

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИКИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ»
(ФГБНУ ВНИИТиН)

На правах рукописи



МЕЩЕРЯКОВ АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ И АКТИВАЦИИ ДИЗЕЛЬНОГО СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского
хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Нагорнов С.А.

Тамбов 2022

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ТЕРМИНОВ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	12
1.1 Анализ основных способов повышения качества дизельного топлива	12
1.2 Электромагнитная обработка дизельного топлива.....	17
1.3 Ультразвуковая обработка дизельного топлива	24
1.4 Комбинированная обработка дизельного топлива	28
1.5 Выводы и задачи исследований.....	32
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДИЗЕЛЬНОГО СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА	35
2.1 Конструкция комбинированного модуль-смесителя с ультразвуковым модулем для обработки дизельного смесевого топлива	35
2.2 Математическое моделирование ультразвукового модуля в комбинированном модуль-смесителе	40
2.3 Определение основных параметров ультразвукового модуля.....	46
2.4 Разработка принципиальной схемы улучшения качества дизельного смесевого топлива с применением комбинированного модуль- смесителя	55
2.5 Выводы.....	57
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	58
3.1 Общая методика исследований	58
3.2 Методика исследования влияния ультразвуковой обработки на дизельное и дизельное смесевое топливо	60
3.3 Методика обработки топлива в комбинированном модуль-смесителе.	62
3.4 Методика хроматографического анализа топлива	64
3.5 Методики определения физико-химических свойств топлив.....	66
3.6 Методика стендовых испытаний топливной аппаратуры.....	66

СПИСОК ТЕРМИНОВ

активация топлива: Процесс обработки топлива, в ходе которого без применения реагентов осуществляется воздействие на его физико-химические свойства путем разбиения длинных углеводородных цепей, входящих в молекулярный состав топлива;

биодизельное топливо: Сложный метиловый эфир с качеством дизельного топлива, получаемый из масла растительного или животного происхождения и используемый в качестве топлива.

дизельное смесевое топливо: Дизельное топливо, изготовляемое путем смешивания дизельного и биодизельного топлива или дизельного топлива и растительных масел.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современном мире с каждым годом все более остро встает вопрос топливной эффективности и экологичности техники с дизельными силовыми установками. Однако, оснащенность данной техникой, отвечающей требованиям современных реалий, в сельском хозяйстве остается на низком уровне. Согласно данным департамента растениеводства, механизации, химизации и защиты растений Минсельхоза России средний возраст тракторов АПК составляет 19,95 лет. Это побуждает научное сообщество к разработке технических средств, позволяющих решить данную проблему автотракторной техники.

Согласно статистическому сборнику «Сельское хозяйство в России. 2021» средние цены на дизельное топливо, приобретенное сельскохозяйственными организациями с 2010 по 2020 гг. выросли с 17 058 тыс. рублей до 48 063 тыс. рублей соответственно, рост в указанный период составил более, чем в 2,8 раза. Постоянно ужесточающиеся требования к экологическим нормативам дизельного топлива заставляют производителей уменьшать в его составе серосодержащих соединений. Это дополнительно удорожает его, и пагубно влияет на эксплуатационные показатели топливной аппаратуры. Кроме того, доля некондиционного топлива в общем объеме постоянно растет. Так по данным департамента растениеводства, механизации химизации и защиты растений Минсельхоза России с 2014 по 2017 гг. рост составил 13,3 %, а именно, в 2014 году из 185 взятых проб некондиционных оказалось – 38, что составило 20,5%, в 2017 году из 145 проб – 49, а это уже 33,8%.

Таким образом, производители сельхозпродукции становятся заложниками битвы за экологические показатели с одной стороны, и финансовыми издержками на покупку топлива и ремонт техники с другой. На рынке получается ситуация, при которой подорожанию топлива способствует и растущие цены на нефть, и дополнительные расходы нефтеперерабатывающих заводов на требуемую очистку топлива.

Для производителей сельхозпродукции более выгодна ситуация, при которой часть топлива будет восполняться за счет собственных ресурсов, и расходоваться более эффективно. Другими словами, необходимо перейти на дизельное смесевое топливо. Однако, данный переход имеет и ряд не решенных вопросов. К ним можно отнести короткий срок хранения, ухудшение физико-химических свойств, снижение мощностных показателей дизельных двигателей. Поэтому поиск эффективных способов получения и улучшения дизельного смесевое топлива является актуальным и своевременным.

Для реализации процесса получения и улучшения дизельного смесевое топлива применяются устройства, позволяющие обрабатывать топливо непосредственно перед попаданием в камеру сгорания. Для улучшения дизельного смесевое топлива применяются узкоспециализированные устройства комбинированного принципа воздействия. Однако, внедрению таких устройств в автотракторную технику препятствует недостаточная изученность влияния на топливную систему и возможности реализации.

Таким образом, в условиях постоянно растущих цен и объемов некондиционного топлива на рынке остро встает вопрос в необходимости разработки устройств по улучшению качества дизельного смесевое топлива, доступных конечному потребителю.

Диссертационная работа выполнялась в ФГБНУ ВНИИТиН в 2015-2021 гг. в соответствии с программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы «Научно обосновать новые методы и средства повышения эффективности использования углеводородных топлив, электроэнергии и альтернативных источников энергии в сельском хозяйстве».

Степень разработанности темы. Вопросом улучшения технико-экологических показателей качества дизельного топлива (повышением эксплуатационной мощности, снижением эксплуатационного расхода топлива, снижением выбросов вредных веществ в отработанных газах дизельных двигателей) занимались отечественные и зарубежные ученые: Хохлов А.Л.,

Улюкина Е.А., Лиханов В.А., Митусова Т.Н., Егоров И.Н., Волгин С.Н., Воробьев Ю.В., Мурамович В.Г., Нагорнов С.А., Данилов А.М., Голубев И.Г., Федоренко В.Ф., Марков В.А., Уханов А.П., Девянин С.Н., Gad M.S., Vivek Ugare, M. Piyush, P. Gaurav, Rathod, M. Tushar. Работы ученых посвящены изучению изменения основных физико-химических свойств дизельного топлива под воздействием полей различной природы и присадок, а также биодизельного топлива. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования говорят об эффективности использования биодизельного топлива в дизельном двигателе без преобразований его конструкции. Однако, используемое дизельное смесевое топливо обладает повышенной вязкостью, способностью к расслоению, а исходное дизельное топливо не всегда соответствует стандартам качества.

Цель исследований: улучшение технико-экологических показателей работы дизельного двигателя за счет получения и обработки дизельного смесевое топлива комбинированным модуль-смесителем, встроенным в топливную систему.

Задачи исследований:

1. Обосновать способ повышения эффективности получения и обработки дизельного смесевое топлива.
2. Обосновать конструкцию ультразвукового модуля комбинированного устройства для получения и улучшения качества дизельного смесевое топлива, с возможностью встраивания в топливную систему автотракторной техники.
3. Установить закономерности, повышающие эффективность работы ультразвукового модуля комбинированного модуль-смесителя при обработке топлива.
4. Провести экспериментальные исследования топливной аппаратуры, определить технико-экономические и экологические показатели дизельного двигателя при работе на дизельном и дизельном смесевом топливе, обработанном в комбинированном модуль – смесителе.
5. Оценить экономическую эффективность от реализации результатов исследований.

Объект исследований. Технологический процесс получения, обработки и применения дизельного смесевоего топлива с использованием комбинированного модуль-смесителя.

Предмет исследования. Закономерности изменения физико-химических свойств дизельного смесевоего топлива, обработанного в комбинированном модуль-смесителе и технико-экологических показателей двигателя внутреннего сгорания.

Научная новизна результатов исследования:

— Математическая модель, описывающая зависимость характеристик ультразвукового излучения от параметров ультразвукового модуля комбинированного модуль - смесителя;

— Алгоритм расчета высоты и ширины сопла, угла заточки, длины и толщины пластины ультразвукового модуля, написанный на языке программирования Haskell;

— Зависимости изменения кинематической вязкости дизельного топлива при различных показателях мощности и времени ультразвуковой обработки, а также давлении в топливной системе;

— Технико-экологические показатели дизельного двигателя при работе на дизельном смесевом топливе, полученном и обработанном во встроенном в топливную аппаратуру комбинированном модуль-смесителе.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность использования в топливной системе дизельного двигателя комбинированного модуль-смесителя, позволяющего улучшить его технико-экологические показатели.

Теоретическая значимость заключается в разработке способа обработки дизельного топлива, разработке программы для расчета параметров ультразвукового модуля. Техническая новизна подтверждена патентом RU на изобретение № 2645676 «Способ очистки дизельного топлива».

Практическую значимость имеет разработанный комбинированный модуль-смеситель для обработки дизельного и дизельного смесового топлива, встраиваемый в топливную систему дизельного двигателя, обеспечивающий улучшение качества дизельного и дизельного смесового топлива, увеличение производительности, снижение расхода топлива и улучшения экологических показателей.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования проводились согласно законам классической механики, гидродинамики, массообмена. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием методов исследования качества топлива, стендовых испытаний топливной аппаратуры и полевых исследований. Все исследования проводились с использованием стандартных (ГОСТ 2177-99; ГОСТ 6307-75; ГОСТ Р 51069-97; ГОСТ 17.2.2.02-98; ГОСТ 7057-2001; ГОСТ 33-2016; ГОСТ 20287-91; ГОСТ 10578-2020; ГОСТ 10579-2017; ГОСТ 30745-2001; ГОСТ 6365-75) и частных методик. Результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики, с применением прикладных программ Microsoft Excel, Mathcad, языка программирования Haskell.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- теоретическая зависимость влияния параметров ультразвукового модуля на свойства дизельного смесового топлива;
- тенденция изменения физико-химических свойств обрабатываемого дизельного смесового топлива;
- рациональная схема комбинированного модуль-смесителя для обработки дизельного смесового топлива с заданными вязкостно-плотностными свойствами;
- технико-экологические показатели дизельного двигателя при работе на дизельном смесовом топливе, полученном и активированном во встроенном в топливную аппаратуру комбинированном модуль-смесителе.

Степень достоверности и апробация результатов исследования подтверждается достаточным количеством выполненных экспериментов, использованием стандартных и частных методик, современных приборов и

оборудования, совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований с результатами, полученными другими авторами по данной тематике, наличием актов внедрения результатов исследований, выступлением с докладами на международных конференциях, одобрением и публикацией результатов исследованием в открытой печати. Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и получили положительную оценку: на международных симпозиумах и научных конференциях: «Актуальные проблемы биологии и экологии» (2017г., г. Грозный), «Инновационные технологии в науке и образовании» (2018г., с. Дивноморское), «Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества» (2021г., г. Тамбов), «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства» (2021г., г.Тамбов), «Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК» (2021г., г. Москва), «Инновационные технологии и технические средства для АПК» (2021г., г. Воронеж), «Научно-технический семинар по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок им. проф. Крутова» (2022 г., г. Москва).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационные исследования соответствуют паспорту специальности 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства», п. 6 «Исследование условий функционирования сельскохозяйственных и мелиоративных машин, агрегатов, отдельных рабочих органов и других средств механизации технологических процессов в сельскохозяйственном производстве, в т.ч. с применением альтернативных видов топлива», п. 11 «Разработка инженерных методов и технических средств обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве» и п. 9 Положения о присуждении ученых степеней – изложены новые, научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в КФХ «Роса» (Тамбовская область, Рассказовский район), АОр РТП «Некрасовское» (Тамбовская область, г. Рассказово), КФХ «Киселев» (Тамбовская область, Рассказовский район), КФХ «Наседкин» (Тамбовская область, Рассказовский район), ИП «Осипов» (Тамбовская область, Рассказовский район). Практическое использование результатов позволило уменьшить топливные затраты, сократить выход из строя топливной аппаратуры и получить положительный экологический эффект.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано 18 печатных работ, в том числе 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья Web of Science. Получен 1 патент Ru № 2645676 С1 «Способ очистки дизельного топлива», 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021616350. Объем публикаций составляет 10,56 печ. л., из них автору принадлежит – 3,59 печ. л..

Личный вклад автора состоит в проведении анализа литературных и патентных источников по теме диссертации, в проведении и обработке результатов теоретических и экспериментальных исследований, разработке, сборке и встраивании модуль-смесителя в топливную систему трактора, проведение полевых исследований дизельного двигателя, а также участие в апробации результатов исследования на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 123 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 16 таблиц, приложения на 18 страницах. Список использованной литературы включает 125 наименований.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ основных способов повышения качества дизельного топлива

Использование дизельных двигателей в современном машиностроении позволяет повысить экономичность, мощность, надежность, долговечность эксплуатируемой техники, поэтому данный тип двигателей нашел широкое применение в различных отраслях промышленно-экономического комплекса.

В агропромышленном комплексе основную долю ДВС составляют дизельные двигатели. Качество работы дизельного двигателя напрямую зависит от физико-химических свойств используемого топлива.

Ежегодно увеличиваются затраты на приобретение моторных топлив. На рисунке 1 представлены розничные цены дизельного топлива по годам по данным Росстат [1].

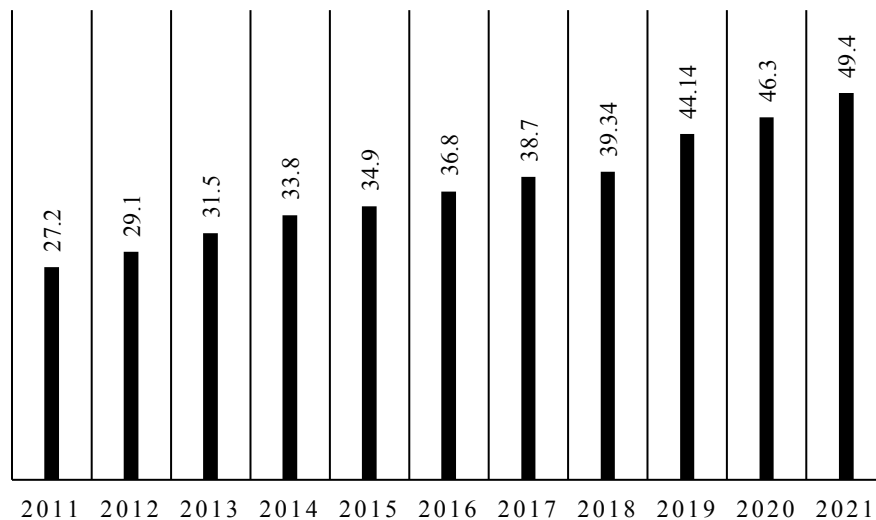


Рисунок 1.1 – Динамика роста цен на дизельное топливо по данным Росстат

Ресурсная база нефти в России ежегодно уменьшается. По данным главы Федерального агентства (апрель 2021 года) по недропользованию (Роснедра) Евгения Киселева запасов нефти в России хватит на 58 лет, из них высокорентабельных — только на 19 лет [2]. В то же время технологии развиваются, появляется возможность разработки труднодоступных месторождений, при этом повышается себестоимость добычи. Таким образом,

стоимость дизельного топлива повышается и по прогнозам в ближайшие пять лет цены будут только расти. По данным Росстата средневзвешенная цена дизельного топлива на АЗС в июне 2019 года составила 45,7 рублей, а в июне 2020 – 47,3. Стоимость дизельного топлива за год увеличилась на 3,5 %.

Расходы на приобретение топливно-смазочных материалов (ГСМ) в агропромышленном комплексе наиболее весомы в структуре материальных расходов. Так согласно данным департамента растениеводства, механизации, химизации и защиты растений Минсельхоза России доля затрат на дизельное топливо в 2018 году из общего числа затрат на технику, запчасти и ГСМ составили 23 %. Фактическое потребление ГСМ сельхозтоваропроизводителями с 2010 по 2018 гг. возросло на 200 тысяч тонн.

Еще одной из проблем топливной отрасли, является инфраструктурный недостаток, из-за которого в процессе доставки топлива до конечного потребителя снижается его качество. В настоящее время не все дизельное топливо в России соответствует стандартам качества. В ходе транспортировки и длительного хранения в его составе увеличивается количество воды, уменьшается количество легких фракций, происходит занижение цетанового числа. А как известно, работоспособность и эффективность двигателей автотракторной техники напрямую зависит от свойств дизельного топлива. На рисунках 1.2 – 1.3 показана динамика изменения количества некондиционного топлива на рынке с 2014 по 2017 годы (по данным Департамента растениеводства, механизации, химизации и защиты растений Минсельхоза России).

Из рисунков 1.2 – 1.3 следует, что количество некондиционного топлива возрастает. При этом с каждым годом стандарты требуют повышения качества дизельного топлива. Это связано с ростом транспортных средств и неуклонным ужесточением требований к защите окружающей среды.

Ухудшение качества дизельного топлива можно нивелировать применением присадок и дополнительной обработкой в устройствах с волновым и комбинированным воздействиями.

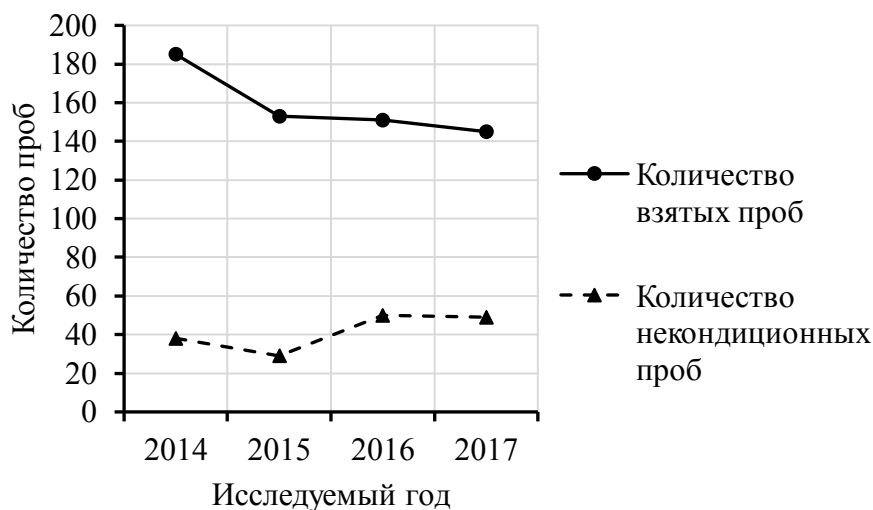


Рисунок 1.2 – Результаты анализа проб топлива

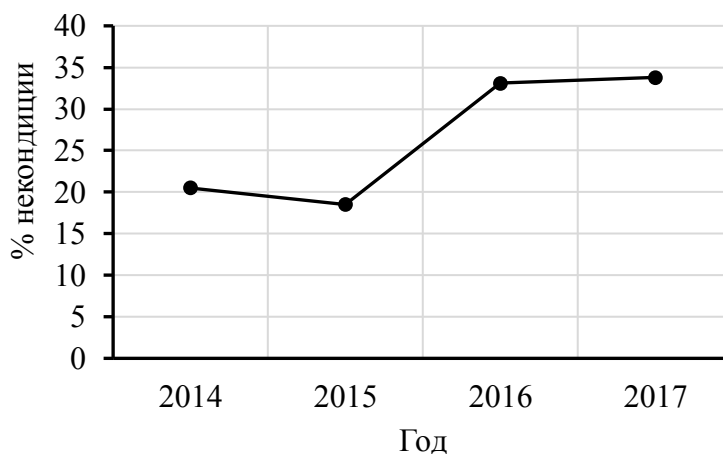


Рисунок 1.3 – Динамика изменения качества топлива

Весной 2021 году в России вступили в силу новые гигиенические нормативы. Пересмотрены значения предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в воздухе таких как: бензол, 1,3-бутадиен, серосодержащие соединения, тетрахлорметан. Все перечисленные вещества относятся к канцерогенам, которые пагубно влияют на жизнь и здоровье человека, вызывая смертельные заболевания.

Существует множество способов улучшения качества дизельного топлива. Все способы можно разделить на две группы: химические и физические (рисунок 1.4).

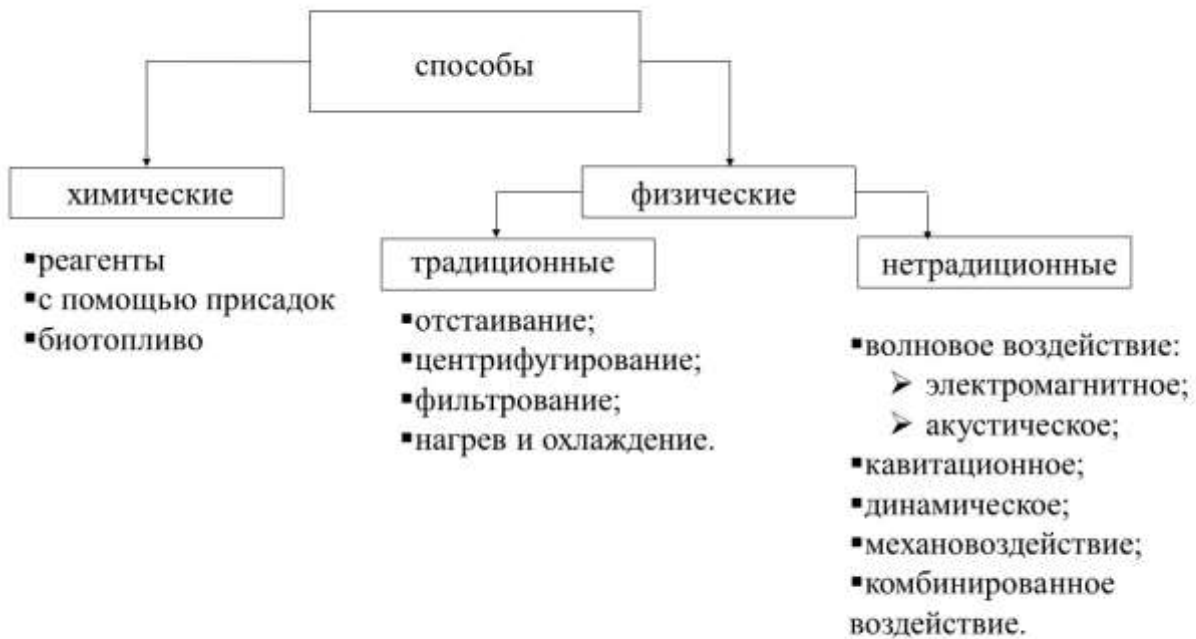


Рисунок 1.4 – Классификация способов улучшения качества дизельного топлива

Химические способы подразумевают использование реагентов, присадок. В настоящее время в РФ применяются несколько видов присадок: антидетонационные, промотеры воспламенения, противоизносные, депрессорно-диспергирующие, поглотители сероводорода, моюще-диспергирующие [3]. Отечественный рынок представлен в основном антиоксидантами и промотерами воспламенения для дизельных топлив. Проблемой остаётся разработка и организация производства отечественных противоизносных и депрессорно-диспергирующих присадок. Альтернативой присадкам могут служить добавки на основе биотоплива. Все популярнее становится использование биодизельного топлива в качестве добавки [4-11], которое экологично и безопасно.

Физические способы в свою очередь можно разделить на традиционные (классические) и нетрадиционные (перспективные). К традиционным относятся отстаивание, центрифугирование, фильтрация. Эти способы позволяют избавиться от различных механических примесей и воды. Обработка нетрадиционными способами позволяет изменять структуру и свойства исходного топлива без использования реагентов [12, 13].

К нетрадиционным (перспективным) способам относится обработка топлива волновым воздействием:

- Электромагнитными волнами;
- Акустическими волнами;
- Комбинированное воздействие.

Чаще всего используется комбинация различных волновых воздействий: электромагнитная обработка, виброструйная, вибромагнитная и т.д. [12, 14-16].

Ни один из перечисленных способов, не работает эффективно. В связи с этим, современный взгляд на проблему улучшения качества дизельного топлива заключается в комплексном подходе к её решению. А именно, использование совместно с различными методами обработки топлива присадок различной природы. Одним из перспективных направлений, в силу положительной динамики, является использование в качестве присадок биодизельного топлива.

Биодизельное топливо представляет собой масла различных растений (соя, редька, горчица, подсолнечник, сурепка, лен и др.) [9,10] или метиловые эфиры жирных кислот этих растительных масел, которые используются в качестве добавки для получения дизельного смесового топлива. Физико-химические свойства биодизельного топлива на основе метиловых эфиров растительных масел наиболее близки к свойствам нефтяного дизельного топлива.

Дизельное смесовое топливо [17] имеет ряд неоспоримых преимуществ перед дизельным:

- экономит нефтяное топливо;
- обладает улучшенными смазывающими свойствами;
- снижает содержание вредных веществ в отработанных газах, выбрасываемых двигателем в атмосферу;
- снижает углеродные накопления в камере сгорания и на клапанах головки блока цилиндров;
- имеет повышенное по сравнению с нефтяным топливом цетановое число.

1.2 Электромагнитная обработка дизельного топлива

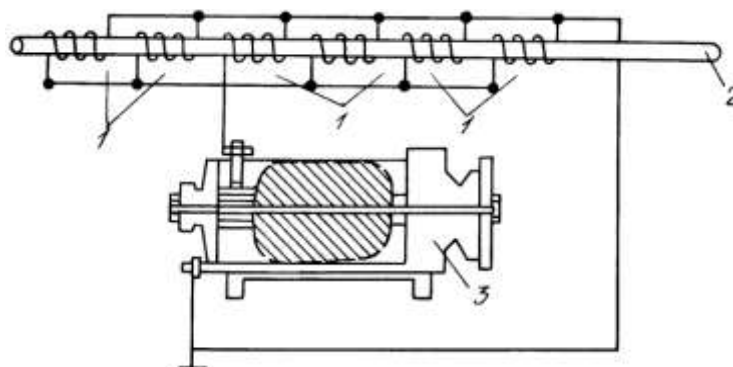
Влияние магнитного поля на свойства углеводородных топлив изучалось в начале прошлого века. Еще в 50-х годах установлено [18], что магнитное поле приводит к некоторому упорядочению молекул в веществе, а позднее было доказано [19], что воздействие магнитного поля может изменять молекулярную структуру топлива.

В настоящее время известны различные способы и устройства воздействия магнитного поля на различные нефтепродукты в том числе и на дизельное топливо [20-40].

В ряде исследований установлено [21 – 23], что магнитное поле положительно влияет на набухание глинистых частиц, которое приводит к увеличению коэффициента вытеснения углеводородов ($\approx 30\%$).

Магнитное поле использовалось для удаления нормальных парафиновых углеводородов в нефти и парафиновых отложений в нефтепроводах [34-36].

В работах [14, 15] рассмотрено воздействие магнитного поля на коэффициент поверхностного натяжения бензинов (рисунок 1.5). По мнению авторов, этот коэффициент снижается при магнитной обработке.



1 – секции электромагнита; 2 – топливный трубопровод; 3 – генератор тока.

Рисунок 1.5 – Схема прибора для магнитной обработки бензина

Устройство состоит (рисунок 1.5) из отдельных секций 1, трубопровода 2 из диамагнитного материала и генератора тока 3. К генератору автомобиля подключен электромагнит, который имеет 6 секций. В указанных работах говорится о

возможности электрического сопротивления в секциях электромагнита, в зависимости от скорости движения топлива. Недостатком является однонаправленность потока топлива и силовых линий магнитного поля.

Далее представлено [16, 40] несколько устройств, разработанных в 90-х гг., для магнитной обработки моторного топлива (рисунки 1.6-1.7), каждое из которых имеет свои характерные достоинства и недостатки.

Представленное на рисунке 1.6 устройство [16] состоит из топливопровода 1 с катушкой 2, электрической обмотки 3, 4 – источника питания, наружного магнитопровода, изготовленного из ферромагнитного кожуха 5, с торцевыми ферромагнитными шайбами 6.

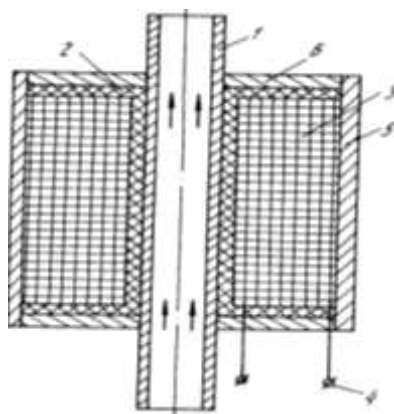


Рисунок 1.6 – Устройство для магнитной обработки жидких топлив

Недостатком является сложность изготовления полого кожуха из ферромагнитного материала с монтажом на его торцах ферромагнитных шайб.

В работе [40] осуществляется воздействие электромагнитным полем на поток топлива (рисунок 1.7). Поле создается вдоль параллельно расположенной пары электродов согласно равенству $\frac{L}{D \cdot 2} = \frac{Kt}{U \cdot f \cdot 2}$.

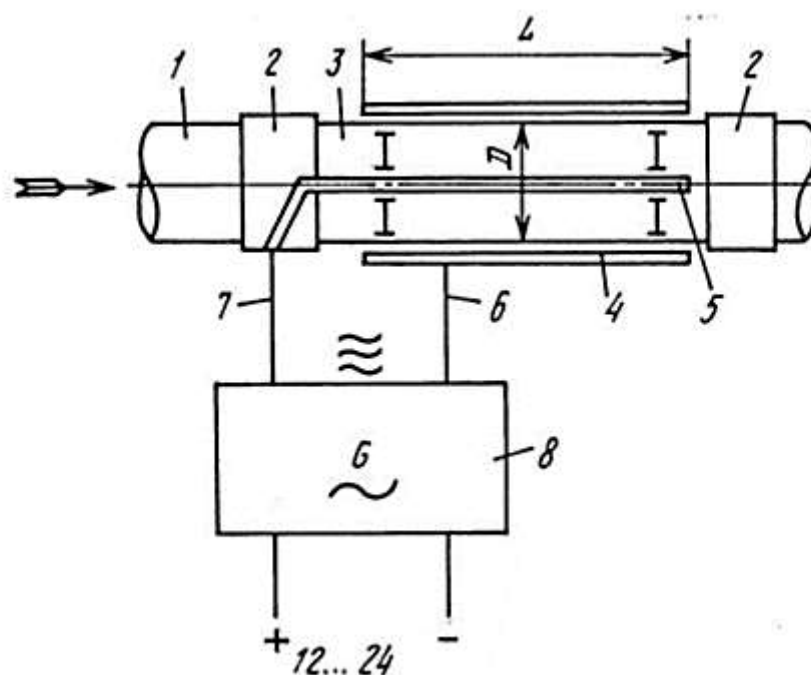
где: D - диаметр топливопровода (7,5-10 мм);

L - длина участка топливопровода в зоне воздействия (1200-1600 мм);

U - напряжение на электродах (12-600 В);

f - частота колебаний электромагнитного поля (10-100 Гц)

Kt - коэффициент качества топлива (0,8-1,0).



1, 3 – топливопровод; 2 – хомут; 4, 5 – внешний и внутренний электроды соответственно; 6 и 7 – провода питания; 8 – узел электропитания

Рисунок 1.7 – Схема обработки топлива

Использование подвижного электромагнитного поля в значительной степени ограничивает область применения данного способа обработки.

Известны катализаторы, увеличивающие воздействие электромагнитного поля [41], изготовленные из магнитных или немагнитных материалов, которые, активно влияют на горючую смесь перед впрыском в двигатель. Воздействие осуществляется в два этапа. На первом в специальной камере, заполненной гранулированным катализатором и топливом, производится нагрев до 70 – 80 °С. На втором – в другой камере производят воздействие электромагнитным полем 1 - 2 Тл в присутствии катализатора в течении 40 – 90 с. Утверждается, что удастся снизить содержание монооксида углерода в 5-6,6 раз, оксидов азота в 2 раза и ароматических соединений в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания бензола в 5-8 раз, толуола 3-5 раз.

По данным [37] последовательная установка по ходу движения топлива по топливопроводу двух групп постоянных *Nd-Fe-B* магнитных систем, приводит к

экономии углеводородного топлива в 1,5 раза. В работе автор не описывает причинно-следственные связи экономии топлива.

Установлено [42], что при работе дизельных двигателей на топливе, обработанном электромагнитным полем с применением катализаторов, наблюдается снижение выбросов оксида углерода более чем на 20 %, при одновременном увеличении уровня выброса углеводородов на 4 % и оксидов азота – на 20 %. Зафиксировано снижение расхода около 5 %. Однако большинство исследователей отмечают нестабильность полученных результатов.

В работах [24-30, 43] установлено, что разброс значений экономии топлива при использовании магнитного поля в различных работах колеблется в пределах от 2 % до 20%, в зависимости от скорости истечения топлива. В работах [24, 43] описывается увеличение термического коэффициента КПД ДВС на 5%. Кроме того, авторы [24] утверждают, что при росте уровня воздействия с 0,8 до 1,1 Тс эффект усиливался, при этом наибольший результат достигается на менее энергозатратных режимах работы ДВС. Из работы [30] следует, что при одинаковом электромагнитном воздействии по мере увеличения процентного содержания биодизельного топлива (0-20%) эффект от обработки возрастал. Однако авторами не уточнялось это связано с электромагнитным воздействием или из-за наличия в составе биодизельного топлива дополнительно кислорода.

В силу противоречивых данных сложно сделать вывод о применимости данного способа, однако из него следует, что эффект от его применения напрямую зависит от мощности электромагнитного поля и скорости истечения топлива через него. Также остается не ясным, как рост термического коэффициента КПД ДВС сказался на уровне выбросов оксидов азота с отработанными газами («дилемма Дизеля»).

В последние годы основное внимание уделяется проблеме снижения антропогенного воздействия на окружающую среду. Так, в некоторых работах [25, 31] подчеркивается, что обработанное в магнитном поле нефтяное топливо обуславливает некоторое сокращение в отходящих газах вредных веществ. Так, выбросы монооксида углерода СО сократились на 5 - 29%, углеводородов C_xH_y

снизились на 26-29%, в то же время содержание оксидов азота NO_x , по одним данным, увеличилось на 18% [23], по другим не изменялось [32].

В работе [33] предложено оптимальную величину магнитной индукции считать 0,4 Тл, которая, по мнению авторов, позволит повлиять на качество и эксплуатационные свойства дизельной фракции. Однако не приведено, какой конкретно дизельной фракции, не указано направление вектора магнитной индукции, не сказано, как изменилось качество, какие именно свойства дизельной фракции изменились и в какую сторону.

Вопросом влияния воздействия электрического поля на топливо занимался Е.М. Захватов [44]. Он обрабатывал углеводородное топливо электрическим полем напряженностью 200 – 300 В/м. Высоковольтная обмотка катушки зажигания служила источником питания. Были предложены устройства, которые, по мнению автора, способны улучшить экономические и экологические характеристики ДВС, работающих на обработанном углеводородном топливе [45].

В работе [46] исследовано влияние напряженности электрического поля на основные физические характеристики топлива (испаряемость, температура вспышки, кинематическая вязкость). Было обнаружено изменение вышеперечисленных параметров, однако конкретные данные не приводились, при этом отмечено, что с течением некоторого времени эти параметры возвращались к исходным значениям.

В работах [47, 42] показано, что при не высоких частотах переменного электрического поля (100 - 700 Гц) в некоторых жидкостях (ацетон, декан) изменялась их относительная вязкость (рисунок 1.8). Значительное изменение вязкости характерно для тех углеводородов, которые подвергались воздействию переменного электрического поля, чем под действием постоянного электрического поля.

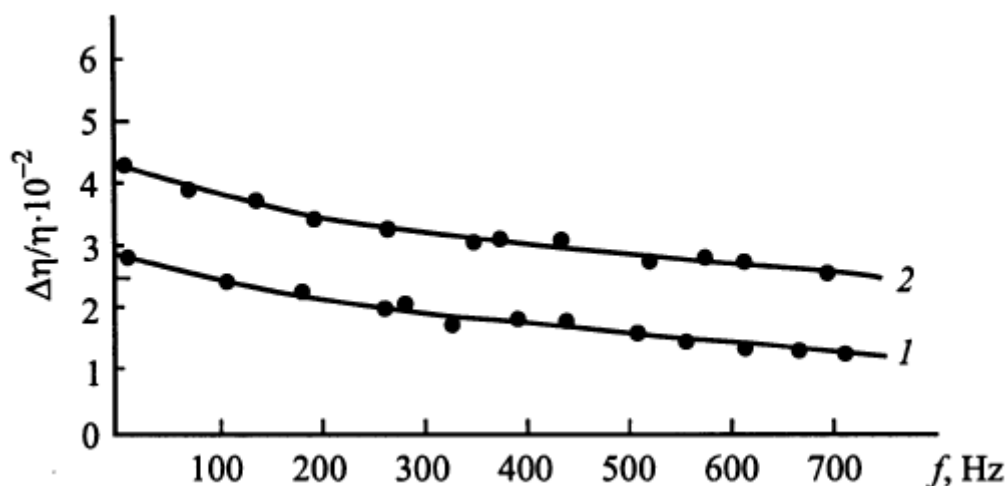


Рисунок 1.8 – Относительное изменение вязкости декана от частоты:

1 – 200 В/м, 2 – 400 В/м

Установлено [45], что для ДВС, работавших на топливах, обработанных электромагнитным воздействием, характерно снижение дымности на 20 %, а также повышение экономии топлива 10 - 20 %, а при эксплуатации турбореактивных двигателей 15 - 35 %.

Изменить вязкость и структуру топлива позволяет его обработка путем пропускания между двумя электродами [48]. В результате перемещения в межэлектродном пространстве топливо поляризуется. Такое топливо способно активировать процессы горения в ДВС и эксплуатировать их на обедненных смесях, приведет к уменьшению его расхода и снижению токсичности отработавших газов.

В устройстве [44] дизельное топливо подвергают вторичной обработке электрическим полем в камере, в которой вода, сконденсированная после первой обработки, переходит в парообразное агрегатное состояние, испарившийся пар распадается на водород и кислород, поступающие в цилиндры в смеси с топливом и улучшающие процесс его горения. Аналогичные процессы исследованы в устройствах [49 – 51], где улучшается процесс горения и полнота сгорания.

Электрообработку топлива [52] осуществляют с помощью электродов с высоким напряжением (20 000 - 25 000 В). Устройство устанавливается вертикально так, чтобы трубка отвода топлива в бак находилась в верхнем

положении. Под действием разности электропотенциалов молекул топлива и электродов они обмениваются электронами, образуются разноименные диполи и ионы. Часть выпавших диполей, проходят через полупроницаемую мембрану и дополнительный электрод, выводятся в бак. Ориентированные и положительно заряженные молекулы топлива подаются на диспергирование, после этого смешивают с воздухом, гомогенизируют и направляют воздушно-топливную смесь в камеру сгорания.

Известны устройства [53-57], где топливо обрабатывают электрическим или магнитным воздействием, а также их комбинацией. При этом экономия топлива составит 15 – 20%, а за счет более полного сгорания сократятся выбросы вредных веществ в отходящих газах [55]. Предлагается [56,57] на поверхность электродов для дополнительной активации предварительно разрушенных молекул топлива и диссоциации водорода нанести катализатор, изготовленный из металлов 7 группы (марганец *Mn*, технеций *Tc* и рений *Re*). Устройство содержит диэлектрический корпус, электроды, покрытые катализатором, установленные с зазором и соединенные с генератором, снабженным модулятором частоты. Такой вид обработки называется электрокаталитическим, он позволяет обрабатывать топливо, находящееся в межэлектродном зазоре высокочастотными модулированными полями.

Для получения мелкодисперсной топливной смеси, а также улучшения ее свойств используется электростатическая обработка, которая дешевле и проще [58]. В результате ее использования сокращается расход бензина, увеличивается мощность двигателя 16-20%. Однако высокое напряжение, необходимое для зарядки топлива создаёт опасность искры.

Воздействие электромагнитных полей может быть ещё более эффективным при высокой температуре. Так, в работе [59] представлено комбинирование электромагнитного способа с нагревом. Предварительный подогрев жидких углеводородов, с помощью регулируемого устройства, до состояния пара облегчает воздействие электромагнитных импульсов (параметры обработки: электромагнитные импульсы ≈ 1 МВт, частота $1 \approx$ кГц, время обработки менее 1 нс)

на углеводороды. Спиралеобразное движение паров в емкости для обработки, обусловленное углом ввода их в емкость, увеличивает время воздействия. Охлаждение обработанных паров до состояния жидкой фазы посредством регулируемого устройства позволяет получить обработанные углеводороды в готовом для использования виде.

Несмотря на положительное влияние электромагнитной обработки, в различных источниках встречаются противоречивые данные ее эффективности. Однако, всех их объединяет повышенная энергозависимость, не безопасность использования и дороговизна исполнения.

1.3 Ультразвуковая обработка дизельного топлива

Ультразвуковые колебания изменяют ход протекания химических реакций, изменяют физико-химические свойства веществ и жидкостей, положительно влияет на состав, экологичность, коксуемость топлива и токсичность отработанных газов [60-63], способствуют распаду длинных углеводородных цепей, частичному распаду циклических и ароматических соединений [60, 64-65].

Характер протекания процесса будет зависеть от параметров ультразвука: времени озвучивания, интенсивности, частоты колебаний и т.д. В зависимости от параметров ультразвуковой обработки возможно увеличение скорости процессов в несколько сотен и даже тысяч раз [61].

Многие работы 50-60-х годов прошлого века посвящены изучению влияния ультразвуковых колебаний на свойства нефти, парафинов, масел [66-69]. Область применения ультразвуковой обработки нефтесодержащих продуктов в последнее время значительно расширена [70-73].

Озвучивание нефти при температуре 430 °С и давлении 20 кг/см² [66] привело к снижению выхода газа и бензина фракций и к увеличению дизельных фракций $\approx 19,5\%$.

Дальнейшее повышение температуры на 20 °С и давления на 20-30 единиц приводит к увеличению выхода бензина, увеличению газа, незначительное увеличение дизельных фракций.

Ряд исследователей [67] использовали ультразвуковые колебания для депарафинизации масел и обезмасливания парафинов. Ультразвук положительно влиял на скорость фильтрации суспензий.

В работе [68] успешно применен ультразвук по очистке труб от парафина. Для этого использовались магнитострикционные излучатели (18 кГц) и пьезоэлектрические излучатели (60 кГц). Замечено, что при увеличении интенсивности ультразвука скорость очистки труб возрастала.

В работе [69] улучшить качество нефти удалось за счет использования ультразвука (15 – 20 кГц) в процессе обессоливания и обезвоживания нефти, за счет чего сократилось время отстоя.

Авторы [74] утверждают, что при длительном воздействии ультразвука нарушаются углеводородные связи в парафине, в результате изменяются его физико-химические свойства.

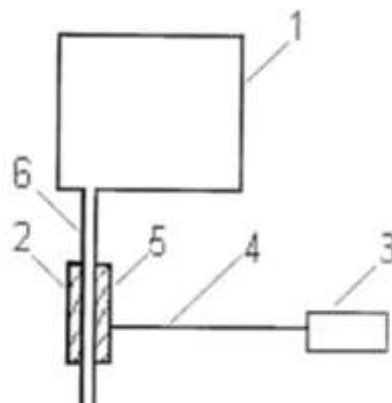
Разработан [75] метод обработки нефти ультразвуковым диспергатором. Исследователи пришли к выводу, что температура замерзания такой нефти снижается на 6 – 7 °С, а время релаксации наоборот увеличивается, что дает возможность транспортировать нефть на большие расстояния.

В [76, 77] разработано ультразвуковое устройство для обработки топлива, которое позволило экономить топливо на 3-7,5%, кроме того улучшаются и другие показатели. Снижается дымность на 17%, увеличивается коэффициент избытка воздуха около 15%.

В работе [78] изучалась работа двигателя на обработанном ультразвуком биотопливе на основе рапсового и сафлорового масел. Результаты работы оказались схожими по таким показателям - эффективная мощность, максимальный крутящий момент. Кроме того, дымность при этом снизилась на 19%.

В работе [79-82] дизельное топливо смешивали с растительным маслом и подвергали озвучиванию с частотой более 40 кГц, в результате чего смесевое топливо получилось более однородное и мелкодисперсное.

В [83, 84] представлено устройство для обработки ультразвуком биотоплива и дизельного смесевое топлива в топливной системе трактора (рисунок 1.9).

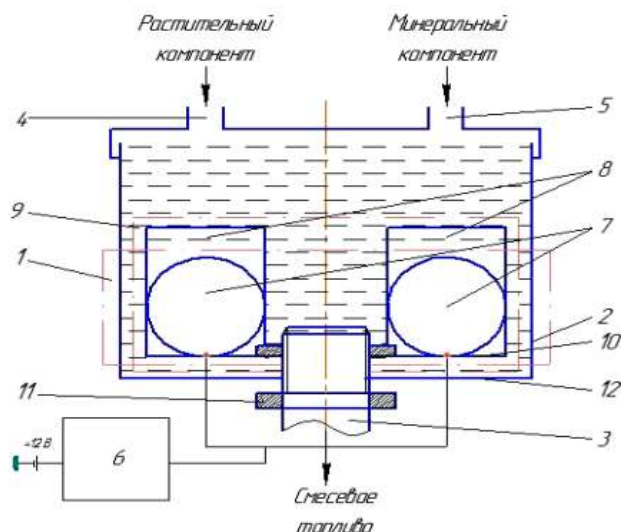


1 – топливный бак; 2 – излучатель ультразвука; 3 – генератор ультразвука; 4 – провода; 5 – стальной корпус; 6 – топливопровод.

Рисунок 1.9 - Устройство для ультразвуковой обработки биотоплива

В работах [72, 80] предлагается двухтопливная система питания дизеля для смешивания дизельного топлива с биотопливом на основе соевого масла и обработка его ультразвуком. Ультразвуковой смеситель позволяет получать смесевое топливо из дизельного топлива и соевого масла и обрабатывать их ультразвуком с частотой излучения 25 кГц (рисунок 1.10).

Установлено, что ультразвуковая обработка положительно влияет на свойства дизельного смесевое топлива. При работе дизельного двигателя на таком топливе тягово-скоростные показатели улучшаются на 2-3%, а экологические на 6-8%. Такое озвучивание приводит к уменьшению удельного эффективного расхода дизельного смесевое топлива. Однако, при этом происходит снижение мощности двигателя.



1 – ультразвуковой излучатель; 2- корпус; 3 – выходной канал; 4, 5 – выходные каналы; 6 – блок управления; 7 – пьезоэлемент; 8 – направляющие; 9 – крепеж; 10 – основание; 11 – штуцер; 12 – днище.

Рисунок 1.10 – Ультразвуковой смеситель компонентов дизельно –соевого топлива

В данной работе используют готовое смесевое топливо, что может отрицательно сказаться на качестве топлива. Кроме того, используемая ультразвуковая обработка зависит от бортовой энергосистемы, возможна утечка топлива из уплотнителей системы электрического ультразвукового излучателя. А при пониженных температурах происходит быстрое разделение фракций в смесевом топливе, при котором масло оседает, и для его размешивания необходимо начать движение на баке меньшего объема.

Исследования показали [85], что при работе дизельного двигателя на смесевом топливе (в состав смесевого топлива входит масло редьки и дизельное топливо) происходит незначительное ухудшение его показателей, при этом обработка биоминерального топлива ультразвуком положительно влияет на его показатели.

Согласно данным [64] обработка дизельного топлива ультразвуком приводит к улучшению коэффициента фильтруемости, снижению вязкости, снижению температуры фильтруемости и температуры застывания, увеличению цетанового

числа; увеличению межремонтного периода эксплуатации двигателя и топливной системы, снижению расхода топлива.

Ультразвуковая обработка дизельного топлива применяется в совокупности с другими методами обработки топлива. Например, в работе [86] наряду с ультразвуком используется электрообработка, что приводит к снижению кинематической вязкости на 2,5 %, температуры вспышки – на 4 %, поверхностного натяжения – до 5 % и повышению цетанового числа топлива на 6 %.

В этой связи необходимо установить возможность и параметры ультразвуковой обработки без применения электроизлучателей.

1.4 Комбинированная обработка дизельного топлива

Одним из видов комбинированной обработки дизельного топлива является комплексное воздействие на обрабатываемую среду в результате которой образуется эффект кавитации. В настоящее время под кавитацией понимают образование пузырьков (по-другому их называют каверны или пустоты) в жидкостях и последующее их разрушение. Кавитация может возникать из-за вибрации, шума, эрозии, света.

Автор утверждает, [64] что перед разрушением пузырьки на поверхности пульсируют, а затем исчезают за счет контакта с другими, находящимися рядом пузырьками. Установлено, что в жидкой среде обработанной ультразвуком появляются механические силы, напор в $1,01 \cdot 10^5$ МПа [70, 73, 65,].

В зависимости от причины возникновения кавитация бывает акустическая (возникает из-за прохождения акустической волны большой интенсивности), гидродинамическая (за счет снижения давления), электродинамическая, пьезоэлектрическая, магнитострикционная и механическая.

Для создания кавитации используют различные генераторы, такие как гидродинамические, электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные, механические. Самыми распространенными являются гидродинамические генераторы [87].

Принцип работы этих генераторов основан на колебании резонирующих элементов от потока жидкости [88]. В качестве элементов выступают пластины, стержни различных размеров и конфигураций. Топливо или любая другая жидкость с большой скоростью при выходе из сопла попадает на резонирующий элемент и возникает пульсация и кавитация.

Известны гидродинамические устройства с вращающимися и неподвижными рабочими органами, со струйными кавитаторами, и их комбинация [89]. Примером таких конструкций является труба Вентури.

В работе [90] изучено влияние одновременно ультразвука и электрического поля (напряженность составила 100 В/м). Обработка электромагнитным полем дает снижение кинематической вязкости 2,5 %, температуры вспышки и поверхностного натяжения на 4 % и 5 % соответственно. Однако, одной электромагнитной обработки недостаточно для диспергирования коллоидных частиц. Дальнейшую обработку производили комбинированно с ультразвуковой. Устройство установлено перед дизельным двигателем, при обработке топлива зафиксировано снижение потребления топлива до 5 %, температуры отработанных газов – 15 %. При четырехкратной обработке снижение расхода – 15 %. На рисунке 1.11 показана зависимость максимального и среднего диаметров топливных частиц от времени обработки в ультразвуковой установке УЗДН-2Т. Частота озвучивания составляла 22 кГц. Оптимальное время обработки 100 мл топлива – 60 с.

Недостатком данного устройства является отсутствие возможности регулировки и настройки уровня воздействия под разные виды дизельного смесового топлива.

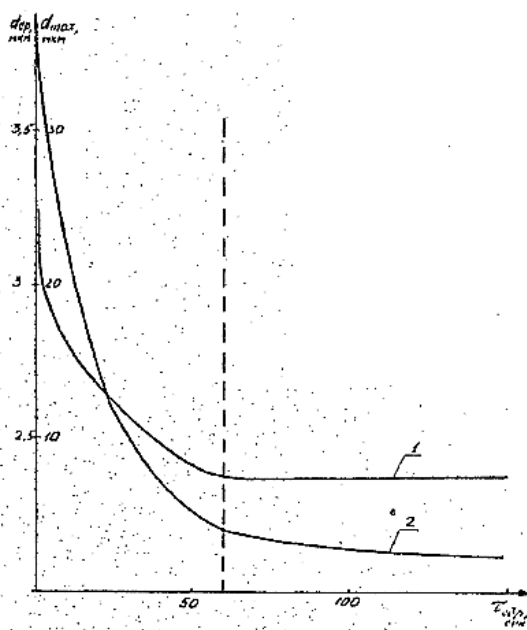


Рисунок 1.11 – Зависимость максимального – 1 и среднего – 2 диаметров частиц в дизельном топливе от времени обработки в ультразвуковой установке УЗДН-2Т

Другим вариантом комбинированной обработки дизельного топлива является механическое воздействие.

Так уже в 40-х гг. прошлого века появились данные о возможности влияния механических воздействий на разрыв углеводородных цепочек [91]. Установлено, что разрыв углеводородных цепочек происходит за счет механических воздействий, без применения специальных химических реагентов. Такое явление назвали механохимический процесс или эффект.

Механохимический процесс или механовоздействие может возникать за счет: прессования, вальцевания, прокатывания, растирания, диспергирования, продавливания через капилляры и щели. При значительном механовоздействии в молекулах рвутся ковалентные связи с высвобождением энергии более 400 кДж/моль [91].

Начиная с 60-х годов XX века изучение механоактивации все больше затрагивает углеводородные топлива и моторные масла. Установлено, возможны разрывы молекулярных цепей, которое приводит к изменению составов и свойств топлив и масел.

Одним из способов повышения качества дизельного топлива [92] является

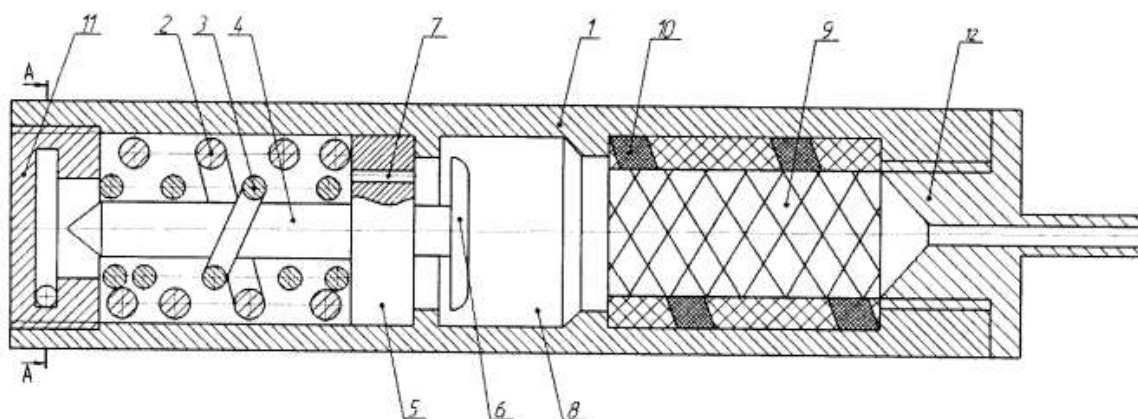
обработка водо-топливной эмульсии в режиме импульсной акустической кавитации в роторном аппарате с модуляцией потока. В ходе обработки топлива, происходит его очистка от механических примесей, смол, парафинов. Отличительная особенность способа в том, что грубодисперсная водо-топливная эмульсия подвергается многократному глубокому диспергированию и интенсивному перемешиванию в данном аппарате. Однако, роторный аппарат с модуляцией потока – сложное устройство, имеющее зазоры с малым уровнем допуска. К тому же, технологически должен устанавливаться в стационарном месте, т.е. не допускает установки на автотракторную технику.

Примером механовоздействия является смеситель-активатор Ю.В. Воробьева [93]. В данном смесителе установлены камеры, которые осуществляют кинематическое и кавитационное воздействие на топливо. За счет своей конструкции, смеситель позволяет смешивать топливо с присадками, а также изменять структуру исходного топлива за счет нарушения межмолекулярного взаимодействия. Топливо получается «активированным», т.е. в его составе уменьшается доля тяжелых углеводородов и увеличивается легких, что подтверждается хроматографическими исследованиями. Концентрация гексана, гептана повысилась до 37 %. В бензине содержание октаноопределяющего толуола повышалось до 16 %, авиакеросине – нонана и декана – до 21 %. Кроме того, активатор способен работать на мазуте, рапсовом масле [94].

В результате эксплуатации дизельных двигателей с активатором топлива замечено снижение расхода дизельного топлива, снижение выбросов отработанных газов, снижение серы на с 0,03 до 0,02 %, смол 7 до 0,8 мг/100 мл [95].

Смеситель-активатор Ю.В. Воробьева позволяет получить гидродинамическую кавитацию, но акустическая кавитация дает более эффективные результаты по улучшению физико-химических свойств топлива.

Известен комбинированный статический смеситель-активатор для получения водно-биотопливной эмульсии (рисунок 1.12) [96].



1 – корпус; 2 и 3 – винтовые элементы; 4 – цилиндрический стержень; 5 – цилиндрическая вставка; 6 – плита со скругленными по радиусу краями; 7 – каналы; 8 – промежуточная камера; 9 – пространственная решетка; 10 – кольцевые магниты; 11 – сопло с тангенциальным вводом; 12 – торцевая крышка;

Рисунок 1.12 – Схема основных элементов смесителя для получения водно-биотопливной эмульсии

Комбинированный статический смеситель-активатор с гидродинамической кавитацией и магнитным воздействием, обладает лучшими показателями по воздействию на топливо по сравнению с предыдущим активатором. Но, в его конструкции есть ряд недостатков, а именно, отсутствие возможности внесения изменений без преобразований конструкции, магнитная обработка топлива менее эффективна в сравнении с ультразвуковой.

Таким образом, необходимо установить закономерности применение комбинирования ультразвуковых колебаний с многофакторной обработкой и добавок на основе биодизельного топлива.

1.5 Выводы и задачи исследований

Анализ литературных источников показал, что наиболее результативными являются устройства, позволяющие обрабатывать топливо непосредственно перед

попаданием в камеру сгорания.

Из рассмотренных способов обработки перспективным представляется использование ультразвуковых колебаний. Однако, в ряде исследований используются готовые ультразвуковые электроизлучатели, которые при высокой цене имеют довольно ограниченный срок службы и для их применения необходимо использовать дополнительное электрооборудование (генератор ультразвуковых колебаний, который требует обслуживания и отвода тепловой энергии).

Комбинированная обработка дизельного и дизельного смесового топлива включает в себя все преимущества рассмотренных ранее вариантов. Она дает возможность варьировать способы воздействия, что делает это направление приоритетным и востребованным в настоящее время. Однако, известные аналоги не позволяют добиться поставленных задач в силу их специфики.

Одно из таких направлений по улучшению качества дизельного топлива является комбинированная обработка топлива волновым воздействием в совокупности с добавлением биодизельного топлива на основе некондиционных растительных масел и растительных масел непищевого происхождения. Комбинированная обработка позволяет изменять структуру и свойства исходного топлива без использования реагентов, а биодизельное топливо улучшить экологические показатели качества топлива. Комбинирование ультразвуковых колебаний с многофакторной обработкой позволит добиться требуемого результата.

Таким образом, на основании литературного обзора сформулированы следующие задачи:

1. Обосновать способ повышения эффективности получения и обработки дизельного смесового топлива.
2. Обосновать конструкцию ультразвукового модуля комбинированного устройства для получения и улучшения качества дизельного смесового топлива, с возможностью встраивания в топливную систему автотракторной техники.

3. Установить закономерности, повышающие эффективность работы ультразвукового модуля комбинированного модуль-смесителя при обработке топлива.

4. Провести экспериментальные исследования топливной аппаратуры, определить технико-экономические и экологические показатели дизельного двигателя при работе на дизельном и дизельном смесевом топливе, обработанном в комбинированном модуль – смесителе.

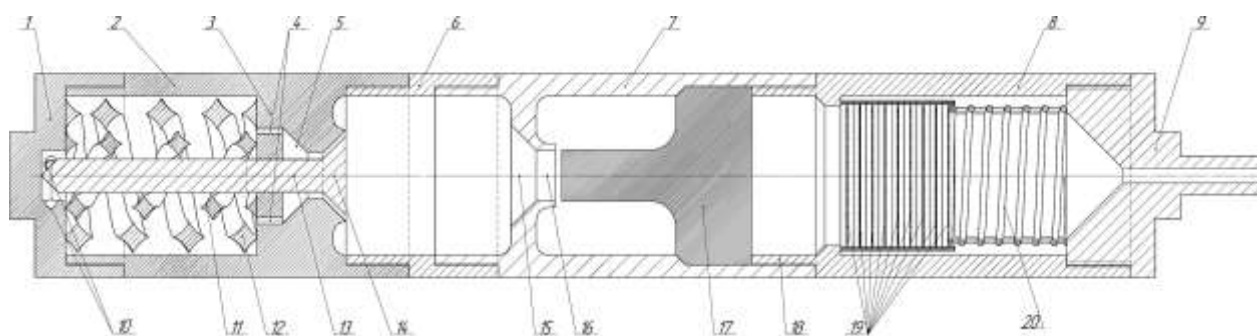
5. Оценить экономическую эффективность от реализации результатов исследований.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДИЗЕЛЬНОГО СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

2.1 Конструкция комбинированного модуль-смесителя с ультразвуковым модулем для обработки дизельного смесевого топлива

Из литературного обзора установлено, что для улучшения качества дизельного топлива необходимо использовать дизельное смесевое топливо, полученное при помощи смешения в комбинированном модуль-смесителе дизельного и биодизельного топлив с одновременной ультразвуковой обработкой.

На рисунке 2.1 – 2.2 представлены схема и 3d модель модуль-смесителя, в котором инициируется многофакторное воздействие на смесь (гидродинамическое, кавитационное, ультразвуковое) [105].



1 – крышка, 2 – корпус первого модуля, 3 – перегородка, 4 – каналы, 5 – камера промежуточная, 6 – корпус второго модуля, 7 – корпус третьего модуля, 8 – корпус четвертого модуля, 9 – крышка торцевая, 10 – тангенциальный ввод, 11, 12 – винтовые элементы, 13 – стержень цилиндрический, 14 – вставка цилиндрическая, 15 – выемка конусообразная, 16 – сопло прямоугольное, 17 – пластина, 18 – паз, 19 – решетки, 20 – пружина.

Рисунок 2.1 – Схема модуль-смесителя

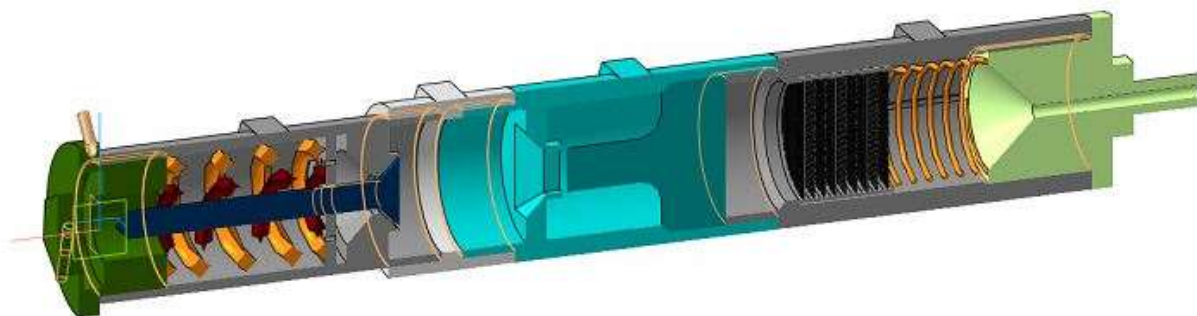


Рисунок 2.2 – 3d модель модуль-смесителя

Комбинированный модуль-смеситель состоит из четырех модулей-смесителей, образующих корпус устройства. Слева располагается вводная крышка модуль-смесителя 1 с тангенциальными вводами 10. Крышка 1 наворачивается на корпус 2 первого модуль-смесителя. Внутри корпуса 2 расположены внешний и внутренний винтовые элементы 12 и 11 соответственно, имеющие разнонаправленную навивку. Цилиндрический стержень 13 плотно посажен в винтовой элемент малого диаметра. Для регулировки зазора, между корпусом 2 и конусной части стержня 14 на стержне и корпусе выполнено резьбовое соединение. Перегородка 3, в которую упираются винтовые элементы, имеет проходные каналы 4 малого диаметра. Центры входных отверстий каналов 4, направляющих топливо в промежуточную камеру 5, располагаются в зазоре между винтовыми элементами 11 и 12. В корпус 2 первого модуль-смесителя вкручивается корпус 6 второго - промежуточного модуля. В корпус 6 второго - промежуточного модуль-смесителя вкручивается корпус 7 третьего ультразвукового модуль-смесителя. Вход в третий модуль-смеситель осуществляется через конусообразную выемку 15, переходящую в прямоугольное сопло 16, направляющее поток жидкой среды на резонансный колебательный элемент - пластину 17. Пластина 17 входит в паз 18 в корпусе 7 и прижимается вкручивающимся в корпус 7 третьего модуль-смесителя корпусом 8 четвертого модуля-смесителя. Внутри корпуса 8 расположены однотипные решетки 19, имеющие три паза под углом 120° . Решетки прижимаются пружиной 20, фиксирующейся торцевой крышкой 9, имеющей конусообразную выемку для формирования выходного потока.

Техническая задача комбинированного модуль-смесителя состоит в повышении эффективности смешения и гомогенизации, структурирования и активации топлив путем совершенствования конструкции использованием быстро заменяемых базовых модулей и ультразвукового излучателя, обеспечивающих направленное изменение состава и свойств обрабатываемого топлива.

Решение поставленной задачи достигается в комбинированном модуль-смесителе прямоточного типа. Корпус устройства состоит из последовательно соединенных модуль-смесителей, сочлененных между собой резьбовым соединением. Ввод топлива осуществляется через вводную крышку с тремя тангенциальными входами. Первый модуль-смеситель имеет два винтовых элемента с противоположной навивкой. Винтовые элементы доходят до стенки корпуса модуль-смесителя, в котором есть сквозные каналы, направляющие поток топлива в промежуточную камеру. Сквозь стенку корпуса и внутренний винтовой элемент проходит цилиндрический стержень с резьбой, выполненный заодно с конусообразной вставкой. Имеется возможность регулировки зазора между конусообразной вставкой и ответной частью в корпусе первого модуль – смесителя.

Второй модуль-смеситель представляет из себя промежуточную камеру. Третий модуль-смеситель (рисунок 2.3) начинается с заборной части с воронкообразным срезом, для лучшего забора топлива, переходящую в прямоугольное сопло. Через которое, топливо направленным потоком подается на пластину из высоколегированной стали, имеющую заостренные края. Под действием потока пластина совершает колебательные движения с высокой частотой, с образованием кавитационных облаков.

В четвертом модуль-смесителе содержится смесительный элемент, составленный из перекрещивающихся решеток маленького сечения и заканчивающейся торцевой крышкой, которая имеет конусообразную выемку для формирования потока на выходе.

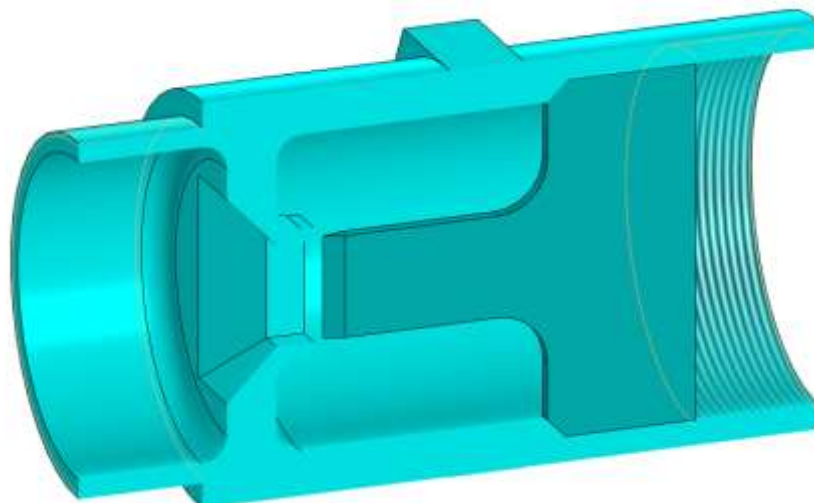


Рисунок 2.3 – 3d модель ультразвукового модуля

Использование комбинированного модуль-смесителя, содержащего основные последовательно соединенных статических модуль-смесителя, позволяет получить активированное, высоко гомогенизированное и структурированное топливо.

Комбинированный модуль-смеситель работает следующим образом. Топливо подается через крышку с тангенциальным вводом 10, поток завихрится и приобретает кинематическую энергию. Внешние и внутренние винтовые элементы 11 и 12 усиливают завихрение потока и интенсифицируют перемешивание.

В первом модуль-смесителе топливо расслаивается при переходе от одного элемента к другому, а в пределах одного винтового элемента течет по двум полукруглым винтовым каналам, в противофазе, это приводит к множественным локальным квазиударным процессам, которые способствуют дроблению и смешиванию топлива. В конце первого модуль-смесителя перед перегородкой 3, содержащей каналы 4 образуется вихревая зона, формирующая псевдокипящий слой.

В каналах 4 повышается скорость движения жидкости. Ударяющейся поток о плиту корпуса 2 образует турбулентную область и попадает в зазор между корпусом 2 и конусной частью 14 цилиндрической вставки. Это приводит к повторному ускорению потока, который выстреливает в промежуточный модуль-смеситель 6.

Скругленные по радиусу края корпусов 2 и 7 предназначены для направления движения образующихся потоков, что позволяет ликвидировать застойную зону.

На выходе из модуль-смесителя 2 имеется конусообразная выемка 15 для формирования потока, которая переходит в прямоугольное сопло 16, направляющее поток топлива на резонансный колебательный элемент – пластину 17. Поток воздействует на грань пластины, вследствие чего она совершает колебательные движения высокой частоты. При пересечении пластины струей топлива возникает кавитационная область, отличающаяся от предыдущей характеристиками в зоне срывного течения за пластиной. Кавитация носит акустический гидродинамический характер, обусловленная интенсивным срывом топлива с поверхности пластины в ходе движения топлива. Следует отметить, что акустическая и гидродинамическая кавитации возникают одновременно в одном потоке и дополняют друг друга. Само по себе схлопывание пузырьков служит источником выделения звуковой энергии.

В четвертом модуль-смесителе происходит многократное рекомбинация смешиваемых компонентов с помощью решеток 19. Происходит многократное разделение и воссоединение потоков в пересекающихся направлениях. Активный массообмен приводит к высокой степени гомогенизации топлива. Формирование выходного потока заканчивается в конусообразной выемке в торцевой крышке 9.

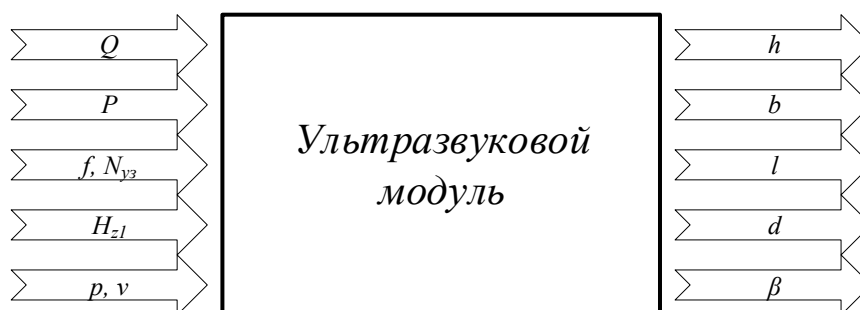
Основные преимущества предлагаемого устройства по сравнению с известными решениями: наличие модульной структуры, позволяющей при необходимости точно вносить изменение в конструкцию, добиваясь показателей, при которых будет наблюдаться максимальная рекомбинация и преобразование структуры топлива. Конструкция перехода из первого модуль-смесителя во второй позволяет усилить процесс перемешивания обрабатываемого топлива. Анализ литературных источников показал, что использование в устройстве генератора ультразвуковых волн на базе резонансного колебательного элемента лишит ультразвуковой излучатель недостатков, присущих ультразвуковым электроизлучателям и позволит добиться требуемых физико-химических свойств обрабатываемого топлива. Работающей в потоке топлива резонансный

колебательный элемент, воздействует на весь слой обрабатываемого топлива.

Таким образом, в комбинированном модуль-смесителе помимо смешивания топлива создаются условия для дробления и рекомбинации длинных углеводородных цепей, изменения структуры и свойств обрабатываемых топлив.

2.2 Математическое моделирование ультразвукового модуля в комбинированном модуль-смесителе

На рисунке 2.4 представлены основные входные (полученные на основе предварительных экспериментальных данных на лабораторной установке) и выходные параметры ультразвуковой обработки. Зная некоторые параметры протекающего топлива и предварительные параметры ультразвуковой обработки, необходимо рассчитать параметры ультразвуковой пластины: высоту и ширину сопла, длину и толщину ультразвуковой пластины, угол заточки пластины. Значимость этих параметров см. [100].



Q – расход жидкости, м³/с; P – давление, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с, $N_{уз}$ – мощность излучателя, Вт; H_{zl} – частота колебаний, Гц; h – высота сопла, м; b – ширина сопла, м; l – длина ультразвуковой пластины, м; d – толщина пластины, м; β – угол заточки пластины, °.

Рисунок 2.4 – Основные параметры ультразвуковой обработки

При расчете параметров ультразвукового модуля комбинированного модуль-смесителя были сделаны следующие допущения:

— высота сопла равна высоте генератора ультразвуковых колебаний (пластины);

— генератор ультразвуковых колебаний находится на расстоянии 1 мм от сопла;

— толщина пластины не может быть больше ширины сопла [101].

Из гидравлики известно (см., например, [102]),

$$F = \frac{Q}{U}, \quad (2.1)$$

где F – площадь сопла, м²;

Q – расход жидкости м³/с;

U – скорость истекающей жидкости, м/с.

В (2.1) скорость истекающей жидкости можно определить формулой:

$$U = \mu \sqrt{2gH}, \quad (2.2)$$

где μ – коэффициент расхода

g – ускорение свободного падения, м/с²

H – гидродинамический напор, Па.

При этом,

$$\frac{2P}{\rho} = 2gH, \quad (2.3)$$

Учитывая 2.3 формула 2.2 примет вид:

$$U = \mu \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (2.4)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

P – давление в центре тяжести сечения потока, Па.

Из формулы для нахождения числа Рейнольдса коэффициент расхода равен:

$$\mu = \frac{Re}{25.2} = \frac{U \cdot D}{\nu \cdot 25.2}, \quad (2.5)$$

где ν - кинематическая вязкость, м²/с;

D – диаметр сопла, $D = 2 \sqrt{\frac{F}{\pi}}$, м.

Если подставить 2.5 в 2.4, тогда после преобразования получим:

$$F = \pi \frac{(6.3 \cdot v)^2 \cdot \rho}{2 \cdot P} \quad (2.6)$$

С другой стороны, так как сопло имеет прямоугольную форму, его площадь равна:

$$F = h \cdot b, \quad (2.7)$$

где h – высота сопла, м;

b – ширина сопла, м.

Введем коэффициент $\lambda = \frac{b}{h}$, учитывающий геометрию сопла, и коэффициент $\lambda_1 = \frac{b}{d}$, учитывающий отношение между параметрами сопла и пластины (см. рисунок 2.5), где d – толщина пластины.

Если допустить, что сопло имеет квадратную форму, то

$$h = b = \sqrt{F}, \quad (2.8)$$

если прямоугольную, то

$$b = \lambda h, F = \lambda h^2, h = \sqrt{\frac{F}{\lambda}} \quad (2.9)$$

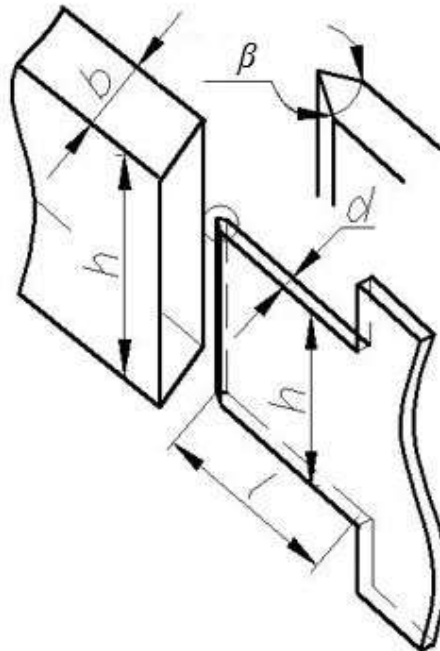


Рисунок 2.5 – Схема ультразвуковой пластины

Исходя из (2.6) и (2.9) получаем следующую систему:

$$\begin{cases} b = \lambda h, \\ \lambda h^2 = \pi \frac{(6.3 \cdot v)^2 \cdot \rho}{2 \cdot P}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Известно (см. [100]), что мощность ультразвукового излучателя определяется формулой:

$$N_{\text{уз}} = \frac{m}{2 \cdot 10^3 t} (U_2^2 - U_{\text{max}}^2), \quad (2.11)$$

где $N_{\text{уз}}$ – мощность ультразвукового излучателя, Вт;

m – масса жидкости, кг;

U_2 – средняя скорость частицы жидкости на участке перемещения пластины, м/с;

U_{max} – скорость движения жидкости при которой закачивается кавитация, м/с;

t – время перемещения частицы на пути S , с.

Значение t , U_2 , U_{max} определяются формулами:

$$t = \frac{1}{2 \cdot H_{\text{зр}}}, \quad (2.12)$$

$$U_2 = 4fH_{\text{зр}}, \quad (2.13)$$

$$U_{\text{max}} = U_2 \sqrt{\frac{1}{k_k + 1}} 4fH_{\text{зр}}, \quad (2.14)$$

где f – амплитуда колебания пластины, м;

$H_{\text{зр}}$ – резонансная частота ультразвука, Гц;

k_k – критическое число кавитаций, для дизельного топлива находится в интервале [1,05, 3,5].

Критическое число кавитаций описывается формулой:

$$k_k = \frac{H_{\text{нп}} - H_2}{H_2}, \quad (2.15)$$

где $H_{\text{нп}}$ – давление насыщенных паров дизельного топлива, $2 \cdot 10^4$ Па

H_2 – гидродинамический напор, истекающей из сопла излучателя, Па.

Учитывая 2.12, 2.13, 2.14 и уравнение 2.11 получаем следующую формулу для вычисления мощности ультразвукового излучателя:

$$N_{\text{уз}} = \frac{m \cdot 16f^2 H_{\text{зр}}^3 \cdot k_k}{10^3 \cdot (k_k + 1)}. \quad (2.16)$$

Известно (см. [100]), что:

$$f = \frac{P_{y5} l^3}{3E J_z}, \quad (2.17)$$

$$P_{y5} = 2P_{y0} \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta = P_{y0} \sin 2\beta, \quad (2.18)$$

$$J_z = \frac{hb^3}{12}, \quad (2.19)$$

где P_{y5} – усилие, действующее на пластину перпендикулярно оси заточки, создающее колебание пластины, Н;

l – длина пластины, м;

E – модуль упругости материала (в нашем случае $2 \cdot 10^{11}$ Н/м²), Н/м²;

J_z – момент инерции сечения, м⁴;

β – половина угла заточки, °;

P_{y0} – усилие, действующее на пластину, Н.

Если подставить уравнения 2.18 и 2.19 в 2.17 получим:

$$f = \frac{4P_{y0} \sin 2\beta l^3}{E \cdot h \cdot b^3}, \quad (2.20)$$

Установлено (см. [100]), что

$$P_{y0} = \frac{E_{\text{кин}}}{S} = \frac{mQ^2}{2h^2 b^2 S^2}, \quad (2.21)$$

где $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия;

S – расстояние до сопла, м;

m – масса обрабатываемого топлива, $m = \rho \cdot Q \cdot t$, кг.

Так как пластинка устанавливается в 1мм от сопла, то $S = 1 \cdot 10^{-3}$ м. После преобразований 2.21 P_{y0} принимает вид:

$$P_{y0} = \frac{\rho Q^3 t}{2h^2 b^2 10^{-3}} = \frac{\rho Q^3 t 10^3}{2h^2 b^2}. \quad (2.22)$$

Учитывая (2.22) и значение модуля упругости материала получаем следующую формулу для вычисления амплитуды ультразвукового модуля:

$$f = \frac{\rho Q^3 \sin 2\beta l^3 t}{10^8 h^3 b^5}. \quad (2.23)$$

Резонансная частота ультразвука (см. [114]) определяется по формуле:

$$H_{zp} = 2H_{z1}, \quad (2.24)$$

где H_{z1} – частота колебания пластинки, Гц.

Известно (см. [103, 104]), что частота колебаний пластинки вычисляется по формуле:

$$H_{z1} = \frac{22,4d}{2\pi l^2 \sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\rho_1}}, \quad (2.25)$$

где l – длина пластины, м

d – толщина пластины, м

ρ_1 – плотность материала пластины, кг/м³.

Для прямоугольной формы $b = \lambda h$, допустим, что $b = \lambda_1 d$, тогда $\lambda h = \lambda_1 d$, из этого следует $d = \frac{\lambda}{\lambda_1} h$ или

$$d = \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{F}. \quad (2.26)$$

Из формулы 2.25 с учетом 2.26 длина пластины вычисляется по формуле:

$$l = \sqrt{\frac{11,2 \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{F}}{\pi H_{z1}} \sqrt{\frac{E}{\rho_1}}}. \quad (2.27)$$

Так же из формулы 2.23 половина угла заточки вычисляется по формуле:

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{f \cdot 10^8 \cdot g h^3 \cdot b^5}{\rho Q^3 l^3 t}\right). \quad (2.28)$$

Интенсивность ультразвукового излучения определяют по формуле:

$$I = \frac{N_{y3}}{F}, \quad (2.29)$$

где I – Интенсивность ультразвукового излучения, Вт/м².

Таким образом, из формул 2.6, 2.26, 2.27, 2.28, 2.29 получаем систему уравнений 2.30 описывающую математическую модель, позволяющую рассчитать параметры ультразвукового модуля с учетом введенных λ и λ_1 .

$$\begin{cases} F = \pi \frac{(6.3 \cdot v)^2 \cdot \rho}{2 \cdot P}, \\ d = \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{F}, \\ I = \frac{N_{y3}}{F}, \\ l = \sqrt{\frac{11,2 \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{F}}{\pi H_{z1}} \sqrt{\frac{E}{\rho_1}}}, \\ \beta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{f \cdot 10^8 \cdot g h^3 \cdot b^5}{\rho Q^3 l^3 t}\right). \end{cases} \quad (2.30)$$

Однако, остается не ясным, при каких показателях λ и λ_1 ультразвуковой излучатель будет показывать наилучшие результаты.

2.3 Определение основных параметров ультразвукового модуля

Для упрощения расчётов параметров ультразвукового модуля и анализа различного рода зависимостей разработано программное обеспечение (Приложение А). Диапазон параметров, при котором осуществлялся запуск представлен в таблице 2.1 [101].

Таблица 2.1 – Параметры запуска программного обеспечения

Параметры	Дизельное топливо	Смесевое 20% топливо	Смесевое 30% топливо	Смесевое 50% топливо
Давление, Р Па	140000 - 202600			
Расход, Q м ³ /с	0,00009875 - 0.0002121			
Плотность, ρ , кг/м ³	860	870	875	880
Кинематическая вязкость, ν , м ² /с	0,0000045	0,000005	0,0000055	0,000006
Мощность излучателя $N_{уз}$, Вт	30 - 90			
Частота колебаний, Гц	25000 - 200000			
λ	0,1 - 1			
λ_1	1 - 2,5			
Модуль упругости E, Па	210000 Па - 220000 Па			
Плотность материала пластины ρ_1 , кг/м ³	8500 кг/м ³ - 8700 кг/м ³			
Амплитуда колебаний, м	0,02-0,05			

На рисунке 2.6 показана, зависимость площади сечения сопла ультразвукового модуля от давления, подаваемого насосом. С ростом процентного содержания биодизельного топлива в дизельном топливе площадь сечения сопла

возрастает. За счет повышения давления возрастает расход жидкости, а это влечет за собой потребность в увеличении площади сечения сопла. С другой стороны, с ростом процентного содержания биодизельного топлива в дизельном смесевом топливе возрастают вязкостно-плотностные характеристики топлива, из-за чего расход жидкости падает, а значит и площади сечения сопла уменьшается. Площадь сечения сопла для дизельного топлива находится в интервале $[17,6 - 21,5]$ мм², для 20% дизельного смесевоего топлива - $[15,3 - 20]$ мм², для 30% дизельного смесевоего топлива - $[11,7 - 15,6]$ мм², для 50% дизельного смесевоего топлива - $[8,6 - 12,3]$ мм².

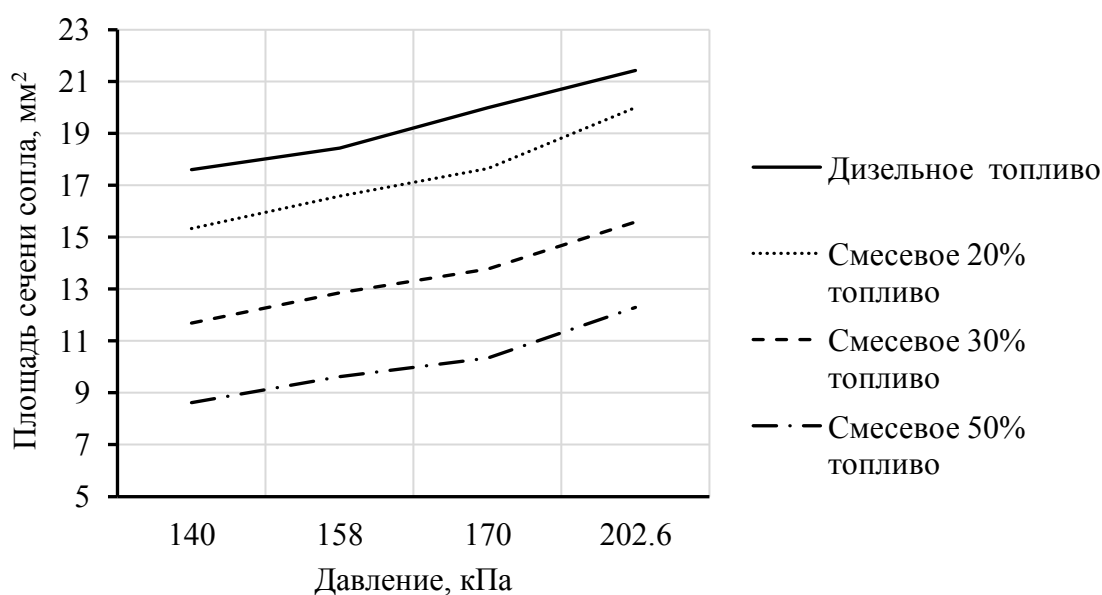


Рисунок 2.6 – Зависимость площади сечения сопла ультразвукового модуля от давления насоса

Далее определяли параметры ультразвукового излучателя – пластины (угол заточки, длина пластины) для разных видов топлив.

На рисунках 2.7-2.8 представлена динамика изменения угла заточки пластины от расхода жидкости при разных значениях λ , λ_1 и разных видов дизельных смесевых топлив.

Графики на рисунке 2.7 показывают, что значения угла заточки при $\lambda_1=2,5$ больше, чем при $\lambda_1=1$. Таким образом, при увеличении параметра λ_1 угол заточки возрастает, а с ростом расхода топлива угол заточки пластины уменьшается.

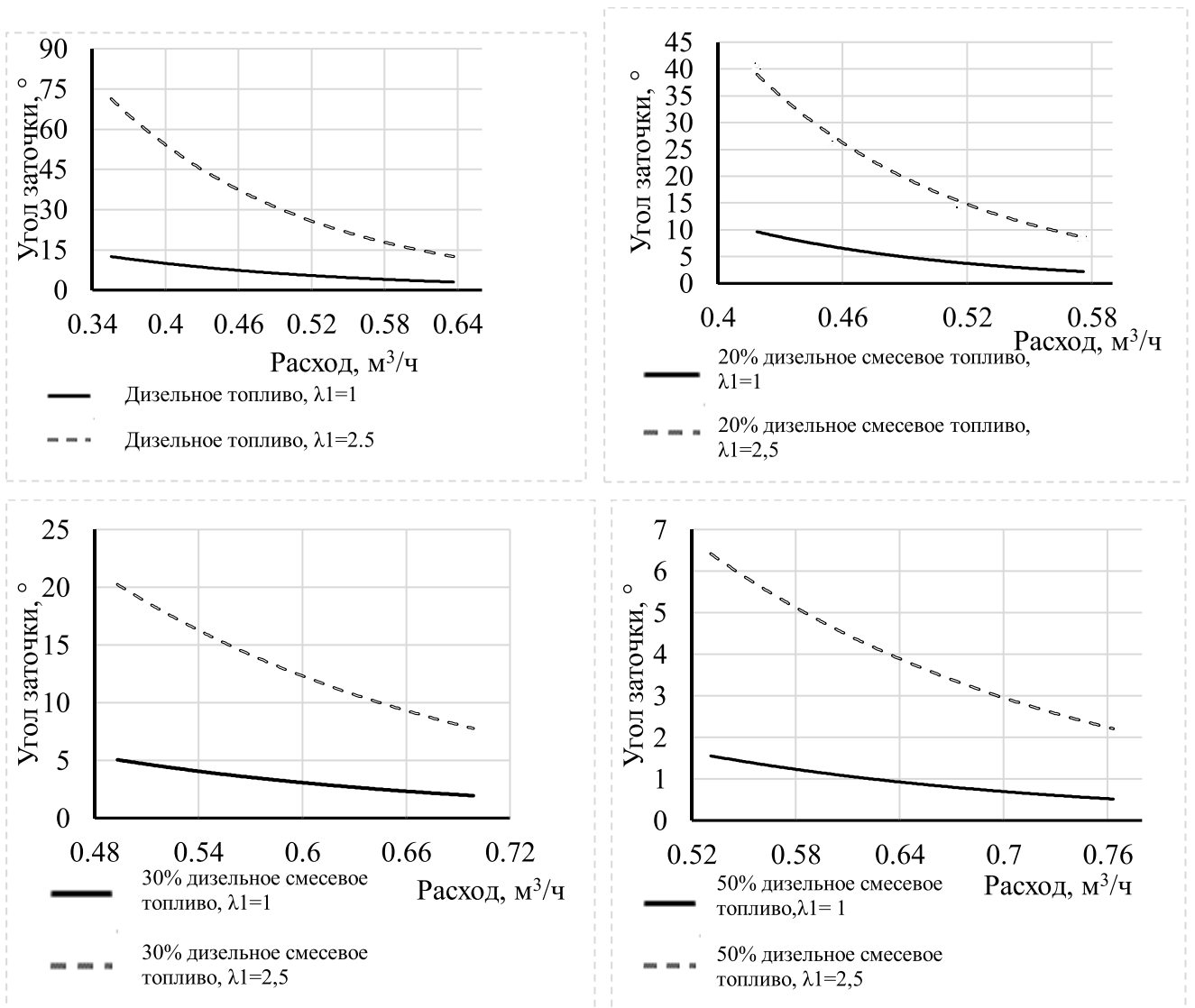


Рисунок 2.7 – Зависимость угла заточки от расхода топлива при $\lambda=0,3$

На рисунках видно, что при увеличении параметра λ_1 (от 1 до 2,5) угол заточки пластинки ультразвукового модуля для различных топлив увеличивается. Т.е., по мере уменьшения толщины пластинки угол заточки увеличивается.

Графики на рисунке 2.8 показывают, что при аналогичных параметрах по расходу и $\lambda_1=1,5$ угол заточки для различных топлив при $\lambda=0,1$ больше, чем при $\lambda=0,3$. Таким образом, по мере увеличения параметра λ , т.е., чем сопло ультразвукового излучателя шире и ниже, тем угол заточки пластины меньше.

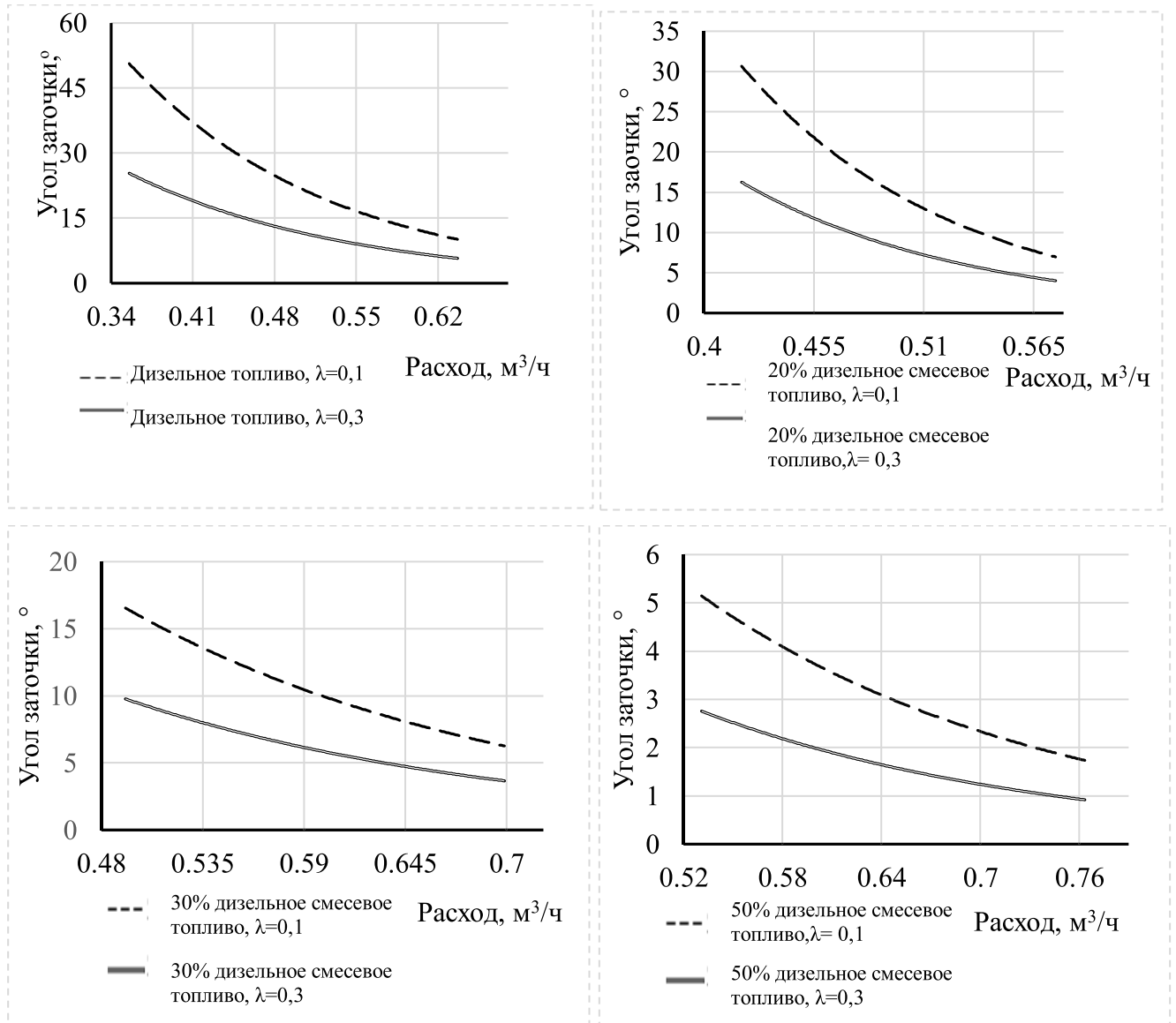


Рисунок 2.8 – Зависимость угла заточки от расхода жидкости при $\lambda_1=1,5$

Таким образом, угол заточки пластинки ультразвукового излучателя уменьшается и с ростом расхода жидкости, и с увеличением коэффициента λ (т.е. чем сопло ультразвукового излучателя шире и ниже, тем угол заточки пластины меньше). Также угол заточки пластины ультразвукового модуля зависит от ее толщины, чем пластина толще, тем ее угол заточки должен быть больше.

Согласно расчету, минимальный угол заточки достигается при $\lambda=1$ и $\lambda_1=1$, (т.е. при сопле квадратной формы и тонкой пластинке) и составляет: для дизельного топлива - $1,75^\circ$, для 20% смесового - $1,23^\circ$, для 30% - $1,09^\circ$, для 50% - $0,3^\circ$. Максимальный угол заточки достигается при $\lambda=0,1$ и $\lambda_1=2,5$ и составляет: для

дизельного топлива - 88° , для смесового 20% - 78° , для 30% - $38,69^\circ$, для 50% - $11,09^\circ$.

Далее определяли длину пластины в зависимости от частоты колебаний (рисунок 2.9). Установлено, что при увеличении частоты колебаний длина колебательной пластины уменьшается. Согласно расчетным данным максимальная длина пластины требуется для дизельного топлива, и составляет 25 мм при 25 кГц. Минимальная длина пластины для дизельного смесового 50% топлива – 7,41 мм при частоте колебания пластины 200 кГц.

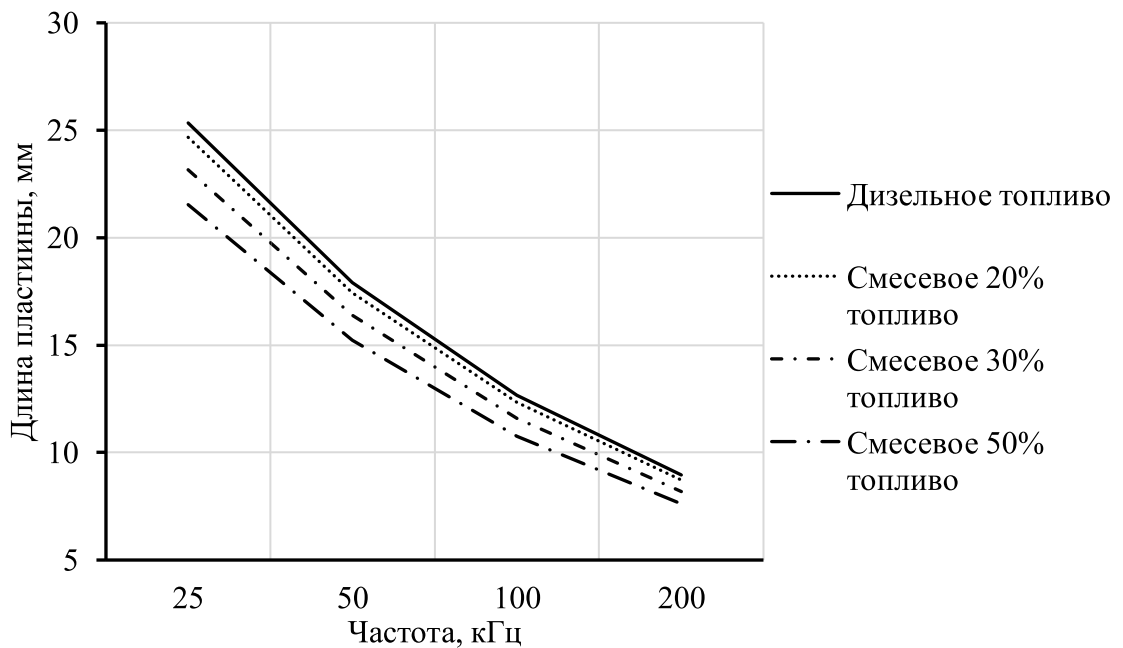


Рисунок 2.9 – Зависимость длины пластины от частоты колебаний при $\lambda=0,1$, $\lambda_1=1,5$, $P=140\text{кПа}$, $N_{\text{уз}}=55\text{ Вт}$

На рисунке 2.10 показана зависимость интенсивности ультразвукового излучения от коэффициента λ . Данные приведены при давлении 140 кПа, $N_{\text{уз}}=30\text{ Вт}$ $\lambda_1=1,5$.

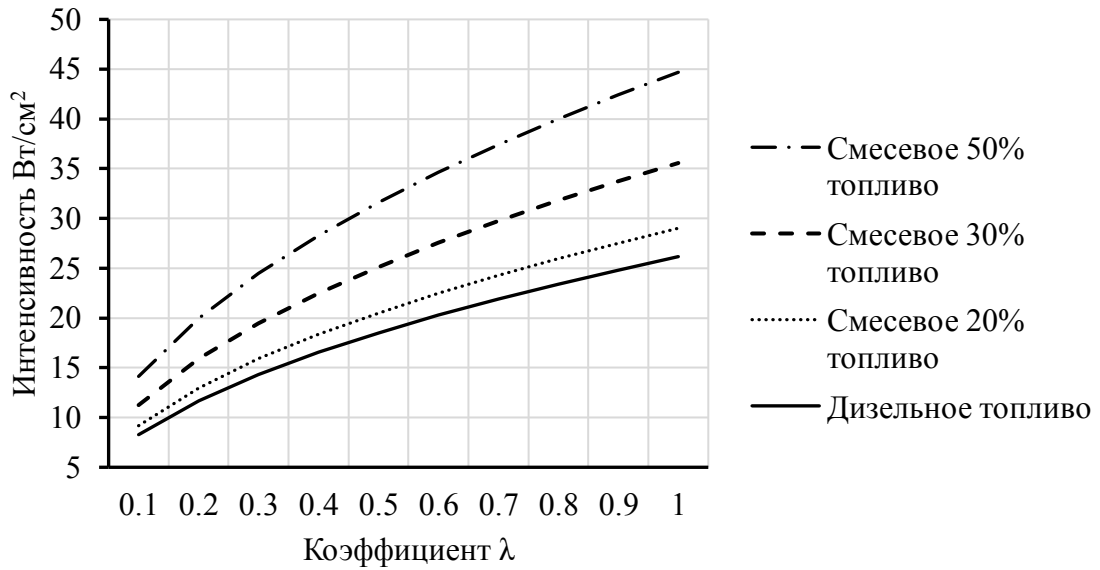


Рисунок 2.10 – Зависимость интенсивности ультразвукового излучения от коэффициента λ при $\lambda_1=1,5$, $P=140$ кПа, $H_{z1} = 25$ кГц

Установлено, что при увеличении коэффициента λ интенсивность ультразвукового воздействия возрастает. Возрастание интенсивности связано с тем, что при увеличении коэффициента λ , высота пластинки уменьшается, а, следовательно, площадь пластинки также уменьшается. Максимальная интенсивность ультразвукового воздействия достигается у 50% дизельного смесевое топлива, и составляет 45 Вт/см^2 при $\lambda=1$. Минимальная - у дизельного топлива ($8,27 \text{ Вт/см}^2$ при $\lambda=0,1$).

На рисунках 2.11 – 2.13 показана зависимость интенсивности от мощности и частоты колебаний пластины соответственно. С увеличением мощности и частоты колебаний пластины ультразвукового модуля интенсивность возрастает.

Максимальные показатели интенсивности достигаются при частоте колебаний пластины $H_{z1} = 200$ кГц и мощности $N_{вз} = 90$ Вт (рисунок 2.13) и составляет: для дизельного топлива – $38,3 \text{ Вт/см}^2$, 20% смесевое топлива – $42,47 \text{ Вт/см}^2$, 30% смесевое топлива – $52,06 \text{ Вт/см}^2$, 50% смесевое топлива – $65,41 \text{ Вт/см}^2$. Минимальные достигаются при частоте колебаний пластины $H_{z1} = 25$ кГц и мощности $N_{вз} = 30$ Вт (рисунок 2.12) и составляет: для дизельного топлива – $4,51$

Вт/см², 20% смесового топлива – 5 Вт/см², 30% смесового топлива – 6,14 Вт/см², 50% смесового топлива – 7,71 Вт/см².

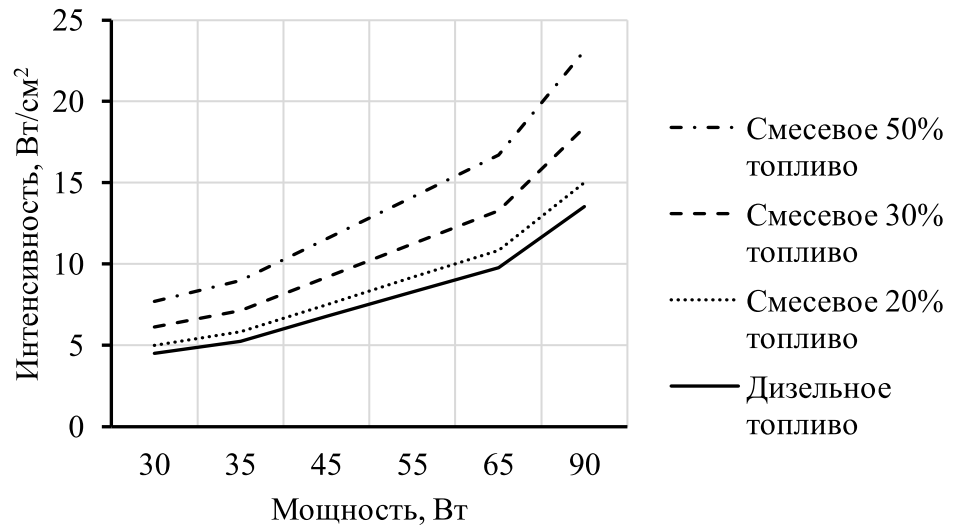


Рисунок 2.11 – Зависимость интенсивности ультразвукового излучения от мощности излучателя при $\lambda=0,1$, $\lambda_1=1,5$, $H_{z1} = 25$ кГц, $P=140$ кПа

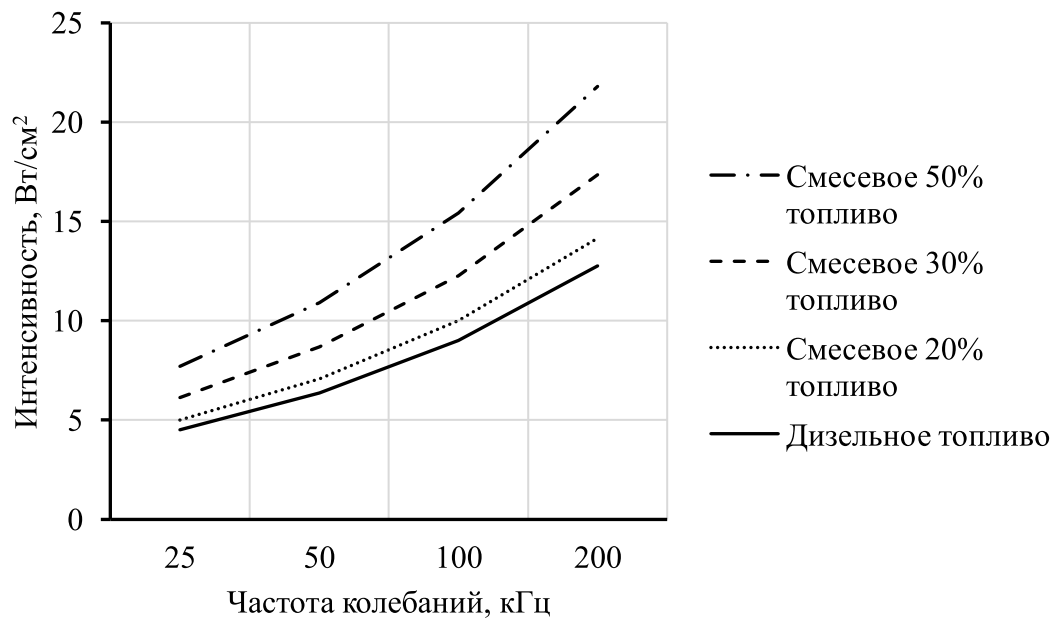


Рисунок 2.12 – Зависимость интенсивности ультразвукового излучения от частоты колебаний пластины при $\lambda=0,1$, $\lambda_1=1,5$, $N_{yz} = 30$ Вт, $P=140$ кПа

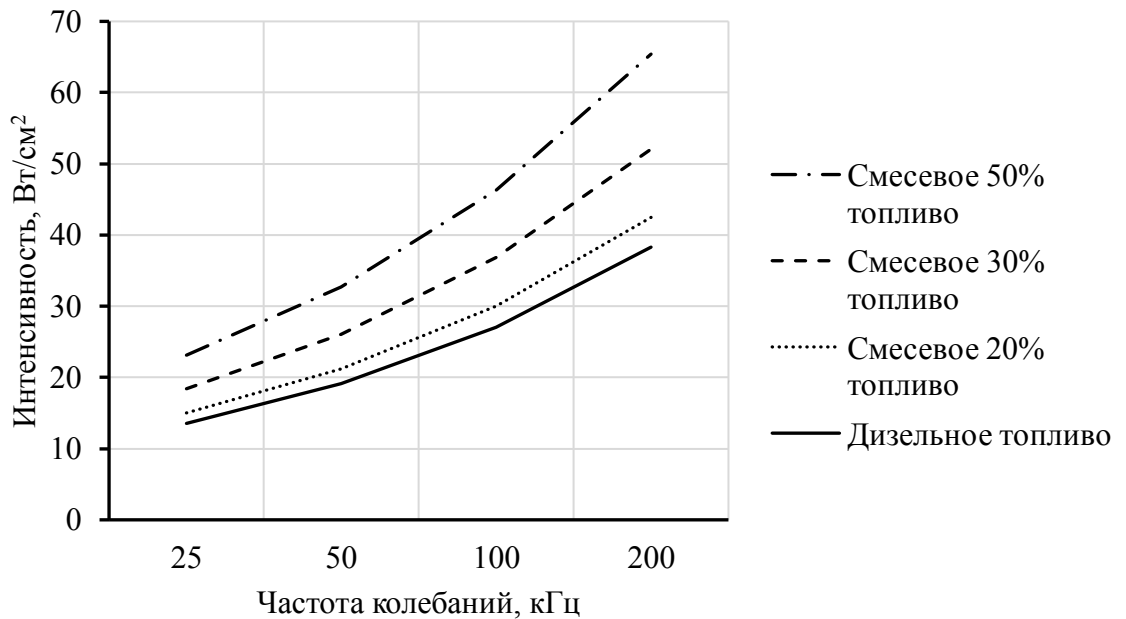


Рисунок 2.13 – Зависимость интенсивности ультразвукового излучения от частоты колебаний пластины при $\lambda=0,1$, $\lambda_1=1,5$, $N_{\text{вз}}=90$ Вт, $P=140$ кПа

Из рисунков 2.11 – 2.13 видно, что максимальная интенсивность ультразвукового воздействия осуществляется при высоких частотах и мощностях ультразвукового излучателя. Также, влияние на интенсивность оказывает коэффициент λ , однако чрезмерное ($b > 3f$) увеличение этого коэффициента может привести к образованию зон с недостаточной степенью озвучивания.

Таким образом, выбор параметра ультразвукового модуля зависит от характеристик используемого топлива и топливной аппаратуры, в какую планируется встраивать модуль-смеситель.

В таблице 2.2 приведены основные расчётные параметры, взятые при $\lambda=0,1$, $\lambda_1=1,5$, $N_{z1} = 200$ кГц. Значение параметров λ , λ_1 , N_{z1} выбраны с учетом максимальных показателей интенсивности озвучивания.

Таблица 2.2 – Параметры ультразвукового модуля

Ширина сопла, мм	Толщина пластины, мм	Высота пластины, мм	Длина пластины, мм	Угол заточки, °	Площадь сечения сопла, мм ²	Давление топливной аппаратуры, кПа	Параметры			
							Дизельное топливо	20% Дизельное смесевое топливо	30% дизельное смесевое топливо	50% дизельное смесевое топливо
0,93	0,62	9,29	7,41	50,60	8,62	140				
0,98	0,65	9,81	7,61	37,52	9,63	158				
1,02	0,68	10,16	7,75	27,6	10,33	170				
1,11	0,74	11,09	8,1	10,21	12,3	202,6				
1,08	0,72	10,81	7,99	31,71	11,69	140				
1,13	0,76	11,34	8,19	19,15	12,87	158				
1,17	0,78	11,73	8,33	11,87	13,77	170				
1,25	0,83	12,49	8,59	7,18	15,59	202,6				
1,24	0,83	12,38	8,56	16,89	15,34	140				
1,29	0,86	12,88	8,72	14,37	16,58	158				
1,33	0,89	13,29	8,86	11,77	17,66	170				
1,41	0,94	14,14	9,14	6,33	20	202,6				
1,33	0,88	13,27	8,86	5,13	17,61	140				
1,36	0,91	13,58	8,96	3,38	18,45	158				
1,41	0,94	14,14	9,14	2,5	20	170				
1,46	0,98	14,64	9,3	1,77	21,43	202,6				

По мере увеличения λ от 0,1 до 1 геометрическая форма сопла из выраженной прямоугольной переходит в квадратную форму. При прямоугольной форме сопла скорость потока жидкости на краях струи отличается от скорости в центре на величину погрешности. Когда сопло квадратное отличие скоростей на краях и в центре становится более выраженным. Таким образом, оптимальным можно считать λ взятую в диапазоне от 0,1 до 0,4. Выбор конкретного λ зависит от необходимых характеристик ультразвукового излучателя и давления в системе питания дизельного двигателя.

Параметр λ_1 может быть взят из диапазона от 1 до 2,5. По мере его увеличения толщина пластины уменьшается прямо пропорционально. Выбор конкретного λ_1 зависит от выбранного λ и частоты колебания пластины. В большинстве случаев λ_1 остается в диапазоне от 1,4 до 1,8.

Изменение λ и λ_1 влечет за собой корректировку угла заточки, частоты колебания и длины пластины, как следствие, влияет на все параметры и характеристики ультразвукового излучателя.

Основным ограничением на параметры ультразвукового излучателя является техническая возможность его реализации.

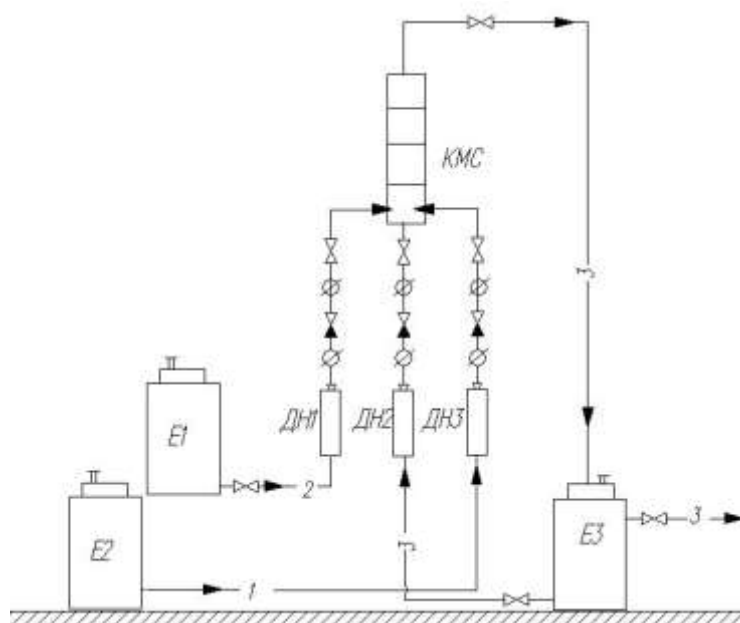
2.4 Разработка принципиальной схемы улучшения качества дизельного смесевоего топлива с применением комбинированного модуль-смесителя

При разработке технологии улучшения качества дизельного смесевоего топлива с применением комбинированного модуль-смесителя за основу взята разработанная в ФГБНУ ВНИИТиН общая структурная схема. В результате изучения и анализа литературных источников, математической модели, была предложена принципиальная схема улучшения качества дизельного смесевоего топлива.

На рисунке 2.14 представлена принципиальная схема обработки дизельного смесевоего топлива [97, 98], которая состоит из двух стадий:

- получение дизельного смесевго топлива;
- комбинированная обработка.

Биодизельное топливо 1 из емкости (E2) через дозирующий насос (ДН3) направляют в комбинированный модуль-смеситель (КМС). Из емкости (E1) товарное дизельное топливо 2 с помощью дозирующего насоса (ДН1) также направляется в комбинированный модуль-смеситель (КМС). Комбинированный модуль-смеситель (КМС) имеет конструкцию, за счет которой инициируется многофакторное воздействие на смесь (гидродинамическое, кавитационное, ультразвуковое). После обработки биодизельное топливо поступает в одну из ёмкостей E3. Заполненные емкости E3 отключаются от системы на время технологической паузы, для отстаивания. По завершению процесса часть полученного дизельного смесевго топлива 3, взятого снизу емкости E3, возвращается в модуль-смеситель, а большая часть обработанного топлива, взятого в верхней части емкости E3, идет на склад.



1 – биодизельное топливо; 2 – товарное дизельное топливо; 3 – дизельное смесевго топливо после обработки; E1, E2, E3 - емкость; ДН1, ДН2, ДН3, – дозирующий насос; КМС – комбинированный модуль – смеситель.

Рисунок 2.14 – Принципиальная схема обработки дизельного смесевго топлива

2.5 Выводы

1. Усовершенствована конструкция комбинированного модуль-смесителя, разработана конструкция ультразвукового модуля.

2. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать параметры (F, l, d, β, h) и коэффициенты λ, λ_1 ультразвукового модуля комбинированного модуль-смесителя для обработки дизельного смесевоего топлива с заданными вязкостно-плотностными свойствами.

3. Определен интервал площади сечения сопла $F [8,7 - 21,5]$ мм², интервал угла заточки пластины $\beta [0,3^\circ - 88^\circ]$, интервал длины пластины $l [7,41 - 25]$ мм, интервал высоты пластины $h [9,29 - 14,64]$ мм, интервал толщины пластины $d [0,62 - 0,98]$ мм.

4. Определен интервал коэффициента $\lambda [0,1 - 0,4]$, который зависит от характеристик ультразвукового излучателя и давления в системе питания дизельного двигателя. Определен интервал коэффициента $\lambda_1 [1,4 - 1,8]$, который зависит от коэффициента λ и частоты колебания пластины.

5. Установлена максимальная интенсивность ультразвукового воздействия для разных видов топлив ($38,3 - 65,4$ Вт/см²), которая осуществляется при высоких частотах (200 кГц), мощностях ультразвукового излучателя (90 Вт) и коэффициенте $\lambda [0,1 - 0,4]$.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая методика исследований

Схема общей методики исследований представлена на рисунке 3.1. На первом этапе проводился литературный обзор известных способов обработки и улучшения качества топлива дизельных двигателей, а также возможности использования биодизельного топлива для получения дизельного смесового топлива. После постановки цели и задач исследований, осуществляли описание общей технологической схемы обработки дизельного смесового топлива, теоретический расчет ультразвукового модуля комбинированного модуль-смесителя. Следующий этап — это разработка методик экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились в лабораториях ФГБНУ ВНИИТиН г. Тамбова, «РТП» Некрасовское г. Рассказово и совместно с крестьянско-фермерскими хозяйствами Тамбовской области. На заключительном этапе осуществляли экономическое обоснование эффективности от реализации результатов исследований.

В испытаниях использовалось дизельное топливо ЕВРО класс 3, 4, 5, ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009).

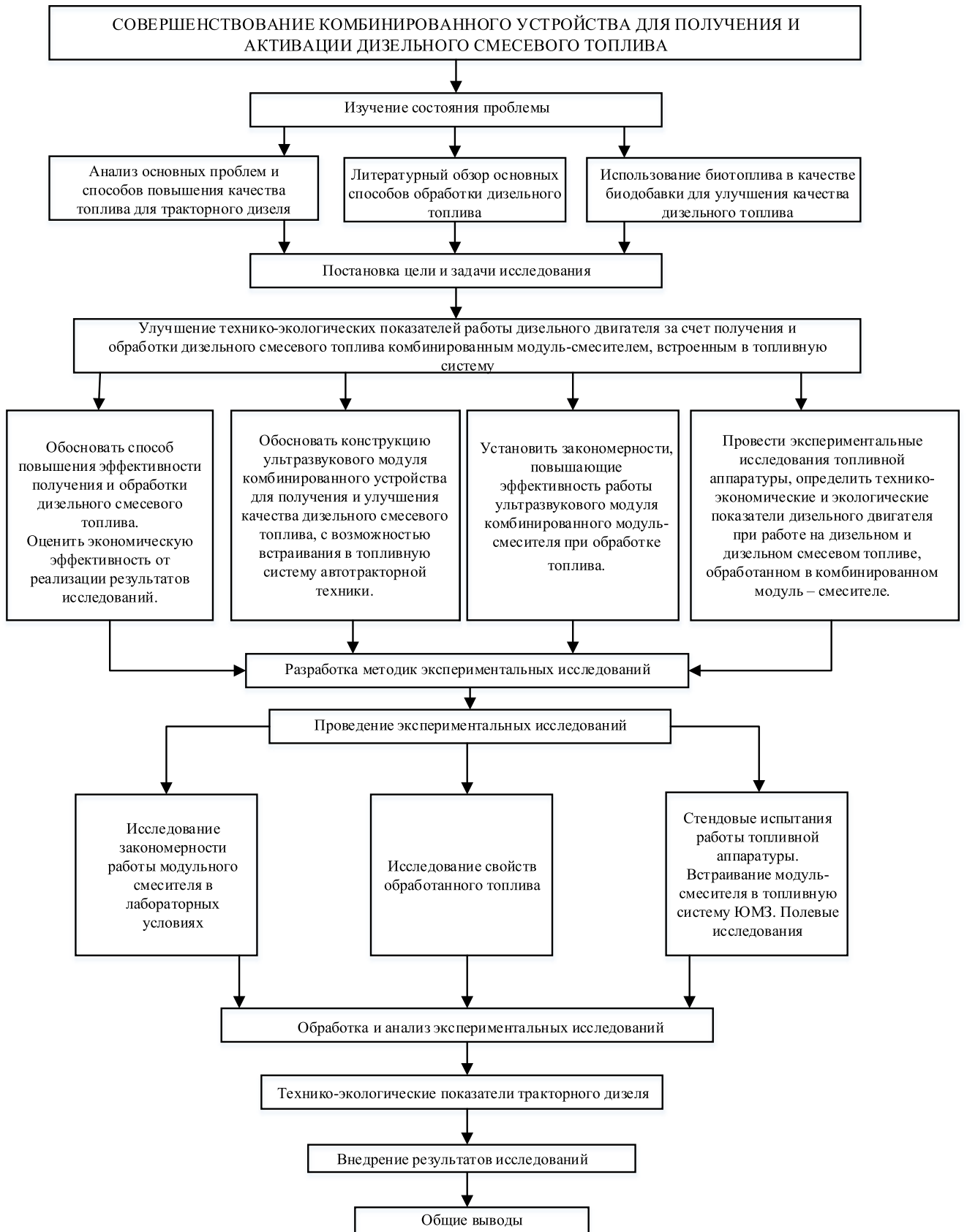


Рисунок 3.1 – Схема основных этапов проведения исследований

3.2 Методика исследования влияния ультразвуковой обработки на дизельное и дизельное смесевое топливо

Предварительно обработку дизельного и дизельного смесевого топлива осуществляли на лабораторной установке Qsonica sonicators Q700 (рисунок 3.2) с частотой механических колебаний 20 кГц и максимально излучаемой мощностью до 700 Вт.

Для получения дизельного смесевого топлива использовали биодизельное топливо, синтезируемое по методике разработанной лабораторией №7 ФГБНУ ВНИИТиН на лабораторной установке Qsonica sonicators Q700 (рисунок 3.2) из одноатомного спирта, гомогенного катализатора и растительного масла. Источником растительного масла являлись такие растения как, индау, сафлор, рыжик, микроводоросли, некондиционные семена растений, а также некондиционные фритюрные масла.



А) общий вид ультразвуковой камеры и панели управления



Б) Синтез биодизельного топлива

Рисунок 3.2 – Внешний вид лабораторной установки Qsonica sonicators Q700

В ультразвуковую камеру помещают исследуемый образец дизельного топлива (компоненты для синтеза биодизельного топлива), опускают зонд и закрывают дверцу ультразвуковой камеры. На сенсорном экране панели

управления устанавливают параметры обработки (время, амплитуду, температуру) и с помощью кнопки «Run» осуществляют запуск установленной программы.

Диаметр наконечника зонда диктует количество образца, который может быть эффективно обработан. Малые диаметры зонда позволяют фокусировать энергию высокой интенсивности внутри малой сконцентрированной области, большие диаметры могут обрабатывать большие объемы, но предлагают более низкую интенсивность энергии.

Соотношение амплитуды и мощности. Мощность ультразвука измеряется в Вт. Амплитуда – это измерение отклонения кончика зонда. Ультразвуковой процессор был разработан так, чтобы поддерживать постоянную амплитуду, независимо от изменений нагрузки. По мере обработки жидкости нагрузка на зонд будет изменяться из-за изменений в образце жидкости (например, вязкость, концентрация, температура и т.д.). По мере увеличения сопротивления движению зонда (увеличение нагрузки на зонд) источник питания будет подавать дополнительную мощность для обеспечения того, чтобы отклонение на кончике зонда оставалось постоянным. Показания мощности будут меняться по мере изменения нагрузки, однако амплитуда останется прежней. Сопротивление движению зонда определяет, какая мощность будет подаваться для поддержания амплитуды.

Эффективность обработки ультразвуком измеряется интенсивностью кавитации, а не общей мощностью, приложенной к системе. Интенсивность непосредственно связана с амплитудой излучающей поверхности наконечника. Именно амплитуда должна обеспечиваться, поддерживаться и контролироваться.

Выбор зонда подходящего размера является критичным фактором при ультразвуковой обработке образца. Объем обрабатываемой пробы должен соответствовать диаметру наконечника зонда. Каждый зонд имеет рекомендуемый диапазон объема пробы. Соответствия обрабатываемого объема и диаметра наконечника представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Соответствия обрабатываемого объема и диаметра наконечника

Диаметр наконечника		Диапазон объема обработки
1/16"	(2 мм)	0,2 мл – 5 мл
1/8"	(3 мм)	1 мл – 15 мл
1/4"	(6 мм)	10 мл – 50 мл
1/2"	(12 мм)	20 мл – 250 мл
3/4"	(19 мм)	50 мл – 500 мл
1"	(25 мм)	100 мл – 1000 мл

В случае несоответствия обрабатываемого объема диаметру наконечника наблюдаются зоны застоя.

Вторая проблема – это вспенивание. Она часто возникает при объеме образцов менее 1 мл. Причиной вспенивания обычно являются 3 проблемы: амплитуда слишком велика для небольшого объема, наконечник слишком велик для объема или наконечник вставлен на неправильную глубину.

3.3 Методика обработки топлива в комбинированном модуль-смесителе

На рисунке 3.3 представлен внешний вид установки для обработки топлива. Установка состоит из комбинированного модуль-смесителя, емкостей исходных продуктов, насосов. На начальном этапе происходит загрузка дизельного и биодизельного топлива в баки. Далее насосами топливо подается в комбинированный модуль-смеситель для получения дизельного смесового топлива. Одновременно с получением дизельного смесового топлива происходит многофакторное воздействие на смесь (гидродинамическое, кавитационное, ультразвуковое) в комбинированном модуль-смесителе. После получения и обработки дизельное смесовое топливо для дальнейшей работы перенаправляется в один из баков. Давление на входе в смеситель отслеживалось по манометру, коэффициент отношения высоты сопла к ширине изменялся путем замены

ультразвукового модуля. Для получения дизельного смесового топлива использовали биодизельное топливо, синтезируемое по методике разработанной лабораторией №7 ФГБНУ ВНИИТиН в модуль-смесителе, из одноатомного спирта, гомогенного катализатора и растительного масла (рисунок 3.3). Источником растительного масла являлись такие растения как, индау, сафлор, рыжик, микроводоросли, некондиционные семена растений, а также некондиционные фритюрные масла.



А) общий вид установки Б) модуль-смеситель

Рисунок 3.3 – Внешний вид установки с комбинированным модуль-смесителем для обработки топлива

Влияние параметров ультразвуковой обработки на качество дизельного и дизельного смесового топлива проводили по методике многофакторного эксперимента [106].

В качестве плана проведения эксперимента был выбран ортогональный центрально-композиционный план второго порядка, с количеством опытов в центре плана равным 4 и звездным плечом для трехфакторного эксперимента $\alpha=1,215$ (таблица 3.2).

За критерий оптимизации «Y» принята кинематическая вязкость топлива ν . Исходными факторами исследуемого процесса взяты: коэффициент λ отношения высоты сопла к его ширине, время обработки, давление на входе в смеситель - «X₁, X₂, X₃» соответственно.

Таблица 3.2 - Ортогональный, центральный композиционный план (ОЦКП) для $k=3$ (где k – число факторов)

Место плана	Номер опыта	x ₁	x ₂	x ₃
Ядро плана ПФЭ 2 ³	1	0,4	30	202,6
	2	0,2	30	202,6
	3	0,4	6	202,6
	4	0,2	6	202,6
	5	0,4	30	101,3
	6	0,2	30	101,3
	7	0,4	6	101,3
	8	0,2	6	101,3
Звездные точки	9	0,42	18	151,95
	10	0,18	18	151,95
	11	0,3	32,58	151,95
	12	0,3	3,42	151,95
	13	0,3	18	213,5
	14	0,3	18	90,4
Центр плана	15	0,3	18	151,95

3.4 Методика хроматографического анализа топлива

Хроматографический анализ обработанного и необработанного дизельного и дизельного смесового топлив осуществляли на приборе «Кристалл 2000М» (рисунок 3.4).

Хроматограф «Кристалл 2000М» предназначен для измерения состава компонентов в жидких средах. В состав хроматографа входит пламенно-ионизационный детектор. Хроматограф оснащен программным обеспечением «Хроматэк-Аналитик».



Рисунок 3.4 – Внешний вид хроматографа «Кристалл 2000М»

Подготовка к исследованиям:

1. Приготовление внутреннего стандарта.

Взвешивание гексадекана (2000 мг) и добавление 10 - 12 см³ гексана в мерной колбе объёмом 25 см³

2. Подготовка пробы дизельного смесового топлива.

Пробу анализируемого топлива тщательно перемешивали. В стаканчик для взвешивания брали пипеткой 0,1 см³ дизельного смесового топлива и добавляли 1,9 см³ гексана. Раствор взвешивали, к нему добавляли 0,1 см³ раствора гексадекана в гексане в качестве внутреннего стандарта. Образовавшийся раствор снова взвешивали и тщательно перемешивали, давали отстояться в течение 5 мин.

Проведение исследований:

1. Установка рабочих условий (температура термостата колонок 170 0С; температура испарителя 280 0С; температура детекторов 290 0С; скорость потока газа-носителя (азот, гелий) - 30-40 см³/мин; величина пробы - около 1 мкл гексанового раствора дизельного смесового топлива).

2. Добавление исследуемого топлива в хроматограф. Анализ проводили в автоматическом режиме и получали полный отчет по анализируемому веществу с записью на жесткий диск компьютера.

3. Программа отображала площади отображаемых пиков, высоты пиков и концентрации по группам веществ.

3.5 Методики определения физико-химических свойств топлив

Физико-химические свойства топлива (фракционный состав, плотность, кинематическая вязкость, температура помутнения, температура застывания, температура вспышки в закрытом тигле) определяли по стандартным методикам [107 - 111].

Цетановое число определяли с помощью прибора SHATOX SX-300 (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Измерение цетанового числа SHATOX SX-300

Сущность измерения заключается в определении детонационной стойкости бензинов, самовоспламеняемости дизельных топлив и параметров масел на основании измерения их диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления.

3.6 Методика стендовых испытаний топливной аппаратуры

Стендовые испытания проводили на ремонтно-тракторном предприятии в два этапа. На первом этапе проведен демонтаж, регулирование, настройка и проверка технического состояния топливной аппаратуры трактора ЮМЗ-6Л по стандартным методикам [112]. В ходе второго этапа, на настроенной топливной аппаратуре трактора ЮМЗ-6Л определялись основные показатели работы

топливной аппаратуры для разных видов топлива – дизельного и дизельного смесового топлива.

3.6.1 Регулирование и проверка технического состояния форсунок тракторных двигателей

Перед стендовыми испытаниями работы топливной аппаратуры проводили регулирование и проверку технического состояния двух комплектов форсунок ФД-22 на приборе КИ-3333 [113] (рисунок 3.6). Определение технического состояния форсунок проводили по качеству распыливания и давлению. Давление начала впрыскивания замеряли на установленном манометре, а качество распыливания визуально и по резкости звука. Визуально оценивали размер капель, распределение их по длине и сечению топливного факела, оценивали резкость и громкость звука.



Рисунок 3.6 – Внешний вид стенда КИ-3333 для регулирования форсунок

3.6.2 Стендовые испытания топливной аппаратуры

Осуществляли регулировку топливных насосов ТНВД 65Н-1100150 на дизельном топливе на стенде КИ-921М согласно [112] (рисунок 3.7). Стенд КИ-921М предназначен для регулирования и испытания ТНВД дизельных двигателей. Для подогрева топлива до нужной температуры использовался электронагреватель проточного типа с электронным регулятором температуры, который был дополнительно встроен в стенд.



Рисунок 3.7 – Стендовые испытания топливной аппаратуры

Согласно известной методике [114] осуществляли последовательные мероприятия по настройке и регулированию ТНВД согласно таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Регулировочные параметры топливного насоса ТНВД 65Н-1100150

ТНВД 65Н-1100150	Обозначение топливного насоса		Число секций	Начала действия регулятора, мин ⁻¹	Номинальный режим			Режим максимального крутящего момента			Режим максимальной частоты вращения холостого хода			Полное выключение подачи регулятором (не более), мин	Угол начала нагнетания топлива первой секцией, град.
	Двигатель	Марка			Частота вращения вала, мин ⁻¹	Число циклов	Подача, см ³	Частота вращения вала, мин ⁻¹	Число циклов	Подача, см ³	Частота вращения вала, мин ⁻¹	Число циклов	Подача, см ³		
	Д-65М	Автомобиль, трактор, комбайн, спец. техника	4	885-895	875±5	875	68,5±1	600+50	600	50-52	930±10	1000	28	985	57+1

3.7 Методики проведения исследования работы дизельного двигателя в полевых условиях

Исследования влияния, обработанного в комбинированном модуль-смесителе топлива на работу дизельного двигателя в полевых условиях, проводили на тракторах ЮМЗ-6Л (с двигателем марки Д – 65Н), со встроенным в топливную аппаратуру комбинированным модуль-смесителем, и ЮМЗ-6АЛ (Д – 65Н) с топливной аппаратурой в штатной комплектации. Исследования состояли из двух этапов. На первом оценивали производительность дизеля трактора ЮМЗ-6Л (с двигателем марки Д – 65Н) с установленным модуль-смесителем. На втором производилось сравнение ресурсных характеристик топливных аппаратур, установленных на тракторах ЮМЗ-6Л и ЮМЗ-6АЛ, работающих на разных видах топлива. В ходе исследований оценивали работу тракторов по технико-экономическим и экологическим параметрам.

3.7.1 Методика исследования производительности автотракторной техники в полевых условиях

Проводили измерения производительности трактора ЮМЗ-6Л, расхода топлива и удельного расхода топлива на единицу выполненной работы (рисунок 3.8).

В качестве полевых исследований была выбрана вспашка участка экспериментального старопахотного поля, которая проводилась в сухую погоду на горизонтальном участке плугом ПН-3-35. Перед работой плуг был отстроен на глубину вспашки 0,22 м, была выполнена припашка и контрольная проверка регулировки навесного оборудования для пахоты на заданную глубину. Площадь участка для каждого эксперимента составляла 0,1 га.

В процессе исследований в топливный бак заливалось определенное количество топлива. Замерялось время каждого эксперимента. После окончания каждого этапа, остатки топлива сливались и взвешивались, менялись фильтры

тонкой очистки и прокачивалась топливная система для следующего замера. По разнице уровней залитого и слитого топлива вычисляли расход топлива в данном эксперименте.



А) Слив дизельного смесового топлива Б) Вспашка экспериментального участка

Рисунок 3.8 – Исследование дизельного двигателя в полевых условиях

Результаты измерений заносились в протокол в трехкратной повторности на каждом виде топлива.

Расход топлива G_m , кг/ч определялся по формуле (3.1):

$$G_T = \frac{\Delta G_T}{\Delta \tau}, \quad (3.1)$$

где ΔG_T – навеска топлива, кг;

$\Delta \tau$ – время, за которое расходуется навеска топлива, ч.

Удельный расход топлива на единицу выполненной работы q , кг/га определялся по формуле (3.2):

$$q = \frac{G_T \cdot \Delta \tau}{S}, \quad (3.2)$$

где S – площадь экспериментального участка, га;

Производительность трактора рассчитывали по формуле P , га/ч:

$$P = \frac{S}{\Delta \tau}. \quad (3.3)$$

3.7.2 Методика измерения дымности и состава смеси отработанных газов

Измерение дымности проводили по методике [115] с помощью дымомера Инфракар Д (рисунок 3.9). Принцип работы дымомера заключается в измерении интенсивности света при его прохождении через отработанные газы. Дымомер состоит из: оптический блок; дистанционный пульт управления; зонд для горизонтально расположенной выпускной системы с пробоотборным шлангом; зонд для вертикально расположенной выпускной системы с пробоотборным шлангом; датчик частоты вращения коленчатого вала; датчик температуры масла.



А) Внешний вид прибора



Б) Измерение дымности на ЮМЗ-6Л

Рисунок 3.9 – Измерение дымности отработанных газов

Рабочие условия применения прибора: 1) питание прибора: - от бортовой сети автотракторной техники напряжением (12 +2,8/-1,2) В; - от сети переменного тока напряжением 220 В (- 15/+10) % и частотой 50 Гц \pm 1 Гц; 2) температура окружающего воздуха от 0 до 35 0 С; 3) диапазон относительной влажности окружающей среды до 80 % при 300 С; 4) атмосферное давление 92 - 105 кПа.

Для определения в составе выхлопных газов концентрацию углеводородов и суммы оксидов азота использовали портативный газоанализатор ГИАМ-29М-4. Газоанализатор применяется для контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания двигателей судов внутреннего и смешанного плавания и других дизельных двигателей. Комплектация ГИАМ-29М-4 включает прибор, заборный зонд, блок питания 220

В, футляр, провод для подключения прибора к персональному компьютеру; кабель для подключения прибора от бортовой сети.

3.7.3 Методика исследований ресурсных характеристик топливных аппаратур в полевых условиях, в зависимости от выбранного топлива

Сравнение ресурсных характеристик проводили на аналогичных топливных аппаратах, установленных на тракторах ЮМЗ-6Л и ЮМЗ-6АЛ в течении 960 моточасов наработки в ходе выполнения сезонных работ. Перед началом испытаний была проведена замена плунжеров и подкачивающих насосов на двух ТНВД 65Н-1100150 (правый) и распылителей на двух комплектах форсунок с последующей регулировкой, настройкой и проверкой технического состояния по стандартным методикам [114]. На трактор, работающий на дизельном смесевом топливе (ЮМЗ-6Л), был установлен дополнительный бак под биодизельное топливо, а в топливную аппаратуру был встроен модульный смеситель. Перед началом испытаний и после их окончания на тракторе, работающем на дизельном смесевом топливе, производился замер компрессии, создаваемых в цилиндрах двигателя. Второй трактор ЮМЗ-6АЛ работал со штатной топливной аппаратурой на дизельном топливе. Через каждые 120 моточасов наработки производилась проверка технического состояния по стандартным методикам [114].

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Исследование влияния параметров ультразвуковой обработки на свойства дизельного смесевго топлива

Согласно теоретическому обоснованию (глава 2 таблица 2.2) определили основные параметры ультразвукового модуля, необходимые для обработки топлива с заданной кинематической вязкостью и плотностью. Эти параметры использовали для изготовления ультразвукового модуля.

Далее проводили многофакторный эксперимент по обработке дизельного топлива на лабораторной установке (рисунок 3.3) с разными ультразвуковыми модулями.

Исходными факторами исследуемого процесса взяты: λ - коэффициент отношения высоты сопла к ширине, время обработки, давление на входе в смеситель - « X_1 , X_2 , X_3 » соответственно. В таблице 4.1 представлены входные факторы исследуемого процесса и их уровни варьирования. После обработки топливо анализировалось по основным физико-химическим показателям [116].

Таблица 4.1 – Факторы и их значения

Факторы	Обозначение	Уровни варьирования				
		-1,215	-1	0	+1	+1,215
Коэффициент отношения высоты сопла к ширине (λ)	X_1	0,18	0,2	0,3	0,4	0,42
Время обработки (t, с)	X_2	3,42	6	18	30	32,58
Давление на входе в смеситель (P, кПа)	X_3	90,4	101,3	151,95	202,6	213,5

За критерий оптимизации « Y » принята кинематическая вязкость топлива ν . Как известно, этот параметр является одним из основных показателей качества дизельного топлива. Отклонение кинематической вязкости от стандартных значений приводит к нарушению работы топливной аппаратуры, нарушению процесса смесеобразования и сгорания. Топливо, имеющее средний показатель кинематической вязкости 3,5-4,0 мм²/с при 20°С обладает лучшими свойствами:

более высокой проникающей способностью, обеспечивает более легкий запуск и стабильную работу двигателя при низких температурах.

В результате ультразвуковой обработки дизельного топлива при разных параметрах с учетом плана эксперимента получено уравнение регрессии, описывающее зависимость $\nu=f(\lambda, t, P)$:

$$Y = 3,819 + 0,027X_1 - 0,145X_2 - 0,233X_3 + 0,123X_1X_2 - 0,036X_1X_3 - 0,06X_2X_3 + 0,366X_1^2 + 0,158X_2^2 - 0,142 \cdot X_3^2.$$

Модель проверена на адекватность по критерию Фишера (Приложение Б). Влияние входных факторов на изменение кинематической вязкости исследуемого топлива при нулевых уровнях варьирования X_1 , X_2 и X_3 соответственно представлено на рисунках 4.1- 4.3

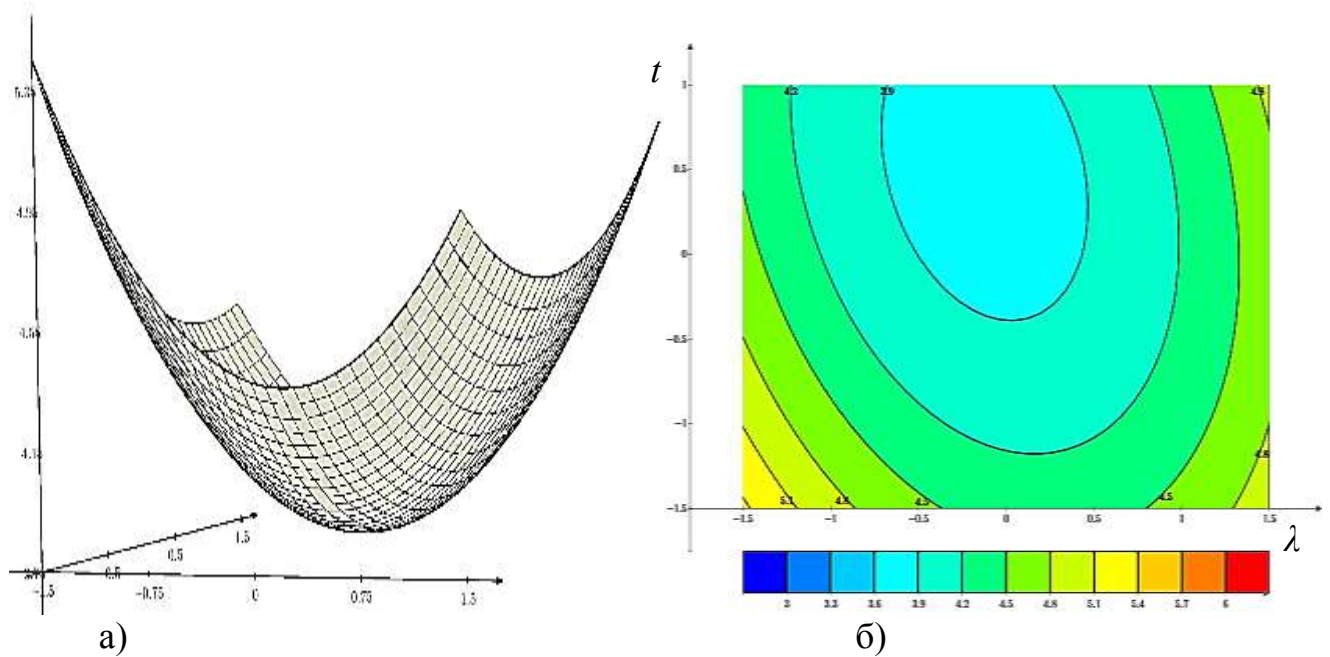


Рисунок 4.1 – Поверхность отклика $Y = f(X_1, X_2)$ (а), сечение поверхности откликов X_1 , X_2 (б) при нулевом уровне варьирования X_3

Минимальное значение кинематической вязкости (3,6-3,9 мм²/с) приходится на интервал времени обработки в закодированном формате от -0,2 до 1,5 и коэффициенту отношения высоты сопла к ширине от -0,5 до 0,5, что соответствует значениям 15,6 – 36 с, 0,25 – 0,35 (рисунок 4.1).

Минимальное значение кинематической вязкости (3,31-3,48 мм²/с) приходится на интервал коэффициента отношения высоты сопла к ширине в закодированном формате -0,6 до 0,5 и давлении от 1 до 1,215, что соответствует значениям 0,24 – 0,35, 202,6 – 264 кПа (рисунок 4.2).

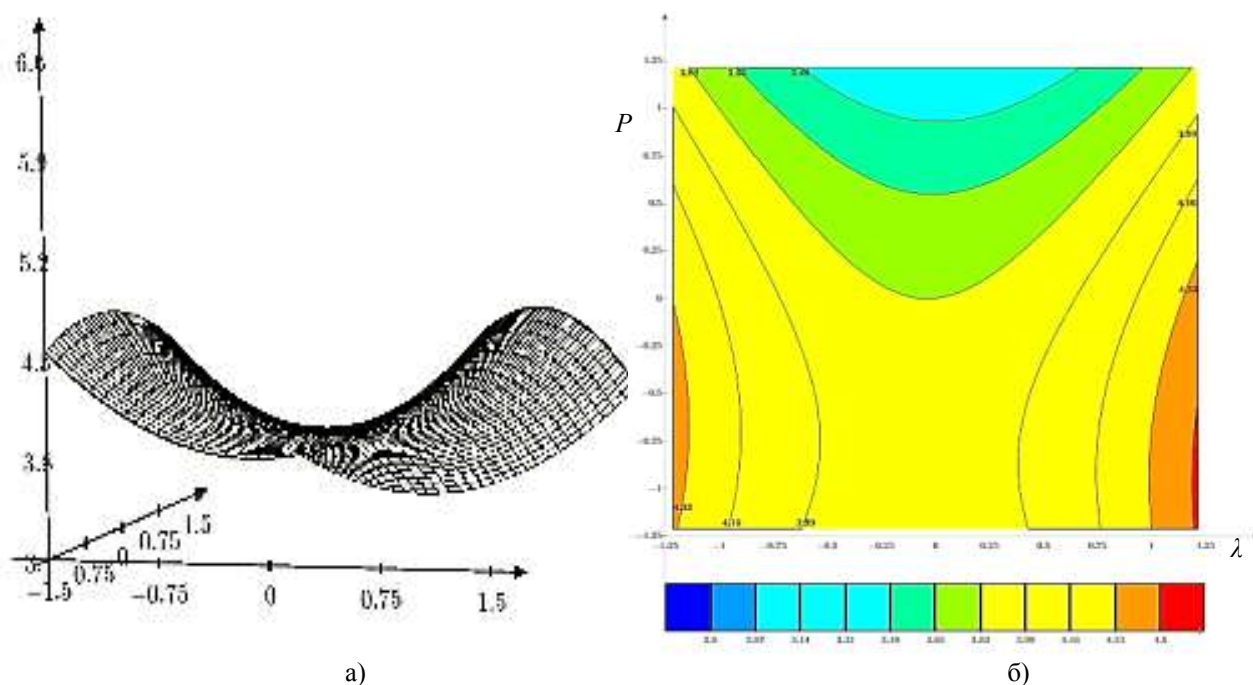


Рисунок 4.2 – Поверхность отклика $Y = f(X_1, X_3)$ (а), сечение поверхности откликов X_1, X_3 (б) - при нулевом уровне варьирования X_2

Минимальное значение кинематической вязкости (3,2-3,4 мм²/с) приходится на интервал времени обработки в закодированном формате от 0,7- 0,75 и давления от 1,2-1,4, что соответствует значениям 38 – 39 с, 212,6-222,6 (рисунок 4.3). Установлено, что увеличение времени обработки и давления положительно влияет на снижение показателя кинематической вязкости.

Для достижения максимального снижения кинематической вязкости (3,4-3,6 мм²/с) дизельного топлива определены оптимальные параметры работы смесителя: коэффициент отношения высоты сопла к ширине 0,25-0,35, время обработки 27-38 с и давление 212-213 кПа.

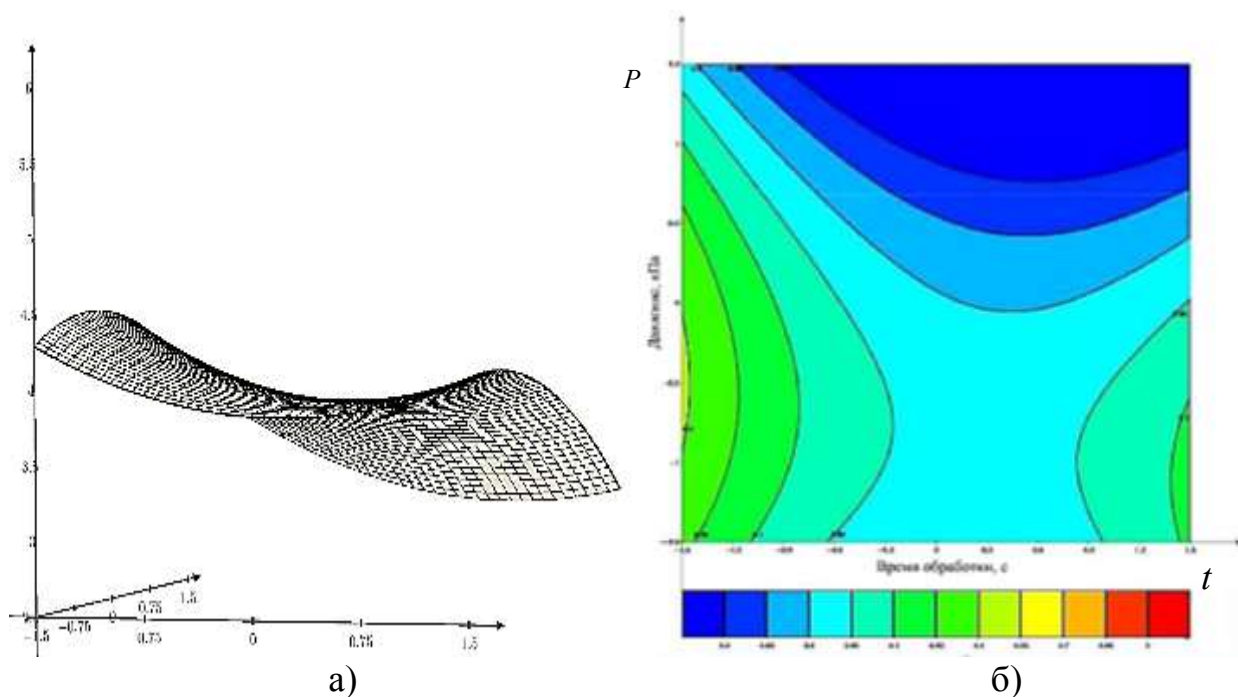


Рисунок 4.3 – Поверхность отклика $Y=f(X_2, X_3)$ (а), сечение поверхности откликов X_2, X_3 (б) при нулевом уровне варьирования X_1

Таким образом, коэффициент отношения высоты сопла к ширине 0,25-0,35 в течении 27-38 с и давлении 212-213 кПа способен снизить значения кинематической вязкости на 28-30% (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Значения кинематической вязкости

Дизельное смесевое топливо, % биодизельного топлива	Кинематическая вязкость, мм ² /с до обработки	Кинематическая вязкость, мм ² /с после обработки
0	4,8	3,36
5	4,9	3,43
10	5,1	3,57
20	5,5	4
30	5,9	4,13
40	6,4	4,55
50	7	4,9
100	7,5	5,5

Исследования показали, что при заданном давлении выбранная конструкция комбинированного модуль – смесителя позволяет добиться снижения вязкости 5 - 20 % дизельного смесевоего топлива до 3 – 4 мм²/с, что дает оптимальные показатели работы топливной аппаратуры при 20 °С.

4.2 Сравнение свойств дизельного смесевоего топлива, полученного с помощью комбинированного модуль-смесителя с использованием ультразвукового модуля и без него

На рисунках 4.4 – 4.8 представлено сравнение свойств полученного топлива при 20 °С с помощью комбинированного модуль-смесителя с использованием ультразвукового модуля и без него (обработанное топливо и необработанное топливо соответственно).

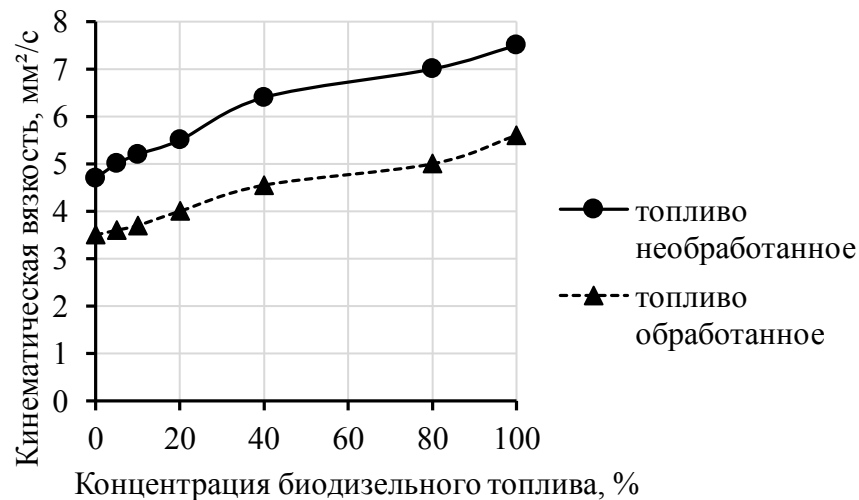


Рисунок – 4.4 Зависимость кинематической вязкости топлива от концентрации в нем биодизельного топлива

По мере увеличения концентрации биодизельного топлива кинематическая вязкость дизельного смесевоего топлива увеличивается при этом кинематическая вязкость обработанного топлива ниже, чем у необработанного.

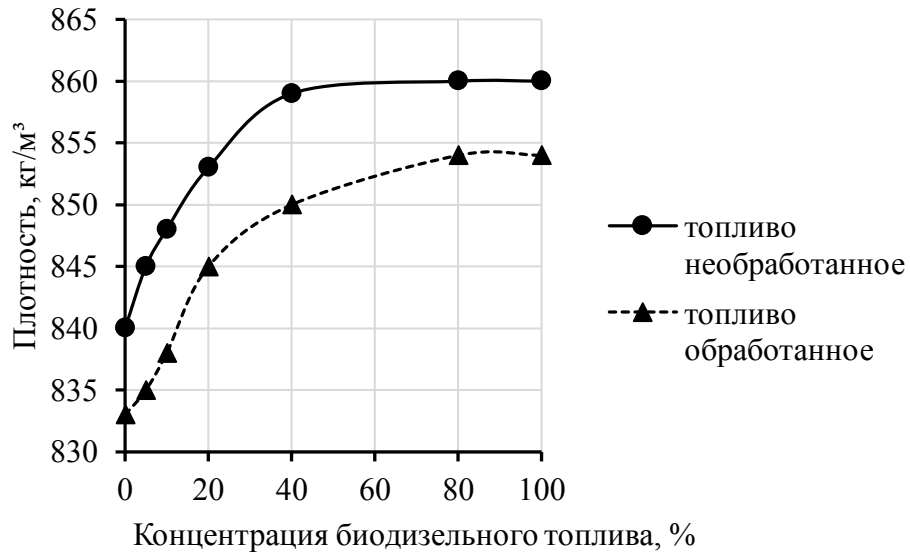


Рисунок 4.5 – Зависимость плотности топлива от концентрации в нем биодизельного топлива

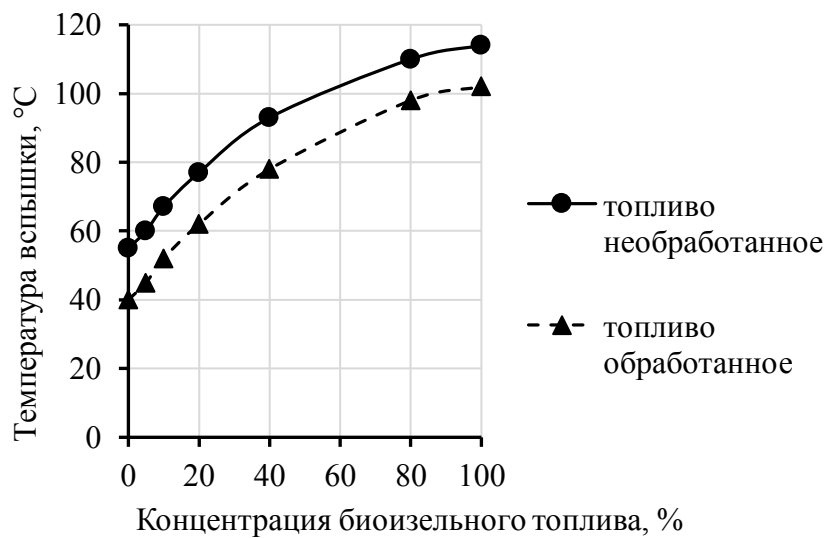


Рисунок 4.6 – Зависимость температуры вспышки топлива от концентрации в нем биодизельного топлива

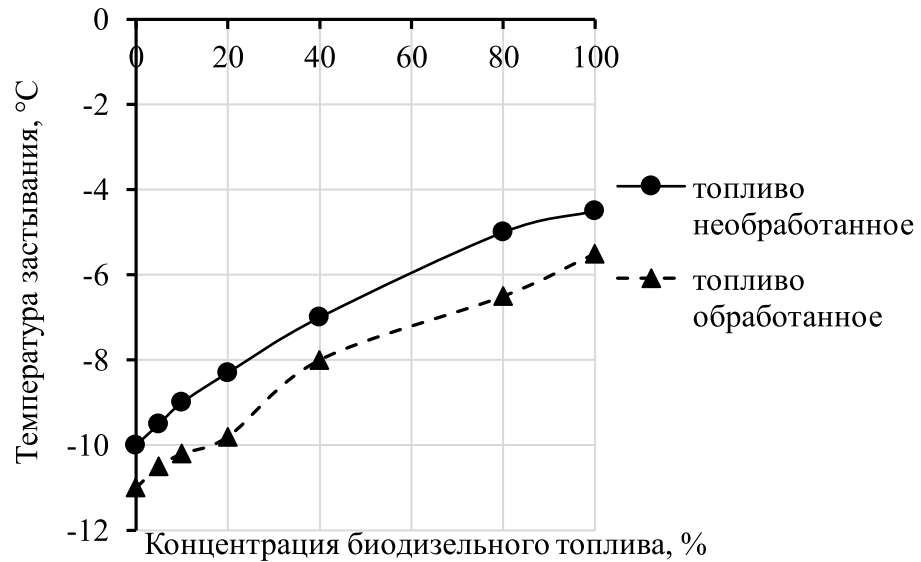


Рисунок 4.7 – Зависимость температуры застывания топлива от концентрации в нем биодизельного топлива

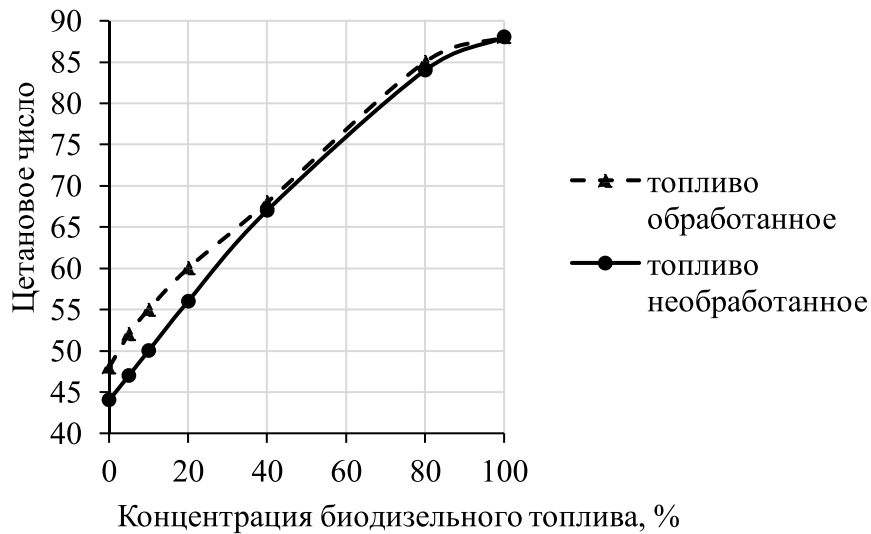


Рисунок 4.8 - Зависимость цетанового числа топлива от концентрации в нем биодизельного топлива

Применение ультразвукового модуля в составе комбинированного модуль-смесителя способствует улучшению основных физико-химических показателей дизельного и дизельного смесевоего топлива: снижению значений кинематической вязкости, плотности, температуры вспышки (рисунок 4.4 - 4.6). В тоже время обработка способствует увеличению цетанового числа и низкотемпературных

свойств (рисунок 4.7 - 4.8), однако при этом низкотемпературные свойства 20 % дизельного смесевое топлива остаются хуже, чем у дизельного [117]. Справедливо предположение, что данное изменение физико-химических свойств происходит в следствии изменения углеводородного и жирнокислотного составов исследуемых топлив.

На основе анализа данных, полученных в ходе исследований влияния параметров ультразвуковой обработки на свойства дизельного смесевое топлива, было сделано предположение, что для стандартных параметров эксплуатации ТНВД наиболее подходящим является 20% дизельное смесевое топливо. В таблице 4.3 представлены основные показатели качества дизельного топлива и 20% дизельного смесевое топлива, обработанного с применением ультразвукового модуля и без него.

Таблица 4.3 – Характеристики топлива

Показатели	Дизельное топливо необработанное	Дизельное топливо обработанное	20% дизельное смесевое топливо, необработанное	20% дизельное смесевое топливо, обработанное
Кинематическая вязкость при 20°C, мм ² /с	4,8	3,36	5,5	3,85
Плотность при 20°C, кг/м ³	840	832	855	845
Фракционный состав, %:				
10	160	145	170	160
50	250	238	280	260
95	350	330	365	345
Температура вспышки в закрытом тигле, °C	55	50	77	62
Температура застывания, °C	-10	-11	-8,3	-9,8

Представлена зависимость изменения кинематической вязкости обработанного 20% дизельного смесового топлива от времени (рисунок 4.9).

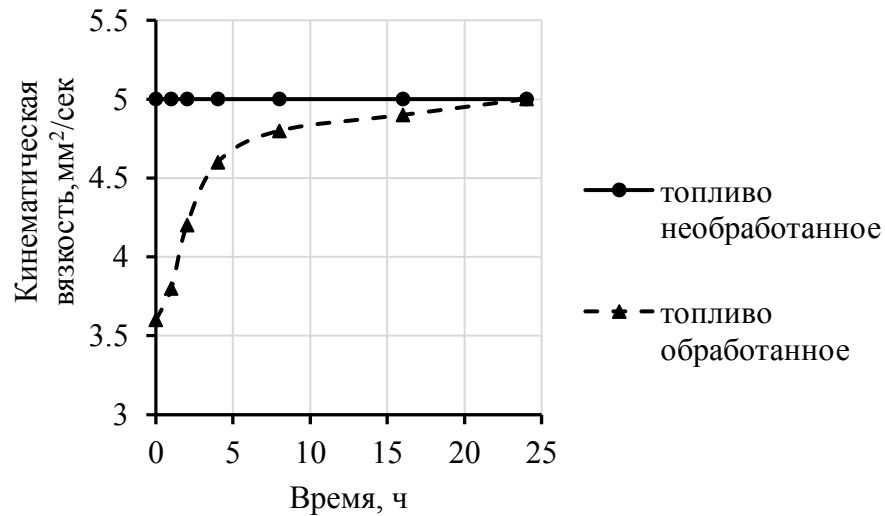


Рисунок 4.9 – Динамика изменения кинематической вязкости во времени

Установлено, что обработанное 20% дизельное смесовое топливо в течении суток возвращается к исходному состоянию, т.е. время релаксации составляет 24 часа. Следовательно, обработанное 20% смесовое топливо необходимо как можно быстрее эксплуатировать.

На рисунках 4.10, 4.11 представлены хроматограммы и в таблице 4.4 изменения углеводородного состава дизельного обработанного и необработанного топлив.

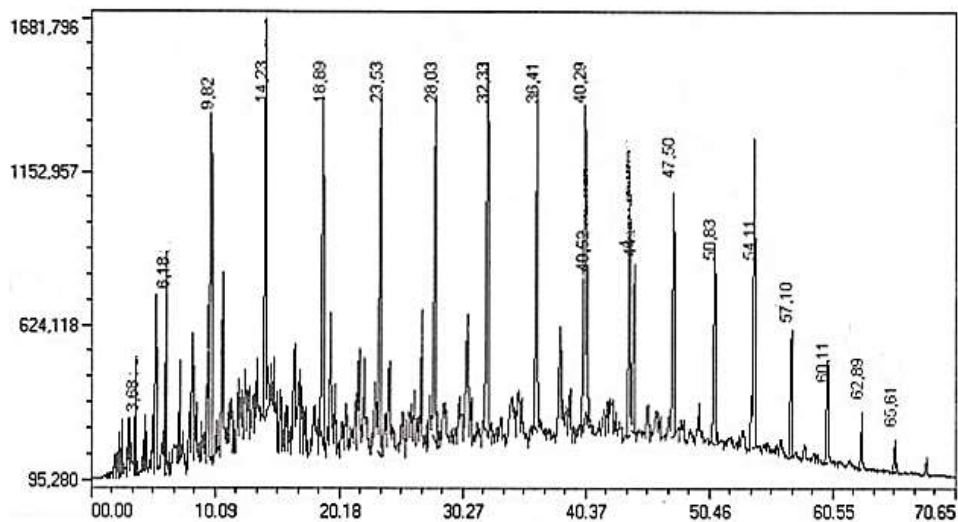


Рисунок 4.10 - Хроматограмма дизельного топлива

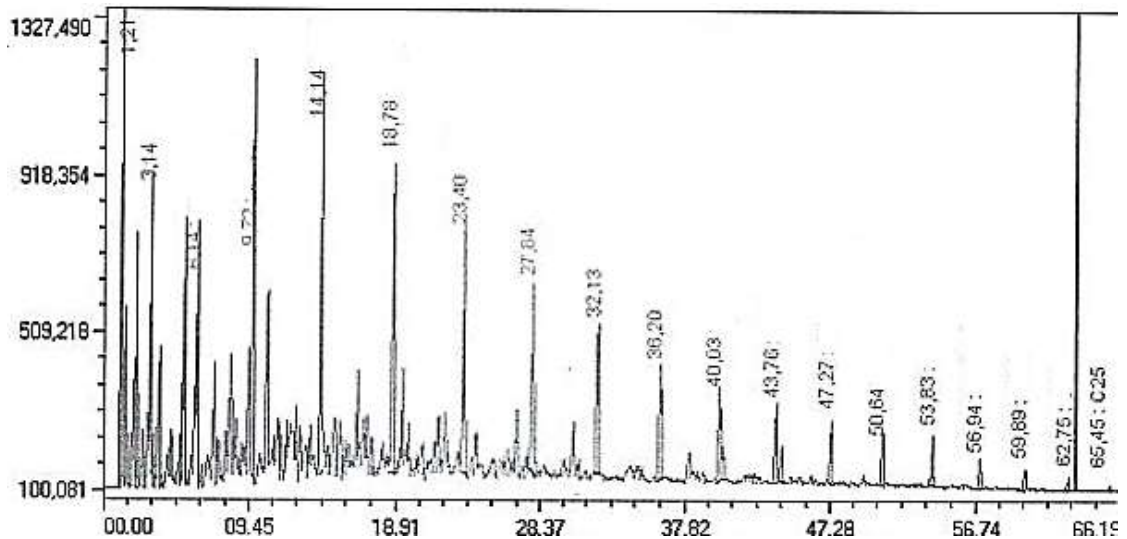


Рисунок 4.11 - Хроматограмма обработанного дизельного топлива

Таблица 4.4 - Изменение углеводородного состава дизельного топлива

Число атомов углерода	Дизельное топливо исходное, %	Дизельное топливо обработанное, %	
8 (Октан)	0,94	0,91	- Δ 3,11
9 (Нонан)	2,38	2,29	- Δ 3,6
10 (Декан)	5,04	4,93	- Δ 2,0
11	7,46	7,67	+ Δ 2,84
12	6,85	7,73	+ Δ 12,87
13	7,97	8,37	+ Δ 5,13
14	8,79	10,01	+ Δ 13,98
15	8,53	8,84	+ Δ 3,69
16	7,99	9,68	+ Δ 21,24
17	6,83	6,92	+ Δ 1,33
18	6,23	6,34	+ Δ 1,91
19	5,55	6,04	+ Δ 8,96
C ₁₉ H ₄₀ (Пристан)	4,32	4,13	- Δ 4,19
20	4,55	4,43	- Δ 2,65
C ₂₀ H ₄₂ (Фитан)	3,19	2,84	- Δ 10,97
21	6,10	4,11	- Δ 32,62
22	2,72	2,01	- Δ 26,10
23	2,57	1,57	- Δ 38,91
24	1,13	0,73	- Δ 35,4
25	0,86	0,45	- Δ 48
Итого	100	100	

По результатам анализа углеводородного состава дизельного топлива установлено снижение количества углеводородов с $C_8 - C_{10}$ и $C_{20} - C_{25}$, при общем увеличении (за исключением C_{14} , C_{19} – Пристан) содержания углеводородов $C_{11} - C_{19}$, т.е. уменьшается количество углеводородов легких и тяжелых фракций, при одновременном увеличении количества основных углеводородов. Таким образом, происходит «нормализация» фракционного состава дизельного топлива. Это должно положительным образом сказаться на улучшении физико-химических свойств не только дизельного, но и смесового топлива на его основе, а также должно способствовать улучшению растворимости при взаимном перемешивании компонентов смесового топлива.

В таблице 4.5 приведены результаты определения жирнокислотного состава рыжикового масла до и после обработки.

Таблица 4.5 - Изменение жирнокислотного состава масла рыжика

Жирнокислотный остаток	Число углеродных атомов и двойных связей	Масло исх.	Масло обр., %	
Миристиновая кислота	14:0	2,04	3,85	+Δ 88,72
Пентадекановая кислота	15:0	2,05	4,05	+Δ 97,56
Пентадеценовая кислота	15:1	6,93	4,87	- Δ 29,72
Пальмитиновая кислота	16:0	1,67	2,43	+ Δ 45,5
Пальмитоолеиновая кислота	16:1	0,03	0	- Δ 100
Маргариновая кислота	17:0	2,02	4,75	+ Δ 135,14
Маргариноолеиновая кислота	17:1	4,82	2,17	- Δ 54,97
Стеариновая кислота	18:0	2,76	4,01	+Δ 145,28
Олеиновая кислота	18:1	47,97	57,83	+ Δ 20,55
Линолевая кислота	18:2	18,3	9,86	- Δ 46,12
Линоленовая кислота	18:3	-	-	-
Арахидиновая кислота.	20:0	-	-	-
Эйкозеновая кислота	20:1	-	-	-
Эйкозодиеновая кислота	20:2	-	-	-
Бегеновая кислота	22:0	3,84	1,74	- Δ 54,68
Эруковая кислота	22:1	3,36	2,87	-Δ 14,48
Докозодиеновая кислота	22:2	0,72	0,03	- Δ 95,83
Лигноцериновая кислота	24:0	1,09	0,65	- Δ 40,36

Продолжение таблицы 4.5

Жирнокислотный остаток	Число углеродных атомов и двойных связей	Масло исх.	Масло обр., %	
Нервоновая кислота	24:1	2,4	0,31	- Δ 87,08
м - глицериды		0	0,38	+Δ
д - глицериды		0	0,2	+ Δ
Итого			100	

Как видно из результатов анализа пробы обработка способствует разрыву межмолекулярных связей, активации, рекомбинации и уменьшению двойных связей в жирнокислотных остатках непредельных кислот – эруковой (на 14,48 %), докозадиеновой (на 95,83 %) при одновременном повышении температуры обрабатываемой пробы в 1,4 – 1,9 раз. При этом уменьшается процентное содержание тяжелых кислот (C_{22} - C_{24}) и увеличение кислот с содержанием углерода C_{14} – C_{18} .

Далее в работе провели исследования изменение жирнокислотного и углеводородного составов смесевое топлива до и после обработки. Состав представлял собой гомогенный раствор, состоящий из 20 % эфиров рыжикового масла и 80 % дизельного топлива.

На рисунках 4.12, 4.13 и в таблице 4.6 приведены результаты определения жирнокислотного и углеводородного составов 20 % дизельного смесевое топлива до и после обработки.

Полученное дизельное смесевое топливо практически соответствует фракционному составу используемого дизельного топлива.

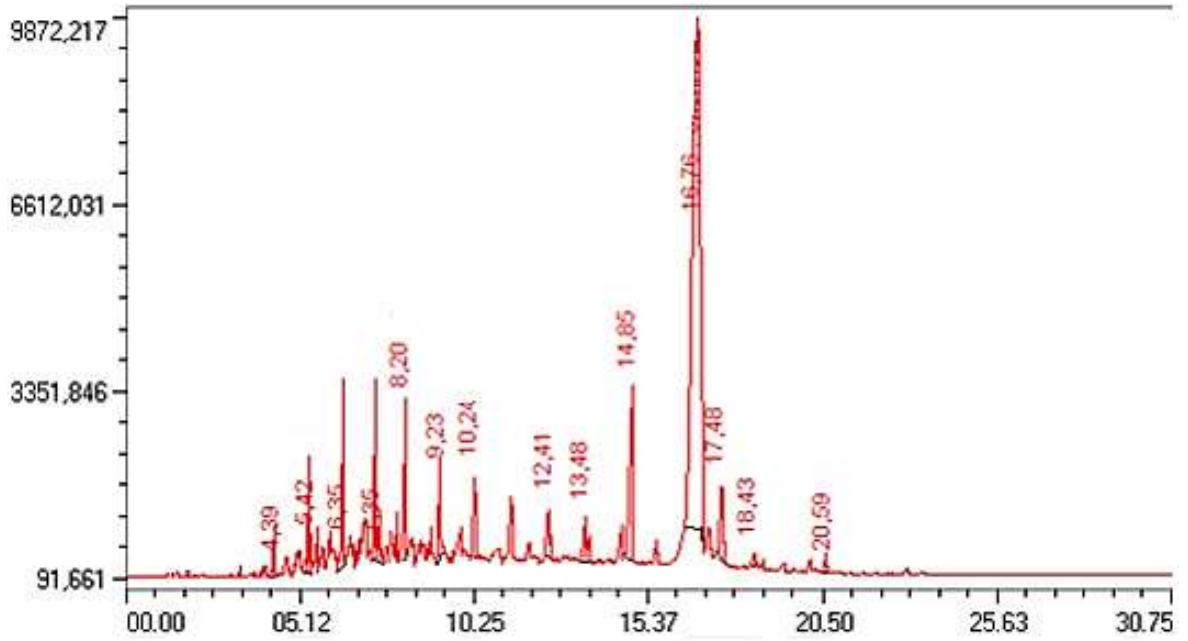


Рисунок 4.12 - Хроматограмма необработанного 20% дизельного смесевое
ТОПЛИВА

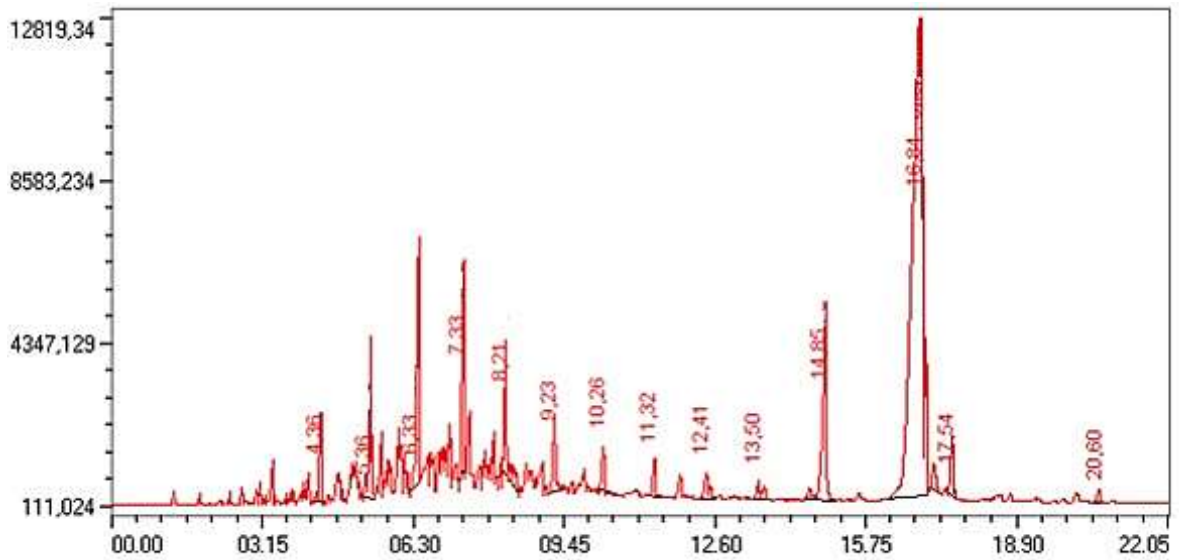


Рисунок 4.13 - Хроматограмма обработанного 20% дизельного смесевое топлива.

Таблица 4.6 - Изменение жирнокислотного и углеводородного составов 20% дизельного смесевое топлива до и после обработки

Число атомов углерода /Жирнокислотный остаток	Число углеродных атомов	20% Дизельное смесевое топливо необработанное	20% Дизельное смесевое топливо обработанное
Октан	8	0,70	0,67
Нонан	9	1,9	1,83
Декан	10	4,03	3,94
	11	5,9	6,06
	12	5,48	6,18
	13	6,37	6,69
	14	7,03	8,01
	15	6,82	7,07
	16	6,39	7,74
	17	5,46	5,53
	18	4,98	5,07
	19	4,44	4,83
Пристан	$C_{19}H_{40}$	3,45	3,30
	20	3,64	3,54
Фитан	$C_{20}H_{42}$	2,55	2,27
	21	4,88	3,28
	22	2,17	1,6
	23	2,1	1,28
	24	0,8	0,516
	25	0,7	0,36
Миристиновая кислота	14:0	0,4	0,75
Пентадекановая кислота	15:0	0,40	0,79
Пентадеценная кислота	15:1	1,38	0,96
Пальмитиновая кислота	16:0	0,33	0,48
Пальмитоолеиновая кислота	16:1	0	-
Маргариновая кислота	17:0	0,4	0,94
Маргариноолеиновая кислота	17:1	0,96	0,43
Стеариновая кислота	18:0	0,55	0,79
Олеиновая кислота	18:1	9,88	11,524
Линолевая кислота	18:2	3,66	1,97
Линоленовая кислота	18:3	-	-
Арахидиновая кислота.	20:0	-	-

Продолжение таблицы 4.6

Число атомов углерода /Жирнокислотный остаток	Число углеродных атомов	20% Дизельное смесевое топливо необработанное	20% Дизельное смесевое топливо обработанное
Эйкозеновая кислота	20:1	-	-
Эйкозодиеновая кислота	20:2	-	-
Бегеновая кислота	22:0	0,72	0,32
Эруковая кислота	22:1	0,65	0,55
Докозодиеновая кислота	22:2	0,1	0,09
Лигноцериновая кислота	24:0	0,20	0,11
Нервоновая кислота	24:1	0,47	0,40
М-глицериды		0,1	0,13
Д-глицериды		0,01	0
Итого		100	100

После комбинированной обработки в модуль-смесителе 20% дизельного смесевое топлива, наблюдалось уменьшения легкой (на 0,19 %) и тяжелой (на 3,61%) фракции, увеличение средней фракции (на 3,78 %).

Таким образом, обработка в комбинированном модуль-смесителе с применением ультразвукового модуля позволяет эффективно перемешивать и улучшать физико-химические показатели получаемого дизельного смесевое топлива.

4.3 Стендовые испытания топливной аппаратуры трактора

Для проверки гипотезы о наиболее подходящем топливе на базе АОр РТП «Некрасовское» (Тамбовская область, г. Рассказово) были проведены стендовые испытания топливной аппаратуры ТНВД 65Н-1100150 с комплектом форсунок ФД-22 трактора ЮМЗ-6Л. В таблице 4.7 сведены основные результаты испытаний форсунок.

Таблица 4.7 – Основные результаты испытания форсунок

Исследуемые параметры	Дизельное топливо	20% дизельное смесевое топливо	30% дизельное смесевое топливо	50% дизельное смесевое топливо
Давление начала впрыскивания, кПа	175	175	175	175
Качество распыления топлива	норма	норма, но дальнобойность больше, в сравнении с дизельным	норма, но дальнобойность больше, в сравнении с дизельным	норма, но дальнобойность больше, в сравнении с дизельным
Герметичность запирающего конуса распылителя	норма	норма	норма	норма

Кроме того, оценивали характер распыливания топлива по диаметру капли топлива. Диаметр капли определяли по известной формуле Заутера. На рисунке 4.14 представлена зависимость изменения диаметра капли топлива от кинематической вязкости. Из графика видно, что диаметр капли у дизельного смесевого топлива выше, чем у дизельного топлива на 6%. Из-за увеличения размера (диаметра) капель топлива ухудшается качество распыливания, что влияет на образование отложений на стенках камеры сгорания.

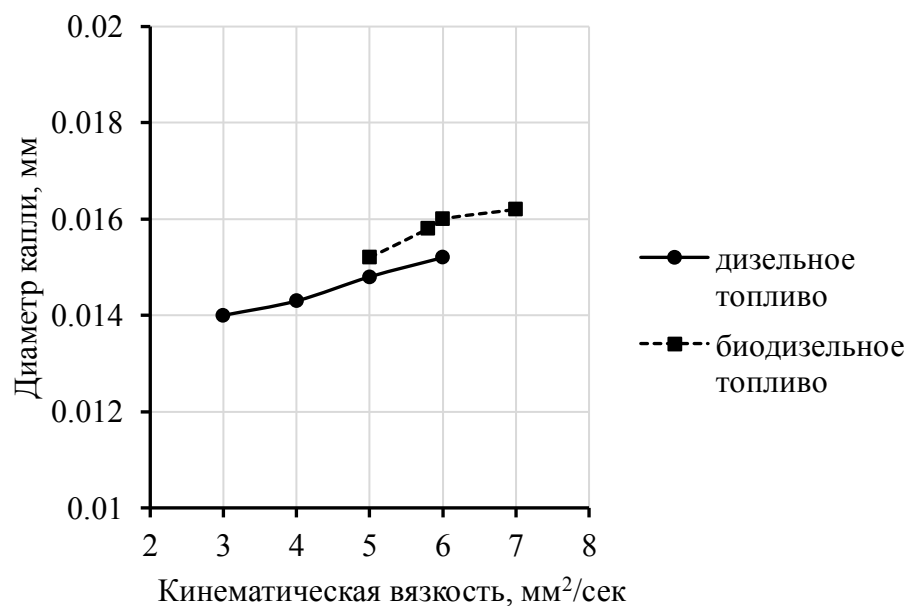


Рисунок 4.14 – Динамика изменения диаметра капли от кинематической вязкости топлива

При исследованиях проверялась работа подкачивающего насоса ТНВД на дизельном топливе. С помощью насоса ручной подкачки осуществлялось заполнение системы топливом и удаление из нее воздуха при неработающем двигателе.

Подкачивающий насос исследуемой дизельной топливной аппаратуры обеспечивал давление подкачки, равное 152 кПа, что является штатным давлением при нормальной температуре топлива (20°C) и работе на дизельном топливе. Для увеличения производительности насоса при повышенной температуре топлива производилась его проверка и настройка.

После настройки топливной аппаратуры давление подкачки дизельного топлива поднялось до 195 кПа (рисунок 4.15), а для дизельного смесового топлива с содержанием сложного метилового эфира рыжикового масла 50% - до значений, превышающих 200 кПа. Эти значения давления подкачки получены при температуре топлива, равной 40 °С. В ходе дальнейших исследований прослеживалась общая тенденция к понижению давления подкачивающего насоса при повышении температуры. При использовании всех образцов дизельного смесового топлива и увеличении температуры топлива до 70 °С давление подкачки не выходило за рамки нормы (не снижалось ниже 172 кПа при норме 152 кПа).

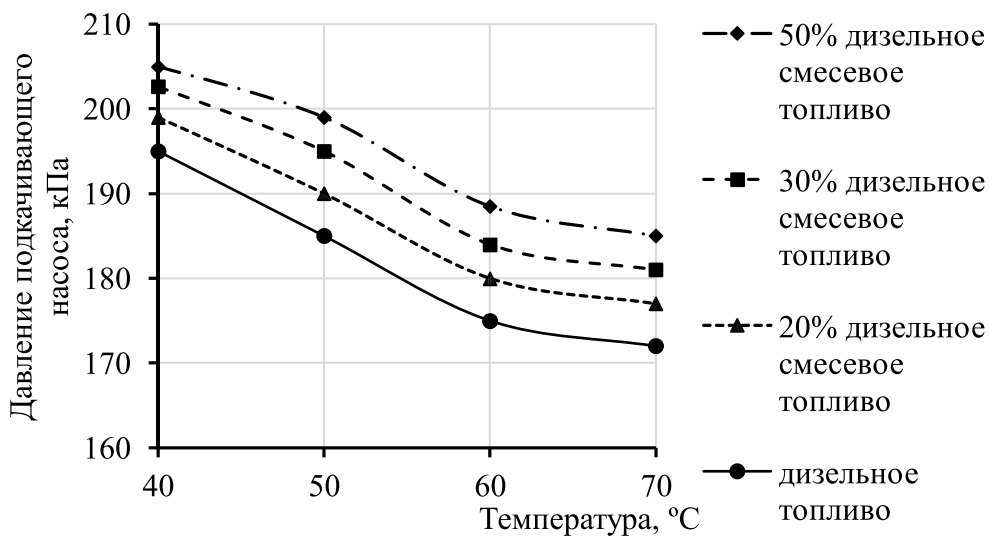


Рисунок 4.15 - Зависимость давления подкачки топлива в ТНВД от температуры топлива

Исследована зависимость цикловой подачи топлива от его температуры (рисунок 4.16). Следует отметить, что при температуре топлива, равной 40°C, и работе на дизельном смесевом топливе, содержащем 50% биодизельного топлива, отмечено увеличение цикловой подачи примерно на 5 мм³/цикл (рисунок 4.17). При дальнейшем нагреве всех видов топлива цикловая подача снижается. Также наблюдается хорошая равномерность подачи топлива по секциям ТНВД при работе на всех исследуемых видах топлива.

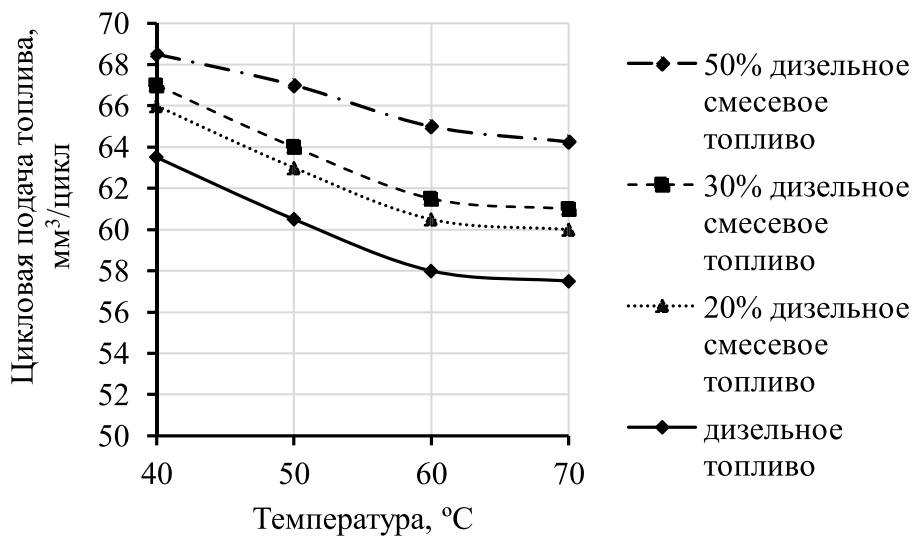


Рисунок 4.16 - Зависимость цикловой подачи ТНВД на номинальном режиме от температуры

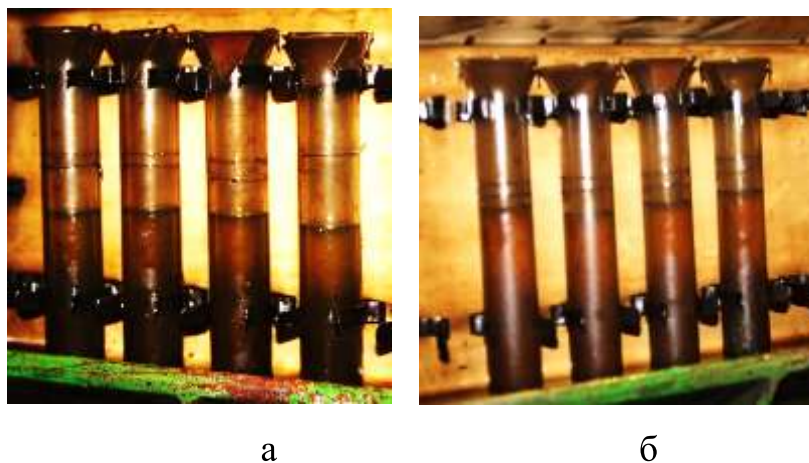


Рисунок 4.17 - Внешний вид мерных колб стенда топливной аппаратуры при подаче дизельного топлива (а) и 50% дизельного смесевого топлива (б)

На последнем этапе исследовалась пусковая подача топлива. При температуре 40 °С пусковая цикловая подача дизельного топлива составляла 18 мм³/цикл (рисунок 4.18). При работе на 50% дизельном смесевом топливе, пусковая цикловая подача возросла до 22 мм³/цикл. Повышение температуры исследуемых топлив приводило к снижению пусковой подачи. Минимальное значение пусковой цикловой подачи (менее 14 мм³/цикл) отмечено при температуре 70 °С и работе на дизельном топливе.

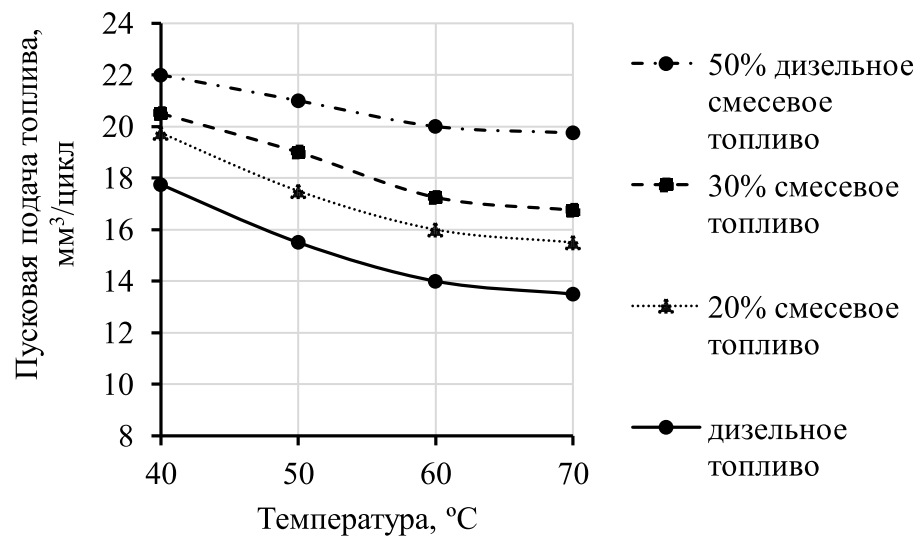


Рисунок 4.18 - Зависимость пусковой цикловой подачи ТНВД от температуры

Проведенный анализ показал, что основные показатели исследуемой топливной аппаратуры (давления подкачки топлива, цикловая подача топлива на номинальном режиме, пусковая цикловая подача) зависят от вида топлива (его физико-химических свойств) и его температуры. На рисунках 4.19, 4.20 показан характер изменения кинематической вязкости и плотности топлив при повышении температуры.

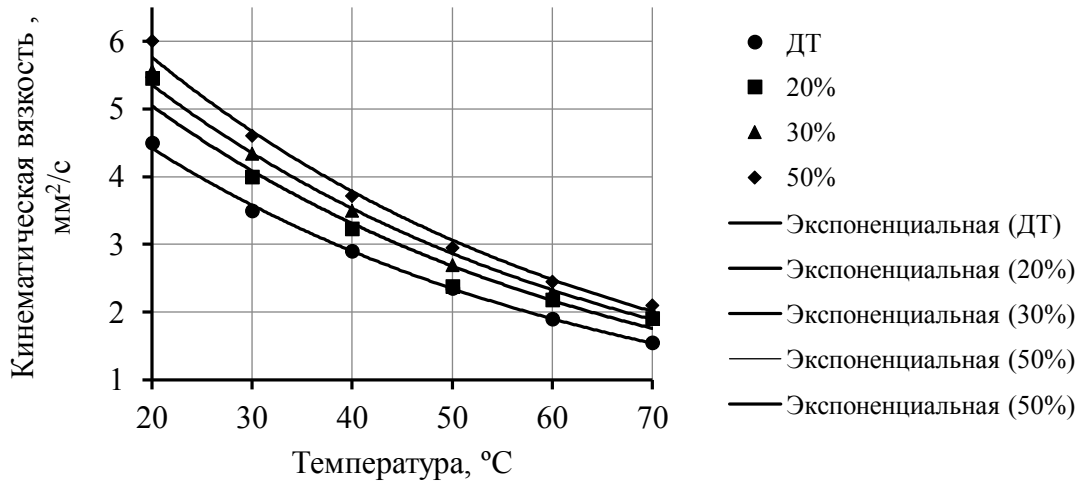


Рисунок 4.19 - Зависимость кинематической вязкости исследуемых топлив от температуры

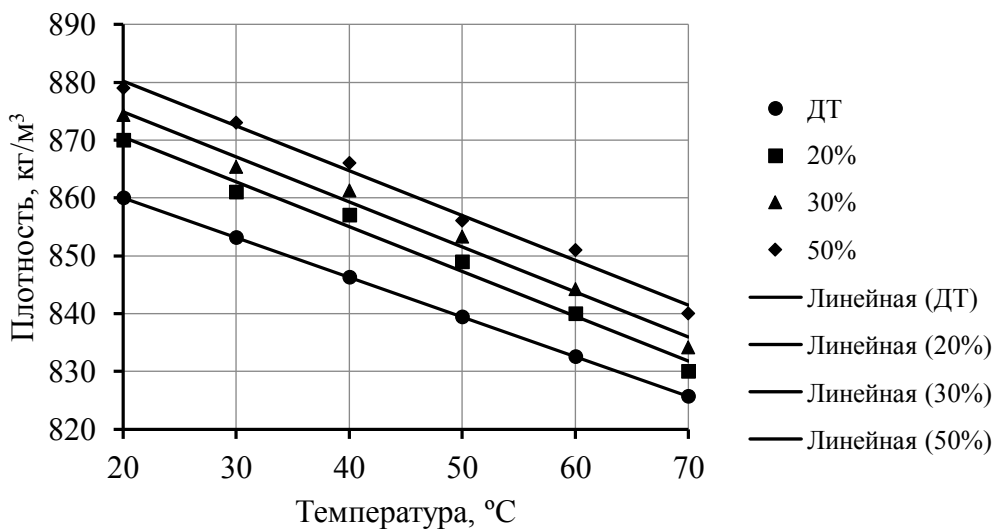


Рисунок 4.20 - Зависимость плотности исследуемых топлив от температуры

Данные рисунков 4.14 - 4.20 свидетельствуют о том, что основные показатели работы дизельной топливной аппаратуры в значительной степени определяются плотностью и кинематической вязкостью топлива [118, 119]. В соответствии с ГОСТ 32511-2013 дизельное топливо должно иметь плотность в диапазоне от 820 до 845 кг/м³ и кинематическую вязкость в диапазоне от 2,0 до 4,5 мм²/с (при температуре 40 °C). Рассматриваемый ТНВД имеет требуемые показатели именно при работе на топливах с указанными плотностью и вязкостью. При этом

наблюдается стабильная работа топливной аппаратуры и хорошая равномерность подачи топлива по секциям ТНВД. У исследуемого ТНВД 65Н-1100150 наблюдается выход за регулировочные показатели работы на топливах с кинематической вязкостью выше $4,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ и ниже $3 \text{ мм}^2/\text{с}$.

При понижении вязкости увеличиваются подтекания и просачивания топлива во всех зазорах и не плотностях, что приводит к снижению цикловой подачи топлива. Подтекания топлива через форсунку после окончания впрыскивания увеличивают нагарообразование на деталях, образующих камеру сгорания, включая носок распылителя форсунки, и дымность отработавших газов. Применение маловязкого топлива приводит к ухудшению его смазывающей способности, увеличению износов плунжерных пар и других прецизионных деталей.

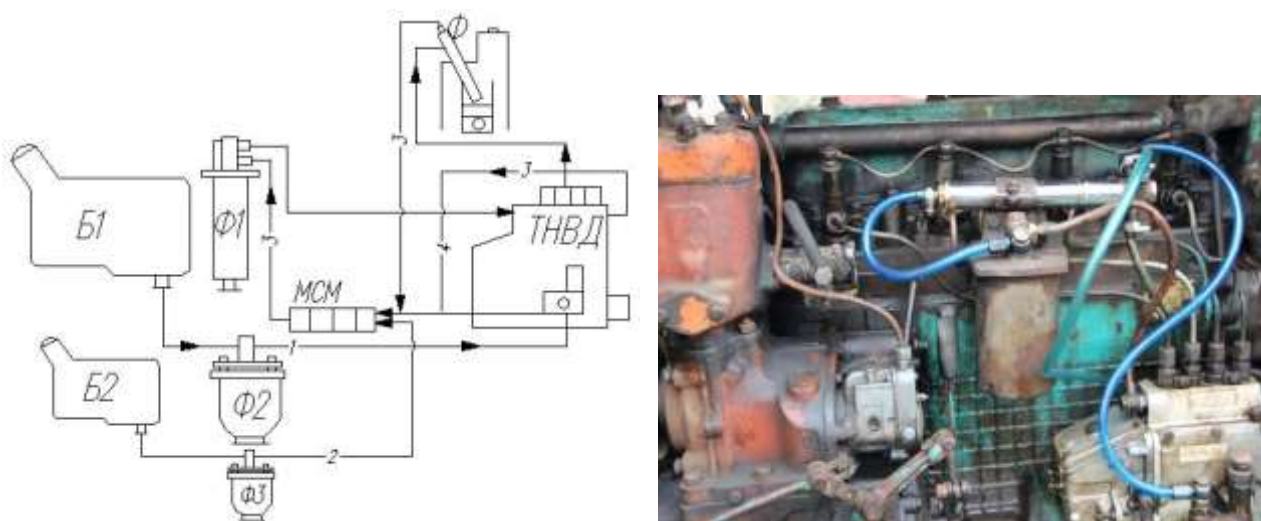
Использование топлива повышенной вязкости приводит к увеличению диаметра капель распыливаемого топлива, на испарение топлива более тяжелого фракционного состава затрачивается большее время, отмечаются неполнота сгорания топлива, повышенное нагарообразование, увеличение дымности отработавших газов, повышается расход топлива [120].

Для повышения эффективности работы дизельного двигателя на дизельном смесевом топливе необходимо производить корректировку работы топливной аппаратуры под конкретное дизельное смесевое топливо обработкой комбинированным модуль-смесителем, который позволит добиться желаемого результата без внесения существенных изменений в конструкцию автотракторной техники.

Анализ результатов стендовых испытаний показал, что наименьшее отклонение от регулировочных показателей работы топливной аппаратуры ТНВД 65Н-1100150 с комплектом форсунок ФД-22 трактора ЮМЗ-6Л наблюдается при использовании 20 % дизельного смесевое топлива.

4.4 Исследования ресурсных характеристик топливных аппаратур в полевых условиях, в зависимости от выбранного топлива

Исходя из результатов исследования влияния параметров ультразвуковой обработки на свойства дизельного смесового топлив, сравнения свойств обработанного комбинированным модуль - смесителем дизельного смесового топлива и не обработанным, стендовых испытаний работы топливной аппаратуры трактора в качестве основного исследуемого топлива было выбрано 20% дизельное смесовое топливо. На основании параметров работы подкачивающего насосы ТНВД и расчетных данных ультразвукового модуля был изготовлен комбинированный модуль – смеситель для работы с 20 % дизельным смесовым топливом (рисунок 4.21).



Б1 – бак для дизельного топлива, Б2 – бак для биодизельного топлива, Φ1 – фильтр тонкой очистки, Φ2 – фильтр грубой очистки, Φ3 – фильтр грубой очистки, МСМ – модуль- смеситель, ТНВД – топливный насос высокого давления, Φ – форсунки. 1 – дизельное топливо; 2 - биодизельное топливо; 3 – дизельное смесовое топливо; 4 – дренаж

Рисунок 4.21 – Схема и фото топливной системы трактора ЮМЗ-6Л с встроенным комбинированным модуль-смесителем

На рисунках 4.22 - 4.25 представлена динамика изменения давления впрыска форсунок, цикловой, пусковой подачи топлива и давления подкачивающего насоса в зависимости от наработки моточасов и вида используемого топлива. На рисунке 4.22 показана динамика падения давления начала впрыска.

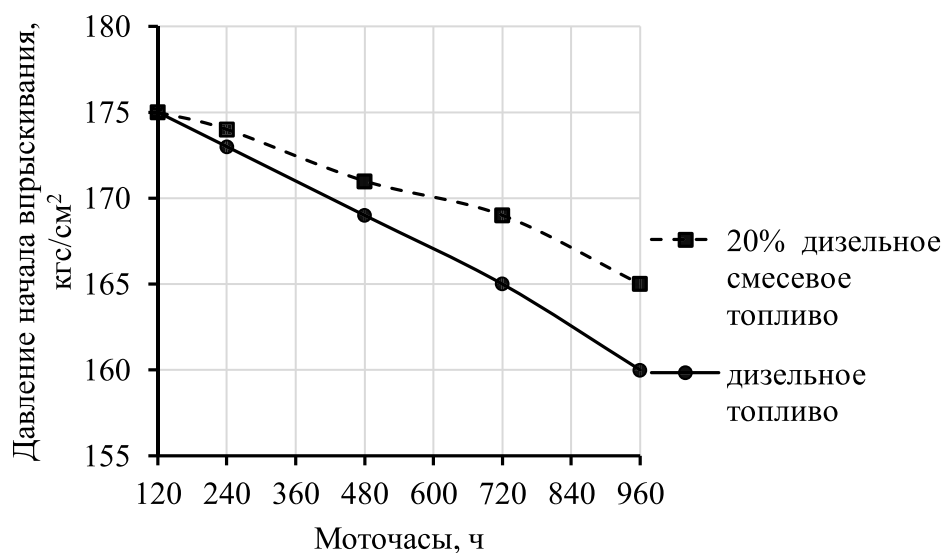


Рисунок 4.22 – Динамика изменения начала впрыскивания топлива в зависимости от моточасов

В ходе испытаний давление не изменялось первые 120 моточасов, далее происходило постепенное снижение давления начала впрыска. На дизельном топливе более быстрая динамика снижения давления начала впрыска. Так после 960 часов наработки форсунки, работающие на дизельном топливе, имели давление начала впрыска в 160, кгс/см². На смесевом – 165 кгс/см².

На рисунке 4.23 показана динамика падения цикловой подачи ТНВД. Изменение цикловой подачи началось после 240 моточасов наработки. После 240 моточасов происходило постепенное снижение уровня цикловой подачи. На дизельном топливе более быстрая динамика снижения уровня цикловой подачи. Так после 960 часов наработки ТНВД, работающий на дизельном топливе, имел уровень цикловой подачи в 62 мм³/цикл. На смесевом – 65 мм³/цикл.

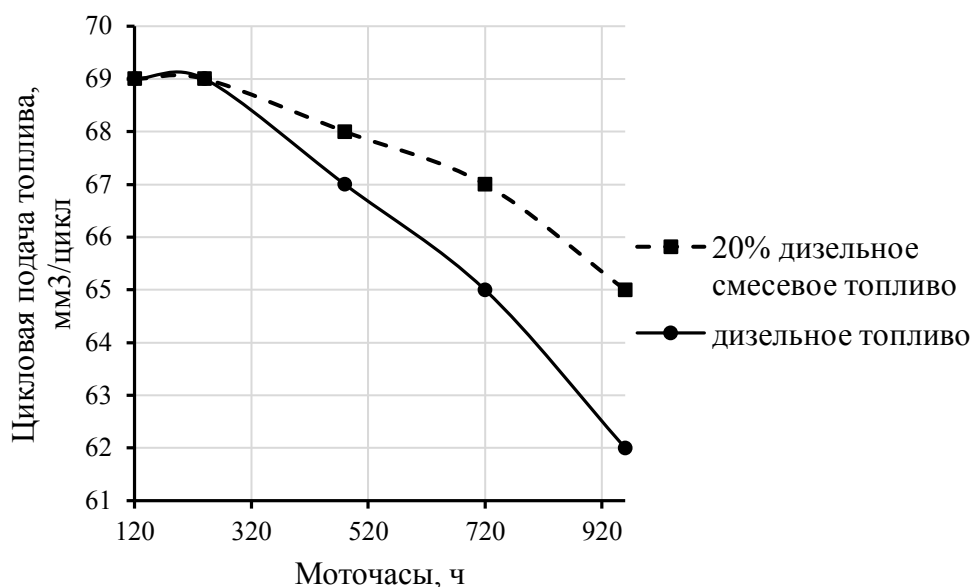


Рисунок 4.23 - Динамика изменения цикловой подачи топлива в зависимости от моточасов

На рисунке 4.24 показана динамика падения пусковой подачи ТНВД. Изменение пусковой подачи началось после 120 моточасов наработки. После 120 моточасов происходило постепенное снижение уровня цикловой подачи. На дизельном топливе более быстрая динамика снижения уровня пусковой подачи. Так после 960 часов наработки ТНВД, работающий на дизельном топливе, имел уровень пусковой подачи более 17 мм³/цикл. На смесевом – 20 мм³/цикл.

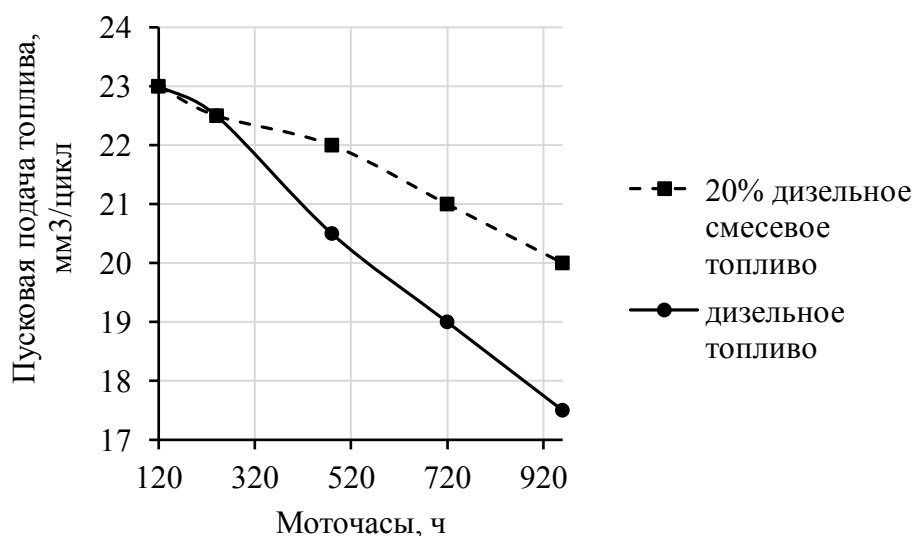


Рисунок 4.24 - Динамика изменения пусковой подачи топлива от моточасов

На рисунке 4.25 показана динамика падения давления подкачивающего насоса. В ходе испытаний давление не изменялось первые 120 моточасов, далее происходило постепенное снижение давления подкачивающего насоса. На дизельном топливе более быстрая динамика снижения давления. Так после 960 часов наработки подкачивающий насос, работающий на дизельном топливе, имел давление в 175 кПа, на смесевом – 190 кПа.

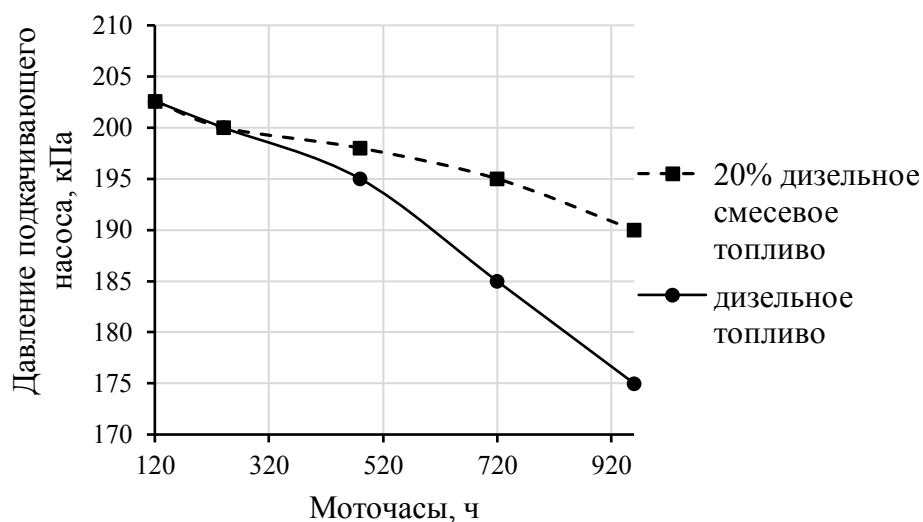


Рисунок 4.25 - Динамика изменения давление подкачивающего насоса от моточасов

В ходе исследований установлено, что работа трактора на дизельном смесевом топливе положительно влияет на ресурс основных агрегатов топливной системы, таких как распылители форсунок, плунжерные пары ТНВД, подкачивающий насос. Так в сравнении с аналогичной топливной аппаратурой, работающей на дизельном топливе, после 960 моточасов наработки показатели распылителей форсунок, работающих на дизельном смесевом топливе выше на 3 %, пусковая подача плунжерных пар – на 12,5%, цикловая подача плунжерных пар – на 4,6%, подкачивающего насоса на 7,89% [121, 122].

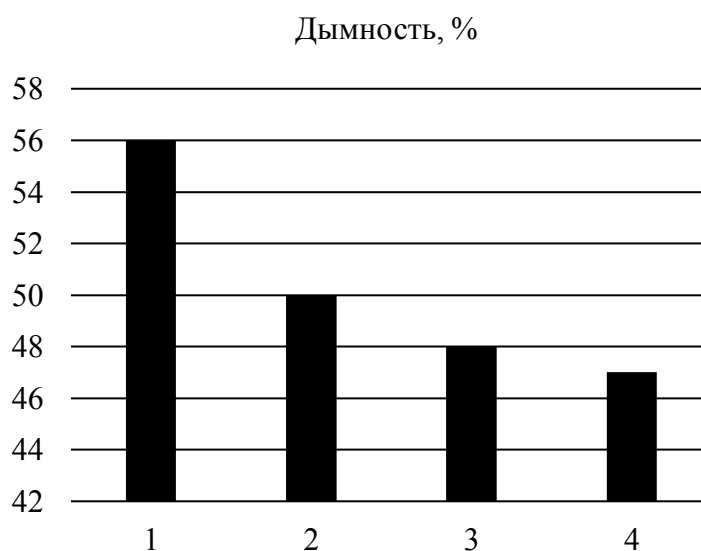
Использование дизельного смесевое топлива совместно с модуль-смесителем оказывает положительный эффект на работу и ресурс топливной аппаратуры.

4.5 Полевые исследования работы дизельного двигателя с встроенным комбинированным модуль – смесителем

Исследования проводили на тракторе ЮМЗ-6Л с двигателем марки Д – 65Н. Осуществляли измерения технико-экономических показателей в полевых условиях, а также экологических показателей (дымность, концентрация углеводородов, оксидов азота в отработанных газах). Результаты измерения представлены в таблице 4.8 - 4.9, рисунках 4.26 – 4.30.

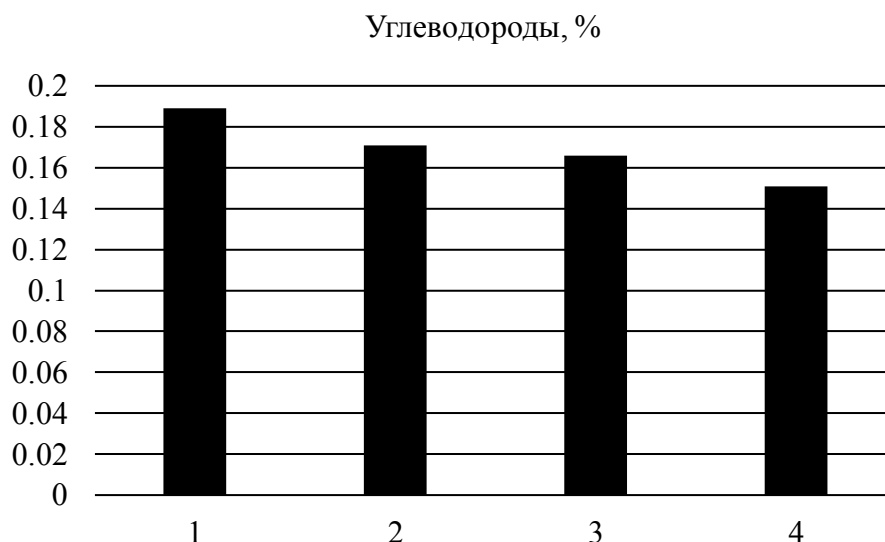
Таблица 4.8 – Экологические показатели двигателя Д-65Н

Показатель	Виды топлива			
	дизельное топливо	20% дизельное смесевое топливо	30% дизельное смесевое топливо	50% дизельное смесевое топливо
Дымность, %	56	50	48	47
Концентрация углеводородов, %	0,189	0,171	0,166	0,151
Концентрация оксидов азота, %	0,285	0,29	0,31	0,32



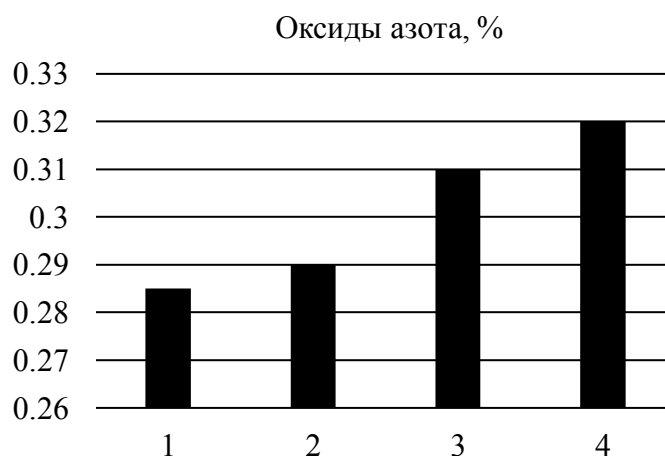
1 – дизельное топливо; 2 – 20% дизельное смесевое топливо; 3 – 30% дизельное смесевое топливо;
4 – 50% дизельное смесевое топливо.

Рисунок 4.26 – Изменение дымности отработанных газов



1 – дизельное топливо; 2 – 20% дизельное смешанное топливо; 3 – 30% дизельное смешанное топливо; 4 – 50% дизельное смешанное топливо.

Рисунок 4.27 – Изменение суммарных углеводородов отработанных газов



1 – дизельное топливо; 2 – 20% дизельное смешанное топливо; 3 – 30% дизельное смешанное топливо; 4 – 50% дизельное смешанное топливо.

Рисунок 4.28 – Изменение оксидов азота отработанных газов

Дымность, концентрация углеводородов дизельного смешанного топлива в отработанных газах уменьшается по мере добавления в него биодизельного топлива, а концентрация оксидов азота увеличивается. Дымность 20% дизельного смешанного топлива ниже дизельного топлива на 11%, концентрация углеводородов на 9,5%, концентрация оксидов азота выше на 1,7% [123].

Таблица 4.9 – Техничко-экономические показатели и производительность двигателя Д-65Н при работе на разных видах топлив

Показатель	Виды топлива			
	дизельное топливо	20% дизельное смесевое топливо	30% дизельное смесевое топливо	50% дизельное смесевое топливо
S , га	0,1	0,1	0,1	0,1
Δt , ч	0,25	0,23	0,27	0,28
G_T , кг/ч	8,04	7,93	8,1	8,25
P , га/ч	0,4	0,43	0,37	0,36
q , кг/га	20,1	18,239	21,87	23,1



1 – дизельное топливо; 2 – 20% дизельное смесевое топливо; 3 – 30% дизельное смесевое топливо; 4 – 50% дизельное смесевое топливо.

Рисунок 4.29 – Изменение производительности трактора ЮМЗ – 6Л при работе на разных видах топлива



1 – дизельное топливо; 2 – 20% дизельное смесевое топливо; 3 – 30% дизельное смесевое топливо; 4 – 50% дизельное смесевое топливо.

Рисунок 4.30 – Изменение удельного расхода топлива на единицу обрабатываемой площади, кг/га

При испытании трактора с встроенным комбинированным модуль-смесителем на разных видах дизельных смесевых топлив и дизельном топливе установлено изменение технико-экономических показателей и производительности трактора ЮМЗ – 6Л с двигателем Д-65Н. Максимальная производительность зафиксирована при работе на 20% дизельном смесевом топливе - на 7,5% выше, чем при работе на дизельном топливе. Дальнейшее увеличение биодизельного топлива до 30% и 50% в смесевом приводит к снижению производительности на 7,5% и 10% соответственно. Это объясняется тем, что рабочие параметра комбинированного модуль-смесителя подобраны под обработку 20% дизельного смесевоего топлива.

Минимальный удельный расход топлива на единицу обрабатываемой площади зафиксирован при работе на 20% смесевом топливе - на 9,3% ниже, чем при работе на дизельном топливе. Дальнейшее увеличение биодизельного топлива до 30% и 50% в смесевом приводит к повышению удельного расхода на единицу обрабатываемой площади на 8,8% и 15% соответственно.

Технологические рекомендации по использованию дизельного смесевоего топлива на тракторе приведены в Приложении В. Акты внедрения – Приложение Г.

4.6 Выводы

1. Установлены оптимальные параметры работы ультразвукового модуля: коэффициент отношения высоты сопла к ширине 0,25-0,35, время обработки 27-38 с и давление на входе в смеситель 212-213 кПа для достижения максимального снижения кинематической вязкости.

2. Применение комбинированного модуль-смесителя способствует улучшению основных физико-химических показателей топлива: снижению значений кинематической вязкости (28 - 30%), плотности (2-3%), температуры вспышки (на 15°C); увеличению цетанового числа (8%) и низкотемпературных свойств 10% - 18%, однако при этом низкотемпературные свойства 20 % дизельного смесевоего топлива остаются хуже, чем у дизельного.

3. Установлено изменение состава, обработанного 20% дизельного смесевоего топлива. Количество легких и тяжёлых фракций уменьшилось на 0,19 % и на 3,61% соответственно, а средних увеличилось на 3,78 % в сравнении с не обработанным.

4. Установлены зависимости изменения давления подкачивающего насоса, цикловой подачи топлива, пусковой подачи топлива при увлечении температуры на различных видах топлива.

Цикловая подача при работе на 50% (при 40°C) дизельном смесевом топливе повышается на 7,3 % (5 мм³/цикл), по сравнению дизельным топливом; пусковая подача на 18 % (4 мм³/цикл), а давление подкачивающего насоса на 3,75%.

У исследуемого ТНВД 65Н-1100150 наблюдается выход за регулировочные показатели работы на топливах с кинематической вязкостью выше 4,5 мм²/с и ниже 3 мм²/с.

5. Установлено, улучшение показателей работы топливной аппаратуры трактора на 20 % дизельном смесевом топливе с встроенным модуль-смесителем, после 960 моточасов наработки. Показатели распылителей форсунок повышаются на 3 %, пусковая подача плунжерных пар – на 12,5%, цикловая подача плунжерных пар – на 4,6%, подкачивающего насоса на 7,89%.

6. Дымность, концентрация углеводородов дизельного смесевоего топлива в отходящих газах уменьшается по мере добавления в него биодизельного топлива, а концентрация оксидов азота увеличивается. Дымность 20% дизельного смесевоего топлива ниже дизельного топлива на 11%, концентрация углеводородов на 9,5%, концентрация оксидов азота выше на 1,7%.

7. Установлено повышение производительности трактора ЮМЗ – 6Л с двигателем Д65 – Н при работе на 20% дизельном смесевом топливе - на 7,5% выше, чем при работе на дизельном топливе. Дальнейшее увеличение биодизельного топлива до 30% и 50% в смесевом приводит к снижению производительности. Минимальный удельный расход топлива на единицу обрабатываемой площади зафиксирован также при работе на 20% смесевом топливе - на 9,3% ниже, чем при работе на дизельном топливе. Дальнейшее увеличение биодизельного топлива до 30% и 50% в смесевом приводит к повышению удельного расхода на единицу обрабатываемой площади на 8,8% и 15% соответственно.

5. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представлено экономическое обоснование результатов исследований от применения дизельного смесевого 20% обработанного топлива в комбинированном модуль-смесителе, встроенным в топливную систему трактора ЮМЗ-6Л на примере небольшого КФХ Тамбовской области. На сезон (далее применяется термин «год») крестьянско-фермерскому хозяйству приобретается 0,36 - 0,4 ц дизельного топлива в расчете на единицу площади пашни [124, 125]. Из него 3200 кг дизельного и 800 кг (или 900 л) биодизельного топлива.

Экономический эффект рассчитывается по формуле 5.1.

$$\mathcal{E} = P_{\text{дт}} \cdot C_{\text{дт}} - P_{\text{смт}} \cdot C_{\text{смт}} \quad (5.1)$$

где \mathcal{E} – экономический эффект от внедрения на 1 трактор КФХ, руб.,

$P_{\text{дт}}$ – годовой расход дизельного топлива, л.,

$C_{\text{дт}}$ – цена дизельного топлива, руб./л.,

$P_{\text{смт}}$ – годовой расход дизельного смесевого топлива, л.,

$C_{\text{смт}}$ – цена дизельного смесевого топлива, руб./л.

Расход дизельного топлива рассчитывается по формуле 5.2

$$P_{\text{дт}} = G_{\text{дт}} \cdot k_N \cdot k_T \cdot T \quad (5.2)$$

где $G_{\text{дт}}$ – часовой расход дизельного топлива, л/ч

k_N, k_T - коэффициенты загрузки двигателя по мощности и времени.

T - годовая наработка, ч.

$$P_{\text{дт}} = 5,4 \cdot 0,86 \cdot 0,75 \cdot 1200 = 4179,6 \text{ л/год.}$$

Расход дизельного смесевого топлива рассчитываем по формуле 5.3.

$$P_{\text{смт}} = G_{\text{смт}} \cdot k_N \cdot k_T \cdot T \quad (5.3)$$

где $G_{\text{смт}}$ – часовой расход дизельного смесевого топлива, л/ч

$$P_{\text{смт}} = 5,0 \cdot 0,86 \cdot 0,75 \cdot 1200 = 3870 \text{ л/год.}$$

Цену дизельного смесевого топлива рассчитываем по формуле 5.4

$$C_{\text{смт}} = 0,8 \cdot C_{\text{дт}} + 0,2C_{\text{бт}} \quad (5.4)$$

Цена биодизельного топлива складывается из суммы всех затрат, формула 5.5.

$$Ц_{БТ} = Z_c + Z_{ЗП} + Z_{ЕСН} + Z_{АО} + Z_{РО} + Z_{ПР} \quad (5.5)$$

где Z_c – затраты на используемое сырье, руб./л;

$Z_{ЗП}$ – затраты на заработную плату, руб./л;

$Z_{ЕСН}$ – затраты на единый социальный налог, руб./л;

$Z_{АО}$ – затраты на амортизационные отчисления, руб./л;

$Z_{РО}$ – затраты на ремонт оборудования, руб./л;

$Z_{ПР}$ – прочие затраты, равны 3 % от заработной платы, руб./л.

Смета затрат на оборудование представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Смета затрат на комплектацию оборудования

Наименование	Кол-во, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Установка для синтеза биодизельного топлива, производительностью 900 л/год	1	175 000	175 000
Комбинированный модуль-смеситель	1	25 000	25 000
Итого			200 000

В таблице 5.2 представлена смета затрат на сырье.

Таблица 5.2 – Смета затрат на сырье

Наименование	Кол-во, кг/год	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб./год (руб./л)
Масло растительное (из некондиционных семян собственного отжима)	1700	2	3400 (3,78)
Спирт	200	23	4600 (5,11)
Катализатор	20	83	1660 (1,84)
Углекислый газ	-		700 (0,78)
Электричество	36 кВт	5	180 (0,2)
Итого			10540 (11,7)

Затраты на заработную плату рассчитываются по формуле 5.6.

$$Z_{3П} = \frac{N \cdot C_{ср} \cdot T}{\eta} \quad (5.6)$$

где N – количество рабочих, чел;

$C_{ср}$ – средняя часовая тарифная ставка рабочих, руб./ч;

T – фонд рабочего времени, ч;

η – коэффициент, учитывающий рост производительности труда рабочих.

$$Z_{3П} = 11657 \text{руб/год} = 12,9 \text{руб/л.}$$

Затраты на единый социальный налог определим по формуле 5.7.

$$Z_{ЕСН} = \frac{Z_{3П} \cdot П_{ЕСН}}{100} \quad (5.7)$$

$П_{ЕСН}$ – процент обязательных отчислений во внебюджетные фонды.

Амортизационные отчисления рассчитываем по формуле 5.8.

$$Z_{АО} = \frac{Z_{сод} \cdot Н_{ам}}{100} \quad (5.8)$$

где $Z_{сод}$ – затраты на содержание оборудования, руб;

$Н_{АО}$ – норма амортизационных отчислений, 14,1.

$$Z_{сод} = \frac{C_{об} \cdot Н_{р}}{100} \quad (5.9)$$

где $C_{об}$ – стоимость оборудования, руб;

$Н_{р}$ – норматив на ремонт оборудования, составляет 5%.

Таким образом, цена биодизельного топлива составила:

$$Ц_{БТ} = 11,7 + 12,9 + 3,39 + 1,37 + 0,39 + 9,7 = 39,45 \text{руб/л.}$$

Тогда цена смесового 20% топлива $Ц_{СМТ} = 47,89 \text{руб/л}$, а экономическая эффективность на 1 трактор составляет 23 646 руб./год или 118 229 руб./год на небольшое КФХ из 5 тракторов.

Срок окупаемости 1 год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании расчетов уравнений математической модели, исследований условий обработки топлива, стендовых испытаний топливной аппаратуры усовершенствована конструкция комбинированного модуль-смесителя, состоящая из нескольких из нескольких модулей, которые можно компоновать различным образом. Разработана конструкция ультразвукового модуля.

Усовершенствованный комбинированный модуль-смеситель изменяет состав и свойства обрабатываемого топлива. Обработка встроенным в топливную аппаратуру автотракторной техники комбинированного модуль-смесителя 20% дизельного смесевое топлива позволяет улучшить технико-экономические показатели дизельного двигателя.

1. Обоснован способ обработки дизельного и дизельного смесевое топлива комбинированием волновых воздействий с ультразвуковой обработкой.

2. Разработана конструкция ультразвукового модуля комбинированного модуль-смесителя.

3. Разработана математическая модель и алгоритм расчета параметров (F , l , d , β , h) и коэффициентов λ , λ_1 ультразвукового модуля для обработки дизельного смесевое топлива с заданными вязкостно-плотностными свойствами. Определен интервал площади сечения сопла F [8,7– 21,5] мм², интервал угла заточки пластины β [0,3° - 88°], интервал длины пластины l [7,41 – 25] мм, интервал высоты пластины h [9,29- 14,64] мм, интервал толщины пластины d [0,62 – 0,98] мм, интервалы коэффициентов λ и λ_1 [0,1 - 0,4] и [1,4 - 1,8] соответственно. Установлена максимальная интенсивность ультразвукового воздействия для разных видов топлив [38,3 - 65,4] Вт/см², при частоте 200 кГц, мощностях ультразвукового излучателя 90 Вт и коэффициенте λ из [0,1-0,4].

4. Установлены оптимальные параметры работы ультразвукового модуля: коэффициент отношения высоты сопла к ширине 0,25-0,35, время обработки 27-38 с и давление 212-213 кПа.

5. Установлено улучшение свойств и состава обработанного топлива комбинированным модуль-смесителем: снижение кинематической вязкости (28 - 30%), плотности (2-3%), температуры вспышки (на 15°C), легких (0,19%) и тяжелых фракций (3,61%); увеличение цетанового числа (8%), средних фракций (3,78%).

6. Установлено повышение параметров работы топливной аппаратуры на 50% дизельном смесевом топливе (при 40°C): цикловой подачи на 7,3 %, пусковой подачи на 18% и давления подкачивающего насоса на 3,75%.

Установлено улучшение параметров работы топливной аппаратуры на 20% дизельном смесевом топливе после 960 моточасов наработки топливной аппаратуры трактора с встроенным комбинированным модуль-смесителем: показателей распылителей форсунок на 3 %, пусковой подачи плунжерных пар – на 12,55%, цикловой подачи – на 4,6%, подкачивающего насоса на 7,86% по сравнению с показателями аналогичной топливной аппаратуры, работающей на дизельном топливе.

7. Установлено изменение экологических и технико-экономических показателей при работе трактора на обработанном 20% дизельном смесевом топливе: дымность снижается на 11%, концентрация углеводородов снижается на 9,5%, концентрация оксидов азота повышается на 1,8%, производительность повышается на 7,5%, удельный расхода топлива на единицу обрабатываемой площади снижается на 9,3 %.

8. Определено рациональное соотношение дизельного и биодизельного топлив (80%:20%).

9. Экономическая эффективность от использования 20% дизельного смесевого топлива, обработанного в комбинированном модуль-смесителе, встроенным в топливную систему трактора ЮМЗ-6Л составляет 23.646 руб./год на единицу техники.

Рекомендации к производству.

Использование предложенной конструкции встраиваемого комбинированного модуль-смесителя в топливную аппаратуру автотракторной техники совместно с технологией получения и улучшения дизельного смесевоего топлива целесообразно на предприятиях АПК при улучшении физико-химических свойств дизельного топлива, и его обработки перед сгоранием в дизельных двигателях автотракторной техники.

Дальнейшая разработка темы.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут посвящены дальнейшему улучшению низкотемпературных свойств дизельного и температуры вспышки дизельного смесевоего топлива путем модернизации используемых модулей, входящих в состав комбинированного модуль-смесителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистика и показатели [Электронный ресурс]. URL: <https://rosinfostat.ru/tseny-na-benzin>. - (дата обращения 13.05.2021).
2. Тихонов С. На сколько лет России хватит запасов нефти [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2021/04/03/glava-rosnedr-rasskazal-na-skolko-let-rossii-hvatit-zaparov-nefti.html>. - (дата обращения 13.05.2021).
3. Данилов, А.М. Новый взгляд на присадки к топливам (обзор) / А.М. Данилов // Нефтехимия. – 2020. – Т.60 № 2. - С. 163-171.
4. Мещеряков, А.Г. Биотопливо на основе непищевых масленичных растений / А.Г. Мещеряков // В сборнике: Актуальные проблемы биологии и экологии. Материалы международной заочной научно-практической конференции. -2017. - С. 88-92.
5. Хохлов, А.Л. Техническое обеспечение дизеля при работе на дизельном смесевом топливе / А.Л. Хохлов, Д.Е. Молочников, А.А. Хохлов // Вестник Казанского ГАУ. - 2019. Т.14. - № 3(54). - С. 122-127.
6. Биотопливо из нетрадиционных растительных масел / С.А. Нагорнов, Ю.В. Мещерякова, И.В. Бусин, А.Г. Мещеряков, А.Ю. Корнев, Н.Г. Конькова // Наука в центральной России. – 2017. - №2(26). - С. 53-61.
7. Улюкина, Е.А. Особенности применения биотоплива в сельскохозяйственном производстве / Е.А. Улюкина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2019. – № 6(94). – С. 23-27.
8. Лиханов, В.А. Сгорание, тепловыделение и образование оксидов азота в дизеле, работающем на альтернативных топливах / В. А. Лиханов, О. П. Лопатин // – Киров : Вятский государственный агротехнологический университет, 2021. – 173 с.
9. Крюков, В.В. Оценка эксплуатационных показателей сельскохозяйственного трактора при работе на сурепно-минеральном топливе:

автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук: 05.20.03 – технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве / Крюков Владимир Владимирович - Пенза, 2014. – 20с.

10. Сидорова Л.И. Применение редечного масла в качестве биоконпонента дизельного смесевого топлива для дизелей тракторной техники: автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук: 05.20.03 – технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве / Сидорова Лилия Ильдаровна - Пенза, 2016. – 20с.

11. Улюкина, Е.А. Эксплуатационные свойства биотоплив на основе эфиров растительных масел / Е.А. Улюкина, В.Е. Коноплев, М.В. Тачаев // Чтения академика В. Н. Болтинского: в сборнике трудов семинара. - Москва. – 2021. - С. 285-291.

12. Пивоварова, Н.А. Использование волновых воздействий в переработке углеводородного сырья (обзор) / Н.А. Пивоварова // Нефтехимия. – 2019. – Т.59 № 6. - С. 727-738.

13. Кардашев, Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев – М.: Химия, 1990. – 208 с.

14. Харитонов, В.А. Риформинг бензинов электромагнитным полем / В.А. Харитонов, А.Б. Александров / Научный журнал КубГАУ. – Краснодар: КубГАУ, - 2008. - №01(35).

15. Устройство для магнитной обработки жидкого топлива в двигателях внутреннего сгорания: пат. 2269025 Рос. Федерация. № 2004125207/06 / Харитонов В.А., Александров А.Б., Александров Б.Л.; заявл. 17.08.2004; опубл.: 27.01.2006. - Бюл №3. - 6 с.

16. Устройство для магнитной обработки жидкости: пат. 2077678 Рос. Федерация. №93031913/06 / Валиев Н.Ш.; заявл. 15.06.1993; опубл.: 20.04.1997. - Бюл №3. - 3 с.

17. ГОСТ Р 52808-2007 Энергетика биоотходов. Термины и определения— М.: Стандартинформ, 2006. – 15 с.

18. Дорфман, Я.Г. Магнитные свойства и строение вещества / Я.Г. Дорфман - М.: Изд. Гостехиздат, 1955. - 376 с.
19. Ёсимура Эффективность устройств магнитной обработки, используемых для улучшения сгорания топлива / Ёсимура Кацуро // НЭНРЁ ОЁБИ НЭНСЁ. – 1982. – т. 49, №3. – С. 241-254.
20. Магнитный активатор топлива: пат. 2324838 Рос. Федерация. - № 2006111123/06 / Карбушев А.А., Антонян Е.В., Карбушева Г.Н., Карбушев В.Ф., Милокостенко Т.П.; заявл. 05.04.2006; опубл. 20.05.2008. - Бюл. №14. - 6 с.
21. Проскуряков, В.А. Очистка нефтепродуктов и нефтесодержащих вод электрообработкой / В.А. Проскуряков, О.В. Смирнов - Л.: Химия, 1980 - 110 с.
22. Осипов, Ю.Б. Исследование глинистых суспензий, наст и осадков в магнитном поле / Ю.Б. Осипов - М.: МГУ, 1968 - 157 с.
23. Зеленков, В.Н. Исследование методов контроля и индикации магнитной обработки водных систем / В.Н. Зеленков // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем: сборник трудов. - Новочеркасск. – 1975. - С. 82-86.
24. Rama, K. Performance and emission analysis of VCR diesel engine through fuel ionization under the influence of magnetic field / K. Rama, S. // International Journal of Research. – 2018. - Vol. 7 Iss.6. - P. 11–17.
25. Magnetization of diesel fuel for compression ignition engine to enhance efficiency and emissions / S. Swapnil, S. Himanshu, K. Amit, K. Krishna, P. Dixit, K. Ram // International Journal of Applied Engineering Research. - 2018. - Vol. 13. - N.6. - P. 341–347.
26. Пивоварова, Н.А. Магнитные технологии добычи и переработки углеводородного сырья / Н.А. Пивоварова - М.: Газпромэкспо, 2009. - 120 с.
27. Пивоварова, Н.А. Эффективные магнитные технологии для промышленной подготовки и транспортировки нефти и газа / Н.А. Пивоварова // Нефть. Газ. Новации. - 2018. - № 5. - С. 13–18.
28. System with permanent magnets used for magnetic treatment of fuel fluids / R. Ciobanu, O. Dontu, G. Gheorghe, Iu. Avarvarei, D. Besnea // Proceedings of

International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics. - МЕСАНИТЕСН'11. - 2011. - Vol.3. - P. 211–214.

29. Погорлецкий, Д.С. Перспективы магнитной обработки углеводородных топлив на автотранспорте / Д.С. Погорлецкий, А.Б. Малыгин, А.В. Котыло // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. - 2013. - № 3. - С. 58–65.

30. Gad, M.S. Influence of magnetized waste cooking oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine / M.S. Gad // International Journal of ChemTech Research. - 2018. - Vol. 11. - N. 11. - P. 255–267.

31. Performance of internal combustion (CI) engine under the influence of strong permanent magnetic field / Vivek Ugare, Ashwin Dhoble, Sandeep Lutade, Krunal Mudafale // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. - 2014. - P. 11–17.

32. Effect of magnetic field on performance and emission of single cylinder four stroke diesel engine / M. Piyush, P. Gaurav Rathod, M. Tushar // IOSR Journal of Engineering. - 2014. Vol. 4. Iss. 5. P. 28–34.

33. Преимущества магнитной обработки дизельных топлив / Н.А. Пивоварова, Е.С. Акишина, Т.В. Сальникова, И.Р. Лагарова, Д.Д. Нурмамбетов // Вестник АГТУ. - 2019. - №2(68) - С.7-15.

34. Анализ результатов опытно-промышленного применения магнитных депарафинизаторов на нефтяных месторождениях Оренбургской области / М.Н. Персиянцев, Ю.А. Сазонов, В.С. Однолетков, И.Р. Василенко, В.И. Лесин // Нефтепромысловое дело. - 1998. - № 2. - С. 24-26.

35. Опыт применения магнитных приборов для обработки скважин с целью предотвращения проблем, связанных с органическими отложениями / Б.В. Карпов, В.П. Воробьев, В.Т. Казаков, и др. // Нефтепромысловое дело. - 2004. - № 8. - С. 39-40.

36. Лесин, В.И. Физико-химический механизм предотвращения парафиноотложений с помощью постоянных магнитных полей / В.И. Лесин // Нефтепромысловое дело. – 2001. - №5. - С. 31-33.

37. Способ магнитной обработки углеводородного топлива: пат. 2408792 Рос. Федерация. № 2009106937/06 / Подчуфаров С.Н.; заявл. 27.02.2009; опубл.: 10.01.2011. - Бюл №1. - 5 с.
38. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Я.И. Френкель - Л.: «Наука», 1975. - 592 с.
39. Козьменков, И.Н. Повышение эффективности работы дизелей тепловозов путём интенсификации процессов горения электротермической обработкой топлива: дисс. ... канд. тех. наук: 05.04.02: утв. 1.03.2012 / Козьменков Игорь Николаевич - Самара, 2012. – 145 с.
40. Способ обработки топлива: пат. № 2038506 РФ, МПК F02M 27/04 / А.Д. Федотов, А.А. Баканов, А.В. Шабордин; патентообладатель Федотов Александр Демьянович. - № 5056444/06; заявлено 27.07.1992; опубл. 27.06.1995. – 5 с.
41. Способ предварительной подготовки топлива и устройства для его осуществления: пат. 2028491 Российская Федерация, МПК F02M 27/00 / Адамович Б.А., Гайдадымов В.Б., Синяков В.П., Трухтанов В.А., Фролов К.В.; заявитель и патентообладатель Адамович Б.А., Гайдадымов В.Б., Синяков В.П., Трухтанов В.А., Фролов К.В. – № 5002229/06; заявл. 26.07.1991; опубл.: 09.02.1995
42. Мурамович, В.Г. Теоретико-методические основы молекулярной модификации углеводородного топлива для транспортных средств электрическими полями: дисс... докт. тех. наук: 05.22.01: утв. 21.06.2013 / Мурамович Виктор Григорьевич -Санкт-Петербург, 2013. – 230 с.
43. Hayder, J.Kurji Magnetic field effect on compression ignition engine performance / J.Kurji Hayder, S. Imran Murtdha // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018 Vol. 13. N. 12. P. 341 – 347.
44. Устройство для обработки топлива в двигателях внутреннего сгорания: пат. 2011881 Рос. Федерация. № 92011766/06 / Захватов Е.М., Лыженков В.Н.; заявл. 14.12.1992, опубл. 30.04.1994. – 5 с.
45. Устройство для обработки топлива (варианты): пат. 2215172 Рос. Федерация. №200248245/06 / Абакаров А.Н., Мамченко В.М., Туев СВ., Захватов Е.М.; заявл. 09.07.2002, опубл. 27.10.2003. - Бюл №3. - 4 с.

46. Герловин, И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе / И.Л. Герловин - Л.: «Энергоатомиздат», 1990. - 431 с.
47. Остапенко, А.А. Электровязкостный эффект в переменном электрическом поле / А.А. Остапенко // Журнал технической физики. – 2000. – Т.70.(8).
48. Способ обработки топлива и устройство для его осуществления: пат. 2080473 Рос. Федерация. № 93044659/06 / Рыжов Н. Е.; заявл. 14.09.1993, опубл. 27.05.1997. - Бюл №3. - 8 с.
49. Устройство для обработки топлива: пат. 2156879 Рос. Федерация. № 99121238/06 / Лыженков В.Н., Хохонин А.А.; заявл. 7.10.1999, опубл. 27.09.2000. - Бюл №3. - 8 с.
50. Устройство для обработки жидких и газообразных сред: пат. 2093699 Рос. Федерация. № 95114110/06/ Данилов В.И., Омеляненко М.Н., Ковальчук Я.М., Белоус Ю.Н., Омеляненко М.М., заявл. 04.08.1995, опубл. 20.10.1997. - Бюл №3. - 16 с.
51. Устройство для обработки жидкости: пат. 2403210 Рос. Федерация. № 2008100599/06/ Бородин В.И., Логинов В.И., Ержигитов С.Ж., Хрущёв А.Д. Мингалев Э.П., Болычев В.С.; заявл. 09.01.2008, опубл. 20.07.2009. - Бюл №31. – 7 с.
52. Способ электрической обработки жидкого топлива и активатор для жидкого топлива: пат. 2032107 Рос. Федерация. № 4901567/06 / Дарбинян Р.В.; заявл. 11.01.1991, опубл. 27.03.1995. – 7 с.
53. Устройство для обработки топлива в двигателе внутреннего сгорания: пат. 2396454 Рос. Федерация. № 2007141048/06/ Бородин В.И.; заявл. 06.11.2007, опубл. 20.05.2009. - Бюл №22. – 10 с.
54. Способ обработки жидких углеводородов и устройство для его осуществления: пат. 2098454 Рос. Федерация. № 930553128/04/ Ивахник В.Г., Шахова К.И., Ступников В.П., Линский В.А., Словецкий Д.И., Попов В.Т.; заявл. 25.11.1993, опубл. 10.12.1997. – 5 с.

55. Способ обработки топлива: пат. 2038506 Рос. Федерация. № 5056444/06 / Федотов А.Д., Баканов А.А., Шабордин А.В., заявл. 27.07.1992, опубл. 27.06.1995. – 5 с.
56. Устройство для электрокаталитической обработки топлива: пат. 2377434 Рос. Федерация. № 2008106555/06 / Евграфов И.В.; заявл. 22.02.2008, опубл. 27.08.2009. - Бюл №36. – 6 с.
57. Андреев, Е.И. Основы естественной энергетики / Е.И. Андреев - СПб. «Невская жемчужина», 2004. - 584 с.
58. URL: <https://magnet-prof.ru/index.php/magnitnyiy-aktivator-topliva.html> (дата обращения 13.09.2021).
59. Способ обработки жидких углеводородов, и установка для его осуществления: пат. 2179572 Рос. Федерация. № 2000130763/04 / Крымский В.В., Федотов В.А.; заявл. 07.12.2000, опубл. 20.02.2002. – 9 с.
60. Фридман, В.М. Ультразвуковая химическая аппаратура / В.М. Фридман - М.: Машиностроение, 1967. - 234 с.
61. Ультразвуковая колебательная система: пат. 2141386 Рос. Федерация. / Барсуков Р.В., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н.; заявл. 15.12.1997, опубл. 20.11.1999. – 10 с.
62. Егоров, И.Н. Влияние ультразвуковой обработки на фракционный состав летнего дизельного топлива / И.Н. Егоров // Научные труды Латвийской СХА. – Елгава. - 1973. – Вып. 30. – С. 39-44.
63. Сляднев, Г.Е. Применение ультразвуковой обработки топлива для снижения удельного расхода дизельного топлива / Г.Е. Сляднев, С.М. Овчаренко // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы Международной научно-практической конференции. - 2016. - С. 708-712.
64. Матвеев, Ю.И. Ультразвуковая обработка топлива / Ю.И. Матвеев, А.М. Пырков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. - 2015. - №42. - С. 276-279.

65. Василевский, А.В. Способ улучшения пусковых качеств дизельных двигателей в условиях низких температур посредством ультразвуковой кавитационной обработки дизельного топлива / А.В. Василевский // Автомобили и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: международная научно-техническая конференция, посвященная 145-летию МГТУ «МАМИ». – 2010.

66. Подалка, Б.С. Ультразвук в нефтяной промышленности / Б.С. Подалка - Киев: Гостехиздат, 1962. - 67 с.

67. Влияние ультразвука на процесс депарафинизации масел / С.Ш. Абрамович, Р.Л. Имнаев, А.Л. Черножуков и др. // Химия и технология топлив и насел. – 1965. - №3. – С. 29-33.

68. Бабилов, О.И. Ультразвук и его применение в промышленности / О.И. Бабилов - М.: Физматгив, 1959. - 260 с.

69. Скрипкин, Е.И. Применение ультразвука / Е.И. Скрипкин, А.З. Симилевский // Известия вузов. - Нефть и газ. – 1962. - № 2. - С.56-62.

70. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев и др. – Бийск: Алт. гос. техн. ун-та., 2007. – 400 с.

71. Мещерякова, Ю.В. Синтез биодизельного топлива с использованием ультразвука / Ю.В. Мещерякова, И.В. Бусин // Сельский механизатор. – 2021. – № 6. – С. 36-37.

72. Уханова, Ю.В. Обоснование использования соевого масла в качестве добавки к нефтяному дизельному топливу: автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук: 05.20.03 – технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве / Уханова Юлия Владимировна - Пенза, 2019. – 20с.

73. Кудимов, Ю.Н. Электроразрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов / Ю.Н. Кудимов, В.Т. Казуб, Е.В. Голов // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8. - № 2. – С. 253–264.

74. Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание) / К.А. Наульных, Н.А. Рой - М.: Наука, 1971. – 190 с.
75. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / под ред. Г.А. Гулого. – М.: Машиностроение, 1977. – 320 с.
76. Бензонасос с гомогенизацией топлива: пат. №2647355 Рос. Федерация. № 2016123834 / Пуков Р.В, Симдянкин А.А., Юхин И.А., Бышов Н.В., Борычевы С.Н., Успенский И.А., Кокорев Г.Д.; заявл. 15.06.2016, опубл. 15.03.2018. Бюл. 8. – 8 с.
77. Пуков, Р.В. Улучшение показателей автотракторных дизельных двигателей путем ультразвуковой обработки топлива: автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук: 05.20.03 – технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве / Пуков Роман Владимирович - Рязань, 2018. – 20с.
78. Загородских, Б.П. Работа тракторного двигателя на биотопливе / Б.П. Загородских // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. 2017. - № 2 (46). - С. 206-211.
79. Година, Е.Д. Изменение жирнокислотного состава растительных масел при добавке к ним минерального дизельного топлива и при воздействии ультразвука / Е.Д. Година, Д.С. Шеменев, А.П. Уханов // Нива Поволжья. - 2012. - №4(25). - С. 38-42.
80. Уханова, Ю.В. Ультразвук: эффективность применения и технические средства / Ю.В. Уханова, Н.А. Перова, А.П. Уханов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. - 2019. - №2. - с. 57-63.
81. Ультразвуковой смеситель компонентов дизельного дизельного смесевоего топлива: пат. 2629342 Рос. Федерация. № 2016140025 / Уханова Ю. В., Уханов А. П., Уханов Д. А.; заявл. 11.10.16; опубл. 28.08.17, Бюл. № 25. – 8 с.
82. Воздействие ультразвуковой обработки дизельного смесевоего топлива на показатели тракторного дизеля / А. П. Уханов, Ю. В. Уханова, Е. А. Сидоров // Наука в центральной России. – 2017. – №3 (27). – С. 48-56.

83. Фадеев, С.А. Улучшение показателей тракторных двигателей при работе на биотопливе, обработанном ультразвуком: автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук: 05.20.03 – технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве / Фадеев Сергей Андреевич - Саратов, 2011. – 22с.

84. Устройство для ультразвуковой обработки биотоплива: пат. 88396 Рос. Федерация: № 2009127033/22 / Б.П. Загородских, С.А. Фадеев; заявл. 14.07.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31

85. Сидоров, Е.А. Работа тракторного дизеля на биоминеральном топливе / Е.А. Сидоров, Л.И. Сидорова, А.Ю. Романов // Лучшая научная статья 2016: сборник статей победителей IV международного научно-практического конкурса. - 2016. - С. 66-69.

86. Деструкция углеводов в присутствии электромагнитного поля при активации водными растворами электролитов / А.С. Бесов, К.Ю. Колтунов, С.О. Брудев, В.Н. Кириленко и др. // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29.

87. Рой, Н.А. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации / Н.А. Рой // Акустический журнал. – 1957. - вып. 1. - № 3. - С. 72-76.

88. Основы физики и техники ультразвука / учеб. пособие для вузов Б.А. Агранат и др. – М.: Высшая школа. 1987. – 352 с.

89. Федоткин, И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И.М. Федоткин, И.С. Гулый – Киев: ОКО, 2000. – 898 с.

90. Афанасьев, А.В. Применение ультразвуковой и электрообработки в системах топливоподготовки речных судов: дисс... канд. тех. Наук 05.08.05 / Афанасьев Алексей Викторович - Ленинград, 1991. – 200 с.

91. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов // М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

92. Способ обработки дизельного топлива и установка для его осуществления: пат. RU2196902C1 Российская Федерация, МПК F02M 43/00 / Биглер В.И., Сенько Ю.Е.; заявитель и патентообладатель Биглер В.И., Сенько Ю.Е. - № 2001113400/06; заявл. 15.05.2021; опубл.: 20.01.2003.

93. Комбинированный статический смеситель-активатор: пат. 2411074 Рос. Федерация № 2009124923/05. / Ю.В. Воробьев, В.Б. Тетерюков.; заявл. 01.07.2009. опубл. 10.02.2011. - 3 с.

94. Воробьев, Ю.В. Уменьшение расхода моторного топлива приемами механохимии / Ю.В. Воробьев, А.В. Дунаев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 3. – С. 96-103.

95. Устройство для механо -химической обработки и снижения расхода углеводородного топлива / Ю.В. Воробьев, А.Е. Ломовских, М.В. Басарев М. В. и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. - № 1. - С. 21—22.

96. Комбинированный статический смеситель-активатор: пат. № 2592801 С1 Российская Федерация № 2015124635/05/ С.А. Нагорнов, Е.Ю. Левина, М.Ю. Левин заявл. 23.06.2015: опубл. 27.07.2016.

97. Синтез биодобавки к дизельному топливу / А.Г. Мещеряков, Ю.В. Мещерякова, С.А. Нагорнов, И.В. Ерохин [и др.] // Наука в центральной России. – 2016. – №1. – С. 15 – 22.

98. Романцова, С.В. Совершенствование технологии получения композитного моторного топлива для дизельных двигателей / С.В. Романцова, А.Ю. Корнев, А.Г. Мещеряков // Инновационные технологии в науке и образовании: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, с. Дивноморское, 05–09 сентября 2018 года / Редколлегия Ю.Ф. Лачуга [и др.]. – с. Дивноморское: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2018. – С. 51-55.

99. Нагорнов, С.А. Очистка биотоплива углекислым газом / С.А. Нагорнов, Ю.В. Мещерякова, А.Г. Мещеряков // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – № 2(42). – С. 48-53.

100. Егоров, И.Н. Улучшение эксплуатационных свойств дизельных топлив в условиях сельскохозяйственного производства: дис. ... канд. Тех. наук: 05.20.03: утв.1983 / Егоров Игорь Николаевич - Великие Луки, 1983. – 290 с.

101. Мещеряков, А.Г. Расчет и исследование параметров ультразвукового излучателя комбинированного смесителя / А.Г. Мещеряков, Ю.В. Мещерякова, С.А. Нагорнов // Наука в центральной России. – 2022. – № 1(55). – С. 71-81
102. Калекин, А.А. Основы гидравлики и технической гидромеханики / А.А. Калекин. – М.: Мир, 2008. – 280 с.
103. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука, источники мощного ультразвука / Л.Д. Розенберг – М.: Наука, 1967. – 379 с.
104. Бергман, Л. Ультразвук / Л. Бергман – Изд. ИЛ, 1956. – 38 с.
105. Способ очистки дизельного топлива: пат. 2645676 Рос. Федерация 2017110133 / Алибаев Б.Т., Корнев А.Ю., Нагорнов С.А., Бусин И.В., Мещеряков А.Г.; заявл. 27.03.2017. опубл. 27.02.2018. – 5 с.
106. Соколовская, И.Ю. Полный факторный эксперимент / И.Ю. Соколовская // Методические указания для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 36 с.
107. ГОСТ Р 2177-99 Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. – М.: Стандартиформ, 2006. – 24 с.
108. ГОСТ Р 51069-97 Нефть и нефтепродукты. Метод определения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API ареометром. – М.: Стандартиформ, 2008. – 12 с.
109. ГОСТ 33-2016 Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости. – М.: Стандартиформ, 2019. – 39 с.
110. ГОСТ 20287-91 Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания. - М: Стандартиформ, 2006. – 14 с.
111. ГОСТ 6356-75 Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле. – М.: Стандартиформ, 2006. – 11 с.
112. ГОСТ 10578-2020 Насосы топливные дизелей. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2020. – 12 с.
113. ГОСТ 10579-2017 Форсунки дизелей. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2020. – 8 с.

114. ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний». Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24.03.88 N 694

115. ГОСТ 17.2.2.02-98 Атмосфера Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Издание официальное. – 13 с.

116. Исследование параметров механовоздействия на кинематическую вязкость топлив / А.Г. Мещеряков, Ю.В. Мещерякова, С.А. Нагорнов и др. // Наука в центральной России. – 2021. - №3 (51). С. 90-95.

117. Мещеряков, А.Г. Исследование свойств смесевоего топлива, полученного с помощью механовоздействия / А. Г. Мещеряков, Ю. В. Мещерякова, А. Ю. Корнев // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы XIII Международной научно-практической интернет-конференции, п. Правдинский, Московская обл., 08–10 июня 2021 года. – п. Правдинский, Московская обл.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (Правдинский), 2021. – С. 518-522.

118. Нагорнов, С.А. Получение биодизельного топлива из непищевого растительного сырья / С.А. Нагорнов, Ю.В. Мещерякова, А.Г. Мещеряков // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2017. – Т. 7. – № 3(22). – С. 110-116.

119. Улучшение качества дизельных топлив за счет использования соединений на основе возобновляемой биомассы / С.А. Нагорнов, А.Ю. Корнев, Ю.В. Мещерякова [и др.] // Наука в центральной России. – 2017. – № 4(28). – С. 61-71.

120. Мещеряков, А.Г. Исследование работы топливной аппаратуры на смесевом топливе / А.Г. Мещеряков // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: Сборник

научных докладов XXI Международной научно-практической конференции, Тамбов, 28–29 сентября 2021. – С. 139-144.

121. Мещерякова, Ю.В. Получение смесового топлива для улучшения качества дизельного топлива / Ю.В. Мещерякова, А.Г. Мещеряков // Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Воронеж, 11–12 ноября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 140-143.

122. Мещеряков, А.Г. Исследование работы топливной аппаратуры трактора на смесовом топливе с встроенным модульным смесителем / А.Г. Мещеряков, С.А. Нагорнов, Ю.В. Мещерякова // Наука в центральной России. – 2021. – № 5(53). – С. 90-95.

123. Нагорнов, С.А. Экспериментальное исследование работы дизельного двигателя на смесовом топливе / С.А. Нагорнов, Ю.В. Мещерякова, А.Г. Мещеряков // Тракторы и сельхозмашины. – 2016.

124. Разработать методологию эффективного формирования и использования производственных ресурсов в крестьянско-фермерских хозяйствах: отчет о НИР 0648-2014-0018. – 28.11. 2016 г. – Тамбов. 104 с.

125. Сазонов, С.Н. Оснащенность фермерских хозяйств техникой / С.Н. Сазонов, Д.Д. Сазонова, О.Н. Попова // Наука в центральной России. – 2013. – № 5. – С. 4-11.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Текст программы для решения уравнений математической модели

```

import Text.Printf
import Data.List
-- Таблица данных
xQ = [0.309, 0.29309, 0.2675309, 0.25309]
xP = [202.6, 170.0, 158.0, 140.0]
xp1 = [860.0, 870.0, 875.0, 880.0]
xv1 = [0.00027, 0.0003, 0.00033, 0.00036]
g = 9.8
_Nuz = 0.9      -- Мощность излучателя
_Hz = 200.0     -- Частота колебаний
_E = 220000000000 -- Модуль упругости
pl_1 = 8700     -- Плотность материала пластины
f = 30         -- Амплитуда колебаний
_U2 = 4 * f * _Hz -- Средняя скорость частицы жидкости на участке
перемещения пластины
t = 1 / (2 * f * _Hz) -- Время перемещения частицы на пути S
-- Индекс данных, которые берутся из таблицы на 4-й строке
index = 2
pl = xp1!!index
vl = xv1!!index
_P = xP!!index
_Q = xQ!!index
_Hzn = 2*_Hz
-- Расчет H по x
count_H zs = let
    ul = pl / vl

```

```

    yl = pl * g
      under = pl * g * (1 - vl^2 * pl^2)
    in
      [(z*pl*g + _P) / under | z <- zs]
-- Расчет U по каким-то h
count_U hs = let
  vl = xv1!!index
  pl = xpl!!index
  in
    [pl * vl * sqrt(h) | h <- hs]
-- Расчет силы по z
count_F zs = let
  _Q = xQ!!index
  _P = xP!!index
  pl = xpl!!index
  vl = xv1!!index
  before = _Q / (vl * pl)
  above = pl * g * (1 - vl^2 * pl^2)
  in
    [before * (sqrt $ above / (z * pl * g + _P)) | z <- zs]
-- Обертка для генератора списка дробных чисел
gen_list start end step = generate_list start end step 1
-- Генератор списка из дробных чисел
-- На вход старт, конец, шаг, количество цифр после запятой
generate_list::Double -> Double -> Double -> Int -> [Double]
generate_list start end step exact
  | start >= end = []
  | otherwise = [round_number start exact] ++ generate_list (start + step) end step
exact
- Округление чисел

```

```

round_number number by = (fromIntegral . floor $ number * 10^by) / 10^by
-- Расчет пар (l, h)
-- Принимает: список значений F (Желательно одно значение),
предполагаемый список значений d, предполагаемый список значений lambda l
count_lambda fs hs ls = [[l, h, f] | l <- ls, h <- hs, f <- fs, l * h * h == f]
-- Принимает на вход пары значения (l, h) где l - лямбла h - длина
-- Возвращает значения b
count_b values = map (\v-> v!!0 * v!!1) $ values
-- Расчет пар (l1, d)
-- Принимает: список значений b, предполагаемый список значений d,
предполагаемый список значений lambda l
count_lambda1 bs ds l1s = [[l1, d, b] | l1 <- l1s, d <- ds, b <- bs, l1 * d == b]
-- Быстрый расчет d по F и диапазонам
--count_d fs diap = (\x -> count_lambda1 x diap diap) . count_b $ count_lambda fs
diap diap
-- Расчет бета
-- Входные данные для диапазона чисел (от, до, шаг)
-- Вводятся дробные числа.
-- Например count_length 0.0 100.0 0.1
-- БЕЗ asin
-- count_one_beta l lambda h = 0.5 * asin(f*10^5*9.8*h^4*(h*lambda)^6)/(pl *
_Q^3 * l^3)
count_one_beta l lambda h = 0.5 * (f*10^5*9.8*h^4*(h*lambda)^6)/(pl * _Q^3 *
l^3)
count_beta from to step =
  let
    -- Список длин. Входные от до шаг
    ls = count_length from to step
  in

```

```

[[count_k f l, count_one_beta l lam h, l, lam, lam1, h, d, b, f] |
[l,lam,lam1,h,d,b,f] <- ls]
-- Расчет кавитаций
count_k f l =
  let
    -- m = f * l * pl
    m = f * (l + 1) * pl
  in
    (10^3 * _Nuz ) / (m * 32 * f^3 * _Hz^3 - 10^3*_Nuz)
-- Расчет длины пластины
-- Входные данные для диапазона чисел (от, до, шаг)
-- Вводятся дробные числа.
-- Например count_length 0.0 100.0 0.1
count_length from to step =
  let
    -- Диапазон
    diap = gen_list from to step
    --
    -- Список [(lambda, h)]. Входные [F] диапазон1 диапазон2
    pairs_lambda_h = count_lambda [6.5] diap diap
    --
    -- Список значений b. Входные пары (lambda, h)
    --bs = count_b pairs_lambda_h
    --
    -- Список [(lambda1, d)]. Входные [b] диапазон1 диапазон2
    pairs_lambda1_d = count_lambda1 (count_b pairs_lambda_h) diap diap
    --
    -- Для удобства
    -- числитель

```



```

above = [[22.4 * (lambda / lambda1) * f, lambda, lambda1, h, d, b, f] |
[lambda, h, f] <- pairs_lambda_h, [lambda1, d, b] <- pairs_lambda1_d]
-- знаменатель
below = 2 * 3.14 * _Hz
-- правая часть
right = sqrt $ _E / pl_1
in [(sqrt $ a / below * right) : xs | (a:xs) <- above]
join simbol list = intercalate simbol . map show $ list
main = do
  -- Ввод значений типа IO String. Это не строка и не число, это поток ввода
вывода
  putStrLn "Введите начальное число"
  from_str<- getLine
  putStrLn "Введите конечное число"
  to_str<- getLine
  putStrLn "Введите шаг"
  step_str<- getLine
  -- Переводим "поток ввода вывода" в дробные числа
  -- read - превращает в поток в строку
  -- :: Double приводит строку к дробному числу
  let from = (read from_str :: Double)
      let to = (read to_str :: Double)
      let step = (read step_str :: Double)
      let headers = "K,Bet,L,Lambda,Lambda1,H,D,B,F\n"
      result <- return (intercalate "\n" . map (join ",") $ (count_betta from to step))
      writeFile "output.csv" headers
      appendFile "output.csv" result
      --putStrLn . map to_text "\n" . map to_text "," $ (count_betta from to step)

```

Приложение Б

Ортогональный центрально-композиционный план 2-го порядка для 3-х факторного эксперимента (Листинг для программы Mathcad)

Матрица планирования экспериментов.

```
X:=READEXCEL(“.\свойства ДТ.xlsx”, “Лист1!A1:E16”)
```

$$X = \begin{bmatrix} \text{“Run”} & \text{“Block”} & \text{“A”} & \text{“B”} & \text{“C”} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 4 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 5 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 6 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 7 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 8 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 9 & 1 & 1.215 & 0 & 0 \\ 10 & 1 & -1.215 & 0 & 0 \\ 11 & 1 & 0 & 1.215 & 0 \\ 12 & 1 & 0 & -1.215 & 0 \\ 13 & 1 & 0 & 0 & 1.215 \\ 14 & 1 & 0 & 0 & -1.215 \\ 15 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Натуральные значения факторов на разных уровнях.

```
vals:=READEXCEL(“.\свойства ДТ.xlsx”, “Лист1!G1:L4”)
```

Результаты проведения опытов.

```
y:=READEXCEL(“.\свойства ДТ.xlsx”, “Лист1!N2:P16”)
```

Среднее значение при трех повторностях опыта.

```
k:=3 j:=0..2 i:=0..14 N:=15
```

$$Y_i := \frac{\sum_j y_{i,j}}{k}$$

Дисперсия каждого опыта.

$$S2_i := \left(\frac{1}{k-1} \right) \cdot \sum_j (y_{i,j} - Y_i)^2$$

$$S_i := \sqrt{S2_i}$$

$Y =$	$S2 =$	$S =$
3.317	0.301	0.548
4.312	0.201	0.448
4.366	0.214	0.462
4.577	0.362	0.601
4.428	0.059	0.244
4.558	0.885	0.941
4.396	0.476	0.69
4.778	0.565	0.752
4	0.57	0.755
4	0.52	0.721
3.717	0.151	0.388
3.829	0.099	0.315
3.563	0.218	0.466
3.838	0.108	0.329
3.733	0.163	0.404

Дисперсия воспроизводимости эксперимента:

$$\sigma := \sum_i S2_i = 4.891 \quad S_y := \frac{\sigma}{N} = 0.326$$

Наибольшее значение дисперсии:

$$G_{max} := \max(S2) = 0.885$$

Значение G – критерия Кохрена.

$$G := \frac{G_{max}}{\sigma} = 0.181$$

Критическое значение Кохрена при уровне значимости 5%, числа степеней свободы.

$$v1 := k - 1 = 2 \quad v2 := N - 1 = 14 \quad G_{tab} := 0.33 \quad G < G_{tab} = 1$$

Поскольку условие оказалось не ложным (равным 1), то гипотезу следует принять (не отвергнуть), то есть, мы должны сделать вывод об однородности дисперсий и, следовательно, о достаточной достоверности (воспроизводимости) эксперимента.

Определим значения коэффициентов уравнении регрессии при помощи специальной функции «polyfitc».

`polyfitc(X, Y, 2)`

Значения коэффициентов уравнения регрессии:

`c:=polyfitc(X, Y, 2)(1)`

Значение t-критерия Стьюдента для получения коэффициентов регрессии:

`std:=polyfitc(X, Y, 2)(2)`

$$c = \begin{bmatrix} \text{"Coefficient"} \\ 3.501 \\ -0.157 \\ -0.15 \\ -0.176 \\ -0.066 \\ -0.087 \\ -0.141 \\ 0.39 \\ 0.236 \\ 0.187 \end{bmatrix}$$

Определим значимость коэффициентов.

$|c_1| > std_1 = 1$ $|c_2| > std_2 = 1$ $|c_3| > std_3 = 1$ $|c_4| > std_4 = 1$ $|c_5| > std_5 = 0$ $|c_6| > std_6 = 0$

$|c_7| > std_7 = 1$ $|c_8| > std_8 = 1$ $|c_9| > std_9 = 1$ $|c_{10}| > std_{10} = 1$

Значимых коэффициентов регрессии:

`n:=8`

Расчетные значения по уравнению регрессии.

$Yp := \text{READEXCEL}(\text{".\свойства ДТ.xlsx"}, \text{"Лист1!M23:M37"})$

Остаточная сумма квадратов.

$$S2R := \sum_i (Yp_i - Y_i)^2 = 3.465$$

Дисперсия отклонения результатов расчета от опытов:

$$S2ad := \frac{S2R}{N - k - 1} = 0.315$$

Критерий Фишера:

$$F := \frac{S2ad}{Sy} = 0.966$$

Число степеней:

$$f1 := N - n - 1 = 6$$

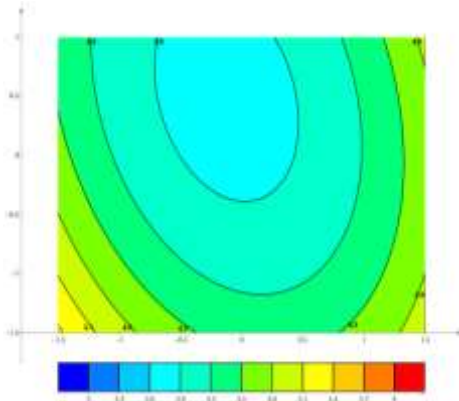
$$f2 := N \cdot (k - 1) = 30$$

Критическое значение F- критерия:

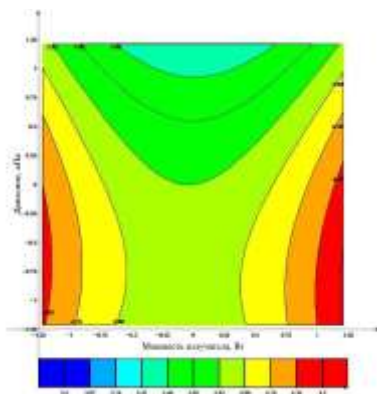
$$Fkp := \text{qF}(0.95, f1, f2) = 2.421$$

$$|F| < Fkp = 1$$

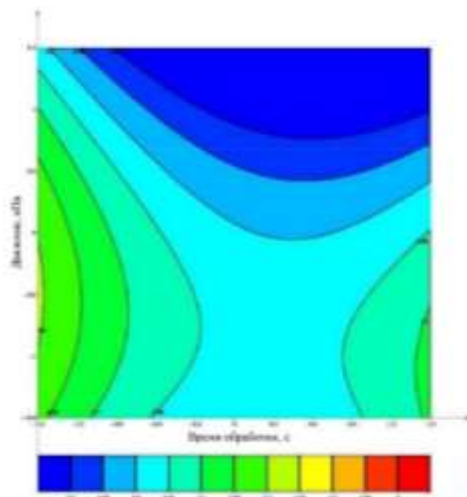
Поскольку условие оказалось не ложным (равным 1), то гипотезу следует принять (не отвергнуть), то есть, мы должны сделать вывод об однородности дисперсий и, следовательно, полученная модель адекватно описывает результаты опытов.



$$\delta_3(A, B) := c_1 + c_2 \cdot A + c_3 \cdot B + c_5 \cdot A \cdot B + c_8 \cdot A^2 + c_9 \cdot B^2$$



$$\delta_3(A, C) := c_1 + c_2 \cdot A + c_4 \cdot C + c_6 \cdot A \cdot C + c_8 \cdot A^2 + c_{10} \cdot C^2$$



$$\delta_3(B, C) := c_1 + c_3 \cdot B + c_4 \cdot C + c_7 \cdot B \cdot C + c_9 \cdot B^2 + c_{10} \cdot C^2$$

Приложение В

Технологические рекомендации по использованию дизельного смесового топлива

1) Для эффективного применения дизельного смесового топлива в автотракторной технике необходимо изготовить комбинированный модуль-смеситель состоящий из 4 модулей (рисунок 2.2) под характеристики требуемого топлива и топливной аппаратуры, согласно таблицы 3.2. Рекомендуемая концентрация биодизельного топлива, входящего в состав дизельного смесового топлива - 20%.

2) Исходя из требуемых соотношений биодизельного топлива к дизельному, необходимо установить дополнительный бак под биодизельное топлива, с соблюдением требуемой пропорции. Параллельно с установкой бака, требуется учесть необходимость в установке дополнительного топливного фильтра грубой очистки и предварительно изготовленного эжектора для ввода биодизельного топлива в дизельное.

Эжектор можно установить непосредственно перед входом в комбинированный модуль-смеситель или после фильтра грубой очистки перед подкачивающим насосом. Рекомендуемое место для установки - перед подкачивающим насосом.

Комбинированный модуль смеситель необходимо установить и подключить согласно схеме на рисунке 4.21. При подключении устройства следует учесть, изменение стандартной схемы разводки топливо проводов, а именно, дренажную трубку с форсунок и сброс излишек топлива с головки насоса высокого давления необходимо перенаправить на комбинированный модуль-смеситель. Прокачку топливной системы необходимо осуществлять по стандартной схеме.

Автотракторная техника, оснащенная комбинированным модуль-смесителем может без ограничений эксплуатироваться на дизельном смесевом топливе в весеннее – осенний сезоны, когда температура воздуха прогревается выше 0 °С.

3) Запуск и остановка дизельного двигателя осуществляется на дизельном топливе. После запуска и прогрева двигателя до 40 °С работа переводится на дизельное смесевое топливо. За 5 минут до остановки двигателя он обратно переводится на работу на дизельном топливе.

4) Обслуживание комбинированного модуль-смесителя осуществляется в период планового технического обслуживания топливной аппаратуры. Перекрывается подача топлива, сливаются остатки топлива из системы и производится осмотр ультразвукового излучателя, для этого его необходимо предварительно демонтировать и разобрать. Осуществляется осмотр пластины на наличие деформации или трещин. В случае их наличия пластинку следует заменить на аналогичную. После осмотра, замены расходных элементов производится сборка в обратной последовательности с последующей прокачкой топливной системы.

Приложение Г
Акты внедрения

КРЕСТЬЯНСКОЕ ФЕРМЕРСКОЕ ХОЗЯЙСТВО "РОСА"

393293, Российская Федерация, Тамбовская область, Рассказовский район, с.
Телешовка

АКТ

О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что материалы исследования Мещерякова А.Г. «Совершенствование комбинированного устройства для получения и активации дизельного смесового топлива» используются в 2021 в КФХ «РОСА», где проходили испытания дизельного двигателя Д – 65Н, с встроенным в топливную систему модульным смесителем.

В ходе испытаний проводили съем топливной аппаратуры (топливного насоса, комплекта форсунок) каждые 120 моточасов для исследования на топливном стенде КИ-921М.

Установлено, что работа трактора на смесовом дизельном топливе положительно влияет на ресурс основных агрегатов топливной системы, таких как распылители форсунок, плунжерные пары ТНВД, подкачивающий насос. Так в сравнении с аналогичной топливной аппаратурой, работающей на дизельном топливе, после 960 моточасов наработки показатели распылителей форсунок, работающих на смесовом биодизельном топливе выше на 3 %, пусковая подача плунжерных пар – на 12,55%, цикловая подача плунжерных пар – на 4,6%, подкачивающего насоса на 7,86%.

Глава КФХ «Роса»



Есипов Е.А.

ФГБНУ ВНИИТиН

Александр Мещеряков

**КРЕСТЬЯНСКОЕ ФЕРМЕРСКОЕ ХОЗЯЙСТВО "КИСЕЛЕВ АЛЕКСЕЙ
ВЛАДИМИРОВИЧ"**

393292, Российская Федерация, Тамбовская область, Рассказовский район, с.

Рождественское

АКТ

О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что материалы исследования Мещерякова А.Г. «Совершенствование комбинированного устройства для получения и активации дизельного смесового топлива» используются в 2021 в КФХ «Киселев Алексей Владимирович», где проходили испытания дизельного двигателя Д-65Н, с встроенным в топливную систему модульным смесителем.

В ходе испытаний проводили съем топливной аппаратуры (топливного насоса, комплекта форсунок) каждые 120 моточасов для исследования на топливном стенде КИ-921М.

Установлено, что работа трактора на смесовом дизельном топливе положительно влияет на ресурс основных агрегатов топливной системы, таких как распылители форсунок, плунжерные пары ТНВД, подкачивающий насос. Так в сравнении с аналогичной топливной аппаратурой, работающей на дизельном топливе, после 960 моточасов наработки показатели распылителей форсунок, работающих на смесовом биодизельном топливе выше на 3 %, пусковая подача плунжерных пар – на 12,55%, цикловая подача плунжерных пар – на 4,6%, подкачивающего насоса на 7,86%.



Глава КФХ «Киселев А.В.»

Киселев А.В.

ФГБНУ ВНИИТнН

Александр Владимирович А.П.

УТВЕРЖДАЮ

Директор АОр РТП
«НЕКРАСОВСКОЕ»

Гришин О.А.

« 17 » 20 21 г.

АКТ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Настоящий акт составлен в том, что в период с апреля по ноябрь 2021 года в РТП «Некрасовское» (393252, Тамбовская область, г. Рассказово, 1-й Некрасовский пер., 94) проходили испытания обработанного дизельного смесевое топлива, полученного с использованием комбинированного модуль-смесителя, разработанного аспирантом ФГБНУ ВНИИТиН Мещеряковым А.Г.

Проведенные на топливном стенде КИ-921М испытания показали, что у исследуемого ТНВД 65Н-1100150 при использовании комбинированного модуль-смесителя после 960 моточасов показатели распылителей форсунок выше на 3 %, пусковой подачи плунжерных пар – на 12,55%, цикловой подачи – на 4,6%, подкачивающего насоса на 7,86% по сравнению с показателями аналогичной топливной аппаратуры, работающей на дизельном топливе.

Таким образом, полученное и обработанное дизельное смесевое топливо с использованием комбинированного модуль-смесителя, рекомендуется к применению в топливной аппаратуре дизельных двигателей.

Главный инженер: АОр РТП

«Некрасовское»

Носков С.А.

ФГБНУ ВНИИТиН

**КРЕСТЬЯНСКО-ФЕРМЕРСКОЕ ХОЗЯЙСТВО «НАСЕДКИН СЕРГЕЙ
АНАТОЛЬЕВИЧ»**

393293, Российская Федерация, Тамбовская область, Рассказовский район, с.
Телешовка

АКТ

О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что материалы исследования Мещерякова А.Г. по теме диссертационного исследования «Совершенствование комбинированного устройства для получения и активации дизельного смесового топлива» используются в 2021 в КФХ «Наседкин С.А.», где проходили испытания дизельного двигателя Д – 65Н, с встроенным в топливную систему модульным смесителем. Осуществляли измерения технико-экономических показателей при нагрузке в полевых условиях и экологических показателей.

При испытании трактора с встроенным комбинированным модуль-смесителем на разных видах смесевых топлив и дизельном топливе установлено изменение экологических и технико-экономических показателей при работе трактора на обработанном 20% дизельном смесевом топливе: дымность снижается на 11%, концентрация углеводородов снижается на 9,5%, концентрация оксидов азота повышается на 1,8%, производительность повышается на 7,5%, удельный расхода топлива на единицу обрабатываемой площади снижается на 9,3 %.



Глава КФХ «Наседкин»

Наседкин С.А.

аспирант ФГБНУ ВНИИТиН

Мещеряков А.Г.