения плотности ОГ.

Характеристический фактор, характеризующий свойства топлива, определили:

$$K_T = \frac{1,216\sqrt[3]{T_{50}}}{\rho_T}, \quad (2.81)$$

где  $\rho_T$  – плотность топлива с добавкой РМ и присадки при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Плотность топлива с добавками РМ определили с учетом аддитивности ее свойств [186]:

$$\rho_T = M_{rDT}^{\text{отн}} \cdot \rho_{DT} + M_{rPM}^{\text{отн}} \cdot \rho_{PM} + M_{r\text{присадка}}^{\text{отн}} \cdot \rho_{\text{присадка}}, \quad (2.82)$$

где  $\rho_{DT}$ ,  $\rho_{PM}$ ,  $\rho_{\text{присадка}}$  – плотность ДТ, РМ и присадки при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$  [187];

$M_{rDT}^{\text{отн}}$ ,  $M_{rPM}^{\text{отн}}$ ,  $M_{r\text{присадка}}^{\text{отн}}$  – относительные молярные массы ДТ, РМ и присадки:



$$M_{r\text{ДТ}}^{\text{отн}}, M_{r\text{РМ}}^{\text{отн}}, M_{r\text{присадка}}^{\text{отн}} = \frac{M_{r\text{ДТ}}, M_{r\text{РМ}}, M_{r\text{присадка}}}{M_{r\text{Т}}}, \quad (2.83)$$

где  $M_{r\text{ДТ}}$ ,  $M_{r\text{РМ}}$ ,  $M_{r\text{присадка}}^{\text{отн}}$  – молярные массы ДТ, РМ и присадки, соответственно, кг/моль;

$M_{r\text{Т}}$  – молярная масса топлива с добавкой РМ и присадки, кг/моль.

Температура, соответствующая выкипанию 50 % фракций ДТ, РМ и присадки, согласно [188], с некоторой долей вероятности будет равна  $T_{50} = T_{\text{ср}}$ , тогда  $T_{\text{ср}}$ , определяли исходя их выражения цетанового числа для смесевых топлив [189]:

$$\text{ЦЧ} = 25,88 \cdot \ln t_{\text{ср}} - 39,17 \cdot (\rho_{\text{т}} - 0,835) + 75,455 \cdot \ln W_{\text{ALF}} - 299,4, \quad (2.84)$$

где  $t_{\text{ср}}$  – среднеобъемная температура кипения, °С.

После преобразований выражения (2.84) получили выражение среднеобъемной температуры кипения в градусах К:

$$T_{\text{ср}} = 273,15 + e^{\frac{\text{ЦЧ} + 39,17 \cdot (\rho_{\text{т}} - 0,835) - 75,455 \cdot \ln W_{\text{ALF}} + 299,4}{25,88}}. \quad (2.85)$$

Цетановое число топлива с добавками РМ и присадки определяли исходя из условия аддитивности [190]:

$$\text{ЦЧ} = M_{r\text{ДТ}}^{\text{отн}} \cdot \text{ЦЧ}_{\text{ДТ}} + M_{r\text{РМ}}^{\text{отн}} \cdot \text{ЦЧ}_{\text{РМ}} + M_{r\text{присадка}}^{\text{отн}} \cdot \text{ЦЧ}_{\text{присадка}}, \quad (2.86)$$

где  $\text{ЦЧ}_{\text{ДТ}}$ ,  $\text{ЦЧ}_{\text{РМ}}$ ,  $\text{ЦЧ}_{\text{присадка}}$  – цетановые числа дизельного топлива (ДТ), РМ и присадки соответственно.

Между цетановыми числами и температурами помутнения имеется следующая зависимость:

$$\text{для ДТ [191]: } \text{ЦЧ}_{\text{ДТ}} = T_{\text{ПДТ}} - 225,1, \quad (2.87)$$

$$\text{для РМ [192]: } \text{ЦЧ}_{\text{РМ}} = T_{\text{ПРМ}} - 250,12, \quad (2.88)$$

$$\text{для присадки [193]: при } \text{ЦЧ}_{\text{присадка}} = T_{\text{Пприсадка}} - 136,25, \quad (2.89)$$

где  $T_{\text{ПДТ}}$ ,  $T_{\text{ПРМ}}$ ,  $T_{\text{Пприсадка}}$  – температуры помутнения ДТ, РМ и присадки соответственно, К.

После подстановки (2.89), (2.88) и (2.87) в (2.86), а затем в (2.85), получим выражение для определения  $T_{50}$  :

$$T_{50} = 273,15 + e^{\frac{M_{гпт}^{гпт} \cdot (T_{гпт} - 225,1) + M_{гпт}^{гпт} \cdot (T_{гпт} - 250,12) + M_{гпт}^{гпт} \cdot (T_{гпт} - 136,25) + 39,17 \cdot (\rho_1 - 0,835) - 75,455 \cdot \ln W_{ALF} + 299,4}{25,88}}. \quad (2.90)$$

Подставляя выражение (2.90) и (2.82) с учетом (2.83), в выражение (2.81) определяли характеристический фактор топлива.

Массу испарившегося топлива за период задержки воспламенения находили [189]:

$$m_{vi} = i_{v,i} \cdot (m_{m,i} \cdot m_m)^{0,5} \cdot \left( \frac{\varphi}{\varphi_i} \right)^{0,35} \cdot K_{исп}, \quad (2.91)$$

где  $i_{v,i}$  – относительная степень испарения топлива;

$m_{m,i}$  – масса топлива, поданная за период задержки воспламенения, кг;

$m_m$  – масса топлива, поданная после начала горения, кг;

$\varphi$  – период после начала горения цикловой подачи топлива, град. поворота коленчатого вала;

$\varphi_i$  – период задержки воспламенения, град. поворота коленчатого вала;

$K_{исп}$  – безразмерный коэффициент учитывающий влияние повышения температуры и давления среды после начала горения на скорость испарения топлива.

Относительную степень испарения топлива, определяли:

$$i_{v,i} = \frac{z}{1 + z}, \quad (2.92)$$

где  $z$  – безразмерный характеристический фактор топливного факела:

$$z = \left( \frac{L}{d_{кc}} \right) \exp \left( \frac{Re \cdot T_{исп} \cdot 10^{-4}}{T_{50}} \right), \quad (2.93)$$

где  $L$  – дальноточность топливного факела, м;

$d_{кc}$  – диаметр горловины камеры сгорания, м;

$Re$  – число Рейнольдса;

$T_{\text{исп}}$  – характерная температура испарения топлива в камере сгорания, К.

Число Рейнольдса находили:

$$\text{Re} = \frac{\frac{d_{\text{кс}}}{2} \cdot \omega}{55 + 0,178 \cdot (T_{\text{нв}} - 623)}, \quad (2.94)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения воздушного заряда, рад/с;

$T_{\text{нв}}$  – температура среды в камере сгорания в момент начала впрыскивания, К.

Безразмерный коэффициент испарения топлива, определяли:

$$K_{\text{исп}} = \left( \frac{T_{\text{ср}}}{T_{\text{ср},i}} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{ср},i}} \right)^{0,5} \cdot \frac{q_{\text{терм},i}}{q_{\text{терм}}} e^{-0,006}, \quad (2.95)$$

где  $T_{\text{ср}}$ ,  $P_{\text{ср}}$  – средние значения температуры и давления в камере сгорания, соответственно, К, Па;

$T_{\text{ср},i}$ ,  $P_{\text{ср},i}$  – средние значения температуры и давления в камере сгорания в момент начала воспламенения, соответственно, К, Па;

$q_{\text{терм},i}$ ,  $q_{\text{терм}}$  – количество теплоты выделившееся в момент начала воспламенения и за весь период сгорания, соответственно, Дж.

Средние значения температуры находили:

$$T_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (T_{\text{нв}} + T_{\text{г}}), \quad (2.96)$$

$$T_{\text{ср},i} = 0,5 \cdot (T_{\text{нв}} + T_i), \quad (2.97)$$

где  $T_{\text{г}}$ ,  $T_i$  – температуры после начала горения и в момент начала воспламенения, соответственно, К.

Средние значения давления, определяли:

$$P_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (P_{\text{нв}} + P_{\text{г}}), \quad (2.98)$$

$$P_{\text{ср},i} = 0,5 \cdot (P_{\text{нв}} + P_i), \quad (2.99)$$

где  $P_{нв}$ ,  $P_r$ ,  $P_i$  – давления в момент начала впрыскивания, после начала горения и в момент начала воспламенения, соответственно, К.

Значения количеств теплоты, находили:

$$q_{\text{терм}} = C_{m,\text{cp}} \cdot (T_{50} - T_{m,o}) + L_v + 0,5 \cdot C_{n,\text{cp}} (T_{\text{cp}} - T_{50}), \quad (2.100)$$

$$q_{\text{терм},i} = C_{m,\text{cp}} \cdot (T_{50} - T_{m,o}) + L_v + 0,5 \cdot C_{n,\text{cp}} (T_{\text{cp},i} - T_{50}), \quad (2.101)$$

где  $C_{m,\text{cp}}$ ,  $C_{n,\text{cp}}$  – теплоемкости жидкого топлива и паров топлива, Дж/К;

$T_{m,o}$  – температура топлива в момент начала впрыскивания, К;

$L_v$  – теплота парообразования топлива при температуре разгонки топлива, Дж.

После подстановки выражений (2.101) и (2.100), (2.99) и (2.98), (2.94) и (2.96) в (2.95), а затем выражений (2.92), с учетом (2.94) и (2.93), в выражение (2.91), получили выражение для определения массы испарившегося топлива за период задержки воспламенения.

Цикловую подачу топлива, определяли:

$$q_{\text{ц}} = \frac{G_{\text{т}}}{120 \cdot n}, \quad (2.102)$$

где  $n$  – частота вращения коленчатого вала дизеля,  $\text{мин}^{-1}$ .

Коэффициент избытка воздуха, находили:

$$\alpha = \frac{G_{\text{в}}}{l_0 \cdot G_{\text{т}}}, \quad (2.103)$$

где  $l_0$  – теоретически необходимого количества воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг возд./кг топл., определяли [194]:

$$l_0 = 11,594 \cdot W_{\text{BET}} + 34,783 \cdot W_{\text{ALF}} - 4,347 \cdot W_{\text{EPS}}. \quad (2.104)$$

Подставляя все вышеопределенные выражения в (2.46), находили концентрацию  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля.

Основные исходные данные для выполнения расчетов представлены в табл. 2.9 и 2.10.

Таблица 2.9. Данные теоретических расчетов содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ при работе дизеля при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ , и разных составах топлива с добавкой РМ и 2,0 % присадки DIFRON H372

№ п/п	$p_e$ , МПа	$\text{NO}_x$ , ppm					
		$n = 1800 \text{ мин}^{-1}$			$n = 1400 \text{ мин}^{-1}$		
		ДТ- 100 %	ДТ- 80 %	ДТ- 45 %	ДТ- 100 %	ДТ- 80 %	ДТ- 45 %
1	0,20	356	252	131	601	488	307
2	0,40	571	401	231	1083	767	501
3	0,60	940	701	401	1650	1271	981
4	0,80	1523	1261	802	1930	1582	1371
5	1,00	2630	2225	1145	2291	1826	1531
6	1,20	–	–	–	2490	1924	1510

Таблица 2.10. Данные теоретических расчетов содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ при работе дизеля при  $p_e = \text{max}$  и разных составах топлива с добавкой РМ и 2,0 % присадки DIFRON H372

№ п/п	$n$ , $\text{мин}^{-1}$	$\text{NO}_x$ , ppm		
		ДТ-100 %	ДТ-80 %	ДТ-45 %
1	1400	2490	1924	1510
2	1500	2510	1980	1403
3	1600	2530	2050	1317
4	1700	2580	2125	1215
5	1800	2630	2225	1145
6	1900	2680	2275	1245
7	2000	2730	2325	1317

По полученным расчетным значениям, представленным в табл. 2.5 и 2.6 построены графики зависимости концентраций  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5 марки Д-245.5S2 при работе на топливах с различными добавками РМ и 2,0 % присадки DIFRON H372 (рис. 2.11).

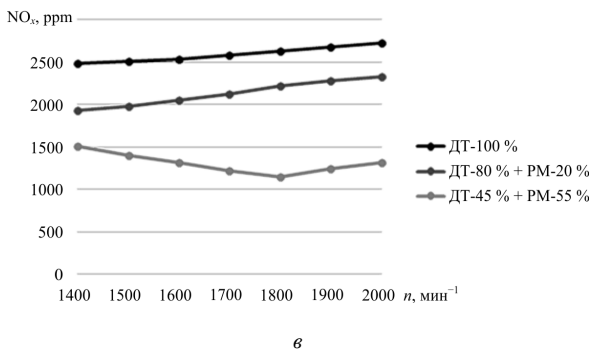
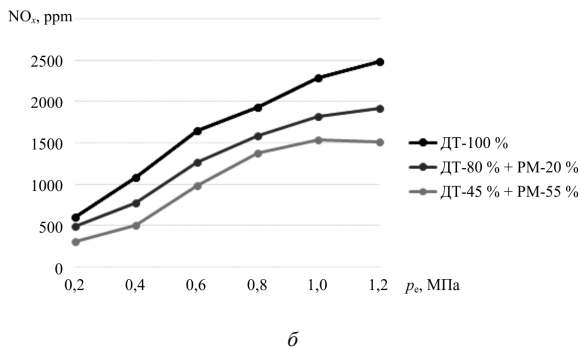
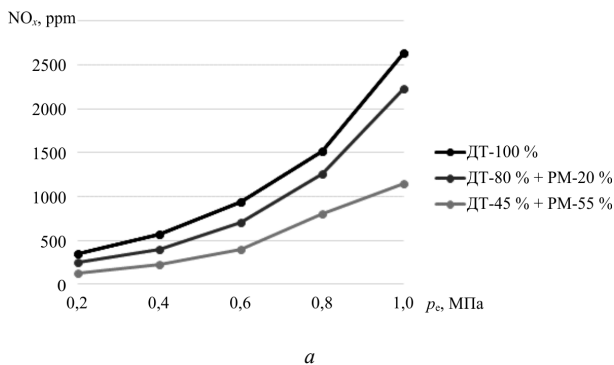


Рис. 2.11. Графики зависимости концентраций  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5 марки Д-245.5S2 при работе на топливах с различными добавками РМ и 2,0 % присадки DIFRON H372: *a* – при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ; *б* – при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ; *в* – при  $p_e = \text{max}$

Расчеты показывают, что работа дизеля на топливах с добавками РМ и присадки DIFRON H372 должна сопровождаться снижением концентраций  $\text{NO}_x$  в ОГ во всех рассматриваемых диапазонах нагрузки и частоты вращения коленчатого вала.

Так, при улучшении низкотемпературных свойств топлив с добавками РМ от 0 до 55 % и 2,0 % присадки DIFRON H372, уменьшение нагрузки с 1,0 до 0,2 МПа при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  дает снижение концентрации  $\text{NO}_x$  от 2630 до 131 ppm (рис. 2.11, *а*), а уменьшение нагрузки с 1,2 до 0,2 МПа при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  приводит к снижению концентрации  $\text{NO}_x$  с 2490 до 307 ppm (рис. 2.11, *б*). При максимальном значении нагрузки и изменении  $n$  от 1400 до 2000  $\text{мин}^{-1}$  концентрация  $\text{NO}_x$  снижается в 1,5 раза (рис. 2.11, *в*).

Тем не менее полученные теоретические данные нуждаются в экспериментальной проверке.

### **3. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ МОТОРНЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАПСОВОГО МАСЛА**

#### **3.1. Общая методика увеличения предела применимости топлив с добавкой рапсового масла в автотракторных дизелях**

Методики исследований основаны на сравнительном методе. Решение поставленных задач проводили в несколько этапов.

На первом этапе проверялась возможность снижения вязкости топлива внесением в состав широкодоступных добавок, присадок. Оптимизировался состав топлива с добавкой РМ.

На втором этапе оценивалось, сильно ли изменятся параметры работы топливной аппаратуры дизеля при работе на ДТ и смеси топлив с добавкой рапсового масла. Определялись параметры работы и необходимые регулировки ТНВД.

Целью третьего этапа исследований явилось сравнение параметров рабочего процесса дизелей путем индицирования, эффективных и токсических показателей дизеля на основных и нагрузочных режимах при работе на топливе с добавкой рапсового масла.

На четвертом этапе проверялось: изменятся ли параметры рабочего процесса, эффективные и токсические показатели трактора «Беларус-922» с дизелем 4ЧН 11,0/12,5 на основных и нагрузочных режимах при работе на топливе с добавкой рапсового масла в полевых условиях.

В исследованиях применялось дизельное топливо марки Л–0,5–40 по ГОСТ 305–2013, рапсовое масло холодного отжима (табл. 3.1), присадки к топливу согласно соответствующим ТУ.

При проведении сравнительных испытаний работы топливной аппаратуры дизеля на ДТ и смеси топлив на основе РМ необходимым условием явилось постоянство положения рейки ТНВД в каждом из исследуемых режимов.

Учитывая специфику работы дизеля, основными режимами исследований явились номинальный скоростной режим при частоте вращения коленчатого вала  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и режим  $M_{\text{кmax}}$  при частоте  $1400 \text{ мин}^{-1}$ .

Это же условие соблюдалось и при снятии скоростных характеристик, то есть на всех фиксируемых частотах вращения коленчатого вала поддерживалось одинаковое значение  $p_c$  при работе на ДТ и смеси топлив с различным процентным содержанием рапсового масла.



Таблица 3.1. Физико-химические свойства рапсового масла

Показатели	Ед. изм.	Значение
Химическая формула	–	$C_{57}H_{101,6}O_6$
Элементарный состав, С:Н:О	кг/кг	78:10:12
Стехиометрическое соотношение	кг/кг	12,6
Плотность при 20 °С	кг/м <sup>3</sup>	916...917
Кинематическая вязкость при 20 °С	сСт	75...76
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	37,3
Коксуемость 10 % остатка	% по массе	0,4
Содержание серы	% по массе	–
Цетановое число	ед.	36
Температура самовоспламенения	°С при 1 атм.	317...318
Коэффициент поверхностного натяжения	мН/м	33,2

Характеристики снимались при оптимальных значениях установочного угла опережения впрыскиваемого топлива. В это же время выполнялся газоанализ для определения дымности и токсичности отработавших газов.

При установке приборов и оборудования, проведенных физико-химических исследований, стендовых испытаний, газоанализе учитывались требования ГОСТ 18509-88, ГОСТ 20000-88, ГОСТ 14921-78, ОСТ 23.1.440-76, ОСТ 23.1.441-76.

Первым делом двигатель прошел обкатку продолжительностью 60 мото-часов на режимах, согласно технической документации завода-изготовителя. Перед началом проведения испытаний выполнялся прогрев двигателя. Температура окружающей среды и топлива во время опытов не превышала значений, указанных в технической документации завода-изготовителя. Техобслуживание дизеля выполнялось в соответствии с инструкцией завода-изготовителя. Крутящий момент, мощность двигателя, среднее эффективное давление и расходы топлива на различных скоростных режимах приводилось к стандартным атмосферным условиям, температуре и плотности топлива согласно ГОСТ 18509-88. После прогрева двигатель выводился на номинальный скоростной режим работы и определялись эффективные показатели. Этот режим являлся контрольным. Эффективные показатели дизеля с отклонениями более чем на 2 % свидетельствовали о нарушениях работы систем двигателя. Неисправности устранялись и исследования повторялись. После окончания испытаний дизель вновь выводился на контрольный режим для проверки показателей.

Для выравнивания температур дизель перед началом измерений работал на каждом режиме не менее 5 мин. Частота вращения коленчатого вала дизеля не отличалась от заданной более чем на  $5 \text{ мин}^{-1}$ .

Для уменьшения погрешностей измерений замер показателей при испытаниях в каждом опыте повторялся не менее 3 раза, брался усредненный результат. Таким же образом производился газоанализ и определение дымности и токсичности ОГ.

### **3.2. Методика проведения исследований влияния присадок на свойства топлив с добавками рапсового масла**

Были проведены исследования влияния состава топлива с добавками РМ на кинематическую и динамическую вязкость, плотность, проведен спектральный анализ образцов РМ, проведены исследования стабильности. Основными явились исследования по возможности снижения вязкости СТ химическим путем.

Лабораторные исследования проводились по традиционным методикам исследования физико-химических свойств [135, 136].

Ингредиенты смеси отмерялись с помощью мерной колбы. Для каждого из значений концентрации РМ, равных 5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 95 % приготавливалось по три пробы. Процентное соотношение компонентов смесового топлива выражалось в массовых долях от массы всей пробы, которая оставалась равной 100 г во всех случаях за счет изменения количества ДТ.

Пробы заливались в стеклянную колбу. Учитывая хорошую смешиваемость ДТ и РМ, перемешивание осуществлялось взбалтыванием в течение 1...2 минут.

Затем пробы переливались в мерные стеклянные цилиндры. Фиксировалось время до появления визуально наблюдаемых изменений (изменение цвета, появление осадка или отстоя) в пробе смесового топлива.

Наблюдение за пробами производилось полгода. На основе анализа полученных результатов делался вывод о возможности применения того или иного состава смеси.

Для всех составов проб по существующей методике ГОСТ 14921-78 определялись денсиметром – плотность и вискозиметром – вязкость.

Для определения кинематической вязкости был выбран вискозиметр ВПЖ-2 с требуемым диаметром капилляра. При выборе исходили из того, чтобы время истечения топлива находилось в пределах не ме-

нее 200 с (ГОСТ 33-2000). Кинематическая вязкость определялась при температуре +20 °С.

Испытание производилось 3–5 раз. В соответствии с ГОСТ 33-2000 число измерений устанавливают в зависимости от времени истечения: пять измерений – при времени истечения от 200 до 300 с; четыре – от 300 до 600 с и три – при времени истечения свыше 600 с.

Для подсчета вязкости определили среднее арифметическое значение времени истечения. При этом учитывали только те отсчеты, которые отличаются не более чем на  $\pm 0,5$  % от среднего арифметического.

Также определяли оптическую плотность, используя фотоэлектроколориметр КФК-2. Исследования были произведены для двух образцов.

Колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2 предназначен для измерения коэффициентов пропускания и оптической плотности растворов жидкостей и твердых тел, а также определения концентрации веществ в растворах методом построения градуированных графиков в отдельных участках диапазона длин волн от 315 по 980 нм, выделяемых светофильтрами. Колориметр позволяет также производить измерения коэффициентов пропускания рассеивающих взвесей, эмульсий и коллоидных растворов в проходящем светофильтре. Принцип определения коэффициента пропускания при помощи этого колориметра основан на определении отношения световых потоков, прошедших через исследуемый раствор и растворитель.

С целью сравнения состава образцов масел были проведены их исследования методом капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии.

Хроматомасс-спектрометрия проводилась на газовом хроматомасс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus («Шимадзу», Япония) с масс-фильтром квадрупольного типа. Прибор был оснащен капиллярной кварцевой колонкой Ultra ALLOY-5 длиной 30 м, внутренним диаметром 0,25 мм с полидиметилфенилсилоксановой неподвижной жидкой фазой.

Данный метод является гибридным и сочетает в себе два отдельных независимых метода: газовую хроматографию и масс-спектрометрию.

Подготовку проб проводили с использованием методики получения метиловых эфиров жирных кислот из триглицеридов переэтерификацией с метанольным раствором гидроокиси калия в соответствии с ГОСТ 31665-2012.

Пробу исследуемого масла 0,1 г предварительно растворяли в 2 см<sup>3</sup> гексана. В полученный раствор добавляли 0,1 см<sup>3</sup> раствора гидроокиси калия в метаноле с концентрацией 2 моль/дм<sup>3</sup>. Смесь интенсивно перемешивали в течение 2 мин, после чего отстаивали для отделения глицерина. Верхний гексановый слой, содержащий метиловые эфиры жирных кислот, анализировали методом капиллярной газовой хромато-масс-спектрометрии. Относительное процентное содержание кислот в исследуемых маслах определяли методом внутренней нормализации по площадям хроматографических пиков соответствующих метиловых эфиров. Обработку данных осуществляли с помощью программного обеспечения GCMSolution 2.5 укомплектованного универсальной библиотекой масс-спектров 250000 органических соединений NIST 05.

Получаемые масс-спектры были интерпретированы с помощью программного обеспечения, которое дает возможность подбора и сравнения максимально сходимых масс-спектров из электронных библиотек с экспериментально полученными масс-спектрами. Идентификация химических соединений производилась также по их временам (индексам) удерживания, зависящим от природы соединения, неподвижной жидкой фазы колонки и условий проведения эксперимента.

### **3.3. Методика проведения сравнительных испытаний работы топливной аппаратуры дизеля на дизельном топливе и топливе с добавкой рапсового масла**

С целью подтверждения приближенности свойств смесового топлива и ДТ проводились сравнительные испытания работы топливной аппаратуры дизелей. Были получены параметры топливоподачи при работе на смесовом топливе и чистом ДТ.

Испытания проводились на стенде КИ-22210-02М-15. Использовались серийные форсунки типа 171-01, устанавливаемые на дизеле 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) и топливный насос типа 4УТНМ.

Перед началом испытаний проверялась исправность самого насоса и форсунок (отсутствие заеданий и стуков в насосе и регуляторе при вращении кулачкового вала; плавность перемещения рейки; отсутствие течей топлива и масла) и правильность их регулировок, включая проверку:

- давления подъема иглы форсунок и качество распыливания;
- давления топлива в головке насоса, равного 0,07...0,12 МПа;

- угла начала нагнетания топлива первой насосной секцией и корректировку угла начала впрыскивания по секциям относительно первой секции;

- работы регулятора.

При необходимости значения указанных параметров приводились в соответствие с нормами [9].

Снималась регуляторная характеристика топливного насоса.

Параметры процесса топливоподачи определялись и контролировались для всех режимов работы, однако они оптимизировались, прежде всего, для номинального режима, так как на других режимах их удается оптимизировать лишь частично.

Необходимым условием сравнительных испытаний работы топливной аппаратуры на ДТ и топливах с добавкой РМ являлось одинаковое положение рычага управления регулятором, соответствующее режимам максимальной подачи.

В процессе испытаний определялась производительность насосных секций, их цикловая подача. Кроме того, подсчитывался часовой расход смесового топлива и замерялась его температура в головке ТНВД.

Неравномерность подачи по секциям насоса подсчитывалась по известной зависимости [9].

Замерялись отклонения начала впрыскивания и длительность впрыскивания по секциям насоса. Качество распыливания топлива форсунками оценивалось визуально.

При проведении испытаний не допускались:

- местные нагревы до температуры выше  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

- ненормальные шумы;

- заедание или единичные прихваты плунжера при любых его угловых положениях;

- защемление рейки насоса.

### **3.4. Методика исследований автотракторного дизеля при применении топлива с добавкой рапсового масла**

При работе тракторного дизеля на топливе с добавкой РМ определяющим фактором являлась сходимость эффективных показателей и показателей процесса сгорания.

В связи с тем, что РМ имеет низшую теплоту сгорания на 12 % ниже, чем ДТ, одним из критериев применимости явилось равенство количества теплоты, вводимого в цилиндры с ДТ и смесью топлив.

Также известно, что РМ имеет в несколько раз большую вязкость, чем ДТ. С учетом данных теоретических исследований использовались составы с максимальным содержанием РМ в смеси 45 %.

При индицировании рабочего процесса дизеля с различным соотношением концентрации РМ необходимым условием являлось сохранение одинаковых значений  $p_e$  для каждого исследуемого скоростного режима. Это же условие выполнялось и при снятии скоростных характеристик, то есть на всех фиксируемых частотах вращения коленчатого вала поддерживалось одинаковое значение  $p_e$  при работе на ДТ и топливе с добавкой РМ. Величина  $p_e$  определялась косвенным путем из показаний весового механизма загрузочного устройства. Все характеристики снимались при оптимальных значениях установочного угла опережения впрыскиваемого топлива. Одновременно со снятием характеристик производилось индицирование и газоанализ, а также отбор проб для определения дымности ОГ.

Оптимальный установочный угол опережения впрыскивания топлива определялся из соответствующей регулировочной характеристики дизеля при различных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива, различных количествах РМ в смеси и постоянном значении частоты вращения.

Графики тепловыделения строились по методике ЦНИДИ.

Нагрузочные и скоростные характеристики дизеля снимались при выбранных концентрациях РМ в смеси.

Концентрация РМ определялась в процентном отношении к массе смеси. Она выбиралась с учетом проведенных ранее исследований и оставалась постоянной величиной по отношению к массе смеси, равной 45 % масс.

Подача смеси ДТ с РМ осуществлялась стандартной системой топливоподачи после пуска и прогрева дизеля на чистом ДТ. Снятие скоростных и нагрузочных характеристик дизеля, газовый анализ проб и определение дымности и токсичности ОГ производились в полном объеме.

### **3.5. Методика эксплуатационных испытаний**

Завершающим этапом исследований явилось сравнение выходных показателей работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на смесевом топливе на основе РМ и чистого ДТ в составе машинно-тракторного агрегата.

Перед испытаниями трактор «Беларус-922» прошел 30-часовую обкатку в соответствии с рекомендациями изготовителя. Комплектация

трактора соответствовала указанной изготовителем в руководстве по эксплуатации для использования на работах, требующих большого усилия.

Типоразмеры шин соответствовали рекомендациям изготовителя, высота почвозацепов была 82 % от номинальной. Давление воздуха доводилось до значения в передних колесах – 1,8 кПа, задних – 2,0 кПа. Применяемое дизельное топливо соответствовало плотности 0,823 г/см<sup>3</sup>, смесь ДТ и РМ с содержанием РМ 20 % – 0,841 г/см<sup>3</sup>, смесь ДТ и РМ с содержанием РМ 45 % – 0,862 г/см<sup>3</sup>.

Вначале был проведен прогрев двигателя до рабочей температуры в пределах 85–95 °С. Испытания проводились при атмосферном давлении – 748 мм рт. ст. и температуре окружающего воздуха 17 °С. Скорость движения трактора при испытаниях не превышала границ безопасности – до 35 км/ч.

Для испытаний был выбран ровный, горизонтальный (с продольным и поперечным уклоном 1 % и 3 % соответственно), прямолинейный участок поля длиной 200 м. В средней части участка в режиме максимальной тяговой мощности на 2-й и 3-й передаче измерялся расход топлива за время прохождения трактором 100 м.

В начале и в конце участка ставились сдвоенные контрольные вешки высотой 2,0 м. Вспомогательные участки по концам размечались вешками, длина этих участков составляла 50 м. Измерения проводились при поддержании заданного тягового усилия в течение не менее 20 с или времени, необходимого для прохождения расстояния не менее 20 м, в зависимости от того, какое время больше (рис. 3.1).

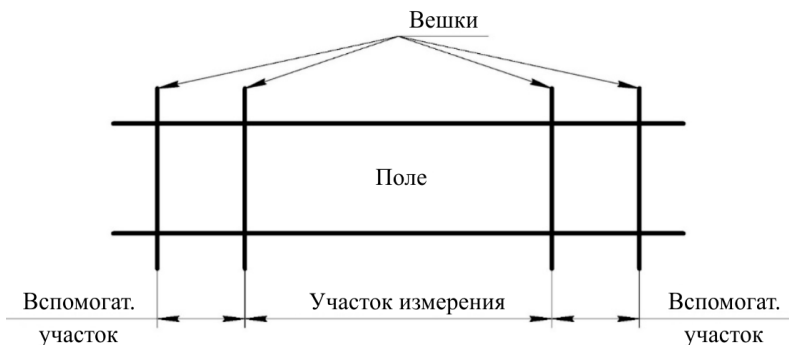


Рис. 3.1. Схема разметки поля

Тяговая характеристика трактора снималась на 2-й и 3-й передачах I диапазона. Загрузка испытываемого трактора осуществлялась плугом ПЛН-3-35 (рис. 3.2) через динамометрическую автосцепку с многоканальным измерительным усилителем Spider 8. Расход топлива замерялся расходомером ДРТ-5.

Показатели дымности и токсичности снимались при помощи дымомера MDO 2 LON и газоанализатора MTG 5 соответственно.



Рис. 3.2. Трактор «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35

### **3.6. Экспериментальные установки, приборы и оборудование**

В ходе работы были проведены исследования влияния состава топлива с добавкой РМ на кинематическую вязкость, оптическую плотность, снимались регулировочная, нагрузочные, скоростная характеристики дизеля, проводились испытания топливной аппаратуры, хроматомасс-спектрометрия образцов РМ, эксплуатационные испытания.

При определении кинематической вязкости использовалось следующее оборудование: вискозиметр ВПЖ-2, штатив, термометр, секундомер, резиновая груша, пробы испытываемых видов топлива. Плотность топлива определяли при помощи набора ареометров.

Для определения оптической плотности был использован фотоэлектроколориметр КФК-2.

Исследования состава образцов РМ были проведены методом капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии на газовом хроматомасс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus («Шимадзу», Япония).



С целью выявления влияния топлив с добавкой рапсового малса на технико-экономические и экологические показатели работы силовых установок трактора были проведены экспериментальные исследования на нагрузочном стенде RAPIDO (Германия) мощностью 250 кВт. На рис. 3.3 и 3.4 представлены общий вид экспериментальной установки для проведения стендовых испытаний и общий вид пульта управления установкой. Испытательная установка располагается в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории испытания двигателей внутреннего сгорания и топлива.



Рис. 3.3. Общий вид экспериментальной установки



Рис. 3.4. Общий вид пульта управления установкой

Индицирование дизеля производилось следующим образом. В головку блока второго цилиндра устанавливался датчик давления PS01 (рис. 3.7) согласно инструкции к индикатору. Далее от датчика сигнал передавался на измеритель ПИД-Регулятор ТРМ 148-Р.Щ4. Вид на установленный измеритель ПИД-Регулятор ТРМ 148-Р.Щ4 показан на рис. 3.5. От ПИД-Регулятора ТРМ 148-Р.Щ4 данные передавались в компьютер со специальными программами для расшифровки сигналов.

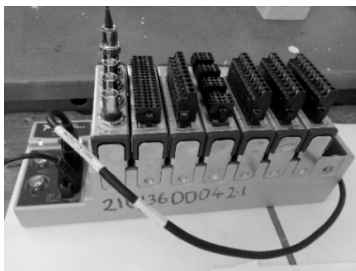


Рис. 3.5. Измеритель ПИД-Регулятор ТРМ 148-Р.Щ4

Датчик отметки ВМТ (рис. 3.6) устанавливался на корпусе маховика. Учитывая, что правильность отметки ВМТ значительно влияет на точность обработки индикаторных диаграмм, установка датчика корректировалась по положению поршня в ВМТ во втором цилиндре, и проверялась по диаграмме сжатия-расширения без подачи топлива.



Рис. 3.6. Датчик отметки ВМТ

Датчик давления (рис. 3.7) устанавливался во втулке, вмонтированной в головку блока второго цилиндра.



Рис. 3.7. Датчик давления PS01

Для выполнения исследований в состав экспериментальной установки входят приборы, которые прошли государственную поверку (рис. 3.8, 3.9, табл. 3.2).



Рис. 3.8. Газоанализатор MGT-5



Рис. 3.9. Дымомер MDO 2 LON

Таблица 3.2. **Приборы и оборудование, входящие в состав экспериментальной установки**

Измеряемый параметр	Наименование прибора или оборудования	Марка прибора	Класс точности
Дымность ОГ	Дымомер	MDO 2 LON	$\pm 1,5 \%$
Токсичность ОГ	Газоанализатор	MGT 5	$\pm 3 \%$
Частота вращения коленчатого вала	Тахометр электронный	ТЭСА	$\pm 0,02 \%$
Расход топлива	Расходомер топлива	AIP-50	$\pm 0,5 \%$
Крутящий момент	Весовой механизм электрического маятникового испытательного стенда	SAK-N670	По 4 разряду
Расход воздуха	Диафрагма нормальная	ДК	$\pm 0,04 \%$
Температура ОГ	Потенциометр с термопарой	КСП-4	$\pm 0,25 \%$
Температура охлаждающей жидкости и масла	Термометр манометрический сигнализирующий	ТС-100	$\pm 6 \%$
Давление масла	Манометр технический	МП-160	$\pm 1,5 \%$
Частота вращения коленчатого вала	Тахометр	AVL DISpeed492	$\pm 0,02 \%$
Расход топлива	Объемный датчик расхода дизельного топлива	ДРТ-5 с терминалом СКРТ 31	$\pm 1 \%$
Тяговое сопротивление	Динамометрическая автосцепка	—	$\pm 2 \%$
	Измерительный усилитель	Spider 8	—

Сравнительные испытания работы топливной аппаратуры дизелей проводились на стенде КИ-22210-02М-15. Использовались серийные форсунки 171–01, устанавливаемые на дизеле 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) и топливный насос типа 4УТНМ.

Эксплуатационные испытания проводились с целью определения работоспособности трактора «Беларус-922» на смесевом топливе в зависимости от режима работы трактора. Для выполнения исследований в состав экспериментальной установки вошли приборы, представленные на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Приборы для определения расхода топлива:  
*а* – расходомер ДРТ-5; *б* – терминал СКРТ 31

Для измерения тягового сопротивления, создаваемого плугом, использовалась динамометрическая автосцепка с многоканальным измерительным усилителем Spider 8, подсоединенным к ноутбуку с установленным специализированным программным обеспечением (рис. 3.11).

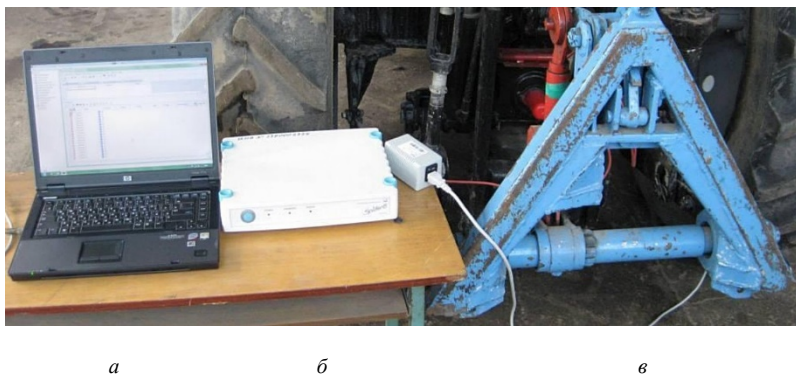


Рис. 3.11. Приборы для определения тягового усилия:  
*а* – ноутбук; *б* – измерительный усилитель Spider 8; *в* – динамометрическая автосцепка

### 3.7. Обработка результатов исследований. Ошибки измерений

Замер исследуемых величин всегда происходит с погрешностями, следовательно, полученные значения всегда имеют приближенные

значения, степень приближения зависит от правильности выбора и возможностей прибора, условий проведения опыта.

Объективность данных, полученных в результате исследований, проверяется подсчетом ошибок измерения величин, и определяется суммарная погрешность результатов опыта. Допускалось, что при выполнении опытов имелись только систематические ошибки. Появление случайных погрешностей исключалось ввиду проведения проверок приборов и поддержания постоянных условий проведения опытов.

Математическая обработка результатов производилась в соответствии с существующими нормами [136].

Для сложной функции вида  $N_e = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  абсолютная ошибка равна сумме частных, в каждой из которых за переменную принимается только один из аргументов:

$$\Delta N = \pm [\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \dots + \Delta N_n(x_n)], \quad (3.1)$$

где  $N$  – истинная величина;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – результат измерения величин.

Относительная ошибка:

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{[\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \dots + \Delta N_n(x_n)]}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}. \quad (3.2)$$

Анализируя источники погрешностей измерений, появляется возможность подсчета суммарной ошибки опыта. При определении этой величины брался самый неблагоприятный случай, когда все частные ошибки берутся со знаком «+». Придерживался следующий порядок определения: оценивались размеры частных предельных погрешностей по отдельным элементам измерений, входящих в опыт, затем подсчитывались абсолютная и относительная ошибки результатов измерений.

Относительная погрешность определения эффективной мощности, вычисляемой по формуле:

$$N_e = \pm \frac{M_k n}{9550}, \quad (3.3)$$

где  $M_k = P_T l$  – крутящий момент;

$P_T$  – показания тормоза;

$l$  – длина плеча весового механизма;

$n$  – частота вращения коленчатого вала,

определялась из выражения:

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = \pm \left( \frac{\Delta P_\tau}{P_\tau} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right). \quad (3.4)$$

Относительная погрешность определения основного, дополнительного и суммарного расходов топлива, вычисляемых по формулам:

$$G_\tau = \frac{g_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}}, \quad G_{\tau\Sigma} = G_\tau + G'_\tau, \quad (3.5)$$

определялись из соответствующих выражений:

$$\frac{\Delta G_\tau}{G_\tau} = \pm \left( \frac{\Delta g_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right), \quad (3.6)$$

$$\frac{\Delta G_{\tau\Sigma}}{G_{\tau\Sigma}} = \pm \frac{\Delta G_\tau + \Delta G'_\tau}{G_\tau} = \pm \left( \frac{\Delta g_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right) \cdot \frac{G_\tau}{G_{\tau\Sigma}} \pm \left( \frac{\Delta g'_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right) \cdot \frac{G'_\tau}{G_{\tau\Sigma}}. \quad (3.7)$$

где  $g_{\text{оп}}$  – количество топлива, расходуемого за опыт;

$\tau_{\text{оп}}$  – время опыта.

Относительная погрешность определения удельного эффективного расхода топлива, вычисляемого по формуле:

$$g_e = \frac{1000 \cdot G_\tau}{N_e}, \quad (3.8)$$

определялась из выражения:

$$\frac{\Delta g_e}{g_e} = \pm \left( \frac{\Delta G_{m\Sigma}}{G_{m\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e} \right) = \pm \left( \frac{\Delta g_{\text{он}}}{g_{\text{он}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{он}}}{\tau_{\text{он}}} \right) \cdot \frac{G_m}{G_{m\Sigma}} \pm \left( \frac{\Delta g'_{\text{он}}}{g_{\text{он}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{он}}}{\tau_{\text{он}}} \right) \cdot \frac{G'_m}{G_{m\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e}. \quad (3.9)$$

Аналогичным образом производилась оценка погрешностей других измеряемых величин. Величины предельных ошибок вычислений и измерений представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. **Предельные ошибки вычислений и измерений**

Наименование величины	Предельная абсолютная ошибка	Предельная относительная ошибка
1. Массовая доля компонентов смеси топлив	0,05 г	0,05
2. Показания тормоза	1 Н	0,05
3. Частота вращения коленчатого вала	5 мин <sup>-1</sup>	0,004
4. Крутящий момент	1 Н · м	0,05
5. Мощность	0,2 кВт	0,6
6. Среднее эффективное давление	0,005 МПа	0,55
7. Часовой расход основного и дополнительного топлив	0,02 кг/ч	0,023
8. Часовой расход суммарного топлива	1,1	0,009
9. Удельный расход топлива	г/(кВт · ч)	0,5
10. Часовой расход воздуха	2,8 кг/ч	2,6
11. Коэффициент избытка воздуха	0,01	2,1
12. Температура ОГ	5 °С	0,022
13. Давление окружающего воздуха	0,1 кПа	0,001
14. Давление масла в масляной магистрали	10 кПа	0,05
15. Температура окружающего воздуха	1 °С	0,0625
16. Температура топлива	1 °С	0,0625
17. Температура охлаждающей жидкости	1 °С	0,0625
18. Относительная влажность воздуха	1 %	0,024
19. Концентрация СО	5 %	0,05
20. Концентрация СО <sub>2</sub>	4 %	0,008
21. Концентрация СН <sub>4</sub>	15 %	0,15
22. Концентрация С	0,3 ед.	1,0
23. Кинематическая вязкость топлива	0,005	2,0
24. Цикловая подача	0,001 мл/ц	0,033
25. Длительность впрыскивания	0,1 град п.к.в.	0,011



## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1. Результаты лабораторных исследований

#### 4.1.1. Результаты лабораторных исследований низкотемпературных свойств топлив с добавкой рапсового масла

Температура помутнения дизельного топлива оказывает влияние на значение предельной температуры его фильтруемости, что, в конечном счете, определяет показатели надежности и безотказности самого дизеля. В топливной композиции, где дизельное топливо является горючей фазой, а рапсовое масло (5,0...55 %) служит альтернативной заменой дизельного топлива – цетанповышающая присадка DIFRON H372 (0,5...2,0 %) служит для повышения самовоспламеняемости топлива. Одновременно, данная присадка, входящая в состав топливной композиции, позволяет изменить ее низкотемпературные свойства. Численные значения температуры помутнения топливной композиции на основе дизельного топлива с различным содержанием рапсового масла и присадки DIFRON H372 представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Температура помутнения топливной композиции

Содержание рапсового масла в топливной композиции, %	Температура помутнения без присадки	Температура помутнения с присадкой DIFRON H372	
		0,5 % присадки	2,0 % присадки
55	+5,0 °C	+4,5 °C	+1 °C
25	+2,5 °C	+2,0 °C	Около 0 °C
5	+2,0 °C	+1,0 °C	Около 0 °C

По результатам полученных данных применение в топливной композиции цетанповышающей присадки DIFRON H372 (0,5...2,0 %) позволяет одновременно улучшить моторные и низкотемпературные свойства смесового топлива, снизить температуру помутнения на 0,5...4°, а также повысить показатели надежности и безотказности топливной аппаратуры и самого дизеля [97].

#### 4.1.2. Результаты лабораторных исследований свойств топлив с добавкой рапсового масла

Для определения кинематической вязкости смесовых топлив, состоящих из РМ и ДТ, использовался вискозиметр ВПЖ-2 с требуемым диаметром капилляра.

Графики зависимости кинематической вязкости топлива от содержания рапсового масла двух образцов представлены на рис. 4.1. Видно, что кинематическая вязкость образца № 12 выше, чем образца № 3 [105].

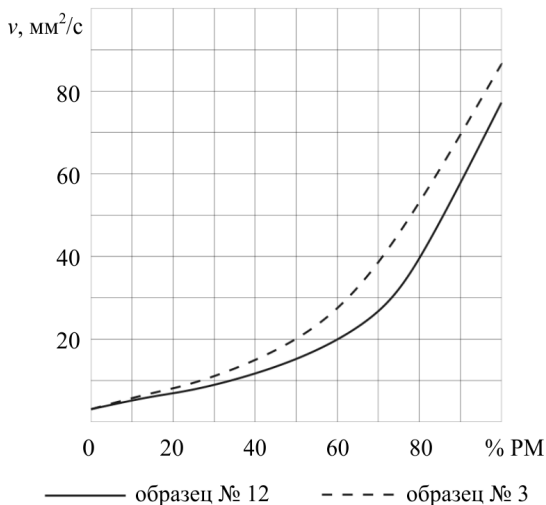


Рис. 4.1. Вязкость топлив с добавкой рапсового масла

Для определения причин отличия кинематической вязкости двух образцов была выполнена хроматомасс-спектрометрия. Отчет об идентификации компонентов, сформированный программой обработки данных, представлен в табл. 4.2 [106].

Вязкость растительных масел зависит от молекулярного веса жирных кислот, входящих в их состав.

Таблица 4.2. Жирнокислотный состав масел

Кислота	Содержание в образце масла, % масс.	
	Образец № 12	Образец № 3
Пальмитиновая	1,01	1,42
9,12-Октадекадиеновая	6,13	5,03
Олеиновая	91,34	91,22
Стеариновая	0,68	1,04
10-Октадеценовая	0,61	1,03
Бегеновая	0,24	0,26

Как видно из данных, представленных в табл. 4.2, содержание жирных кислот, следовательно и их молярный вес, выше в образце № 3 РМ.

Основной проблемой применения РМ является высокая, по сравнению с ДТ, вязкость. С одной стороны, при повышенной вязкости на поверхностях трения образуется демпфирующая пленка, снижающая суммарный массовый износ сопряжения плунжер-штука. С другой стороны, использование топлив с повышенной вязкостью увеличивает нагрузки на детали ТНВД. Даже при стандартной температуре  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкость РМ почти на порядок выше вязкости ДТ.

С целью снижения кинематической вязкости было оценено несколько присадок различных классов на основе сложных виниловых эфиров, ненасыщенных кетонов, эфиров и амидов ненасыщенных кислот. В ходе исследований было установлено, что снижение кинематической вязкости смесей РМ и ДТ до 22 % возможно путем введения депрессорных присадок. Данные вязкости смесей образца № 3 с ДТ и присадками № 1, № 2, № 3 из отмеченных выше классов соединений представлены на рис. 4.2.

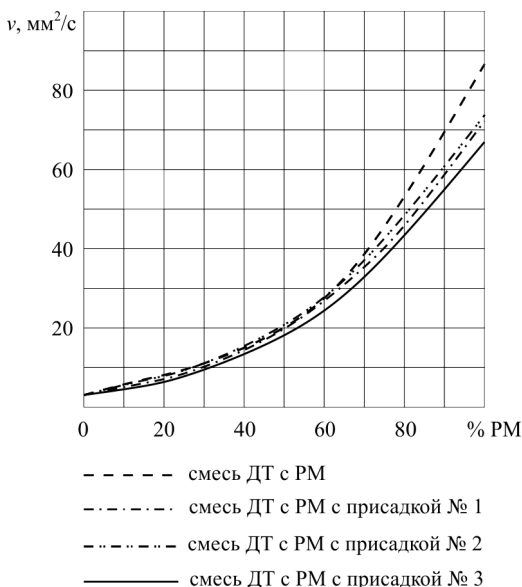


Рис. 4.2. Вязкость топлива с добавкой РМ и присадок

Видно, что использование присадки № 3 в большей степени снижает кинематическую вязкость топлива с добавкой РМ по сравнению с другими рассмотренными присадками.

В дальнейших исследованиях использовалось топливо на основе образца № 3 РМ с присадкой № 3.

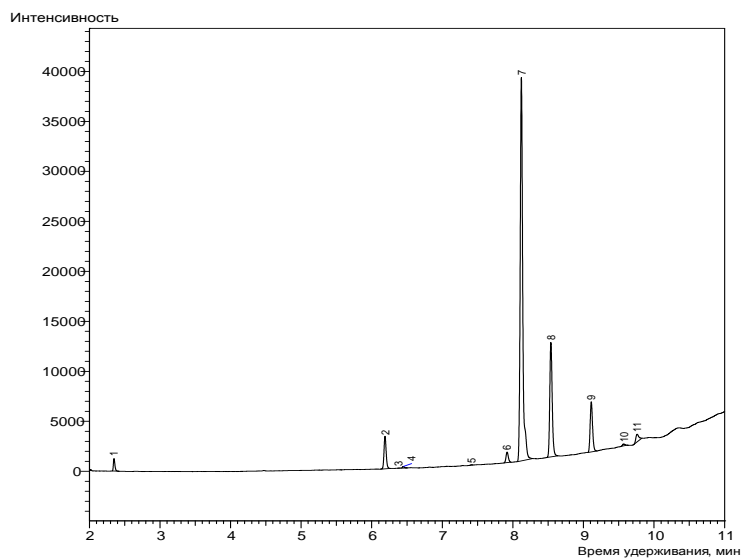
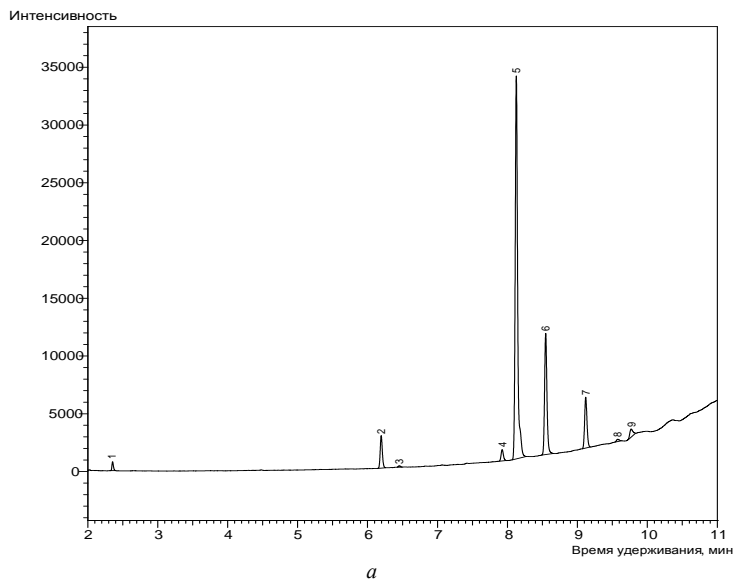
#### **4.1.3. Результаты лабораторных исследований жирнокислотного состава топлив с добавкой рапсового масла**

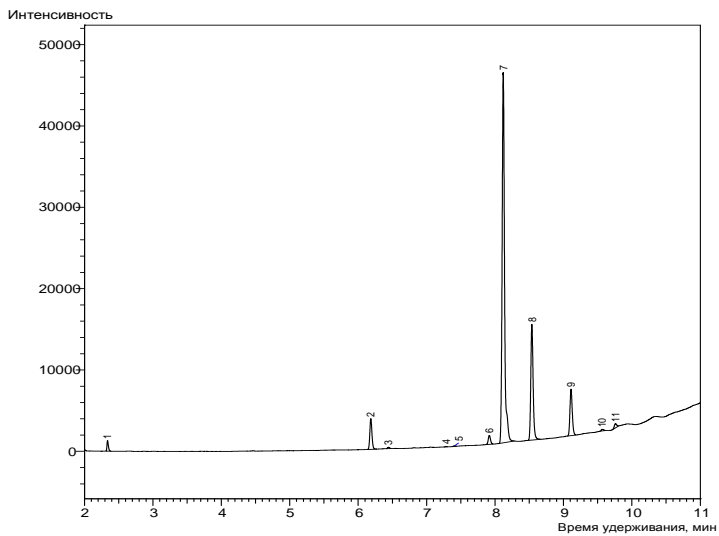
Для определения кинематической вязкости смесевых топлив, в составе которых содержится рапсовое масло и нефтяное дизельное топливо, использовался вискозиметр ВПЖ-2 с необходимым диаметром капилляра [61]. При определении причин отличия кинематической вязкости рапсового масла, был проведен хроматографический анализ пяти образцов. Отчет по процентному содержанию кислотных остатков, сформированный программой обработки данных, представлен в табл. 4.3 [101].

Таблица 4.3. Процентное содержание кислотных остатков в образцах рапсового масла

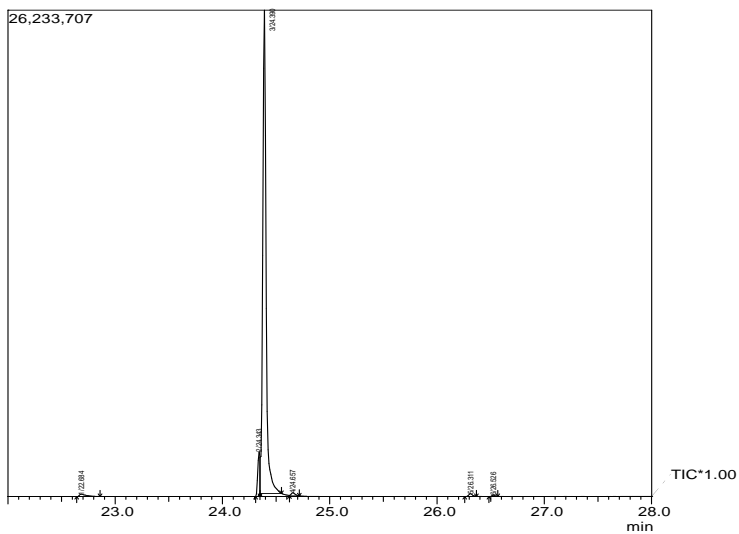
Название кислоты	Число атомов углерода	Число двойных связей	Образец				
			2	3	4	12	19
Пальмитиновая	16	Нет	4,67	4,72	4,73	0,69	3,92
Маргариновая	17	Нет	0,19	0,19	0,19	–	0,17
Стеариновая	18	Нет	1,75	1,65	1,47	0,75	1,74
Олеиновая	18	1	63,55	64,74	65,1	89,86 +0,94	63,79
Линолевая	18	2	19,58	18,71	19,65	7,52	19,27
Линоленовая	18	3	8,15	8,1	7,83	–	9,94
Арахидиновая	20	Нет	0,42	0,32	0,28	–	0,41
Эйкозеновая	20	1	1,68	1,56	0,74	–	0,76
Бегеновая	22	Нет	–	–	–	0,24	–

Показатель вязкости растительных масел зависит от молекулярного веса жирных кислот, входящих в их состав. В связи с этим, предпочтительным для использования в топливной смеси является образец № 19, так как массовая доля непредельных кислот в его составе максимальна (93 %). Данное условие влияет на увеличение скорости процесса сгорания. Хроматограммы образцов и данные анализа хроматограмм представлены на рис. 4.3 и в табл. 4.4 [101].

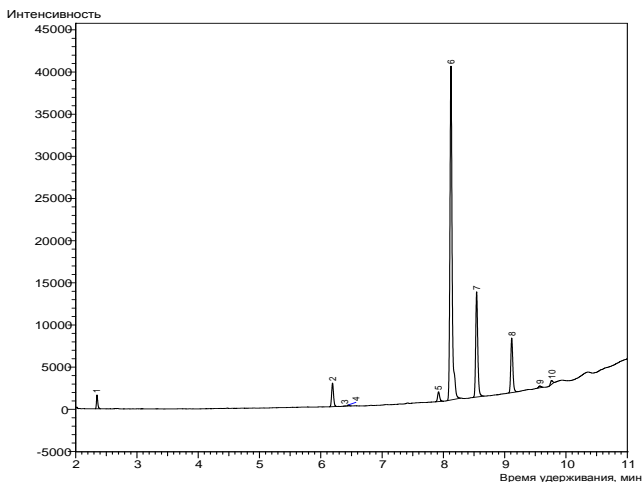




6



2



д

Рис. 4.3. Хроматограммы содержащихся компонентов в пяти образцах: *a* – образец № 2; *б* – образец № 3; *в* – образец № 4; *г* – образец № 12; *д* – образец № 19)

Таблица 4.4. Данные анализа хроматограммы

Peak#	Height	Ret.Time	Area	Conc.	Units	Name
1	1614	2,349	2442	1,573	%	RT2.349
2	2664	6,191	5999	3,864	%	
3	27	6,395	43	0,028	%	RT6.395
4	132	6,451	256	0,165	%	
5	1141	7,921	2651	1,707	%	
6	38070	8,124	97466	62,774	%	
7	12422	8,542	29439	18,960	%	
8	6409	9,115	15185	9,780	%	
9	228	9,573	625	0,402	%	
10	450	9,766	1160	0,747	%	
Total	63157		155266	100,000		

При использовании растительных масел в дизелях необходимо учитывать физико-механические свойства жирных кислот, входящих в состав масел и нефтяных топлив. Применение рапсового масла с высокой вязкостью по отношению к дизельному топливу приводит к образованию демпфирующей пленки на поверхностях трения, снижающей

суммарный массовый износ сопряжения плунжер-втулка. Однако, повышенная вязкость приводит к увеличению нагрузки на детали ТНВД, так как вязкость рапсового масла почти на порядок выше вязкости дизельного топлива.

С целью снижения кинематической вязкости рапсового масла в составе топливной композиции было оценено несколько депрессорно-диспергирующих присадок на основе бензольных полимеров, растворенных в нефтяном растворителе. Данные присадки с функцией «стоп – износ» улучшают смазывающую способность топлив. Эти присадки эффективны и экологичны, так в своем составе не содержат серы и полностью совместимы с другими присадками и маслами, а также улучшают низкотемпературные характеристики дизельного топлива.

Результаты экспериментальных исследований по определению кинематической вязкости топливной композиции, состоящей из процентной доли дизельного топлива, рапсового масла и депрессорно-диспергирующих присадок с использованием вискозиметра ВПЖ-2 представлены в табл. 4.5 [107].

**Таблица 4.5. Результаты экспериментальных исследований по кинематической вязкости топливной композиции**

% содержания рапсового масла РМ	% содержания присадки DIFRON LT345			
	0	0,5	1	2
0	4,872	4,392	4,433	4,444
10	5,812	5,437	5,375	5,289
20	7,490	7,255	7,205	7,091
30	9,253	9,497	9,401	9,445
40	12,476	12,839	12,819	12,769
50	16,087	16,858	16,854	16,700
	% содержания присадки DIFRON H372			
	0	0,5	1	2
0	4,524	4,492	4,455	4,405
10	6,008	5,945	5,873	5,811
20	7,885	7,739	7,633	7,123
30	10,264	10,096	9,984	9,860
40	13,899	13,468	13,270	12,968
50	17,894	17,692	17,400	16,980
	% содержания присадки Антигель Intenpum			
	0	0,5	1	2
0	4,323	4,442	4,508	4,620
10	5,584	5,699	5,841	5,983
20	7,287	7,466	7,670	7,939
40	13,810	13,310	13,626	13,943

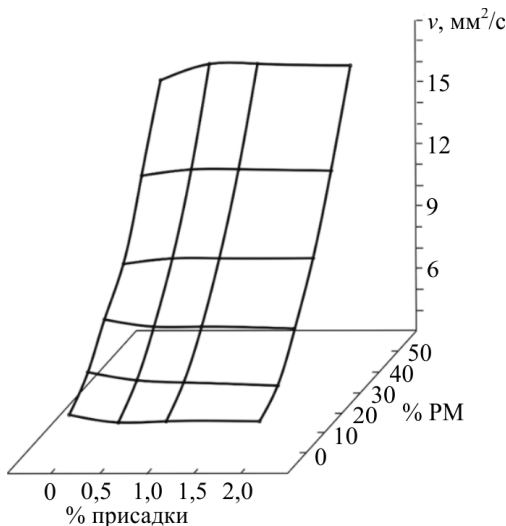


Графические зависимости влияния процентного содержания рапсового масла и депрессорно-диспергирующих присадок в топливных композициях на кинематическую вязкость представлены на рис. 4.2.

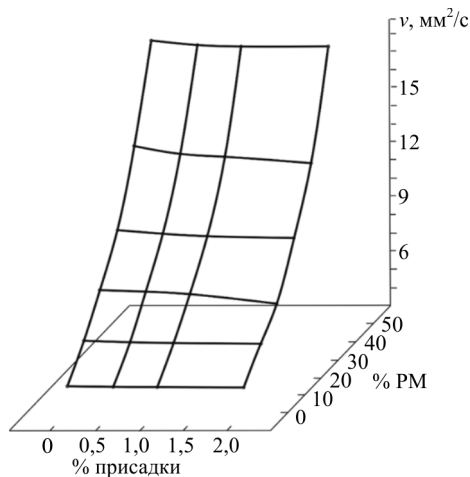
На основе анализа полученных зависимостей (рис. 4.4) установлено, что с увеличением процентного содержания рапсового масла в топливной композиции от 0 до 50 % в независимости от наличия присадок кинематическая вязкость увеличивается с 4,524...4,872 мм<sup>2</sup>/с до 16,087...17,894 мм<sup>2</sup>/с.

С увеличением процентного содержания присадок от 0 до 2 % в заявленной топливной композиции характер изменения графиков кинематической вязкости носит неоднозначный характер.

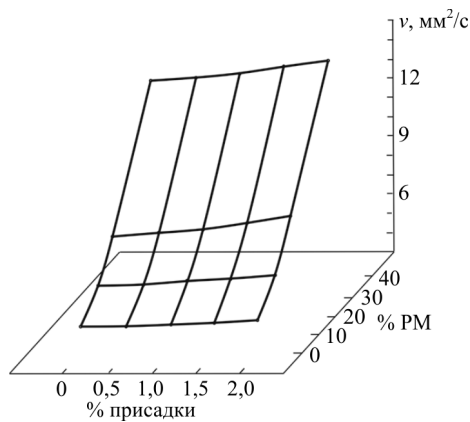
С увеличением процентного содержания присадки DIFRON LT345 (от 0 до 2 %) и рапсового масла (от 0 до 20 %) кинематическая вязкость топливной композиции снижается на 0,2...0,5 мм<sup>2</sup>/с, однако при максимальном увеличении процентной доли рапсового масла в топливной композиции – наблюдается повышение кинематической вязкости на 0,2...0,7 мм<sup>2</sup>/с.



*a*



а



б

Рис. 4.4. Кинематическая вязкость топливных композиций в зависимости от процентного содержания депрессорно-диспергирующих присадок и рапсового масла: а – DIFRON LT345; б – DIFRON H372; в – Антигель Intenpum)

Применение присадки DIFRON H372 в топливной композиции характеризуется явно выраженным линейным изменением кинематиче-

ской вязкости. Во всем процентном диапазоне содержания доли рапсового масла наблюдается тенденция снижения кинематической вязкости на  $0,1 \dots 0,9 \text{ мм}^2/\text{с}$  при увеличении концентрации самой присадки.

Изменение кинематической вязкости с использованием депрессорно-диспергирующей присадки Антигель Intenpum также характеризуется линейной графической зависимостью. Как видно из графика (см. рис. 4.4, в) кинематической вязкости топливных композиций в зависимости от процентного содержания присадки Антигель Intenpum (от 0 до 2 %) и доли рапсового масла (от 0 до 40 %), происходит увеличение значения кинематической вязкости на  $0,409 \dots 1,079 \text{ мм}^2/\text{с}$  во всем диапазоне.

На основании анализа графиков кинематической вязкости топливной композиции с применением присадок, а также смеси в процентном соотношении дизельного топлива и рапсового масла сделан вывод о предпочтении присадки DIFRON H372. Кинематическая вязкость с применением данной присадки изменяется по наиболее линейному закону, а также наблюдаются наибольшие численные значения по снижению кинематической вязкости по сравнению с другими рассмотренными присадками исследуемой топливной композиции [107].

В дальнейших исследованиях использовалось топливо на основе образца № 5 рапсового масла с депрессорно-диспергирующей присадкой DIFRON H372.

## **4.2. Результаты стендовых испытаний работы топливоподающей аппаратуры дизеля**

### **4.2.1. Результаты стендовых испытаний работы топливоподающей аппаратуры на дизельном топливе и топливе с добавкой рапсового масла**

На основании анализа изменения вязкости исследуемой топливной композиции было проведено лабораторное исследование на соответствие требований ТУ завода-изготовителя для дизельных топливных форсунок. Основные показатели оценивались согласно ГОСТ 10579-2017 [139].

График зависимости давления начала впрыскивания от состава топливной композиции представлен на рис. 4.5 [103].

С увеличением доли рапсового масла в топливной композиции от 0 до 100 % линия давления начала впрыскивания изменяется по пара-

болическому закону от 20,88 до 21,08 МПа, что удовлетворяет требованиям ГОСТ и свидетельствует о работоспособности форсунки.

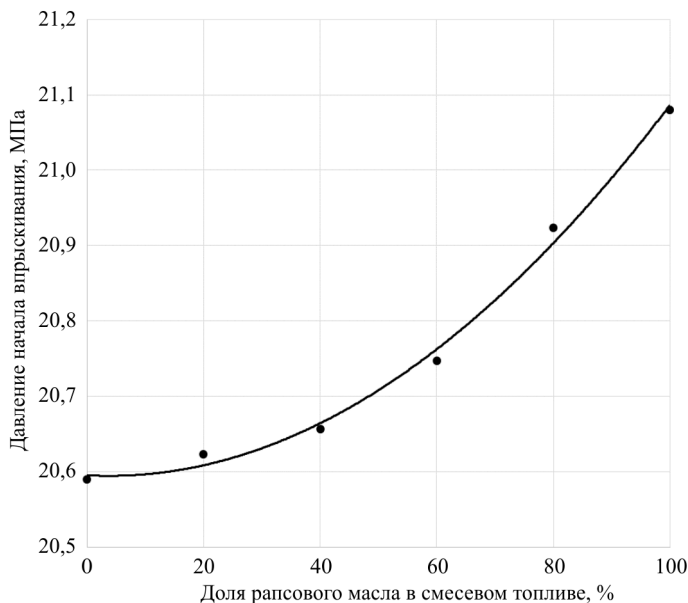


Рис. 4.5. Зависимость давления начала впрыскивания от состава смесового топлива

Испытание дизельной форсунки на герметичность по запирающему конусу и уплотнений, соединений и наружных поверхностей полости высокого давления форсунки в зависимости от состава топливной композиции выявило ее соответствие ГОСТ 10579–2017. График полученной зависимости представлен на рис. 4.6.

При повышении концентрации рапсового масла в топливной композиции время отрыва капли топлива от носика распылителя увеличивается с 18 до 104 с. Данные значения удовлетворяют требованиям ГОСТ 10579–2017.

Данное обстоятельство объясняется тем, что сила поверхностного натяжения капли рапсового масла больше, чем у капли дизельного топлива.

Зависимость гидроплотности распылителей от состава смесового топлива в графической зависимости представлена на рис. 4.7.

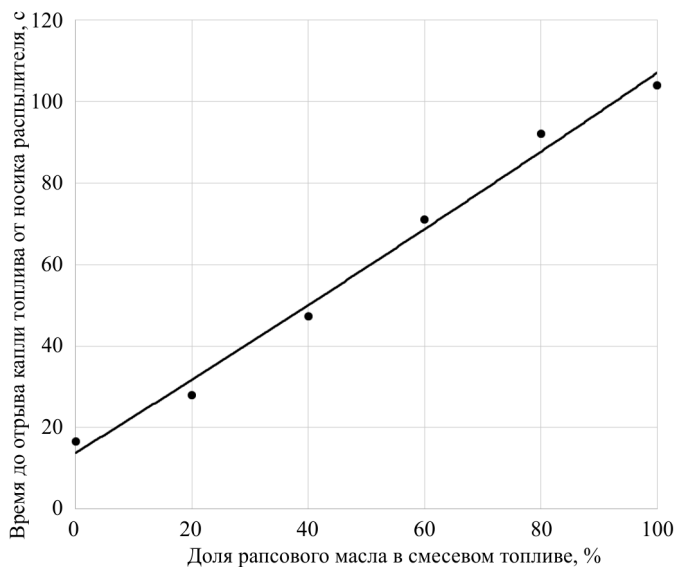


Рис. 4.6. Зависимость герметичности по запирающему конусу от состава смесового топлива

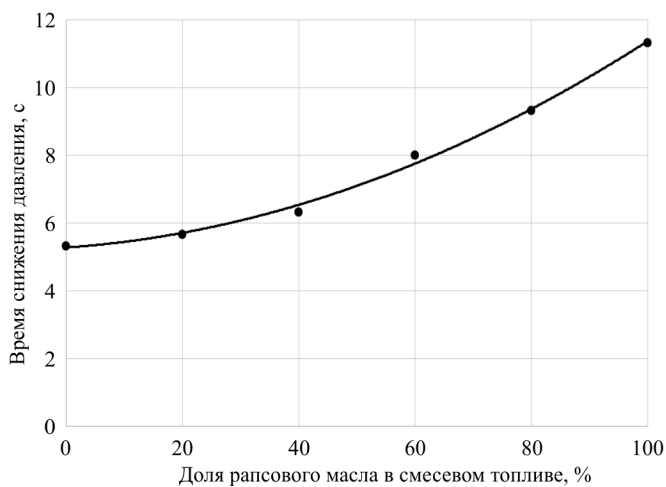


Рис. 4.7. Зависимость гидроплотности распылителей от состава смесового топлива

С повышением доли рапсового масла в смесевом топливе показатель гидроплотности распылителей увеличивается с 5,2 до 11,3 с, ввиду того, что рапсовое масло обладает более высокой плотностью, равной  $915 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ , по сравнению с чистым летним дизельным топливом –  $860 \text{ кг/м}^3$  [104].

Полученные данные свидетельствуют о том, что по данному показателю на всех составах смесевое топливо работоспособность форсунки обеспечена согласно ГОСТу [139].

Однако показатель качества распыливания соответствует ГОСТу лишь на составах смесевое топлива с долей рапсового масла до 60 %. В связи с этим для сохранения работоспособности форсунок, а также эффективных и экологических показателей работы тракторного дизеля долю рапсового масла в смесевом топливе рекомендуется ограничить на уровне 60 %.

Подготовка топливной композиции в смеси дизельного топлива с рапсовым маслом может сопровождаться изменением однородности и образованием дисперсности топливной среды [62].

Перед началом испытаний производились замеры плотности чистого дизельного топлива и смеси ДТ и РМ с содержанием 20 и 55 % последнего соответственно. Значения плотности практически не отличались друг от друга. Вязкость чистого ДТ составила  $3,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , а вязкость смеси с содержанием рапсового масла 25 и 50 % составляла 15,49 и  $27,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно.

На рис. 4.8 приведена скоростная характеристика топливного насоса марки 773-40.02 при включенном регуляторе [15].

Как видно из графика, характер кривых изменения цикловой подачи в режиме максимальной подачи топлива при работе насоса на смесевом топливе, содержащем 45 % ДТ, 80 % ДТ и 100 % ДТ подобны друг другу. При номинальном режиме  $q_{\text{ц}}^{\text{PM}} = 0,112 \text{ мл/ц}$ , а при использовании смеси с рапсовым маслом с концентрацией 20 % –  $q_{\text{ц}}^{\text{PM}} = 0,114 \text{ мл/ц}$ , а с концентрацией 55 % –  $q_{\text{ц}}^{\text{PM}} = 0,110 \text{ мл/ц}$ . Уменьшение цикловой подачи составляет 2 %. При частоте вращения вала соответствующему максимальному крутящему моменту, а также на других частотах вращения изменение величины цикловой подачи составляет 2 %. Данное обстоятельство может быть объяснено изменением потерь и утечек через неплотности плунжерных пар вследствие изменения вязкости смесевое топлива.

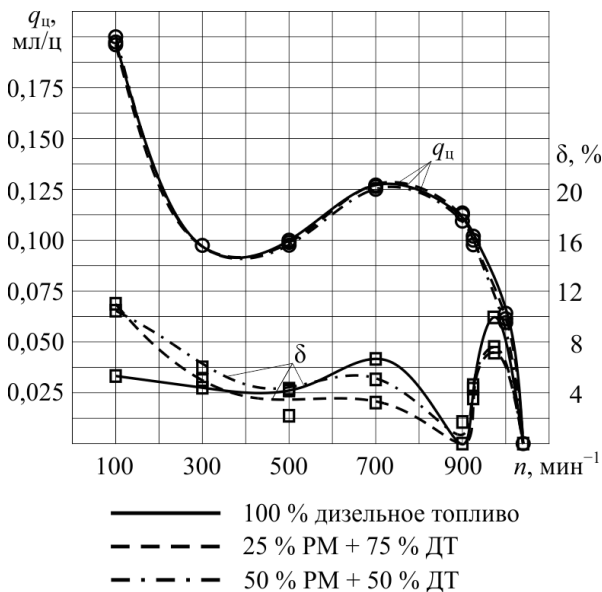


Рис. 4.8. Скоростная характеристика топливного насоса марки 773-40.02 при включенном регуляторе

С увеличением частоты вращения вала насоса до  $980 \dots 1040 \text{ мин}^{-1}$  в действие приводится всережимный регулятор, что вызывает снижение цикловой подачи топлива. В режиме работы холостого хода изменение цикловой подачи соответствует значениям изменения на номинальном режиме работы. Изменение цикловой подачи с использованием смесевых топлив составляет от 2 до 7 % по отношению к работе на чистом ДТ, так как при прочих равных условиях относительный процент гидравлических потерь обратно пропорционален снижению величины цикловой подачи [15].

Неравномерность подачи топлива по секциям насоса при использовании смесового топлива в режиме холостого хода составляет  $\delta = 6,9$  и  $\delta = 7,1 \%$ , для режима максимального крутящего момента  $\delta = 3,1$  и  $\delta = 4,8 \%$ , а для номинального режима составила  $\delta = 0$  и  $\delta = 1,8 \%$ , что соответствует ТУ на работу топливной аппаратуры.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом не вызывает отказов в работе топливной аппаратуры дизеля.

#### 4.2.2. Результаты стендовых испытаний работы топливной аппаратуры дизеля на дизельном топливе и топливе с добавкой рапсового масла

С целью увеличения предела применяемости альтернативных топлив с добавками РМ в автотракторных дизелях необходимо решить задачу снижения такого физико-химического показателя нового топлива, как вязкость.

Определение влияния указанного обстоятельства на изменение параметров топливоподачи явилось целью проведенных исследований. Важным условием при этом было сохранение фиксированного положения рейки топливного насоса.

Перед началом испытаний были определены значения плотности для различных составов смесового топлива (рис. 4.9).

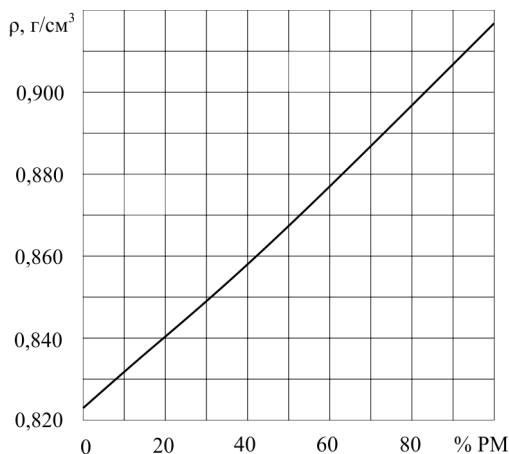


Рис. 4.9. Плотность смесового топлива

Данные рис. 4.9 показывают, что плотность различается не более, чем на 12 %, что вполне приемлемо для работы топливной аппаратуры дизеля.

На рис. 4.10 приведена скоростная характеристика топливного насоса 4УТНМ при включенном регуляторе. Как видно из графика, цикловая подача смесового топлива, содержащего 20 и 45 % РМ, увеличивается на всех скоростных режимах работы в сравнении с работой на чистом ДТ.



Рост же концентрации РМ до 60 % и 80 % вызывает, напротив, снижение цикловой подачи смесового топлива на всех скоростных режимах работы насоса. Это обстоятельство можно объяснить совместным воздействием двух явлений. При малых концентрациях преобладающее действие оказывает снижение утечек через неплотности плунжерных пар, а при больших концентрациях – снижение заполнения надплунжерного пространства. И, наконец, работа ТНВД на топливе, содержащем 100 % РМ, сопровождается снижением цикловой подачи даже ниже его значения для чистого ДТ.

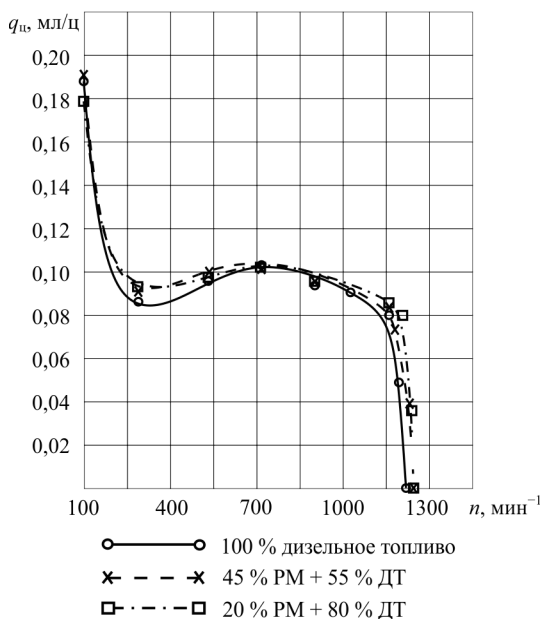


Рис. 4.10. Скоростные характеристики топливного насоса 4УТНМ

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение смесей ДТ с РМ не вызывает отказов в работе топливной аппаратуры дизеля.

Учитывая достаточно жесткие требования стандарта к вязкости моторного топлива, было решено в дальнейших испытаниях ограничить содержание РМ в смесовом топливе на уровне 45 %.

### 4.3. Результаты стендовых испытаний работы дизеля

#### 4.3.1. Влияние различных составов топлив с добавками рапсового масла на рабочий процесс и регулировки тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5

Работа двигателя с применением топливной композиции, состоящей из процентной доли дизельного топлива, рапсового масла и депрессорно-диспергирующей присадки (2 %) должна соответствовать работе серийно выпускаемого двигателя согласно его технической характеристике.

На этапе стендовых экспериментальных исследований определялись: влияние смесового топлива на регулировки тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5, а также оптимальный установочный угол опережения впрыскивания топлива при помощи нагрузочного электротормозного стенда RAPIDO.

Оценка влияния состава топливной композиции, в зависимости от процентного состава ДТ и РМ, на значения оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива производилась на основе анализа регулировочных характеристик [111]. На рис. 4.11 представлены графики изменения эффективных показателей при номинальной частоте вращения ( $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ) и значениях угла опережения от 12 градусов п.к.в. до ВМТ до 34 градусов п.к.в. до ВМТ.

По регулировочной характеристике видно, что при работе двигателя на чистом дизельном топливе оптимальным установочным углом является угол, равный  $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ . При данном угле эффективная мощность дизеля составляет  $N_e = 72 \text{ кВт}$ , удельный эффективный расход топлива равен  $g_e = 228 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ . Данные значения соответствуют руководству по эксплуатации дизеля. При этом значение эффективного КПД, учитывающего теплотворную способность топлива, также максимально и составляет  $\eta_e = 37\%$ , значение крутящего момента равно  $M_k = 382 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Часовой расход чистого дизельного топлива не изменяется, так как на всех установочных углах опережения впрыскивания топлива цикловая подача и скоростной режим двигателя остаются без изменения.

При использовании топливных композиций с добавками рапсового масла расположение кривых изменяется. Часовой расхода топлива  $G_T$  увеличивается до 16,8 и 17,6 кг/ч при содержании рапсового масла в топливной композиции 20 % и 55 %, по отношению к 16,4 кг/ч при работе дизеля на чистом ДТ.

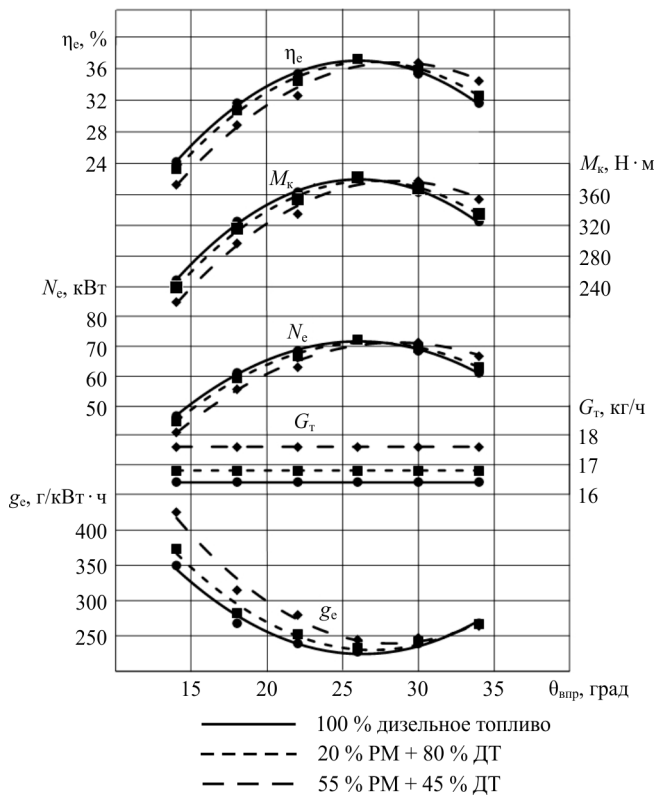


Рис. 4.11. Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по установочному углу опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  (эффективные показатели)

Увеличение часового расхода топлива обусловлено снижением низшей расчетной теплоты сгорания топливных композиций с добавками рапсового масла [111].

Значения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  также увеличились и составляют 233 и 244 г/кВт · ч, при содержании рапсового масла в топливной композиции 20 % и 55 % соответственно. При этом минимум удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  сдвигался в сторону больших значений установочного угла опережения впрыскивания топлива и составлял  $\theta_{впр} = 27 \dots 28^\circ$  при использовании топливных композиций с добавками рапсового масла 20 % и 55 %.

Максимальные значения эффективной мощности, эффективного КПД и крутящего момента также сдвигаются в сторону ранних значений установочного угла опережения впрыскивания топлива.

Учитывая конструктивную особенность установки угла опережения впрыскивания топлива для данного ТНВД, в дальнейших испытаниях было принято значение, равное  $\theta_{впр} = 26^\circ$ , для всех исследуемых топливных композиций.

График экологических показателей токсичности и дымности тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных значениях угла опережения впрыскивания топлива при номинальной частоте вращения коленчатого вала ( $1800 \text{ мин}^{-1}$ ) и различном процентном содержании рапсового масла в топливной композиции представлен на рис. 4.12 [111].

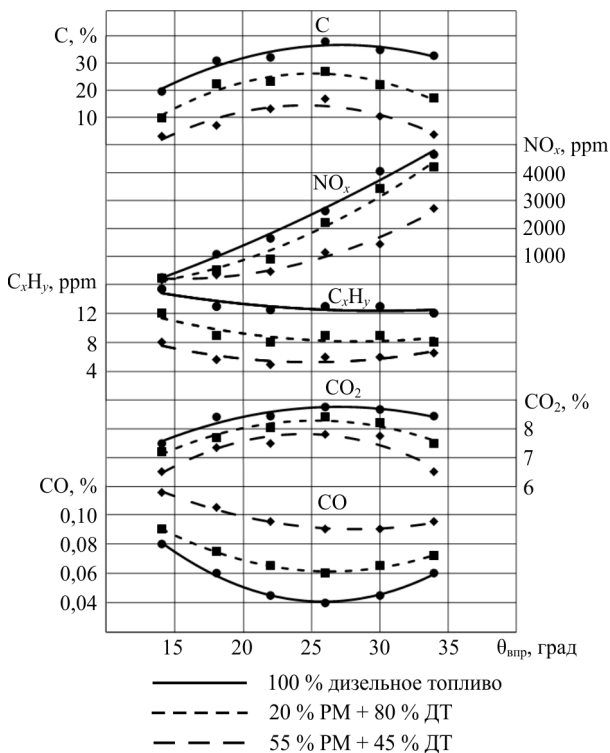


Рис. 4.12. Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по установочному углу опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  (экологические показатели)

Из графика видно, что содержание сажи в отработавших газах при изменении угла опережения впрыскивания топлива как в сторону поздних, так и в сторону ранних – уменьшается при работе тракторного дизеля на чистом ДТ, а также снижается концентрация сажи в ОГ при использовании топливных композиций. При значениях  $\theta_{впр} = 26^\circ$  концентрация сажи  $C$  в отработавших газах составляет: на чистом ДТ  $100 \% = 38,03 \%$ , в топливных композициях – ДТ  $80 \% + РМ 20 \% = 27 \%$  и ДТ  $45 \% + РМ 55 \% = 16,80 \%$  соответственно.

Содержание суммарных оксидов азота  $NO_x$  при работе двигателя на чистом дизельном топливе и топливных композициях с добавками рапсового масла уменьшается в сторону поздних углов опережения впрыскивания топлива. Работа тракторного дизеля на топливных композициях с добавками рапсового масла сопровождается снижением показателей выбросов оксидов азота. Численные значения суммарных оксидов азота  $NO_x$  при  $\theta_{впр} = 26^\circ$  и работе на чистом ДТ составило  $2630 \text{ ppm}$ , при работе на топливных композициях с содержанием рапсового масла  $20 \%$  –  $2225 \text{ ppm}$ , а при  $55 \%$  –  $1145 \text{ ppm}$  соответственно.

Содержание несгоревших углеводородных соединений  $C_xH_y$  снижается в сторону ранних углов опережения впрыскивания топлива. С увеличением содержания доли рапсового масла до  $55 \%$  в топливной композиции значение несгоревших углеводородов  $C_xH_y$  снизилось с  $13$  до  $6 \text{ ppm}$ .

Из графиков экологических показателей при значении установочного угла, равном  $\theta_{впр} = 26^\circ$  п.к.в. до ВМТ, при работе тракторного дизеля на чистом ДТ и топливных композициях с добавками рапсового масла  $20$  и  $55 \%$ , наблюдалось уменьшение значений концентраций диоксида углерода  $CO_2$  в отработавших газах. Так, при значении  $\theta_{впр} = 26^\circ$  п.к.в. до ВМТ и работе двигателя на чистом ДТ концентрация  $CO_2$  составила  $8,77 \%$ , а на топливных композициях с добавками рапсового масла  $20$  и  $55 \%$  –  $8,40$  и  $7,80 \%$  соответственно.

Значение концентрации монооксида углерода  $CO$  при увеличении доли рапсового масла в топливной композиции повышается в сторону поздних углов опережения впрыскивания топлива. Минимальные значения  $CO$  соответствовали значению установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\theta_{впр} = 26^\circ$  при работе на чистом ДТ составили  $0,04 \%$ , а при работе на топливных композициях с добавками рапсового масла  $20 \%$  и  $55 \%$  и составили ДТ  $80 \% + РМ 20 \% = 0,06 \%$  и ДТ  $45 \% + РМ 55 \% = 0,09 \%$  соответственно [111].

Таким образом топливные композиции с долей рапсового масла до 55 % и функциональной присадкой DIFRON H372 (до 2 %) могут быть рекомендованы к применению и позволяют улучшить некоторые эксплуатационные показатели дизеля.

На основании анализа графика регулировочной характеристики для всех исследуемых составов топливных композиций оптимальным значением установочного угла опережения впрыскивания топлива следует считать угол, равный  $\theta_{впр} = 26^\circ$  п.к.в. до ВМТ. При этом угле наблюдаются оптимальные значения эффективных и экологических показателей тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5.

Исследование показателей рабочего процесса сгорания при работе двигателя на топливной композиции, состоящей из процентной доли дизельного топлива, рапсового масла и депрессорно-диспергирующей присадки (DIFRON H372) определялись при помощи индицирования на номинальном скоростном режиме с частотой вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Процесс индицирования осуществлялся при определенных ранее оптимальных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива. По результатам исследования построены совмещенные индикаторные диаграммы и графики тепловыделения при работе двигателя на чистом ДТ и на топливных композициях с добавками рапсового масла 20 и 55 %.

Анализируя график совмещенных индикаторных диаграмм (рис. 4.13), видно, что при увеличении содержания рапсового масла в топливной композиции, кривая сдвигается в сторону поздних углов поворота коленчатого вала  $\phi$ . Так,  $\phi_{ДТ} = 20,4^\circ$  п.к.в., а значения углов, соответствующих действительному моменту впрыскивания при работе дизеля на СТ равны  $\phi_{PM20} = 21,1^\circ$  п.к.в. и  $\phi_{PM55} = 21,8^\circ$  п.к.в. Также наблюдается снижение давления  $p_z$  с увеличением концентрации рапсового масла в смеси.

Работа двигателя на топливной композиции, содержащей рапсовое масло, сопровождается снижением максимального давления цикла  $p_z$ .

При увеличении концентрации рапсового масла от 20 до 55 % в топливной смеси значение максимального давления цикла уменьшается.

Сопоставление расчетных и полученных экспериментальных данных по периоду задержки воспламенения  $\phi$  позволяют сделать вывод об их удовлетворительной сходимости.

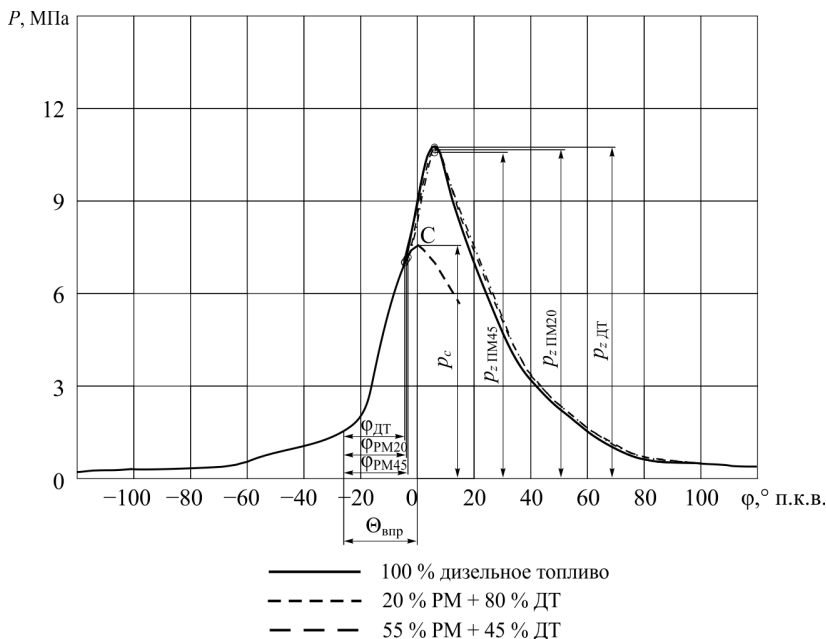


Рис. 4.13. Влияние применяемого топлива с содержанием РМ на индикаторные диаграммы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 ( $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ \text{ п.к.в.}$ ,  $p_c = 0,98 \text{ МПа}$ )

Таким образом, анализ экспериментальных данных подтверждает правильность теоретических предположений о влиянии концентрации рапсового масла на увеличение периода задержки воспламенения.

Анализ данных обработки индикаторных диаграмм по методике ЦНИДИ на ЭВМ показал, что работа дизеля на смесевом топливе сопровождается изменением характеристик тепловыделения (рис. 4.14). Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ  $T_{\text{max ДТ}} = 2820 \text{ К}$ , при работе на СТ с содержанием РМ 20 и 55 %  $T_{\text{max РМ20}} = 2785 \text{ К}$  и  $T_{\text{max РМ55}} = 2610 \text{ К}$ .

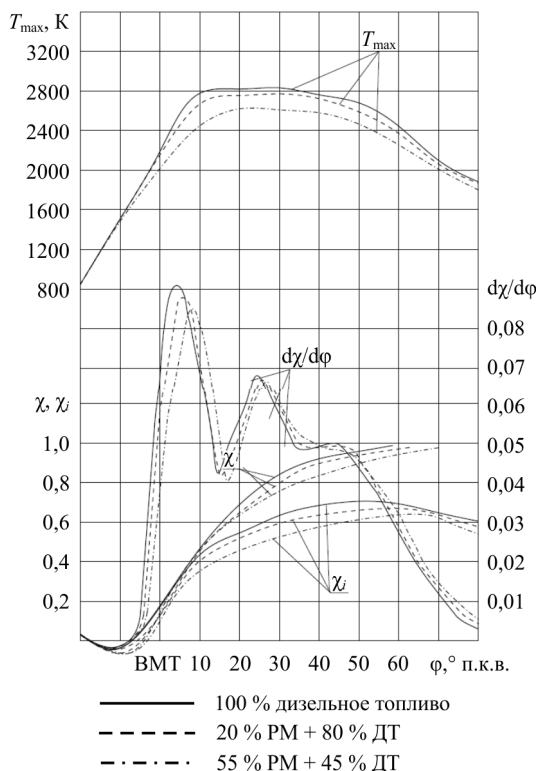


Рис. 4.14. Влияние применения СТ на основе РМ на характеристики тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5

Сравнение кривых активного  $\chi_i$  и полного  $\chi$  тепловыделения и динамики использования теплоты на режиме номинальной частоты вращения позволяет сделать вывод, что сгорание смесового топлива начинается позже, чем дизельного топлива и идет медленнее. Это можно объяснить тем, что смесовое топливо имеет меньшее значение цетанового числа, чем дизельное топливо.

В районе ВМТ при работе двигателя на чистом ДТ доля активного тепловыделения составляет 0,17 от общего количества выделившейся теплоты, а при работе двигателя на топливной композиции с содержанием рапсового масла 20 % доля активного тепловыделения равна  $\chi_{i\text{ РМ}20} = 0,16$ , а при содержании в 55 % рапсового масла  $\chi_{i\text{ РМ}55}$  тепловы-



деление составляет 0,13. По кривым динамики активного тепловыделения видно, что выделение теплоты с увеличением содержания рапсового масла в смеси замедляется, процесс сгорания заканчивается позднее.

Скорость тепловыделения в кинетической фазе резко возрастает при работе двигателя на чистом дизельном топливе и составляет  $(dx/d\varphi)_{\max \text{ ДТ}} = 0,092$ . При работе двигателя на топливной композиции с содержанием рапсового масла до 55 % происходит замедление процесса сгорания, которое обуславливается снижением скорости тепловыделения, увеличением периода задержки воспламенения и меньшей скоростью сгорания смесового топлива. Скорость тепловыделения при различной концентрации рапсового масла (20 и 55 %) составляет  $(dx/d\varphi)_{\max \text{ РМ20}} = 0,089$  и  $(dx/d\varphi)_{\max \text{ РМ55}} = 0,085$  соответственно.

Скорость тепловыделения в диффузионной фазе также уменьшается при работе двигателя на топливной композиции. В данной фазе основную роль отводится скорости диффузии окислителя с парами смесового топлива.

Изменение характера тепловыделения можно отследить на графике максимальных температур (рис. 4.14). Так, при номинальной частоте вращения ( $1800 \text{ мин}^{-1}$ ) и работе двигателя на чистом ДТ  $T_{\max \text{ ДТ}} = 2820 \text{ К}$ , при работе на смесовом топливе с содержанием РМ (20 % и 55 %) максимальные температуры имеют следующие значения  $T_{\max \text{ РМ20}} = 2785 \text{ К}$  и  $T_{\max \text{ РМ55}} = 2610 \text{ К}$ .

Проанализировав графики параметров индикаторной диаграммы и тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (см. рис. 4.13 и 4.14), можно сделать вывод, что с увеличением содержания доли рапсового масла в смеси незначительно замедляется процесс сгорания смесового топлива. Это подтверждает сдвиг оптимальных значений эффективных показателей регулировочной характеристики в сторону более ранних углов опережения впрыскивания топлива. Стоит отметить сходимость характера работы дизеля на СТ и на чистом ДТ.

#### **4.3.2. Влияние различных составов топлив с добавками рапсового масла на эффективные показатели работы тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5**

Одним из этапов исследований было определение влияния смесей РМ с ДТ на эффективные показатели работы тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5.

Оценка влияния состава смесового топлива (по количеству введенного РМ) на значения оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива производилась на основе анализа регулировочных характеристик (рис. 4.11 и 4.12). Дизель 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) загружался электротормозным стендом SAK N670 с балансирной маятниковой машиной. Значение установочного угла опережения впрыскивания топлива определялось по мениску, т.е. с момента начала подачи цикловой дозы топлива секцией топливного насоса.

На рис. 4.15 показаны графики изменения эффективных показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива и различным содержании РМ в смесовом топливе при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

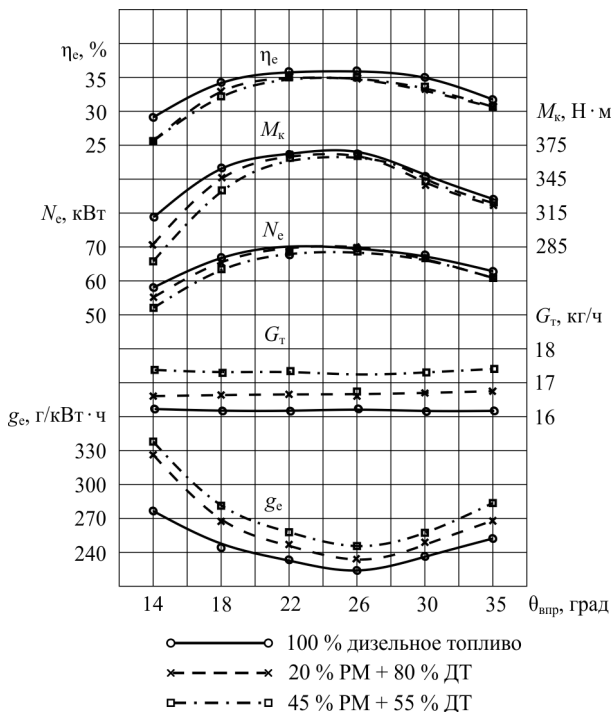


Рис. 4.15. Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по установочному углу опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  (эффективные показатели)

Из данных, представленных на графике, видно, что при работе на чистом ДТ оптимальным установочным углом является  $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ , что соответствует руководству по эксплуатации дизеля. При этом эффективная мощность дизеля составляет  $N_e = 70,1$  кВт, а значение удельного эффективного расхода топлива  $g_e = 228$  г/кВт · ч. Значение эффективного КПД, учитывающего теплотворную способность топлива, также максимально и составляет  $\eta_e = 36 \%$ .

При переходе дизеля для работы топливах с добавками РМ 20 % и 45 % характер кривых несколько изменяется. Так, значения часового расхода топлива увеличиваются от  $G_e = 16,1$  кг/ч при работе дизеля на чистом ДТ, до  $G_{e \text{ РМ}20} = 16,5$  кг/ч и  $G_{e \text{ РМ}45} = 17,2$  кг/ч при работе дизеля с содержанием РМ в смеси 20 и 45 % соответственно. Увеличение вызывается снижением низшей расчетной теплоты сгорания смесового топлива.

Значения удельного эффективного расхода топлива также возрастают и составляют  $g_e = 235,7$  г/кВт · ч и  $g_e = 245,6$  г/кВт · ч соответственно для случаев содержания 20 и 45 % РМ в суммарном топливе. При этом минимум  $g_e$  сдвигается в сторону более ранних углов опережения впрыскивания топлива и составляет  $\theta_{\text{впр}} = 27^\circ$  для топлив с добавками РМ.

Максимальные значения эффективной мощности и эффективного КПД изменяются незначительно в сравнении с работой дизеля на чистом ДТ, и также сдвигаются в сторону ранних углов опережения впрыскивания топлива.

Учитывая конструктивную невозможность установки данных значений установочного угла для топливного насоса 4УТНМ, в дальнейших испытаниях было принято значение  $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ$  для всех исследуемых составов смесевых топлив.

Из графиков показателей токсичности (рис. 4.16) и дымности (рис. 4.17) видно, что при увеличении  $\theta_{\text{впр}}$  содержание сажи в отработавших газах при работе на ДТ и топливе с добавлением РМ снижается для всех значений углов  $\theta_{\text{впр}}$ . При угле  $26^\circ$  концентрация сажи составляет 32 % для ДТ и 28 и 22 % для топлива с добавлением РМ 20 и 45 % соответственно.

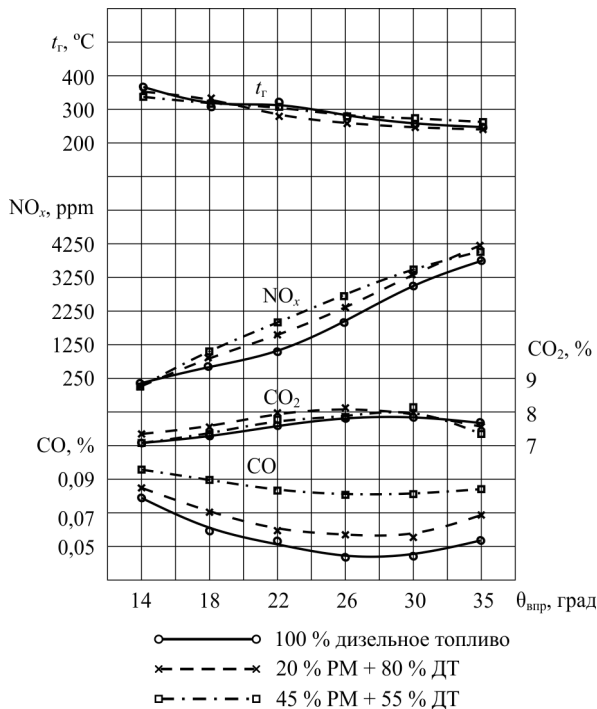


Рис. 4.16. Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по установочному углу опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  (показатели токсичности)

Содержание оксидов азота при работе как на ДТ, так и на топливах с добавлением РМ повышается при увеличении угла. При угле  $26^\circ$  концентрация оксидов азота составляет 1890 ppm для ДТ и 2290 и 2860 ppm для топлив с добавлением РМ 20 и 45 % соответственно.

Работа силовой установки трактора на топливе с добавлением РМ сопровождается повышением выбросов оксидов углерода с ОГ. Так, для топлива с концентрацией РМ 45 % при угле  $\theta_{\text{впр}} = 26^\circ$  выброс  $\text{CO}$  составляет 0,082 %, что на 58,5 % выше, чем при работе дизеля на чистом ДТ. При увеличении установочного угла  $\theta_{\text{впр}}$  концентрация  $\text{CO}$  в ОГ дизеля снижается. Переведя дизель на работу на топливо с добавлением РМ с концентрацией РМ 45 %, минимальное значение выбросов достигается при  $26^\circ$  и составляет 0,082 %.

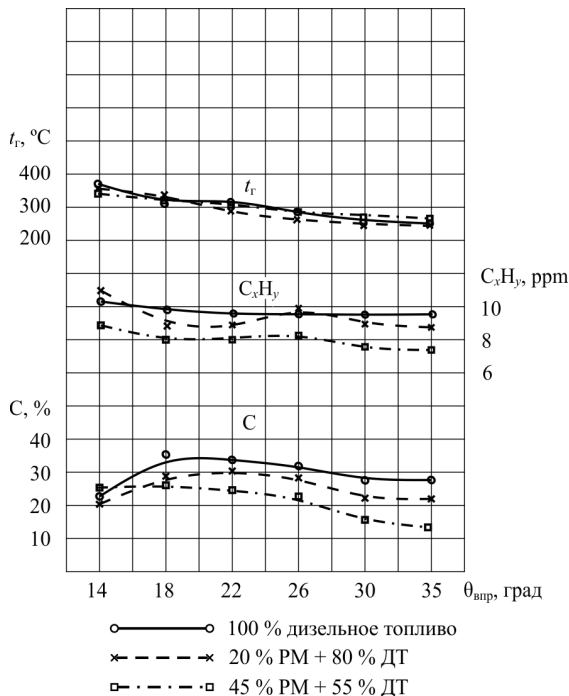


Рис. 4.17. Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по установочному углу опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  (показатели дымности)

При работе дизеля на топливе, содержащем 55 % ДТ и 45 % РМ, наблюдается вначале увеличение, а потом снижение выбросов диоксида углерода. Максимальное значение  $\text{CO}_2$  для этого топлива достигается при  $26^\circ$  и составляет 8,6 %.

Содержание  $\text{C}_x\text{H}_y$  снижается с увеличением содержания РМ в смеси. Так, при угле  $\theta_{впр} = 26^\circ$  значение  $\text{C}_x\text{H}_y$  составляет 9,9, 9,6, 8,3 ppm для чистого ДТ, смеси с добавлением 20 и 45 % РМ соответственно.

#### 4.3.3. Влияние различных составов топлив с добавками рапсового масла на экологические показатели тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5

Влияние работы дизельного двигателя с применением топливной композиции (рапсовое масло, дизельное топливо и присадка направ-

ленного действия DIFRON H372) на эмиссию токсичных веществ с отработавшими газами проводится согласно нормативно-правовому документу [48].

Определение вредных веществ и дисперсных частиц осуществлялось при реализации испытательных циклов для измерения и оценки выбросов газообразных вредных веществ и частиц с отработавшими газами двигателей, работающих на нагрузочное устройство на установившихся режимах [13, 109].

В соответствии с требованиями [38], предъявляемыми для дизелей сельскохозяйственных машин определение выбросов токсичных веществ необходимо проводить, реализовав испытательный цикл С1 «Дизельные двигатели для внедорожного транспорта и промышленного оборудования», который применим к самоходным сельскохозяйственным машинам (включая тракторы) [37].

Весовые коэффициенты испытательного цикла С1, а также режимы испытаний и представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Испытательные режимы цикла С1 и весовые коэффициенты

Номер режима	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота вращения	Объявленная частота вращения				Промежуточная частота вращения			Минимальная частота вращения холостого хода
Крутящий момент, %	100	75	50	10	100	75	50	0
Весовой коэффициент	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15

Согласно ГОСТу [37], объявленная частота вращения – это частота вращения коленчатого вала дизеля при номинальной мощности  $n_N$ . Под промежуточной частотой вращения понимается частота вращения коленчатого вала дизеля  $n_M$ , соответствующая максимальному крутящему моменту [38]. Значения крутящего момента для испытательного цикла для каждого режима представляет собой отношение фактического крутящего момента к максимальному, а частоты вращения в процентах от номинальной частоты вращения коленчатого вала.

Зависимость относительных величин крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя в процентах представлена на рис. 4.18.

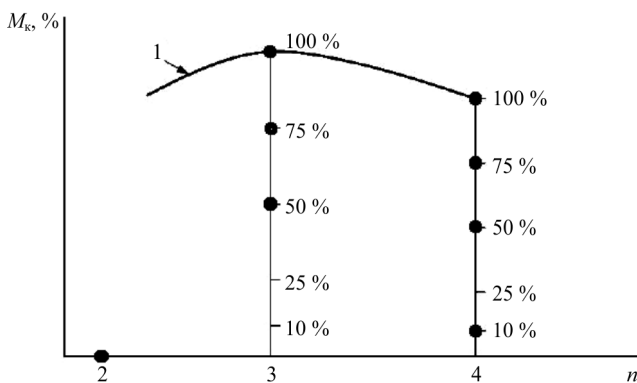


Рис. 4.18. Внешняя характеристика двигателя: 1 — внешняя характеристика при полной нагрузке; 2 — минимальная частота вращения холостого хода; 3 — промежуточная частота вращения; 4 — объявленная (номинальная) частота вращения

Область режимов, где контролируются выбросы токсичных веществ в отработавших газах, представлена на рис. 4.19 [13].

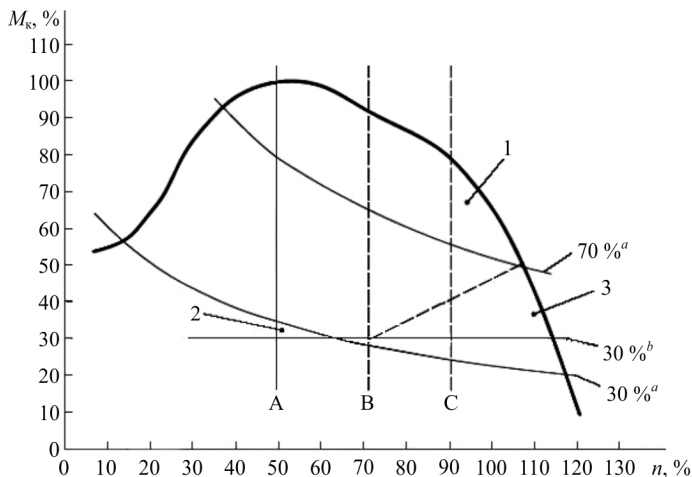


Рис. 4.19. Область контроля выбросов токсичных веществ при стендовых испытаниях дизелей: 1 — область контроля выбросов; 2 — область, где никакие выбросы не контролируются; 3 — область, где не контролируется выброс частиц сажи;  $a$  — относительная величина мощности (в процентах от максимальной мощности);  $b$  — относительная величина крутящего момента (в процентах от максимального крутящего момента)

В результате проведенных испытаний по циклу С1 на режимах, указанных в табл. 4.5, определялись экологические показатели дизеля Д-245.5С2, размерностью 4ЧН 11,0/12,5 результаты испытаний представлены в табл. 4.7.

Таблица 4.7. Результаты стендовых испытаний

Номер режима	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота вращения, %	100				75			30
Крутящий момент, %	100	75	50	10	100	75	50	0
С, %	38,03	20,70	12,50	11,30	17,10	14,10	10,70	8,00
NO <sub>x</sub> , ppm	2630,0	1523,0	571,0	356,0	2490,0	2291,0	1650,0	501,0
C <sub>1</sub> H <sub>x</sub> , ppm	13,00	8,00	4,00	3,00	14,00	13,00	11,00	5,00
CO <sub>2</sub> , %	8,77	7,34	3,70	2,90	10,97	9,96	6,98	2,39
CO, %	0,04	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01

При анализе полученных данных, представленных в табл. 4.6, а также с учетом введенных ограничений, можно сделать вывод о том, что выбросы токсичных веществ на 8 режиме стендовых испытаний, а также выбросы сажи С на 3 и 4 режимах не контролируются. Согласно содержанию нормативного документа [48], показатели диоксида углерода CO<sub>2</sub> не принимаются в качестве сопоставимых для сельскохозяйственных машин.

Обработка полученных данных показала, что точность (правильность и прецизионность) метода измерений составила 95 % [136]. Стандартное отклонение повторяемости составило 2,8 %, а стандартное отклонение воспроизводимости – 2,1 %.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что рассматриваемый дизель Д-245.5С2 размерностью 4ЧН 11,0/12,5, работающий на соответствующих режимах стендовых испытаний с применением смесей рапсового масла и дизельного топлива соответствует требованиям нормативной документации [38, 136, 139].

В результате проведенных исследований было установлено что для оценки выбросов токсичных веществ дизелями сельскохозяйственных машин необходимо проводить сравнительную оценку на основании соответствующего испытательного цикла и установленных режимов испытаний. Оценка полученных экспериментальных данных дизеля Д-245.5С2 размерностью 4ЧН 11,0/12,5 показала, что не все экологические показатели подлежат контролю и нормировке.



В качестве определяемых экологических показателей работы дизеля выбраны: сажа (C), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), несгоревшие углеводороды ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ), диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и монооксид углерода (CO).

Исследования проведены на различных составах смесового топлива. На первом этапе на чистом ДТ, далее при различном массовом содержании РМ в смесовом топливе. Исследуемые составы состояли из 80 % ДТ и 20 % РМ, 45 % ДТ и 55 % РМ.

В результате проведенных стендовых испытаний получены две нагрузочные характеристики (при частоте вращения  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ , соответствующей значению максимального крутящего момента, и при частоте вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ , соответствующей значению номинальной мощности) и внешняя скоростная характеристика тракторного дизеля Д-245.5С, размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ с различной добавкой РМ (рис. 4.20–4.22) [108].

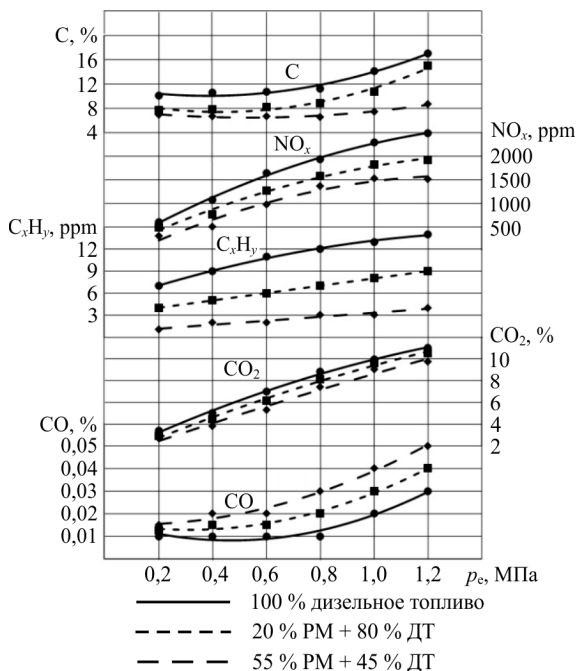


Рис. 4.20. Нагрузочная характеристика дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ с различной добавкой РМ при  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$

Анализ экологических показателей, представленных на рис. 4.20 показал, что при увеличении нагрузки с 0,2 до 1,2 МПа и содержании РМ в СТ до 55 % снизились концентрации в отработавших газах: сажи С с 17,1 до 6,9 %, оксидов азота  $\text{NO}_x$  с 2490 до 307 ppm, несгоревших углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$  с 14,0 до 1,0 ppm и диоксида углерода  $\text{CO}_2$  с 10,97 до 2,70 %, а монооксида углерода CO увеличились с 0,01 до 0,05 % соответственно.

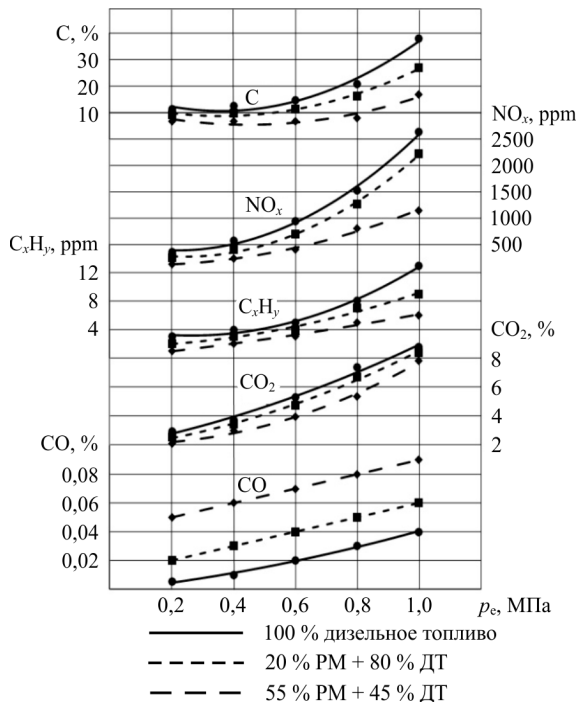


Рис. 4.21. Нагрузочная характеристика дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ с различной добавкой РМ при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

Из рис. 4.21 видно, что при увеличении нагрузки с 0,2 до 1,0 МПа и содержании РМ в СТ до 55 % снизились концентрации в отработавших газах: сажи С с 38,03 до 6,8 %, оксидов азота  $\text{NO}_x$  с 2630 до 131 ppm, несгоревших углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$  с 13,0 до 1,0 ppm и диоксида углерода  $\text{CO}_2$  с 8,77 до 2,09 %, а монооксида углерода CO увеличились с 0,01 до 0,09 % соответственно.

Проведенный анализ зависимостей, представленных на рис. 4.22, выявил, что при снижении  $n$  с 1400 до 2000  $\text{мин}^{-1}$  и увеличении доли РМ в СТ до 55 % снизились концентрации в отработавших газах сажи с 48,57 до 8,70 %, несгоревших углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$  с 17,0 до 4,0 ppm и оксидов азота  $\text{NO}_x$  с 2730 до 1510 ppm. А при увеличении  $n$  с 1400 до 2000  $\text{мин}^{-1}$  и увеличении доли РМ в СТ до 55 % увеличилась концентрация в отработавших газах монооксида углерода  $\text{CO}$  с 0,03 до 0,15 %, а диоксида углерода  $\text{CO}_2$  снизилась с 10,97 до 6,80 % соответственно [108].

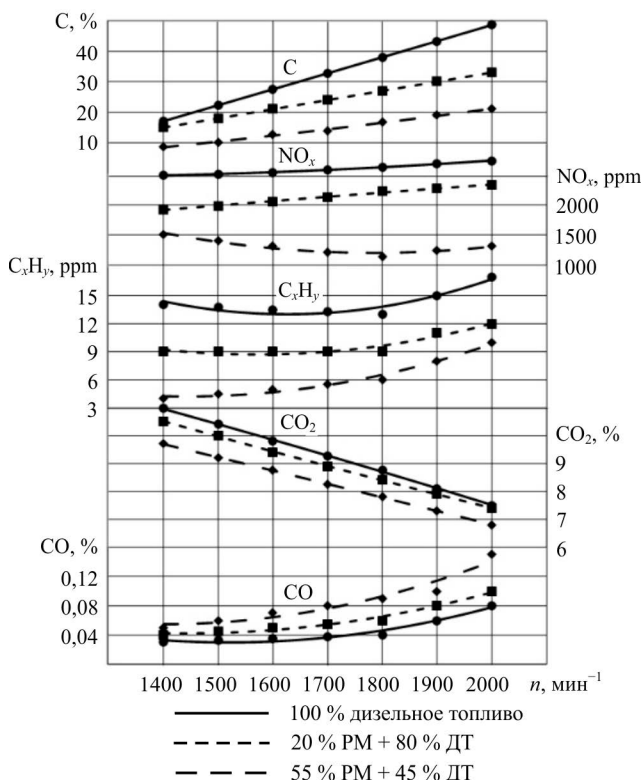


Рис. 4.22. Внешняя скоростная характеристик дизеля Д-245.5С размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при работе на СТ с различной добавкой РМ

## 4.4. Результаты эксплуатационных испытаний

### 4.4.1. Результаты эксплуатационных показателей тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на топливах с добавлением рапсового масла

Оценка влияния состава смесового топлива на работу дизельного двигателя 4ЧН 11,0/12,5 проводилась по нагрузочным характеристикам при частоте вращения коленчатого вала двигателя соответствующему максимальному крутящему моменту ( $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ) и номинальной мощности ( $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ) при его работе на топливных композициях с добавками рапсового масла и присадок направленного действия при помощи сравнительных стендовых испытаний (рис. 4.23) [113].

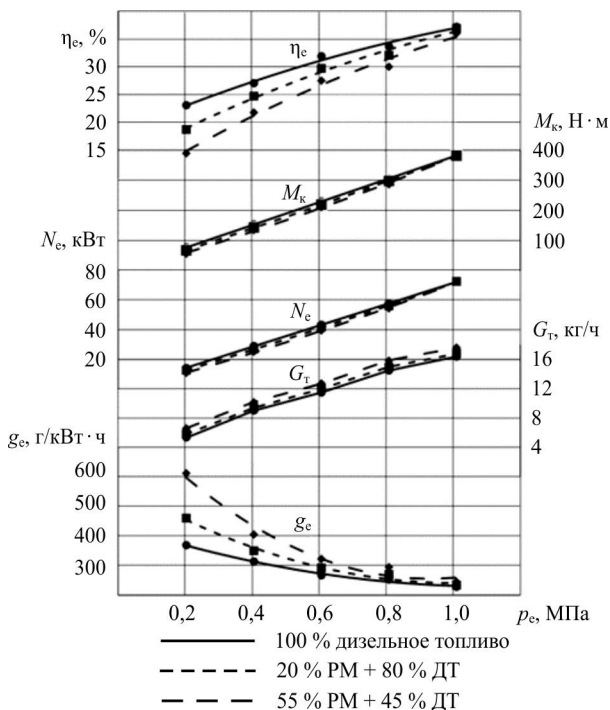


Рис. 4.23. Нагрузочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$  и оптимальном значении угла опережения впрыскивания топлива  $\theta_{впр} = 26^\circ$

При использовании топливных композиций с добавками рапсового масла произведена перерегулировка топливного насоса высокого давления (ТНВД) для увеличения цикловой подачи путем изменения активного хода плунжера с целью компенсации уменьшения теплоты, вносимой в тракторный дизель с этим топливом.

Нагрузочная характеристика тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (эффективные показатели,  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ) при различном содержании рапсового масла, 2 % присадки в топливной композиции приведена на рис. 4.24.

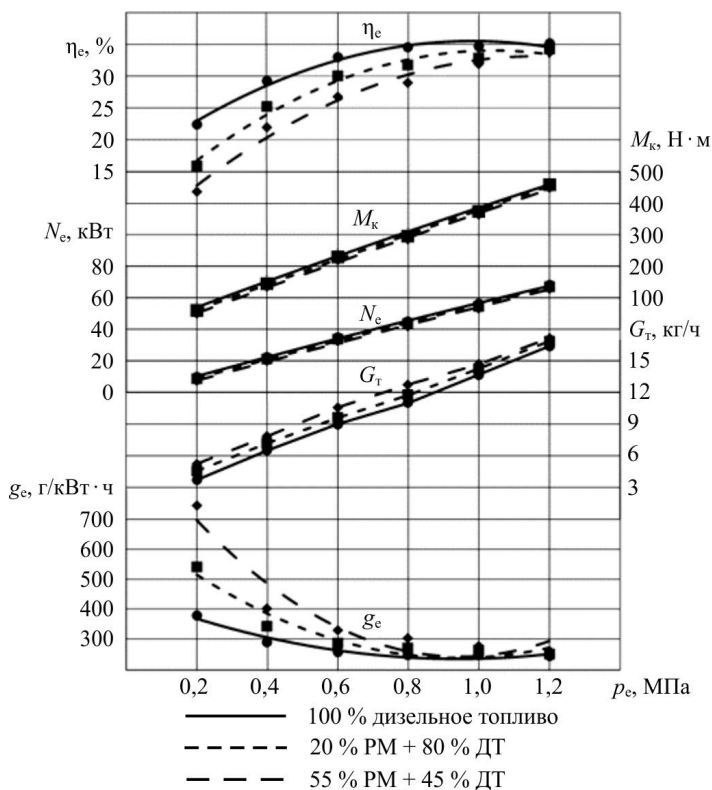


Рис. 4.24. Нагрузочная характеристика тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (эффективные показатели,  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ )

Как видно из данных, представленных на графиках (см рис. 4.23 и 4.24), при снижении нагрузки с 1,0 до 0,2 МПа и увеличении содержания в топливной композиции рапсового масла от 20 до 55 % – эффективный КПД  $\eta_e$  уменьшается с 37 до 14 %.

Исходя из графиков эффективных показателей при номинальном режиме работы, удельный  $g_e$  и часовой  $G_t$  расходы топлива увеличились с 228 до 611 г/кВт · ч и с 5,3 до 17,6 кг/ч соответственно. Численные значения эффективной мощности  $N_e$  и крутящего момента  $M_k$  изменились незначительно при увеличении содержания в топливной композиции рапсового масла от 20 до 55 % [113].

При снижении нагрузки с 1,2 до 0,2 МПа и увеличении содержания в топливной композиции рапсового масла от 20 до 55 % эффективный КПД  $\eta_e$  уменьшается с 3 до 12 %.

Исходя из графиков эффективных показателей в режиме максимального крутящего момента, удельный  $g_e$  и часовой  $G_t$  расходы топлива увеличились с 241 до 746 г/кВт · ч и с 3,7 до 17,16 кг/ч соответственно. Численные значения эффективной мощности  $N_e$  и крутящего момента  $M_k$  изменились незначительно при увеличении содержания в топливной композиции рапсового масла от 20 до 55 %.

Увеличение доли рапсового масла в топливной композиции свыше 60 % не желательно, так как приведет к дополнительным затратам по улучшению физико-механических и моторных свойств смесевого топлива, а также изменению конструктивно-технологических параметров топливоподающей аппаратуры.

#### **4.4.2. Результаты эксплуатационных испытаний трактора «Беларус-922» при работе на топливах с добавлением рапсового масла**

Следующим этапом научных исследований, явилось испытание трактора «Беларус-922» при работе в полевых условиях на смеси ДТ и РМ (рис. 4.25).

После снятия показателей энергетической оценки машинно-тракторного парка (МТА) в процессе испытаний, производился расчет согласно ГОСТ Р52777-2007.



Рис. 4.25. Общий вид трактора «Беларус-922»  
с плугом ПЛН-3-35 при полевых испытаниях

Энергетическая эффективность трактора оценивалась, согласно ГОСТу, использованием теплового потока, подводимого в двигатель в различных эксплуатационных режимах работы МТА. Результаты тяговых испытаний трактора «Беларус-922» приведены в табл. 4.8–4.11.

Таблица 4.8. Показатели энергетической оценки МТА «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 при вспашке почвы на глубину 0,2 м (2 передача/1 диапазон)

№ п/п	Наименование показателя	Вид топлива		
		ДТ	ДТ80 % + РМ20 %	ДТ55 % + РМ45 %
1	Скорость движения, км/ч	8,5	8,3	8,2
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	20	20	20
4	Расход топлива, кг/ч	13,5	14,3	15,1
5	Тяговое сопротивление машины, кН	19,3	19,2	18,1
6	Передача/диапазон	2/1	2/1	2/1
7	Энергетический КПД МТА	0,23	0,22	0,22

Таблица 4.9. Показатели энергетической оценки МТА «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 при вспашке почвы на глубину 0,25 м (2 передача/І диапазон)

№ п/п	Наименование показателя	Вид топлива		
		ДТ	ДТ80 % + РМ20 %	ДТ55 % + РМ45 %
1	Скорость движения, км/ч	7,9	7,7	7,8
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	25	25	25
4	Расход топлива, кг/ч	13,8	14,6	15,8
5	Тяговое сопротивление машины, кН	18,8	18,7	18,4
6	Передача/диапазон	2/І	2/І	2/І
7	Энергетический КПД МТА	0,21	0,22	0,23

Таблица 4.10. Показатели энергетической оценки МТА «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 при вспашке почвы на глубину 0,2 м (3 передача/І диапазон)

№ п/п	Наименование показателя	Вид топлива		
		ДТ	ДТ80 % + РМ20 %	ДТ55 % + РМ45 %
1	Скорость движения, км/ч	9,9	9,6	9,4
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	20	20	20
4	Расход топлива, кг/ч	11,4	12,8	14,1
5	Тяговое сопротивление машины, кН	15,7	15,5	15,7
6	Передача/диапазон	3/І	3/І	3/І
7	Энергетический КПД МТА	0,30	0,31	0,29

Таблица 4.11. Показатели энергетической оценки МТА «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 при вспашке почвы на глубину 0,25 м (3 передача/І диапазон)

№ п/п	Наименование показателя	Вид топлива		
		ДТ	ДТ80 % + РМ20 %	ДТ55 % + РМ45 %
1	Скорость движения, км/ч	8,9	8,6	8,4
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	25	25	25
4	Расход топлива, кг/ч	11,6	13,1	14,8
5	Тяговое сопротивление машины, кН	15,2	15,0	15,1
6	Передача/диапазон	3/І	3/І	3/І
7	Энергетический КПД МТА	0,31	0,29	0,30

Как видно из таблиц, проведенные экспериментальные исследования выявили возможность использования смесового топлива на основе рапсового масла для дизельных ДВС при работе на тракторе и позволили сформулировать следующие выводы:



1. Работа трактора на топливах с добавками РМ не снижает энергетический КПД МТА в сравнении с его работой на ДТ.

2. Работу трактора «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 эффективно производить на 3 передаче I диапазона.

3. Увеличение глубины вспашки с 20 до 25 см ведет к повышению энергетического КПД МТА, это справедливо для всех применяемых топлив.

Влияние РМ на содержание токсичных компонентов в отработавших газах дизеля в зависимости от скорости движения трактора представлено на рис. 4.26.

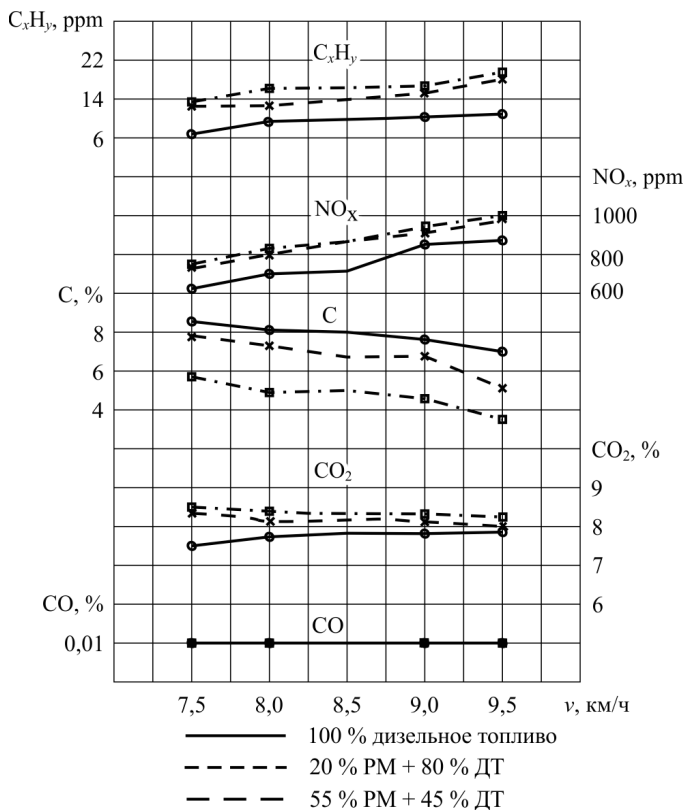


Рис. 4.26. Влияние РМ на содержание токсичных компонентов в отработавших газах дизеля в зависимости от скорости движения трактора

Анализ графика показывает, что содержание суммарных углеводородов  $C_xH_y$  в ОГ повышается при увеличении концентрации РМ в топливе. Так, при скорости движения трактора  $v = 7,5$  км/ч, концентрация  $C_xH_y$  при работе на ДТ составляет 6,1 ppm, для случая с 20 % РМ в топливе – 12,8 ppm, для случая с 45 % РМ в топливе – 13,9 ppm. При скорости движения трактора  $v = 9,5$  км/ч концентрация  $C_xH_y$  для дизельного процесса равна 11,3 ppm, для случая с 20 % РМ в топливе – 17,9 ppm, для случая с 45 % РМ в топливе – 20,4 ppm.

Как видно из графика, содержание оксидов азота  $NO_x$  в ОГ при работе на топливе с добавлением РМ увеличивается. Так, при скорости движения трактора  $v = 7,5$  км/ч концентрация  $NO_x$  в ОГ для дизельного процесса составляет 605 ppm, а для топлива, содержащего 45 % РМ, при той же скорости это значение равно 740 ppm. При скорости движения трактора  $v = 9,5$  км/ч концентрация в ОГ для дизельного процесса составляет 8940 ppm, для топлива, содержащего 45 % РМ, значение равно 995 ppm. Согласно термической природе образования оксидов азота  $NO_x$ , их эмиссия находится в прямой зависимости от содержания свободного кислорода в пламени при условии достаточно высокой его температуры. Повышение локальной и средней температур цикла в случае работы на топливе с добавлением РМ непосредственно обуславливает повышение эмиссии оксидов азота. В то же время концентрация  $NO_x$  находится в прямой зависимости от величины нагрузки, т.к. параллельно с нагрузкой растет температура ОГ.

Характер кривых уровня концентрации СО одинаковый как при работе на ДТ, так и топливе с добавлением РМ. При увеличении скорости движения трактора СО в ОГ не возрастает. Как при скорости движения трактора  $v = 7,5$  км/ч, так и при  $v = 9,5$  км/ч содержание СО для дизельного процесса и работе на топливе с добавлением РМ составляет 0,01 %.

Содержания в ОГ  $CO_2$  увеличивается при увеличении содержания РМ в топливе. Так, при скорости движения трактора  $v = 7,5$  км/ч концентрация в ОГ для дизельного процесса составляет 7,5 %, а для топлива, содержащего 20 и 45 % РМ, при той же скорости это значение соответственно равно 8,3 и 8,6 %. При увеличении скорости движения трактора до  $v = 9,5$  км/ч содержание в ОГ для дизельного процесса составляет 7,9 %, а для топлива, содержащего 20 и 45 % РМ, при той же скорости это значение соответственно равно 8,0 и 8,2 %.

Содержание сажи в ОГ снижается в случае работы дизеля на смеси ДТ с РМ по сравнению с дизельным процессом. С увеличением скорости движения трактора характер кривых содержания в ОГ сажи примерно одинаковый. Так, при скорости движения трактора  $v = 7,5$  км/ч концентрация в ОГ для дизельного процесса составляет 8,4 %, а для топлива, содержащего 20 и 45 % РМ, при той же скорости это значение соответственно равно 7,8 и 5,9 %. При увеличении скорости движения трактора до  $v = 9,5$  км/ч содержание в ОГ для дизельного процесса составляет 7,1 %, а для топлива, содержащего 20 и 45 % РМ, при той же скорости это значение соответственно равно 5,1 и 3,8 %. Снижение, как и следовало ожидать, вызывается меньшей склонностью к дымлению РМ в сравнении с ДТ [146].

Анализируя данные эксплуатационных испытаний, можно сделать вывод: применение топлива с добавлением до 45 % РМ не вызывает отказов в работе топливоподающей аппаратуры и дизеля в целом.

Дизель трактора уверенно запускается, устойчиво работает на всех заданных нагрузках и частотах вращения коленчатого вала, показывает хорошую приемистость. Работа трактора сопровождается снижением выбросов с ОГ сажи.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика оценки влияния состава смесового топлива на механизмы процесса сгорания в цилиндре дизеля.

2. Разработана методика аналитического расчета вязкости топлив с добавками рапсового масла.

3. Экспериментально исследованы физико-химические свойства топлив с добавками рапсового масла и различных присадок. На основании данных лабораторных исследований разработаны новые составы топлива с добавками рапсового масла, содержащие от 5 до 45 % рапсового масла, от 95 до 55 % дизельного топлива и от 1 до 5 % присадки со сниженным на 22 % значением кинематической вязкости (патент РФ № 2629021).

4. Экспериментально установлено, что работа топливopодaющей аппаратуры дизеля на новых составах топлив с добавками рапсового масла не вызывает отказов в ее работе. Зафиксирован незначительный рост цикловой подачи топливного насоса высокого давления на 3 % при использовании топлива с добавками рапсового масла по сравнению с работой на чистом дизельном топливе. При работе дизеля с добавкой до 45 % рапсового масла оптимальным установочным углом опережения впрыскивания топлива следует считать угол  $\theta_{впр} = 26^\circ$ . Разработаны новые конструкции системы регулирования дизеля (патент РФ № 2626524), обеспечивающей оперативное и точное регулирование количества подаваемого смесового топлива на всех его нагрузочных и скоростных режимах работы, смесителя основного и дополнительного топлива (патент РФ № 2637904), обеспечивающего получение однородного состава топлива.

5. Применение новых составов топлив с добавками рапсового масла позволяет приблизить характер процесса их сгорания к характеру процесса сгорания чистого дизельного топлива. Определено снижение часового расхода дизельного топлива на 27 и 38 % при его замещении на 20 и 45 % рапсовым маслом, соответственно, снижение дымности отработавших газов в пределах 14...33 % и выбросов CO в пределах 6...23,5 %, в зависимости от режимов работы дизеля. На 10...35 градусов падает температура отработавших газов, что снижает теплонпряженность деталей дизеля.

6. Определено влияние новых составов топлив с добавками рапсового масла на показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в составе машин-

но-тракторного агрегата. Определены энергетические характеристики трактора тягового класса 1,4 кН («Беларус-922») с дизелем 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на вспашке с плугом ПЛН-3-35 при работе на чистом дизельном топливе и топливах с добавками рапсового масла. Применение данных топлив привело к снижению дымности отработавших газов дизеля на 14...36 %, расхода дизельного топлива в пределах 37...42 %, в зависимости от режима работы машинно-тракторного агрегата и содержания рапсового масла в топливе до 45 %.

7. Теоретически получен и экспериментально подтвержден способ увеличения предела применяемости альтернативных топлив с добавками рапсового масла в автотракторных дизелях. Разработаны рекомендации по применению новых составов топлив с добавками рапсового масла в дизельных двигателях транспортных средств.

8. Применение топлив с добавками РМ позволяет в зависимости от режима работы дизеля сократить расход дефицитного ДТ и значительно ослабить экологические проблемы за счет снижения ущерба, наносимого окружающей среде ОГ дизелями тракторов и транспортных средств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аблаев, А. Биодизель: мыслить за пределами нефтяной трубы / А. Аблаев // Автогазотранспортный комплекс + Альтернативное топливо. – 2007. – № 1. – С. 61–65.
2. Адаптация тракторов и автомобилей к работе на биотопливе / Н.В. Краснощёков [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1994. – № 12. – С. 1–4.
3. Аднан, И. Ш. Расчет периода задержки воспламенения в дизеле в условиях двухфазного смесеобразования / И. Ш. Аднан, Г. М. Камфер, В. Н. Луканин // Совершенствование автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Тр. МАДИ. – М., 1985. – С. 10–19.
4. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А. А. Александров [и др.]; под ред. А. А. Александрова, В. А. Маркова. – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. – 791 с.
5. Аминов, Л. А. Эксплуатационные свойства дизельных топлив, определяющие эффективность их применения при низких температурах / Л. А. Аминов // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. – 2019. – № 3 (13). – С. 55–65.
6. Анализ способов применения биологических видов топлива в дизельных двигателях / С. Н. Борычев [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2017. – № 3. – С. 84–88.
7. Ассад, М. С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчёт, эксперимент / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 305 с.
8. Ашпина, О. Рапс – культура стратегическая / О. Ашпина // The Chemical Journal (Химический журнал). – 2005. – № 9. – С. 40–44.
9. Белявцев, А. В. Топливная аппаратура автотракторных дизелей / А. В. Белявцев, А. С. Процеров. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 224 с.
10. Биодизельные топлива из различных сырьевых ресурсов / В. А. Марков [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 3 (21). – С. 25–31.
11. Биотоплива для дизелей: впрыскивание и распыливание / В. А. Марков [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 8. – С. 7–10.
12. Бузиков, Ш. В. Испытание топливной аппаратуры дизелей при работе на смесях с добавками рапсового масла / Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Транспортные системы. – 2018. – № 4. – С. 10–16.
13. Бузиков, Ш. В. Определение выбросов токсичных веществ дизелями сельскохозяйственных машин / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, И. С. Козлов // Общество. Наука. Инновации (НПК-2021). – 2021. – С. 368–374.
14. Бузиков, Ш. В. Оптимизация добавки рапсового масла в смесевом топливе, применяемом в тракторных дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, И. С. Козлов // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 5 (83). – С. 72–77.
15. Бузиков, Ш. В. Оптимизация состава смесового топлива для применения в тракторных дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, И. С. Козлов // Труды НАМИ. – 2021. – № 1 (284). – С. 16–24.
16. Бутов, А. В. Рынок сельскохозяйственных машин 2019 / А. В. Бутов. – Национальный исследовательский университет: Высшая школа экономики, 2019. – 87 с.
17. Вагин, Д. В. Преимущества и недостатки использования спиртов в качестве добавки к традиционным топливам / Д. В. Вагин // Материалы ЛШ междунар. науч. – техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук П. Г. Свечникова. – Челябинск: ЧГАА, 2014. – Ч. III. – С. 158.
18. Васильев И. П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля / И. П. Васильев. – Луганск: Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. – 240 с.
19. Виды проблем, возникающих при использовании каталитического нейтрализатора / Н. В. Петров [и др.] // Молодой ученый. – 2017. – №23. – С. 152–154.

20. Возможности рапса как альтернативы дизельному топливу // Железные дороги мира. – 1999. – № 10. – С. 41–45.
21. Возможности расширения ресурса дизельных топлив с применением легких синтетических углеводородов в качестве добавки / Шкаликова В. П. [и др.] // Двигателестроение. – 1986. – № 12. – С. 26–29.
22. Воробьев-Обухов, А. Сколько литров с гектара? / А. Воробьев-Обухов // За рулем. – 2008. – № 5. – С. 206–207.
23. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. – М., 1983. – 124 с.
24. Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению: ГОСТ Р ИСО 14067-2021 (ISO 14067:2018, ITD). – М.: Изд-во стандартов, 2021. – 50 с.
25. Гайворонский, А. И. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях / А. И. Гайворонский, В. А. Марков, Ю. В. Илатовский. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 480 с.
26. Государственная система обеспечения единства измерений. Плотность светлых нефтепродуктов. Таблицы пересчета плотности к 15 °С и 20 °С и к условиям измерения объема: Поправка к ГОСТ 8.599–2010.
27. Гражданкин Б. Рапс полностью обеспечит сельское хозяйство России дизельным топливом / Б. Гражданкин // Аграрный эксперт. – 2007. – № 8. – С. 20–25.
28. Грехов, Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов. – 2-е изд. / Л. В. Грехов, В. А. Иващенко, В. А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
29. Григорович, Д. Н. Применение биотоплива на железнодорожном транспорте / Д. Н. Григорович // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 1. – С. 59–65.
30. Грищенко, С. В. Улучшение низкотемпературных свойств и фильтруемости биотоплива из рапса / С. В. Грищенко // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2019. – № 13. – С. 244–247.
31. Гуреев, А. А. Испаряемость топлив для поршневых двигателей / А. А. Гуреев, Г. М. Камфер. – М.: Химия, 1982. – 264 с.
32. Гушин, С. Н. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей применением спиртосодержащих топлив / С. Н. Гушин, С. А. Плотников. – Киров: ООО «Минитипография Авангард», 2003. – 162 с.
33. Данилов А. М. Применение присадок в топливах для автомобилей: справочник / А. М. Данилов. – М.: Химия, 2000. – 232 с.
34. Данилов А. М. Присадки к топливам. Разработки и применение в 01–05 г.г. / А. М. Данилов // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 2. С. 47–56.
35. Данилов А. М. Разработка и применение присадок к топливам в России и в мире/ А. М. Данилов. – Сб. трудов IV научно-практической конференции «Новые топлива с присадками». – СПб.: Академия прикладных исследований, 2006. – С. 11–18.
36. Данилов А. М. Применение присадок в топливах: справочник / А. М. Данилов. – СПб.: Химиздат, 2010. – 368 с.
37. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 1. Измерение выбросов газов и частиц на испытательных стендах: ГОСТ ISO 8178-1-2013, принят 23.04.2014; действ. с 01.01.2015. – М., 2013.
38. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах: ГОСТ ISO 8178-4-2013, принят 23.04.2014; действ. с 01.01.2015. – М., 2013.
39. Девянин, С. Н. Улучшение смесеобразования в дизеле при использовании рапсового масла / С. Н. Девянин, А. А. Путан // Сельский механизатор. – 2009. – № 9. – С. 28–29.

40. Дизели Д-245S2, Д-245.2S2, Д-245.5S2, Д-245.16S2, Д-245.16LS2, Д245.42S2, Д-245.43S2. Руководство по эксплуатации. – ОАО «Минский моторный завод», 2010. – 104 с.

41. Доржеев, А. А. Модели очистки рапсового масла от восков для получения биотопливной композиции / А. А. Доржеев, Е. Г. Пенькова // Актуальные вопросы современной науки: сборник статей по материалам XVI международной научно-практической конференции, Томск, 21 ноября 2018 года. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2018. – С. 71–76.

42. Доржеев, А. А. Низкотемпературные свойства и фильтруемость биотопливных композиций на основе рапсового масла / А. А. Доржеев // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной заочной научной конференции, Красноярск, 15 октября 2015 года / Ответственные за выпуск: А. А. Кондрашев, Ж. Н. Шмелева. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2015. – С. 62–64.

43. Доржеев, А. А. Фильтрация биотопливной композиции на основе рапсового масла / А. А. Доржеев // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы XIV международной научно-практической конференции, Красноярск, 22–23 апреля 2015 года / Ответственные за выпуск: А. А. Кондрашев, Е. И. Сорокатая. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2015. – С. 57–59.

44. Доржеев, А. А. Фильтрация рапсового масла холодного отжима при получении биотопливных композиций / А. А. Доржеев // Эпоха науки. – 2016. – № 6. – С. 37.

45. Дружинин, П. В. Применение присадок к топливу самый эффективный способ улучшения экологических и технико-экономических показателей транспортных дизелей / П. В. Дружинин, В. В. Дыбок // Новые топлива с присадками: сб. тр. II междунауч.-практ. конф. – СПб.: Академия прикладных исследований, 2002, С. 217–223.

46. Дугин, Г. С. Применение биоэтанольного топлива на автотранспорте / Г. С. Дугин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 5. – С. 48–51.

47. Евдокимов, И. Н. Отсутствие аддитивности свойств нефтяных смесей / И. Н. Евдокимов, А. П. Лосев, А. А. Фесан. – Бурение и нефть. – 2012. – № 1. – С. 27–28.

48. Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной техники, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями (Периздание): ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН N 96). принят 13.12.2011; действ. с 01.01.2013. М., 2011.

49. Ерохов, В. И. Механизм и природа эффективности применения спиртов в качестве моторного топлива / В. И. Ерохов // Проблемы функционирования систем транспорта. – 2018. – С. 216–223.

50. Ефанов, А. А. Улучшение экологических характеристик дизеля регулированием состава смесового биотоплива / А. А. Ефанов. – М., 2008. – Т. 20.

51. Жосан, А. А. Сравнение физико-химических свойств дизельного топлива и рапсового масла / А. А. Жосан, Ю. Н. Рыжов, А. А. Курочкин // Вестник аграрной науки. – 2011. – Т. 31. – № 4. – С. 72–73.

52. Звонов, В. А. Исследование динамики образования токсичных веществ в цилиндре дизеля / В. А. Звонов, В. В. Фурса, П. С. Солодовник // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: ХГУ, 1975. – Вып. 21. – С. 17–25.

53. Звонов В. А. Клапан с гидравлическим приводом для отбора проб газа из цилиндра двигателя внутреннего сгорания / В. А. Звонов, Стюарт, Старкман // Приборы для научных исследований. – 1968. – Т. 39, № 12. – С. 34–48.

54. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.

55. Зельдович Я. Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика / Я. Б. Зельдович. – М.: Наука, 1984. – 374 с.

56. Ивченко, Б. П. Теоретические основы информационно-статистического анализа сложных систем / Б. П. Ивченко, Л. А. Мартыщенко, М. Л. Монастырский. – СПб.: Лань, 1997. – С. 278–282.



57. Использование биологических добавок в дизельное топливо / В. М. Федоренко [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротехник», 2007. – 52 с.
58. Использование биотоплива при работе дизельных двигателей в сельском хозяйстве / В. А. Войтов [и др.]. – 2012.
59. Использование в дизеле смесевых биотоплив с добавками растительных масел / В. А. Марков [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2014. – № 10. – С. 11–19.
60. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В. А. Марков [и др.]. – М.: ООО НИЦ «Инженер», 2011. – 536 с.
61. Исследование моторных свойств смесей дизельного топлива с рапсовым маслом / С. А. Плотников [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – № 2 (121). – С. 169–174.
62. Исследование работоспособности дизельной форсунки на смесевых топливах с недостаточными низкотемпературными свойствами / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Тракторы и сельхозмашины, 2020. – № 1. – С. 10–16.
63. Кавтарадзе, З. Р. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов / З. Р. Кавтарадзе – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 720 с.
64. Кайзер, О. А. Кинематическая вязкость рапсового масла и биотопливных композиций на его основе / О. А. Кайзер, А. А. Доржеев // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы XI Междунар. научн. –практ. конф. молодых ученых, Красноярск, 10–11 апреля 2018 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации; Департамент научно-технологической политики и образования; Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2018. – С. 176–179.
65. Каменецкий, Р. М. Состояние и направления развития дизельного двигателестроения / Р. М. Каменецкий // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады науч. –техн. конф., Минск, 11–14 февраля 2009г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; ред. А.В. Кузьмицкий. – Минск, 2009. – С. 15–19.
66. Камфер, Г. М. Взаимосвязь параметров рабочего цикла дизеля с показателями качества топлив / Г. М. Камфер // Двигателестроение. – 1987. – № 8. – С. 30–33.
67. Камфер, Г. М. Комплексный показатель смесеобразования для дизелей с камерой в поршне / Г. М. Камфер // Двигателестроение. – 1986. – № 4. – С. 1–6.
68. Камфер, Г. М. Научные основы эффективного применения топлив различного состава в автотракторных дизелях: дисс. доктор. техн. наук: 05.04.02 / Г. М. Камфер. – М.: РГБ, 2005. – 369 с.
69. Камфер, Г. М. Сравнительный анализ процессов испарения в дизелях с различными способами смесеобразования / Г. М. Камфер // Двигателестроение. – 1985. – С. 3–7.
70. Камфер, Г. М. Анализ взаимосвязи диаметра камеры сгорания и интенсивности движения воздушного заряда в дизеле / Г. М. Камфер, В. Н. Семенов // Двигателестроение. – 1983. – №10. – С. 3–5.
71. Камфер, Г. М. Некоторые особенности рабочего цикла дизеля с камерой сгорания в поршне при использовании смесей дизельного топлива с бензином / Г. М. Камфер, В. Н. Семенов // Совершенствование автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Тр. МАДИ. – М., 1985. – С. 20–24.
72. Капралов, Д. А. Электростанция на пальмовом масле работает в Италии / Д. А. Капралов, А. А. Троицкий // Турбины и дизели. – 2008. – № 4. – С. 2–7.
73. Карташевич, А. Н. Использование альтернативных топлив в тракторных двигателях внутреннего сгорания / А. Н. Карташевич, А. А. Тригуб // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 28–30.
74. Карташевич, А. Н. Применение топлив на основе рапсового масла в тракторных дизелях / А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, В. С. Товстыка. – Киров: Типография «Авангард», 2014. – 144 с.

75. Карташевич, А. Н. Определение пределов низкотемпературной прокачиваемости топлива в системе питания дизеля в условиях зимней эксплуатации / А. Н. Карташевич, А. В. Гордеенко, О. В. Понталёв // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». – 2015. – Вып. 3. – С. 74–79.
76. Карташевич, А. Н. Тракторы и автомобили. Альтернативные топлива для автотракторной техники / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2013. – 60 с.
77. Карташевич, А. Н. Теоретические исследования влияния спиртов на показатели процесса сгорания в дизеле / А. Н. Карташевич, С. А. Плотников // Вестник БГСХА. – 2008. – № 2. – С. 113–117.
78. Киотский протокол к рамочной конвенции Организации Объединённых Наций об изменении климата: протокол, Киото, 11 дек. 1997 г. / ООН // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2006. – № 7, 3/1873. – С. 102.
79. Кириллов, Н. Г. Природный газ и биоресурсы как альтернативные виды моторного топлива для автотранспорта России / Н. Г. Кириллов // Биоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 56–62.
80. Козлов, А. В. Биодизельное топливо как возобновляемый источник энергии для транспорта / Козлов А. В., Кулешов А. С. // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 5. – С. 9–14.
81. Кульчицкий, А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для высш. школы / А. Р. Кульчицкий. – 2-е изд. – М.: Академический Проект, 2004. – 400 с.
82. Лиханов, В. А. Снижение токсичности автотракторных дизелей / В. А. Лиханов, А. М. Сайкин. – М.: Колос, 1994. – 224 с.
83. Лобанов, В. Г. Оптимальный жирнокислотный состав пищевых растительных масел / В. Г. Лобанов, В. В. Щербин // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2003. – № 4. – С. 21–23.
84. Лютко, В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В. Н. Луканин, А. С. Хачиян. – М.: МАДИИ (ТУ), 2000. – 311 с.
85. Малащенко, К. Альтернативный рапс / К. Малащенко // Сельский механизатор. – 2007. – № 1. – С. 26–27.
86. Мамедова, М. Д. Работа дизеля на сжиженном газе / М. Д. Мамедова. – М.: Машиностроение, 1980. – 151 с.
87. Марков, В. А. Оптимизация состава смесевых биотоплив с добавками растительных масел / В. А. Марков, Н. Д. Чайнов, В. В. Неверова // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки». – 2019. – № 2 (83). – С. 114–131.
88. Марков, В. А. Растительные масла как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу / В. А. Марков, С. И. Каськов, С. С. Лобода // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 7 (700). – С. 48–60.
89. Марков, В. А. Сравнительный анализ альтернативных моторных топлив для дизелей / В. А. Марков, Е. В. Бебенин, С. П. Гладышев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 5 (650). – С. 43–48.
90. Марков, В. А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.
91. Марков, В. А. Топлива и топливopодача многотопливных и газодизельных двигателей / В. А. Марков, С. И. Козлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 296 с.
92. Марков, В. А. Физико-химические свойства нефтяных моторных топлив с добавками растительных масел и их влияние на показатели дизеля / В. А. Марков, Н. Д. Чайнов, С. С. Лобода // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2018. – № 5 (122). – С. 108–122.
93. Масло рапсовое. Технические условия: ГОСТ 31759–2012.

94. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Л.: Колос, 1980. 168 с.
95. Митусова, Т. Н. Дизельное топливо из альтернативных источников энергии / Т. Н. Митусова, М. В. Калинина // Специализир. науч.-практ. конф. «Охрана окружающей среды в городе»: сб. докладов / под ред. В.Б. Зотова. – М.: Юго-Восток-сервис, 2006. – С. 129–136.
96. Нагорнов, С. Работа дизелей на разных видах топлива / С. Нагорнов, Р. Фокин // Сельский механизатор. – 2008. – № 7. – С. 42–43.
97. Низкотемпературная топливная композиция: пат. РФ № 2730833, C10L 10/14, C10L 1/00, C10L 1/222, C10L 1/19 / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, Ш. В. Бузиков, Е. А. Куимов, И. С. Козлов. – 4 С.
98. Николаенко, А. В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей / А. В. Николаенко – М.: Колос, 1984. – 335 с.
99. Обельницкий, А. М. Топливо и смазочные материалы / А. М. Обельницкий. – М.: Высшая школа, 1982. – 208 с.
100. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени / Н. А. Чигир [и др.], пер. с англ. / ред. Ю. Ф. Дитякин. – М.: Машиностроение, 1981. – 407 с.
101. Оценка экологических свойств рапсовых масел для применения в качестве моторного топлива сельскохозяйственного трактора / С. А. Плотников [и др.] // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30. – № 1. – С. 43–59.
102. Плотников, С. А. Исследование моторных свойств рапсового масла / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017) [Электронный ресурс]: сб. статей: Всерос. ежегод. науч.-практ. конф., 1–29 апреля 2017 г. – Киров: Науч. изд-во ВятГУ, 2017. – С. 1808–1816.
103. Плотников, С. А. Исследование работоспособности дизельной форсунки на смешевых топливах с недостаточными низкотемпературными свойствами / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 1. – С. 10–16.
104. Плотников, С. А. Исследование свойств новых топлив на основе этанола / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, М. В. Смольников // Вестник БГСХА. – 2017. – № 1. – С. 114–117.
105. Плотников, С. А. Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2017) [Электронный ресурс] / С. А. Плотников, П. Н. Черемисинов // Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 1–29 апреля 2017 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2017. – С. 1875–1882.
106. Плотников, С. А. Недостатки применения топлив на основе рапсового масла в дизельных двигателях / С. А. Плотников, П. Н. Черемисинов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 97–101.
107. Плотников, С. А. Определение влияния топливных присадок на кинематическую вязкость смешевого топлива / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018). – 2018. – С. 766–771.
108. Плотников, С. А. Определение оптимального состава смешевого топлива по экологическим показателям дизеля / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Тракторы и сельхозмашины. – 2021. – № 1. – С. 14–22.
109. Плотников, С. А. Определение токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на этанолсодержащем топливе / С. А. Плотников, М. В. Смольников, П. Ю. Малышкин // Транспортные системы. – 2018. – № 2 (8). – С. 12–18.
110. Плотников, С. А. Определение оптимальных регулировок системы топливоподачи двигателя 4Ч 11,0/12,5 при работе на смесях рапсового масла с дизельным топливом // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2017) [Электронный ресурс] / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, П. Н. Черемисинов // Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 1–29 апреля 2017 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2017. – С. 1841–1848.

111. Плотников, С. А. Определение регулировочных параметров системы топливоподачи тракторного дизеля при работе на топливных композициях с добавками рапсового масла / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2018. – № 4. – С. 133–138.
112. Плотников, С. А. Оптимизация состава спиртовых топлив / С. А. Плотников, С. Н. Гушин // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: межвузовский сб. науч. тр. – Киров: ВГСХА, 2004. – С. 9–13.
113. Плотников, С. А. Определение эффективных показателей тракторного дизеля при работе на топливной композиции с добавками рапсового масла / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Advanced Science. – 2019. – № 3. – С. 15–18.
114. Плотников, С. А. Улучшение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом для использования в тракторных дизелях / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, П. Н. Черемисинов // Двигателестроение. – 2017. – № 4. – С. 21–24.
115. Плотников, С. А. Определение влияния компонентного состава топливной смеси на кинематическую вязкость / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Общество. Наука. Инновации (НИК-2018) [Электронный ресурс]: сб. статей XVIII Всерос. ежегод. науч.-практ. конф., 2–28 апреля 2018 г. – Киров: Науч. изд-во ВятГУ, 2018. – С. 759–765.
116. Подогрев как способ повышения эффективности использования рапсового масла в качестве топлива / Ю. Н. Рыжов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 6. – С. 5–7.
117. Показатели качества рапсового масла холодного отжима / А. Н. Остриков [и др.] // Пищевая промышленность. – 2017. – № 9. – С. 52–55.
118. Применение алифатических спиртов в качестве экологически чистых добавок в автомобильные бензины / С. А. Карпов [и др.] // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2006. – № 2. – С. 48–48.
119. Проблемы технической экологии в сферах российского сельскохозяйственного образования и производства / А. П. Картошкин [и др.] // Международный экологический форум «Общие проблемы и направления обеспечения экологически безопасного, энергосберегающего производства сельскохозяйственной продукции и устойчивого развития сельских территорий» / СПб., РАСХН, ГНУ. – Т. 1. – С. 229–233.
120. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учеб. пособие для вузов / В. А. Марков [и др.]. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.
121. Разработка стабилизаторов и методов исследования эмульсий для топлив: ТЭД по НИР. / ВНИИПАВ; руковод. Б. Е. Чистяков. – № ГР 0180.0024424; Инв. № 0284.0036397. – Щебекино, 1984. – 52 с.
122. Рапсовое масло как альтернативное топливо для дизеля / В. А. Марков [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 2. – С. 1–3.
123. Расчет экономической эффективности применения альтернативных топлив в ДВС «РЭЭПАД-ДВС»: Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2018612815 / С. А. Плотников, Ю. В. Ланских, Л. Ю. Ланских, В. А. Подгорный, М. В. Смольников, П. Н. Черемисинов.
124. Савельев, Г. С. Производство и использование биодизельного топлива из рапса / Г. С. Савельев. – М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2007. – 96 с.
125. Савельев, Г. С. Расчет параметров топливной системы тракторного дизеля при его адаптации к работе на рапсовом масле / Г. С. Савельев, М. Н. Кочетков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 4. – С. 60–67.
126. Семёнов, В. Г. Альтернативные топлива растительного происхождения / В. Г. Семёнов, А. А. Зинченко // Химия и технология топлив и масел. – 2005. – № 1. – С. 29–34.
127. Семёнов, В. Г. Биодизель. Физико-химические показатели и эколого-экономические характеристики работы дизельного двигателя / В. Г. Семёнов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 251 с.

128. Сергеев, Л. В. О работе дизелей на топливно-водяных эмульсиях / Л. В. Сергеев, В. М. Иванов // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 176–183.
129. Силаев, П. А. Влияние свойств смесей дизельного топлива и рапсового масла на характеристики топливopодачи в дизеле при их использовании в качестве топлива / П. А. Силаев // Наука и образование: проблемы, идеи, инновации. – 2020. – № 5. – С. 22–25.
130. Смаль, Ф. В. Перспективные топлива для автомобилей / Ф. В. Смаль, Е. Е. Арсенов. – М.: Транспорт, 1979. – 151 с.
131. Смирнова, Т. Н. Биодизель – альтернативное топливо для дизелей / Т. Н. Смирнова, В. М. Подгаецкий // Двигатель. – 2007. – № 1. – С. 32–35.
132. Стаценко, В. Н. Эффективность применения воднотопливных эмульсий в судовых котлах / В. Н. Стаценко, В. М. Суменков // Судостроение. – 1999. – № 2. – С. 31.
133. Топлива моторные. Методы определения температур помутнения, начала кристаллизации и замерзания: ГОСТ 5066-2018.
134. Топлива. Метод определения предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре: ГОСТ Р 54269-2010.
135. Топливо дизельное. Технические условия: ГОСТ 305-2013.
136. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения: ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. принят 23.04.2002; действ. с 01.11.2002. – М., 2002.
137. Транспорт на биотопливе в Сан-Диего // Автогазоправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2008. – № 4. – С. 65.
138. Фомин, Ю. Я. Гидродинамический расчет топливных систем судовых дизелей / Ю. Я. Фомин // Морской транспорт. – М., 1959. – 114 с.
139. Форсунки дизелей. Технические требования и методы испытаний: ГОСТ 10579-2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 14 с.
140. Фофанов, Г. А. Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта / Г. А. Фофанов, Д. Н. Григорович, А. С. Нестрахов: под ред. Г. А. Фофанова // Труды ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интек, 2008. – 144 с.
141. Фролов, И. Ю. Курс коллоидной химии / И. Ю. Фролов. – М.: Химия, 1989. – 464 с.
142. Химическая энциклопедия / под ред. И. Л. Кнунянца. – Т. 3. – М.: Советская энциклопедия, 1992.
143. Химия горения / У. Гардинер [и др.]; под ред. У. Гардинера; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 464 с.
144. Химия жиров / Б. Н. Тютюнников [и др.] // Пищевая промышленность, М., 1974. – 448 с.
145. Цетаноповышающая присадка DIFRON H372: ТУ 0257-001-65234252–2012.
146. Черемисинов, П. Н. Анализ возможности улучшения физико-химических свойств смеси дизельного топлива с рапсовым маслом / П. Н. Черемисинов // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018): Сборник статей XVIII Всероссийской научно-практической конференции: в 3 томах, Киров, 2–28 апреля 2018 года / Вятский государственный университет. – Киров: Вятский государственный университет, 2018. – С. 1065–1072.
147. Черемисинов, П. Н. Улучшение эксплуатационных показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 путем применения рапсового масла / П. Н. Черемисинов // Будущее технической науки: сб. материалов XVII Межд. молодежн. науч.-техн. конф.; НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – С. 173–174.
148. Чупраков, А. И. Исследование рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при использовании а качестве топлива этанола-топливной эмульсии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / А. И. Чупраков. – СПб., 2012. – 17 с.
149. Шимонаев, Г. С. Общие закономерности горения. Теоретические основы химмотологии / Г. С. Шимонаев; под ред. А. А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – С. 130–137.

150. Широкомасштабные эксперименты по введению рапсового масла в дизельное топливо // Автомобильная промышленность США. – 1997. – № 3. – С. 5–9.
151. Шкаликова, В. Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях / В. Н. Шкаликова, Н. Н. Патрахальцев. – М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. – 64 с.
152. Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика / В. Штиллер. – М.: МИР, 2000. С. 28–29.
153. Экономия горючего / под ред. Е. П. Серегина. – М.: Воениздат, 1980. – 144 с.
154. Эмульсии / под ред. Ф. Шермана. – М.: Химия, 1972. – С. 75–122.
155. Akor, A. J. The Potential of Palm Oil as a Motor Fuel / A. J. Akor, W. J. Chancellor, N. Raubach // Transactions of the ASAE. – 1983. – Vol. 26. – № 1. – P. 23–28.
156. Alcohols in diesel engines a review: «Automot. Eng.» 1984, V/92, № 6, p. 40–44.
157. Araya, K. Single droplet combustion of sunflower oil / K. Araya, S. Tsunematsu // SAE Technical paper series. – 1987. – № 870590. – P. 1–9.
158. Ahmed, I. Oxygenated Fuel Emissions and Performance Characteristics of Ethanol-Diesel Blends in CI Engines / I. Ahmed // SAE Technical Paper Series. – 2001. – N 2001-01-2475. – P. 1–6.
159. Barsic, N. J. Performance and Emissions Characteristics of a Naturally Aspirated Diesel Engine with Vegetable Oil Fuels / N. J. Barsic, A. L. Humke // SAE Technical Paper Series. – 1981. – № 810262. – P. 1–10.
160. Biogas, immer noch ein tenper Treibstoff. // DLZ – Landtechn. – 1986, Jg. 37. – № 11. – P. 1536–1537.
161. Borgelt, S. C. Effects of Soybean Oil – Diesel Fuel Mixtures in Small Precombustion Chamber Engines / S. C. Borgelt, F. D. Harris // ASAE Paper. – 1982. – № 82. – P. 1–6.
162. Cigizoglu, B. K. Used Sunflower Oil as an Alternative Fuel for Diesel Engines / B. K. Cigizoglu, T. Ozaktas, F. Karaosmanoglu // Energy Sources. – 1997. – Vol. 19. – № 6. – P. 559–566.
163. Combustion of the Rape-Seed Oil in a Diesel Engine / M. Hashimoto [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 2002. – № 2002-01-0867. – P. 1–12.
164. Commercialization of Idaho Biodiesel (HySEE) from Ethanol and Waste Vegetable Oil / C. L. Peterson [et al.] // ASAE Paper. – 1995. – № 956738. – P. 1–6.
165. Cotton Seed Oil as a Diesel Fuel Substitute / C. M. Yarbrough [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 1982. – № 823613. – P. 1–8.
166. Culder, O. L. Cetane number estimation of diesel fuels from carbon type structural composition / O. L. Culder. // SAE Tehn. Pap. Ser. – 1984. – P. 57–65.
167. Dhahad, H. A. The impact of adding nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-ZnO to Iragi diesel fuel in terms of compression ignition engines` performance and emitted pollutants / H. A. Dhahad, M. T. Chaichan. – DOI 10.1016/j.tsep.2020.100535 // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – № 18.
168. Effect of assisted hydrogen on combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel / Z. Zhang [et al.] // Energy . – 2022. – V. 254, Part A. – Article 124629.
169. Effect of fuel injection timing and injection pressure on performance in a hydrogen direct injection engine / C. Park [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – V.47, Issue 50. – P. 2152–2156.
170. Effects of direct water injection on engine performance in engine fueled with hydrogen at varied excess air ratios and spark timing / P. Xu [et al.] // Fuel. 2020. – V. 269. – Article 117209.
171. Effects of super heating of heavy fuels on combustion and performance in DI diesel engines / T. Murayama [et al.] // SAE Technical paper series. – 1986. – № 860306. – P. 1–8.
172. El-Seesyad, A. Effects of graphene nanoplatelet addition to jatropha Bio-diesel – Diesel mixture on the performance and emission characteristics of a diesel engine / A. El-Seesyad, H. Hassanab, S.Ookawarac // Energy . – 2018. – V.147. – P. 1129–1152.

173. Emission of dioxins/furans and other U-POPs from test burns of non-POP pesticides in a hazardous waste incinerator / T. Khumsaenga [et al.] // *Waste Management*. – 2013. – V. 33, Issue 4. – P. 833–841.
174. Erdogan, D. Effect of Preheated Corn Oil as Fuel on Diesel Engine Performance / D. Erdogan, A. A. Mohammed // *Agricultural Mechanisation in Asia, Africa and Latin America*. – 1999. – Vol. 30. – № 3. – P. 56–58.
175. Evaluation of cottonseed oil as diesel fuel / E.F. Fort [et al.] // *SAE Technical paper series*. – 1982. – № 820317. – P. 1–18.
176. Evaluation of Turkish Sulphur Olive Oil as an Alternative Diesel Fuel / H. A. Aksoy [et al.] // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. – 1988. – Vol. 65. – № 6. – P. 936–938.
177. Exhaust Gas Emissions and Environmental Effects by Use of Rape Seed Oil Based Fuels in Agricultural Tractors / J. Krahel [et al.] // *SAE Technical Paper Series*. – 1996. – № 961847. – P. 1–14.
178. Exhaust Particulate Emissions of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine / S. A. Niemi [et al.] // *SAE Technical Paper Series*. – 2002. – № 2002-01-0866. – P. 1–12.
179. Experimental energy and exergy analysis of turbocharged marine low-speed engine with high pressure exhaust gas recirculation / D. Wanga [et al.] // *Fuel*. – 2022. – Vol. 323, P. 124360.
180. Experimental investigation of urea injection strategy for close-coupled SCR after-treatment system to meet ultra-low NO<sub>x</sub> emission regulation / S. Liua [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – V. 205. – Article 117994.
181. Experimental study of engine performance and emissions for hydro-gen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation / S. Nag [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – V. 44, Issue 23. – P. 12163–12178.
182. Fast and accurate modeling approach for water and steam thermodynamics with practical applications in district heating system simulation / K. Hinkelman [et al.] // *Energy*. – 2022. – V. 254, Part A. – Article 124227.
183. Fenimore C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames / C. P. Fenimore // *Thirteenth Symp. Combustion*. – Pittsburgh: Combustion inst., 1971. – P. 373–380.
184. Gholami, A. Detail performance and CO<sub>2</sub> emission analysis of a very large crude carrier propulsion system with the main engine running on dual fuel mode using hydrogen/diesel versus natural gas/diesel and conventional diesel engines / A. Gholamia, S. AliJazayerib, Q.Esmailic // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2022. – V. 163. – P. 621–635.
185. Goodrum J. W. Long Term Testing of Peanut Oil in Engines / J. W. Goodrum // *ASAE Paper*. – 1985. – № 85-3571. – P. 1–13.
186. Han, D. Premixed low-temperature combustion of blends of diesel and gasoline in a high speed compression / D. Han // *Combustion Institute*. – 2011. – № 33 (2). – P. 3039–3046.
187. Hawkins, C. S. Engine Durability Tests with Sunflower Oil in an Indirect Injection Diesel Engine / C. S. Hawkins, J. Fuls, F. J. C. Hugo // *SAE Technical Paper Series*. – 1983. – № 831357. – P. 1–4.
188. Heywood J. B. Predictions of nitric oxide concentrations in a spark ignition engine compared with exhaust measurements / J. B. Heywood, S. M. Mathews, B. Owen // *SAE Automotive Engineering Congress. Pap. № 710011*. – Detroit; Michigan, 1971.
189. Impact of Using Biodiesels of Different Origin and Additives on the Performance of a Stationary Diesel Engine / A. Sendari [et al.] // *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2000. – Vol. 122. – № 4. – P. 624–631.
190. Kalaimurugan, K. Combustion behaviour of ZnO nanoparticles added algae biodiesel on CI / K. Kalaimurugan, D. Somasundaram, C. Thirugnanam, T. Dhar-maprabhakaran // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. ISSN: 2214-7853 DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.508.

191. Kalam M. A. Emissions and Deposit Characteristics of a Small Diesel Engine When Operated on Preheated Crude Palm Oil / M. A. Kalam, H. H. Masjuki // SAE Technical Paper Series. – 2005. – № 2005-01-3697. – P. 1–7.
192. Knothe G. Analyzing Biodiesel: Standards and Other Methods / G. Knothe // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2006. – V. 83. – № 10. – P. 823–833.
193. Lenin, M. A. Performance and emission characteristics of a DI diesel engine with a nanofuel additive / M. A. Lenin, M. R. Swaminathan, G. Kumaresan // Fuel. – 2013. – V. 109. – P. 362–365.
194. Liu, H. Effects of gasoline research octane number on premixed low-temperature combustion of wide distillation fuel by gasoline/diesel blend // H. Liu, Z. Wang, J. Wang // Fuel. – 2014. – № 134. – P. 381–388.
195. Low temperature degradation of polychlorinated dibenzo-pdioxins and dibenzofurans over a VO<sub>x</sub>-CeO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst with addition of ozone / M. X. Zhana [et al.] // Waste Management. – 2018. – V. 76. – P. 555–565.
196. Manzoore, E. An investigation on the influence of aluminium oxide nano-additive and honge oil methyl ester on engine performance, combustion and emission characteristics / E. Manzoore, M. Soudagara, N. –NazriNik-Ghazalia, M. A. Kalamalrfan // Renewable Energy. – 2020. – V. 146. – P. 2291–2307.
197. Masjuki, H. A Rapid Test to Measure Performance, Emission and Wear of a Diesel Engine Fueled with Palm Oil Diesel / H. Masjuki, A. M. Zaki, S. M. Sapuan // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 1993. – V. 70. – № 10. – P. 1021–1025.
198. Mazed, M. A. Peanut, Soybean and Cottonseed Oil as Diesel Fuels / M. A. Mazed, J. D. Summers, D. G. Batchelder // Transactions of the ASAE. – 1985. – Vol. 28. – № 5. – P. 1375–1377.
199. Morimune, T. Exhaust Emissions and Performance of Diesel Engine Operating on Waste Food-Oil / T. Morimune, H. Yamaguchi, Konishi // Transactions of the JSME. Ser. B. – 2000. – Vol. 66. – № 641. – P. 294–299.
200. Muralidhara, D. Effect of hydrogen flow rates on the performance of two biodiesels fuelled dual fuel engine / D. M. Muralidhara, N. R. Banapurmath T. Karthi // Materials Today: Proceedings 2022. – V. 49. – Part 5. – P. 2189–2196.
201. Nag, S. Combustion, vibration and noise analysis of hydrogen-diesel dual fueled engine / S. Nag, A. Gupta, A. Dtul // Fuel. – 2019. – P. 488–494.
202. Neue Pflanzenolmotoren von DMS // MTZ. – 1993. – Jg. 54. – № 7/8. – S. 365.
203. Newhall H. K. Direct Spectroscopic Determination of Nitric Oxide in Reciprocating Engine Cylinders / H. K. Newhall, E. S. Starkman // SAE. Pap. 670122. – 1967. – № 76. – 18 p.
204. Niemi S. A. Results from a Durability Test of a Mustard Seed Oil Driven Tractor Engine / S. A. Niemi, T. Hatonen, V. O. K. Laiho // SAE Technical Paper Series. – 1998. – № 982528. – P. 1–15.
205. Niemi S. A. A Tractor Engine Fueled with Mustard Seed Oil: Optimization, Emissions and Practical Experiences / S. A. Niemi, P. E. Illikanen, V. O. K. Laiho // SAE Technical Paper Series. – 1997. – № 972724. – P. 11–25.
206. Novel PdNi/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst prepared by galvanic deposition for low temperature methane combustion / X. Panabc [et al.] // Journal of Energy Chemistry. – 2022. – V. 22. – Issue 4. – P. 610–616.
207. Numerical analysis of injection and spray characteristics of diesel fuel and rapeseed oil in a diesel engine / V. Markova [et al.] // Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – V. 35. – Article 102129.
208. Numerical research of the injected exhaust gas recirculation strategy on a two-stroke low-speed marine diesel engine / Z. Lu [et al.] // Energy. – 2022. – Vol. 244. – P. 122731.
209. Nuthan, B. Effect of hydrogen enrichment on performance, combustion, and emission of a methanol fueled SI engine / B. S. Nuthan, P. J. Kumar Pandey, G. N. Kumar // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – V. 46, Issue 49. – P. 25294–25307.
210. Nutt, B. The Cost of Making Methanol Available to a National Market / B. Nutt, J. Down, J. Holmes // SAE Paper 872063.



211. On the Thermal Decomposition and Residue Formation of Plant Oils / H. J. Goettler [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 1986. – № 861582. – P. 1–9.
212. Pan, X. Experimental Investigation of Operating on Cottonseed Oil in Model 2105 Diesel Engine / X. Pan, X. Xiong, G. Bao // Neiranji Gongcheng – Chinese Internal Combustion Engine Engineering. – 1995. – Vol. 16. – № 1. – P. 55–57.
213. Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil / N. Hemmerlein [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 1991. – № 910848. – P. 1–16.
214. Realizing low NO<sub>x</sub> emissions on a hydrogen-fuel spark ignition engine at the cold start period through excess air ratios control / P. Xu [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – V. 43. – Issue 46. – P. 21617–21626.
215. Scalera, F. Peugeot celebrates its 200 years of life. History, strategies, organisation and future prospects of the French car company. A comparison with Fiat Auto / F. Scalera // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – V. 24. – P. 1243–1256.
216. Shekofteh, M. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with functionalized multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs-OH) and diesel–biodiesel– bioethanol blends / M. Shekofteh, T. Mesri, G. Ahmad // Energy Reports. – 2020. – V.22. – P. 1438–1447.
217. Shi, H. Effect of fast-burning compound ACP and catalyst on the combustion performance of Al/Mg-based fuel-rich HTPB propellants / H. Shi, J. Ren, W-T. Jianmin // Fire Phys Chem. – 2022. – V. 2. – Issue 1. – P. 29–35.
218. Shukla, M. Effect of Au/CeO<sub>2</sub> as fuel borne catalysts on performance, combustion and emissions characteristics of CI engine / M. K. Shukla, G. Tripathi, A. Dhar // Cleaner Engineering and Technology. – 2021. – V. 5. – Article 100335.
219. Simulation of plasma-assisted catalytic reduction of NO<sub>x</sub>, CO, and HC from diesel engine exhaust with COMSOL / A. Belali [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2019. – Vol: 197. – P. 135–149.
220. Simultaneous estimation of ammonia injection rate and state of diesel ureaSCR system based on high gain observer / L. Weia [et al.] // ISA Transactions. – 2022. – V. 126. – P. 679–690.
221. Starkman, E. S. An Investigation into the formation and modification of emission precursors / E. S. Starkman, H. E. Stewart, V. A. Zvonov // SAE Paper. – 1969. – № 690020. – 9 p.
222. Sunflower Oil – an Emergency Farm Fuel? / B. G. Goodier [et al.] // Agricultural Engineering. – 1980. – Vol. 61. – № 3. – P. 20–21.
223. Utilization of Waste Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel / K. Hamasaki [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 2001. – № 2001-01-2021. – P. 1–6.
224. Venu, H. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in biodiesel-diesel-ethanol blends at various injection strategies: Performance, combustion and emission characteristics / H. Venu, V. Madhavan. – DOI 10.1016/j.fuel.2016.08.046 // Fuel. – 2016. – № 186. – P. 176–189.
225. White C. M. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review / C. M. White, R. R. Steeper, A. E. Lutz // Hydrogen Energy. – 2006. – P. 1292–1305.
226. Ziejewski, M. Comparative Analysis of the Long-Term Performance of a Diesel Engine on Vegetable Oil Based Alternate Fuels / M. Ziejewski, H. J. Goettler, G. L. Pratt // SAE Technical Paper Series. – 1986. – № 860301. – P. 1–39.
227. Ziejewski, M. Endurance test of a sunflower oil diesel fuel blend / M. Ziejewski, K. R. Kaufman // SAE Technical paper series. – 1982. – № 820257. – P. 1–14.
228. Ziejewski, M. Laboratory endurance testing of a 25/75 sunflower oil-diesel fuel blend treated with additives / M. Ziejewski, K. R. Kaufman, R. C. Tupa // SAE Technical paper series. – 1984. – № 840236. – P. 1–10.
229. Ziemke, M. C. Long-Term Operator of a Turbocharged Diesel Engine on Soybean Oil Fuel Blends / M. C. Ziemke, J. F. Peters, B. Schroer // SAE Technical Paper Series. – 1983. – № 831222. – P. 93–103.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАПСОВОГО МАСЛА .....	8
1.1. Общие вопросы улучшения эффективных показателей дизеля и трактора.....	8
1.2. Перспективы применения альтернативных топлив в ДВС .....	9
1.3. Перспективы и проблемы применения растительных масел .....	13
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УЛУЧШЕНИЯ МОТОРНЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАПСОВОГО МАСЛА.....	24
2.1. Анализ возможности улучшения эксплуатационных свойств утяжеленных ДТ .....	24
2.2. Улучшение низкотемпературных свойств топлив с добавкой рапсового масла .....	32
2.3. Определение влияния применения смесового топлива на механизмы процесса сгорания.....	42
2.4. Образование оксидов азота в дизеле 4ЧН 11,0/12,5 при применении топлив с добавками рапсового масла с улучшенными низкотемпературными свойствами..	55
3. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ МОТОРНЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАПСОВОГО МАСЛА.....	72
3.1. Общая методика увеличения предела применимости топлив с добавкой рапсового масла в автотракторных дизелях .....	72
3.2. Методика проведения исследований влияния присадок на свойства топлив с добавками рапсового масла.....	74
3.3. Методика проведения сравнительных испытаний работы топливной аппаратуры дизеля на дизельном топливе и топливе с добавкой рапсового масла ...	76
3.4. Методика исследований автотракторного дизеля при применении топлива с добавкой рапсового масла .....	77
3.5. Методика эксплуатационных испытаний.....	78
3.6. Экспериментальные установки, приборы и оборудование.....	80
3.7. Обработка результатов исследований. Ошибки измерений .....	85
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	89
4.1. Результаты лабораторных исследований .....	89
4.1.1. Результаты лабораторных исследований низкотемпературных свойств топлив с добавкой рапсового масла .....	89
4.1.2. Результаты лабораторных исследований свойств топлив с добавкой рапсового масла .....	89
4.1.3. Результаты лабораторных исследований жирнокислотного состава топлив с добавкой рапсового масла .....	92
4.2. Результаты стендовых испытаний работы топливоподающей аппаратуры дизеля.....	99
4.2.1. Результаты стендовых испытаний работы топливоподающей аппаратуры на дизельном топливе и топливе с добавкой рапсового масла .....	99
4.2.2. Результаты стендовых испытаний работы топливной аппаратуры дизеля на дизельном топливе и топливе с добавкой рапсового масла.....	104
4.3. Результаты стендовых испытаний работы дизеля.....	106
4.3.1. Влияние различных составов топлив с добавками рапсового масла на рабочий процесс и регулировки тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5.....	106

4.3.2. Влияние различных составов топлив с добавками рапсового масла на эффективные показатели работы тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 .....	113
4.3.3. Влияние различных составов топлив с добавками рапсового масла на экологические показатели тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 .....	117
4.4. Результаты эксплуатационных испытаний .....	124
4.4.1. Результаты эксплуатационных показателей тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на топливах с добавлением рапсового масла .....	124
4.4.2. Результаты эксплуатационных испытаний трактора «Беларус-922» при работе на топливах с добавлением рапсового масла.....	126
ВЫВОДЫ.....	132
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	134

Научное издание

**Карташевич** Анатолий Николаевич  
**Рудашко** Александр Александрович  
**Плотников** Сергей Александрович и др.

УЛУЧШЕНИЕ МОТОРНЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ  
С ДОБАВКАМИ РАПСОВОГО МАСЛА

Монография

Редактор *Е. П. Савчиц*  
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 24.10.2025. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 8,60. Уч.-изд. л. 7,23.  
Тираж 100 экз. Заказ .

Белорусская государственная сельскохозяйственная академия.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/52 от 09.10.2013.  
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.  
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.