

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Рязанский государственный агротехнологический университет  
имени П.А. Костычева»

На правах рукописи



**СОРОКИН ВЛАДИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОБРАБОТКОЙ  
ТОПЛИВА ВОЛНАМИ СВЧ ДИАПАЗОНА**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Бачурин Алексей Николаевич

Рязань – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Потребление дизельного топлива в сельскохозяйственном производстве.....	10
1.2. Способы контроля потребления топлива двигателями и применение альтернативных топлив .....	15
1.3. Методы воздействия на топливо автотракторных дизельных двигателей.....	25
1.4. Цель и задачи исследования.....	41
1.5. Выводы по первой главе.....	42
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ПРОЦЕСС ВПРЫСКА ТОПЛИВА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ.....	44
2.1. Существующие модели описания процесса впрыска топлива.....	44
2.2. Моделирование изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения дизельного топлива вследствие воздействия на него волн СВЧ диапазона.....	51
2.3. Выводы по второй главе .....	64
ГЛАВА 3. ОБЩАЯ И ЧАСТНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	66
3.1. Общая методика и программа исследования.....	66
3.2. Методика исследования физико-химических характеристик топлива...	68
3.3. Методика оценки площади распыла форсунки и цетанового числа дизельного топлива.....	73
3.4. Методика оценки экологических показателей дизеля .....	75
3.5. Методика оценки расхода топлива дизелем.....	79
3.6. Выводы по третьей главе.....	82
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОПЛИВА ВОЛНАМИ СВЧ ДИАПАЗОНА.....	83

4.1. Экспериментальные исследования физических характеристик топлива до и после обработки волнами СВЧ диапазона.....	83
4.2. Экспериментальные исследования кинематической вязкости топлива.....	88
4.3. Экспериментальные исследования изменения коэффициента поверхностного натяжения топлива.....	94
4.4. Экспериментальные исследования распыла топлива форсункой, цетанового числа и его расхода при обработке волнами СВЧ диапазона.....	99
4.5. Результаты оценки экологических показателей дизеля при обработке топлива волнами СВЧ диапазона.....	103
4.6. Выводы по четвёртой главе.....	106
ГЛАВА 5. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	108
5.1. Выбор параметров устройства СВЧ обработки и методик расчета экономической эффективности.....	108
5.2. Оценка экономической эффективности трактора МТЗ 80, укомплектованного устройством СВЧ обработки топлива.....	117
5.3. Выводы по пятой главе.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	147

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В России в 2023 году производство топлива для различных видов техники выросло до 131 млн. тонн, из которых 88 млн. тонн приходится на дизельное топливо и 43 млн. тонн на бензин, при этом на внутренний рынок поставлено 51 млн. тонн дизельного топлива (ДТ) и 36 млн. тонн бензина [52]. По данным Торгово-промышленной палаты (ТПП) России [147] в 2022 году для проведения полевых работ потребность АПК в дизельном топливе превысила 4,7 млн. тонн: на весну пришлось 1,94 млн. тонн, на осень – 2,76 млн. тонн. При этом, дизельное топливо остается одной из основополагающих статей затрат, определяющих конечную цену продукции, поскольку оно потребляется на всех этапах как сельхозработ, так и последующей транспортировки продукции для хранения и реализации, и составляет, например, в растениеводстве 10-15% от прямых затрат [63].

Снижению потребления дизельного топлива – согласно прогнозам ТПП с 4,7 млн. тонн до 4,6 млн. тонн – может способствовать применение альтернативных видов топлива, таких как жидкое биотопливо (биоэтанол, биодизель, биобутанол, диметиловый эфир), газообразное биотопливо (биогаз, биоводород), сжиженный природный газ (пропан), водородное топливо и электроэнергия (в основном вырабатываемая ветрогенераторами) [149]. Замена этими видами топлива дизельного топлива сможет покрыть порядка 2% его общего объема потребления, что несущественно в нынешних условиях [149]. Таким образом, дизельное топливо останется определяющим фактором производства сельскохозяйственной продукции на ближайшие десятилетия. В условиях неуклонного роста цен на него, все острее становится вопрос о его экономии. Поэтому вопрос о снижении расхода топлива двигателями внутреннего сгорания, применяемыми в сельхозтехнике, за счет малобюджетной модернизации их топливоподающей системы, является одной из главных задач для агропромышленного комплекса и подтверждает обоснованность выбранного научного исследования.

**Степень разработанности темы.** Вопросами топливной экономичности и



улучшения показателей дизельных двигателей в сельском хозяйстве занимались следующие исследователи: Борычев С.Н., Бышов Н.В., Голубев И.Г., Ильвес Р.Л., Кузнецов А.В., Ключ О., Краузе П., Марков В.А., Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А., Ольт Ю.Р., Погуляев В.Д., Руденко И.И., Симдянкин А.А., Успенский И.А., Юхин И.А. и др. В рамках проведенных ими исследований были рассмотрены такие виды воздействия на топливо, как деароматизация, омагничивание, электростатическая, электромагнитная, ультразвуковая обработки, воздействие микроволнового излучения, нагрев и охлаждение топлива, эмульгирование топлива и добавление в него воды [44, 171]. Полученные ими теоретические выводы и практические результаты могут быть использованы при конструировании, сервисном обслуживании [4, 5, 20] и эксплуатации двигателей [11, 118, 145], применяемых в сельскохозяйственном производстве [45, 98, 99, 109].

Анализ устройств и методов обработки топлива показал, что остаются актуальными вопросы воздействия волн сверхвысоких частот на топливо, а именно на физические показатели, такие как коэффициент поверхностного натяжения и кинематическая вязкость, которые непосредственно влияют на каплеобразование и угол распыла топлива при впрыске в камеру сгорания двигателя.

Работа выполнена согласно плану НИР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2021...2025 гг. по теме 1 «Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса в сельскохозяйственном производстве. Перспективы развития сельских территорий» (№ гос.рег. 122020200038-8).

**Цель исследования** – улучшение характеристик дизельных двигателей воздействием на топливо волнами сверхвысокой частоты перед распылением на форсунках.

В соответствии с поставленной целью можно сформулировать следующие **задачи**:

- проанализировать существующие способы обработки топлива, которые улучшают характеристики двигателей;
- смоделировать существующие зависимости процессов впрыска топлива с учетом изменения кинематической вязкости и поверхностного натяжения

дизельного топлива;

- провести исследования по влиянию воздействия волн СВЧ диапазона на характеристики дизельного топлива.

- разработать устройство для обработки топлива волнами СВЧ диапазона, интегрированного в топливную систему дизельных двигателей, оценить экономический эффект от его внедрения.

**Объект исследований** – дизельное топливо, используемое двигателями в сельском хозяйстве.

**Предмет исследований** – изменение характеристик двигателей в системе их топливоподачи при обработке дизельного топлива волнами СВЧ диапазона.

**Научную новизну** диссертационной работы представляют:

- математические модели процессов впрыска топлива в камеру сгорания двигателей с использованием регрессионных уравнений с учетом изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения дизельного топлива;

- результаты исследований воздействия волн сверхвысокой частоты (мощность и время обработки) на характеристики топлива (коэффициент поверхностного натяжения, кинематическую вязкость, цетановое число), а также изменение экономической и экологической характеристик дизельного двигателя.

Исследования и методики расчётов, представленные в работе, состоят из методик по исследованию характеристик топлива (оценка характеристик впрыска, цетанового числа, воспламеняемости топлива, времени обработки, мощности излучателя и расхода топлива) и методик оценки потребления топлива дизеля Д-243 и его экологических показателей.

**Теоретическая значимость работы.** Проанализированы способы изменения основных характеристик дизельного топлива, на основании чего смоделированы математические зависимости процессов распыла топлива в камеру сгорания двигателя, учитывающих начальную температуру топлива и время, прошедшее с момента СВЧ обработки.

**Практическая значимость работы.** Результаты исследований по воздействию волн сверхвысокой частоты (мощность и время обработки) на характеристики топлива (коэффициент поверхностного натяжения, кинематическая вязкость, цетановое число), а также характеристики топливной экономичности и экологичности отработанных газов дизельных двигателей. Разработано устройство для обработки топлива волнами СВЧ диапазона, установленное в систему топливоподачи дизеля Д-243.

**Методы исследований.** Проведены лабораторные исследования по изменению характеристик дизельного топлива согласно ГОСТ 32511-2013 (EN 590:2009) (динамической вязкости, цетанового числа, коэффициента поверхностного натяжения). Использовались методики по оценке площади распыла топлива на форсунке, исследованию воздействия волн СВЧ диапазона на топливо при изменении времени обработки и мощности излучателя, изменению топливной экономичности, состава и дымности отработанных газов дизеля Д-243 (ГОСТ Р 52160-2003, ГОСТ Р 41.24-2003). Анализ полученных результатов научных исследований выполнялся методами статистической обработки с помощью программы «Microsoft Excel».

**Положения, выносимые на защиту:**

- математические модели процессов впрыска топлива с использованием регрессионных уравнений с учетом изменения кинематической вязкости и поверхностного натяжения;
- результаты исследований по воздействию на характеристики дизельного топлива (коэффициент поверхностного натяжения, кинематическую вязкость, цетановое число) волнами СВЧ диапазона (при изменении мощности и времени обработки);
- результаты использования устройства для СВЧ обработки дизельного топлива в топливной системе сельскохозяйственной техники, как на лабораторном стенде действующего двигателя, так и при полевых испытаниях на тракторе МТЗ-80, оценка экономической эффективности использования данного устройства.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований.** Экспериментальные исследования проведены на современном оборудовании, которое прошло своевременную поверку. Полученные результаты и выводы теоретических и экспериментальных исследований обоснованы сходимостью результатов, расхождение которых составляет не более 5%. Степень достоверности научных положений диссертации и апробация результатов обусловлены обоснованностью общепринятых допущений при разработке устройства по воздействию волн сверхвысокого диапазона на дизельное топливо, экономическими показателями, сходимостью полученных результатов по проведению лабораторных и производственных исследований с теоретическими расчетами и аналитическими исследованиями существующих методик и работ широкого круга авторов в данной области исследования.

**Реализация результатов исследований.** На основании проведенных исследований было разработано устройство для СВЧ обработки дизельного топлива, которое было внедрено в топливную систему трактора МТЗ-80 в хозяйстве ООО «Привольное» Старожиловского района.

**Личный вклад соискателя в решение поставленных задач** состоит в участии в постановке и конкретизации цели и задач научных исследований, выборе направления теоретических исследований, разработке программ экспериментов, проведении лабораторных и производственных испытаний, а также во внедрении разработанного устройства для обработки топлива.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты исследований доложены и обсуждены на 73-ой Международной научно-практической конференции «Научно-технические приоритеты в развитии агропромышленного комплекса России» (Рязань, 21 апреля 2022 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Инженерные решения для АПК» (Рязань, 16 ноября 2022 г.), Международной научно-практической конференции «Перспективы развития технической эксплуатации мобильной техники» (Рязань, 08 ноября 2023 г.), Международной научной конференции «Аграрная наука и

инновационное развитие АПК: состояние, проблемы и перспективы» (Смоленск, 18 апреля 2024 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации соискатель опубликовал в 2 научных работах, включенных в "Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук". Общий объем публикаций составил 2,43 пл., из них лично соискателю принадлежит 1,75 пл.

**Структура и объем работы.** В целом диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 176 наименований, в том числе 20 на иностранных языках, и 6 приложений, изложена на 167 страницах, включает 94 рисунка и 19 таблиц.

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1 Потребление дизельного топлива в сельскохозяйственном производстве**

В 2022 году произошло замедление темпов роста спроса на нефтепродукты, из которых страны-потребители производят различные виды моторного топлива, с 6,1% (2021 г.) до 3,5% (2022 г.) [34]. Причинами падения спроса стали как последствия введения санкционного режима (ограничения объемов импорта российской нефти странами ЕС с ценовым потолком 60 USD/баррель) [168], так и замедление темпов роста экономик главных потребителей энергоресурсов – США, ЕС и КНР. Тем не менее, в некоторых регионах был зафиксирован рост потребления, в частности азиатский регион продемонстрировал рост на 2,5%, в том числе Индия – на 10% и Индонезия – на 9,3% (рис. 1.1). Поскольку нефть до сих пор остается преобладающим продуктом на международном рынке энергоресурсов (рис. 1.2), то ее добыча в 2022 году в РФ увеличилась до 535 млн. тонн, а экспорт – на 7% [174]. Вместе с тем при выросших объемах внутреннего производства бензина на 4,4% и дизельного топлива на 6,0% большие объемы нефти и нефтепродуктов поставляются на внешние рынки, например, в Турцию экспорт товаров нефтепереработки увеличился с 3,99 млн. тонн в 2021 году до 5,05 млн. тонн в 2022 году [169]. Поставка этих продуктов на внешние рынки спровоцировала их нехватку внутри России и, соответственно, существенный рост их цены на внутреннем рынке.

Так в начале сентября 2023 года в РФ были отмечены случаи скачкообразного возрастания цены на дизельное топливо и зафиксированный в некоторых регионах его недостаточный объем для проведения осенних сельскохозяйственных работ. Однако в последнее время была проведена определенная работа по недопущению дефицита топлива для аграрного сектора РФ – в частности были проведены совещания с руководством нефтяных компаний, представителями Минэнерго, Минфина, ФАС, Минсельхоза и Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржи [104]. В результате обмена мнениями в рамках намеченной

реализации стратегии по стабилизации цен на топливо было отмечено, что дефицит топлива допущен не был, а цены в большей части регионов РФ продолжают снижаться. При этом запасы бензина и дизельного топлива будут обеспечены на достаточном для потребителя уровне, а рост цен на топливо не превысит уровень прогнозируемых значений годовой инфляции.

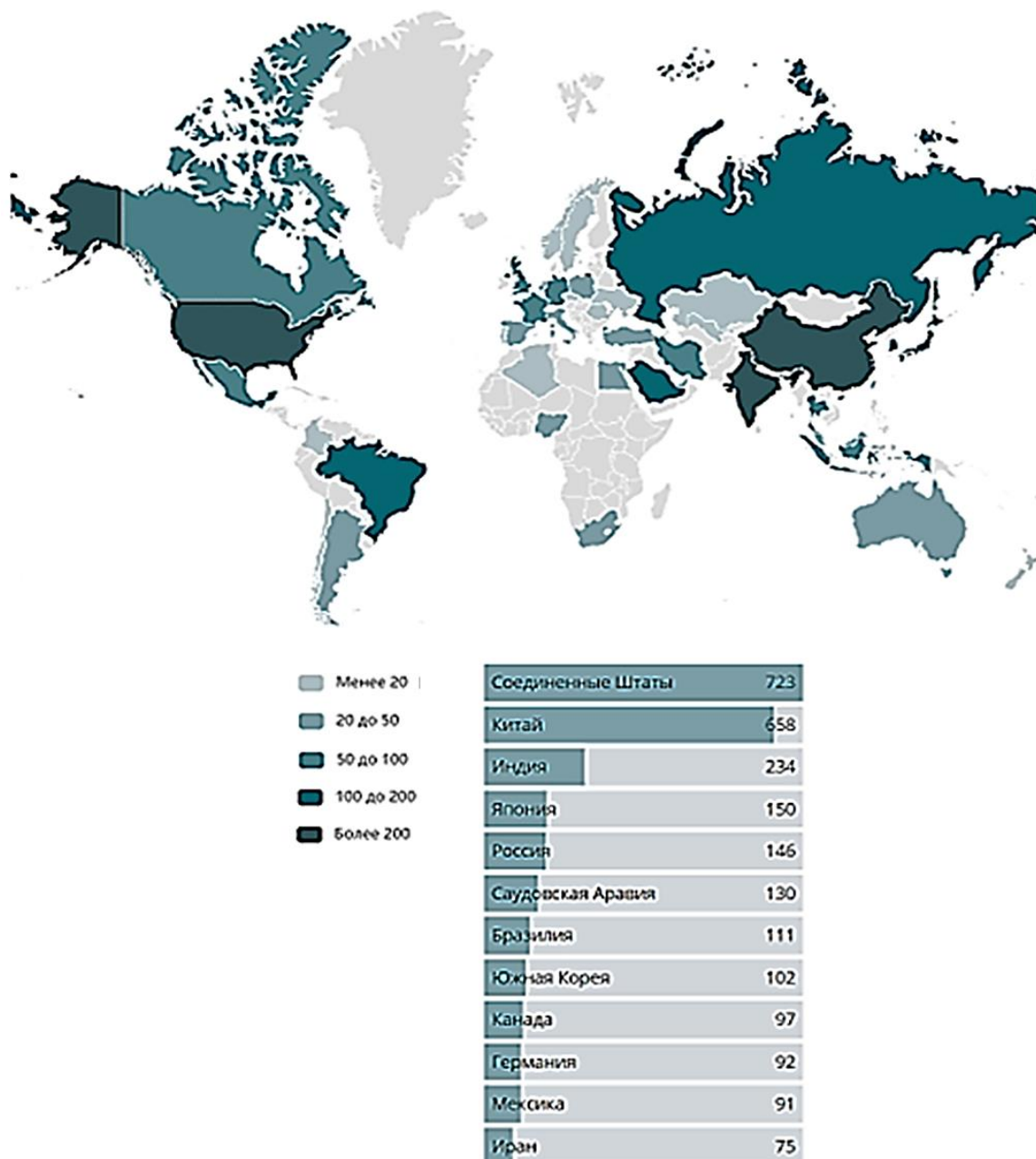
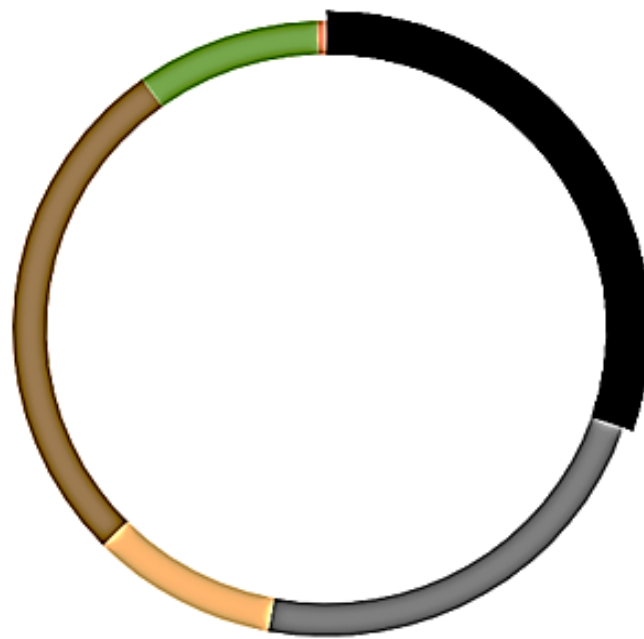


Рисунок 1.1 – Потребление энергоресурсов в мире (в Mtoe – единицах измерения энергии в нефтяной отрасли)



Нефть
  Природный газ
  Электроэнергия

Уголь
  Биомассы
  Теплоэнергетика

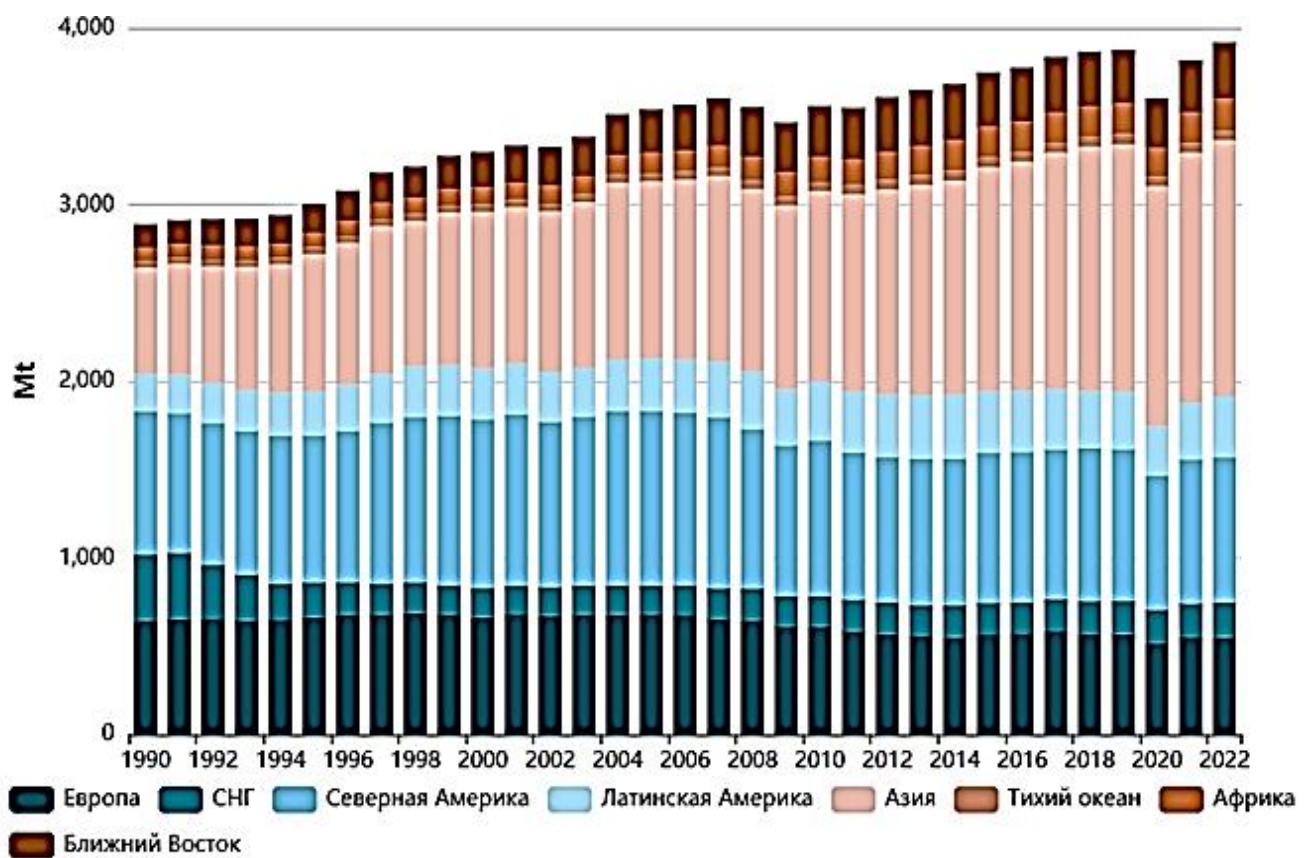


Рисунок 1.2 – Доля нефти в совокупном энергопотреблении (в Mt – мегатоннах)



При этом еще в октябре 2023 года были приняты постановления, необходимые для стабилизации внутреннего топливного рынка [103], и поправки в Налоговый кодекс, восстанавливающие с 1 октября 2023 года, так называемый, топливный демпфер, позволяющий увеличить размер компенсации нефтеперерабатывающим заводам. Данные меры направлены на создание экономических стимулов для заводов-производителей топлива по насыщению им внутреннего рынка, что позволит сдержать рост оптовых биржевых цен. Кроме того, были скорректированы требования к нефтедобывающему комплексу в области продаж дизельного топлива и бензина на биржевых торгах – доля продажи бензина увеличена с 13% до 15%, дизельного топлива – с 9,5% до 12,5%. Эти мероприятия позволили снизить остроту проблемы серьезной нехватки топлива и его высокой стоимости в агропромышленном комплексе (АПК) России.

Хорошо известно, что одним из главных факторов, определяющих конечную стоимость сельскохозяйственной продукции, является топливо, которое используется на этапах посева сельскохозяйственных культур, их выращивания, защиты от вредителей, сбора, транспортировки (рис. 1.3), сортировки, хранения, отправки потребителю и переработки. А главным результатом реализации стратегии и тактики сельскохозяйственного производства [12, 13] является продовольственная безопасность страны [8, 59, 152] или группы стран, объединенных единым направлением развития [16, 39, 139].

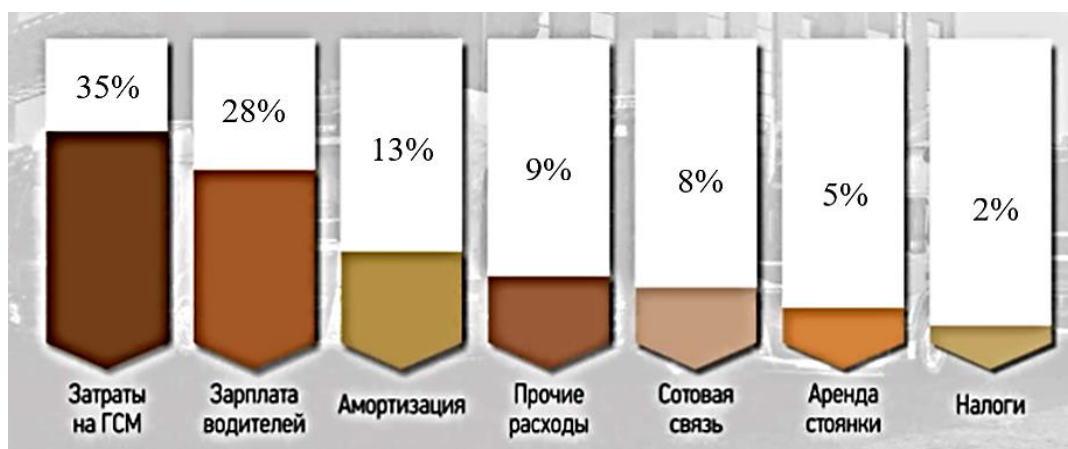


Рисунок 1.3 – Структура расходов компании на транспортировку сельхозпродукции

Большинство авторов, проводящих анализ потребления энергоресурсов в сельском хозяйстве, сходятся в том, что динамика его развития уже не является прямой пропорциональной от удельного расхода энергоресурсов (рис. 1.4) [102, 150].

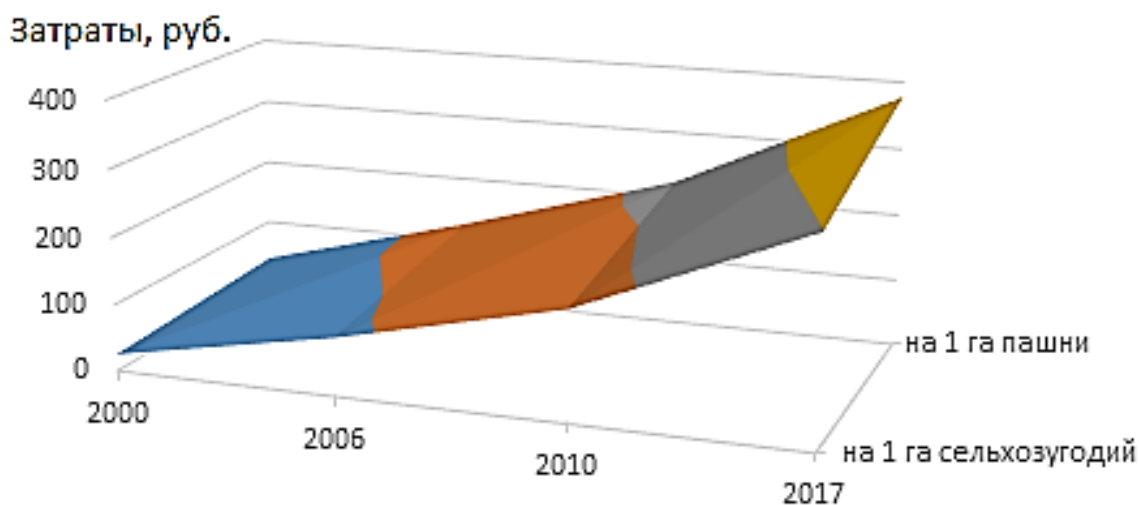


Рисунок 1.4 – Затраты энергоресурсов на один гектар сельхозугодий/пашни в АПК

При этом топливо, являясь доминирующим энергоресурсом в сельскохозяйственном производстве, несмотря на его все возрастающую цену (рис. 1.5) [78, 143] и попытки использования альтернативных источников [79, 116, 156, 160], остается основой этого производства.



Рисунок 1.5 – График изменения мелкооптовых цен ПАО «Газпром нефть» на дизельное топливо при отгрузках с Московского НПЗ

Принимая во внимание, что сельское хозяйство в России является самокупаемой отраслью только благодаря государственным субсидиям (87% прибыли в этом секторе экономики в 2014...2016 гг. было получено за счёт субсидий) [60], объемы которых будут сокращаться в последующие годы (с 472,5 млрд. руб. в 2023 г. до 390,2 млрд. руб. в 2024 г., до 265,8 млрд. руб. в 2025 и до 251,3 млрд. руб. в 2026 г.), то становится понятным, что сельхозтоваропроизводителям придется экономить на самых затратных направлениях производства – топливе и семенах. В связи с этим особо актуальной становится проблема энергосбережения, в том числе за счет экономии топлива, получаемого за счет переработки углеводородного сырья или перехода на альтернативные/возобновляемые источники энергии.

## **1.2. Способы контроля потребления дизельного топлива двигателями и применение альтернативных топлив**

В описанных выше условиях контроль расхода топлива играет важную роль в эффективном функционировании любого предприятия, в том числе сельскохозяйственного профиля [10], при этом контроль возможен двумя основными способами – без использования спутниковых систем [64] и с их применением [40, 53]. Необходимость такого контроля связана с несколькими причинами: во-первых, это точное понимание объема расхода топлива, а также его потребления по отдельным операциям процесса сельскохозяйственного производства, что позволяет сделать вывод о рациональности или нерациональности его использования; во-вторых, это процедура, предотвращающая хищение и нецелевое использование топлива, что позволяет снизить издержки производства сельскохозяйственной продукции.

Бесспутниковая система контроля расхода топлива может быть реализована четырьмя основными способами.

1. По нормам – в соответствии с существующей нормативно-правовой документацией [110]. К недостаткам такой системы можно отнести сложность

расчетов, неточность расчетов вследствие использования усредненных поправочных коэффициентов, допущений по учету загруженности дорог, технического состояния транспортных средств и других существенных факторов, оцениваемых субъективно.

2. Контроль расхода топлива через CAN-шину [29, 122]. К недостаткам такого способа контроля потребления топлива транспортным средством следует отнести высокую погрешность штатных датчиков (до 15%); обязательное наличие процессора в транспортном средстве и возможность его программного и аппаратного согласования с применяемым датчиком.

3. Контроль расхода топлива использованием проточного датчика расхода топлива [42]. К недостаткам данного способа можно отнести возможность обхода датчика с помощью скрытой постоянной или временно устанавливаемой врезки до него, высокую стоимость как самого датчика, так и его последующего обслуживания.

4. Контроль расхода топлива использованием датчика уровня топлива в баке транспортного средства [15]. К недостаткам этого способа можно отнести снижение точности показаний датчика вследствие осаждения на нем со временем тяжелых фракций, находящихся в дизельном топливе.

В отличие от беспутниковых систем контроля расхода топлива спутниковые системы имеют высокую точность и не подвержены вмешательству со стороны водителя транспортного средства, однако они имеют высокую стоимость и требуют привлечения высококвалифицированных исполнителей для ее технического обслуживания и ремонта [21]. При этом автоматически решаются задачи оптимизации маршрутов, снижения холостого пробега и использования транспортных средств, принадлежащих организациям, в личных целях (рис. 1.6) [128].

Одним из способов, снижающих затраты на производство сельскохозяйственной продукции, как было указано выше, является применение альтернативных источников топлива [14, 76]. При этом понятие альтернативных источников включает в себя широкий спектр энергоресурсов:

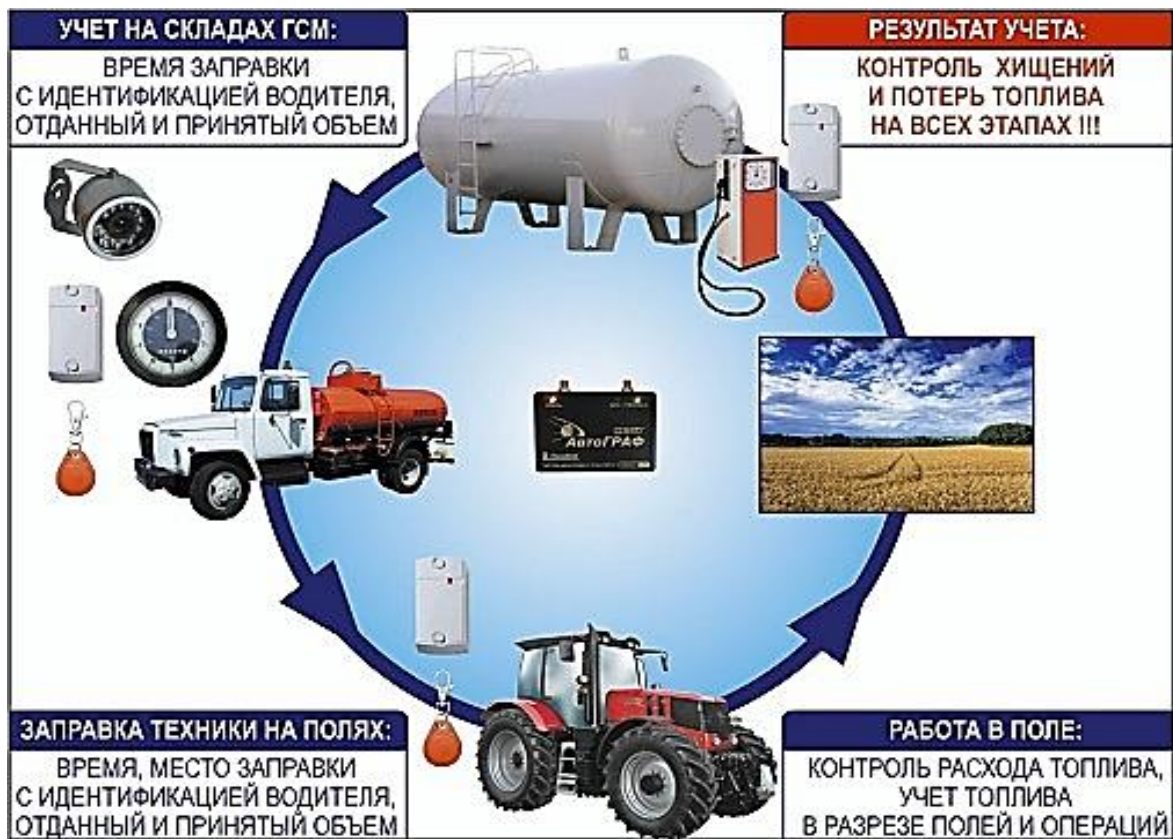


Рисунок 1.6 – Мониторинг контроля использования топлива

- жидкое биотопливо (биоэтанол, биодизель, биобутанол, диметиловый эфир) [43, 47, 72];
- газообразное биотопливо (биогаз, биоводород);
- сжиженный природный газ (метан);
- водородное топливо;
- электроэнергия.

Биоэтанол, как считают некоторые авторы [48], может стать в ближайшем будущем заменителем бензина, имея лучшие показатели по октановому числу и экологическим показателям выхлопных газов [33]. При этом он может быть произведен непосредственно в условиях сельскохозяйственного предприятия на основе имеющегося у него биологического сырья или отходов производства.

Более того, хотя в РФ нет специализированных заводов по производству биоэтанола, исторически выпуск технического и пищевого спирта, который может

быть использован в качестве такого топлива, налажен очень давно. Начиная с 2006 года, было заявлено несколько площадок, готовых к вложению собственных и привлечению заемных средств по промышленному производству биоэтанола в качестве альтернативного топлива (табл. 1.1) [7].

Таблица 1.1 – Потенциальные российские инвесторы в области промышленного производства биоэтанола

Компания инвестор	Регион России	Инвестиции	Сырье	Мощность годовая, тыс. тонн
ГК «Титан»	Омская область	200 млн. дол.	зерно	150
«Башнефть-Юг»	Ростовская область	130 млн. евро	-	250
ГК «Астон»	Ростовская область	80-120 млн. евро	-	250
Спиртзавод «Экстрасиб»	Томская область	300 млн. руб.	-	15
ГК «Виноградов»	Липецкая область	120 млн. евро	пшеница и кукуруза	50
ООО «Русская холдинговая компания»	Тамбовская область	203,8 млн. евро	меласса и зерно	250

К достоинствам производства биоэтанола в РФ можно отнести большие посевные площади, широкий выбор культур и сравнительно дешевое сырье для его производства. К факторам, сдерживающим развитие производства биоэтанола следует отнести следующие: высокая затратность запуска производства; законодательство, сдерживающее развитие продажи биоэтанола высокими акцизами; лоббирование своих интересов «сырьевыми» производителями, в первую очередь, из нефтедобывающей отрасли.

Кроме того, ряд исследователей отмечают возникновение коррозии на поверхностях металлических деталей двигателя, непосредственно контактирующих с биоэтанолом, и увеличение на  $\frac{2}{3}$  выбросов оксидов азота, а

также констатируют, что для снижения потребления топлива система топливоподачи должна быть существенно модернизирована (для бензиновых двигателей изменена конструкция карбюратора) [17].

Биодизель, основой которого является достаточно широкий спектр растительных масел и животных жиров, может быть условно классифицирован по трем поколениям:

- производство топлива из уже культивируемых сельскохозяйственных культур [24, 85, 111, 154];
- производство топлива из жиросодержащих отходов производства – использованный кулинарный жир, желтый жир [92], говяжий жир, жир домашней птицы, свиной жир, кожный жир, жир рыбы [56], а также другие виды сырья (свежие или уже побывавшие в употреблении);
- топливо, производимое из водорослей, содержащих высокий уровень масел [74, 153].

При этом следует подчеркнуть достаточно высокие энергетические показатели упомянутых выше сельскохозяйственных культур (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Энергетические показатели различных культур, применяемых для производства биодизеля

Вид культуры	Средняя теплота сгорания, ккал/кг
Кукуруза	172
Овес	217
Соя	446
Кофе	459
Лен	478
Рис	828
Подсолнечник	952
Какао	1026
Арахис	1059
Мак	1163
Рапс	1190
Олива	1212
Бразильский орех	2392
Пальмовое масло	5950

Водоросли	95000
-----------	-------

Кроме того, в Великобритании и некоторых других странах, которые, как правило, ограничены в расширении площадей для посева сельскохозяйственных культур, перерабатывают отработанные масла. Последовательность переработки отработанных масел в дизельное топливо достаточно хорошо изучена и состоит в последовательном отстаивании и очистке от загрязнений, фильтрации и обезвоживании, финишной обработке с помощью катализаторов и специальных добавок [81]. К достоинствам получаемого дизельного топлива можно отнести отсутствие утилизации исходного продукта и, следовательно, загрязнения окружающей среды, а также низкую себестоимость получаемого топлива. К недостаткам – невысокое качество топлива, а, следовательно, невозможность его использования в современной технике.

Производство биотоплива, в основном основано на переработке следующих сельскохозяйственных культур [57]:

- копра (высушенное ядро кокосового ореха);
- соевые бобы;
- рапсовое семя/канола;
- подсолнечник;
- горчица;
- кунжут;
- арахис;
- масличная пальма;
- ятрофа;
- камелина;
- хлопок;
- кукуруза;
- клещевина;
- слоновая трава;
- сесбания;
- сахарно-тростниковая багасса;



- тунг и многие другие.

Обратной стороной такого производства является беспокойство тем, что не только часть земель сельскохозяйственного назначения переводится под производство культур, выращиваемых для производства биотоплива, но и то, что вновь осваиваемые земли выделяются в больших объемах непосредственно под эти культуры [80]. Уже более 10 лет назад было замечено, что частичная переориентация некоторых государств на производство и потребление биотоплива привела к увеличению цен на кукурузу, пшеницу и соевые бобы.

Интересным направлением для производства биотоплива является применение диметилового эфира, получаемого при пиролизе древесной массы из нестроевого леса, отходов лесозаготовительной и деревообрабатывающей отрасли [65, 164].

В целом же к негативным сторонам применения биотоплива следует отнести то, что его расход увеличивается до 13...15% [32] по сравнению с расходом дизельного топлива при одновременном снижении эффективной мощности двигателя до 30% [9]. Кроме того, биодизель проявляет агрессивность к резиновым уплотнениям, существенно снижает срок службы фильтров, имеет срок хранения, не превышающий 3 месяца с момента его производства, и образует отложения при отрицательных температурах [117].

Газообразное биотопливо – биогаз – содержит в основном метан и углекислый газ и имеет высокую теплотворную способность. Например, сгорание 28 м<sup>3</sup> биогаза эквивалентно сгоранию 16,8 м<sup>3</sup> природного газа или 20,8 л нефти, или 18,4 л дизельного топлива [113]. К недостаткам производства биогаза следует отнести достаточно высокую стоимость инвестиций в биогазовую энергетику, а к достоинствам – возобновляемость данного типа энергии, связанную только с отходами основного производства.

Одним из наиболее перспективных в настоящее время видов топлива считается сжиженный природный газ [51, 66, 138]. Отказ от использования жидкого топлива в пользу газообразного [84, 137] способствует уменьшению компенсационных затрат в России и ведет к стабилизации цен на топливо. Также

снижаются вредные выбросы компонентов выхлопных газов двигателей [83, 86] и происходит перевод их на более безопасный и дешевый вид топлива. Однако этому препятствуют, в первую очередь, административные барьеры, связанные, в частности, с процедурой переоборудования автомобилей на двухтопливную систему питания. В результате возведенных барьеров на пути потребителя газомоторного топлива всего 0,4% автомобилей России оборудованы соответствующей аппаратурой. Во-вторую очередь, эта ситуация связана с неразвитостью инфраструктуры газозаправочных станций и многотопливных автозаправочных станций (рис. 1.7) [35].

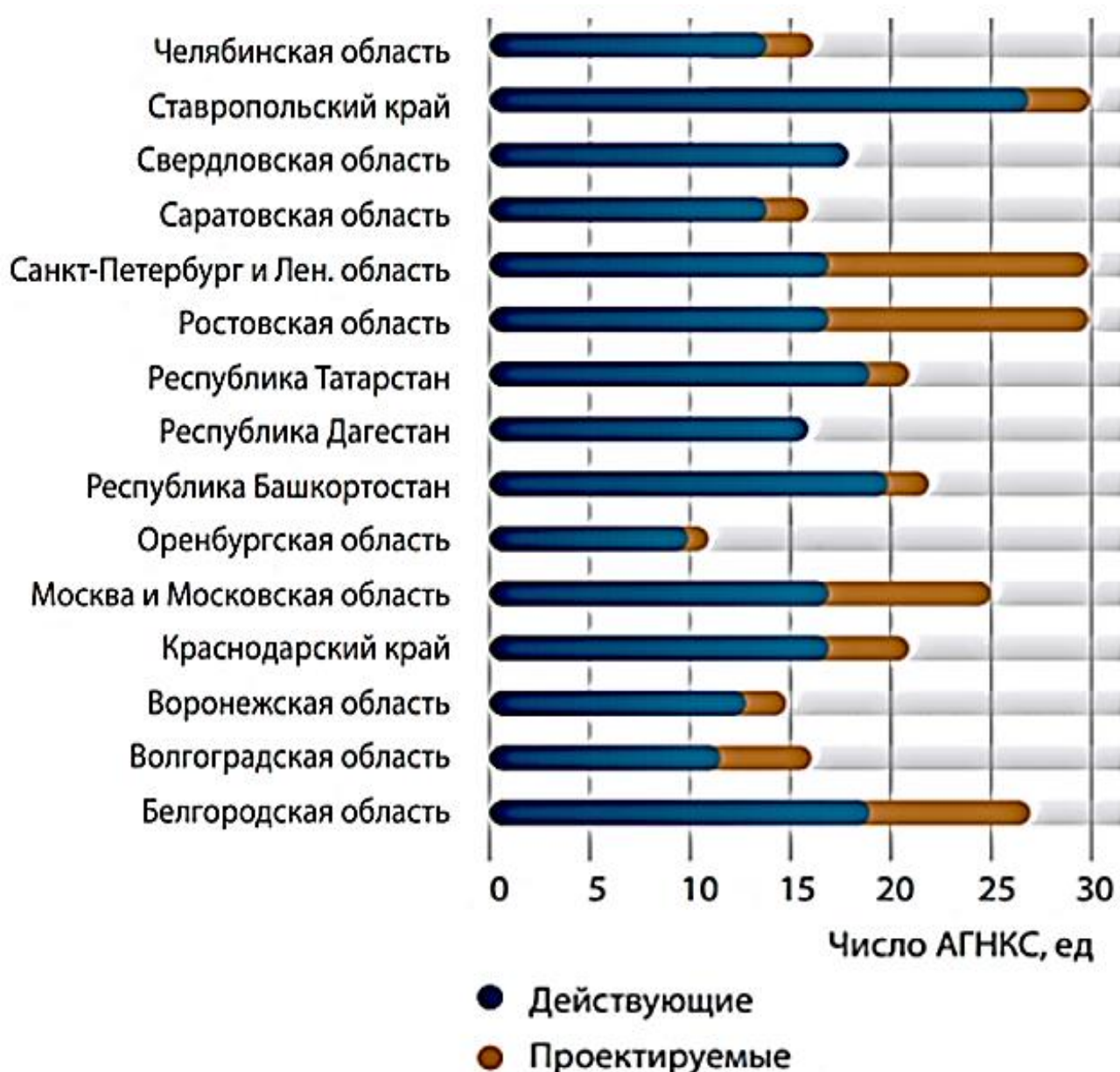


Рисунок 1.7 – Распределение газовых заправок по регионам РФ

Таким образом, главными факторами, сдерживающими развитие отрасли использования природного газа и газообразного топлива в целом, являются как непроработанность нормативно-правовой базы, так и отсутствие необходимой инфраструктуры.

Двигатели внутреннего сгорания современных автотранспортных средств принципиально могут функционировать на чистом водороде [175], однако конструктивно они не приспособлены к этому виду топлива [134]. Более того, при использовании только водорода в качестве топлива ресурс двигателя существенно снижается [25]. Технически адаптация двигателей к применению водорода осуществляется, например, с помощью установки на транспортное средство водородных топливных батарей, где водород находится при температуре не выше 20 К. При этом бак для хранения водорода имеет двухслойную конструкцию с заполнением слоями специальной пены в вакууме. Мощность двигателя при использовании водородного топлива снижается приблизительно на 20% (если использовать штатную систему зажигания транспортного средства). Учитывая, что разработка «водородного транспорта» должна происходить в сочетании со строительством инфраструктуры, позволяющей производить заправку транспортных средств и обслуживание их топливной аппаратуры, то становится понятно, что инвестиции в эту область будут превышать те, что могут быть вложены в вышеописанные направления использования альтернативного топлива. Очевидным существенным достоинством водородного топлива будет являться его экологическая безопасность. Однако до конца не совсем понятно, насколько водяные пары, являющиеся результатом работы двигателя, будут влиять на изменение влажности окружающей среды при массовом использовании в автомобильном транспорте. Тем не менее, предполагается, что водородное топливо – в связи с борьбой с глобальным потеплением – займет одну из передовых позиций в энергопотреблении (рис. 1.8) [22, 158].

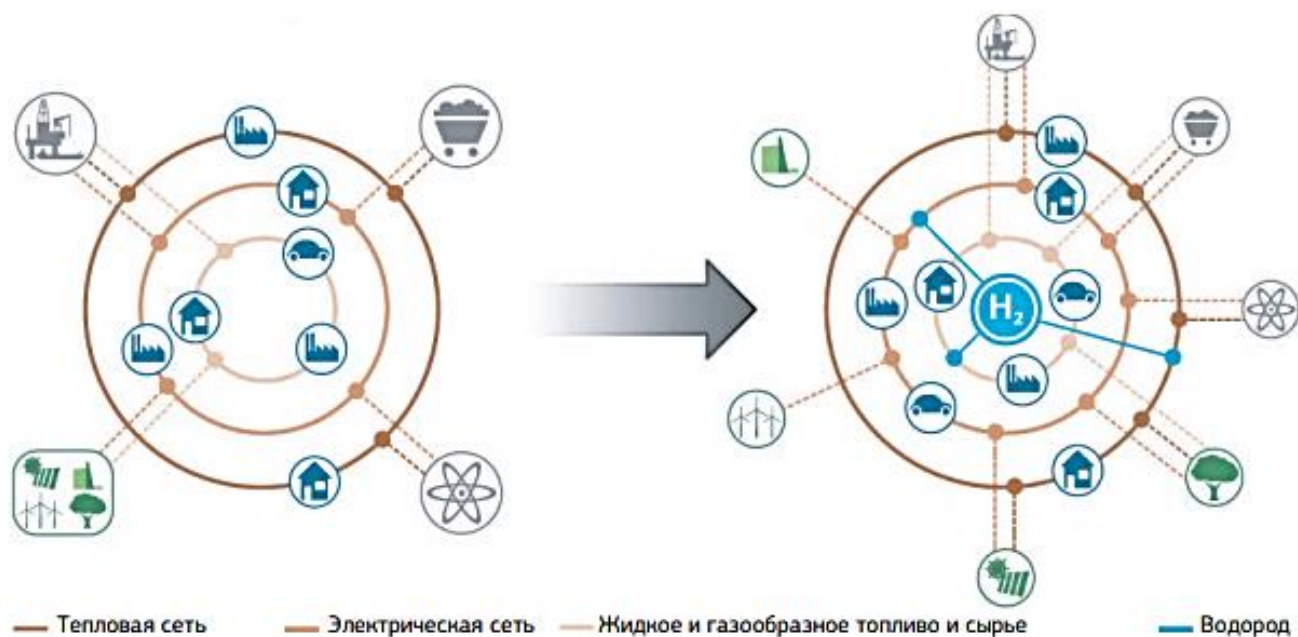


Рисунок 1.8 – Водород в интегрированном энергетическом комплексе

Параллельно водородной энергетике, как правило, рассматривается применение электроэнергии в качестве энергоносителя, приводящего в движение транспортные средства. Актуальным развитие электротранспорта в мире сделала тенденция на снижение выбросов парниковых газов в атмосферу, поскольку считается, что именно транспорт вносит существенный вклад в общий объем выбросов (в 2019 году – 16,8%) [58]. Низкий спрос на электромобили в РФ (рис. 1.9) обусловлен несколькими причинами – высокая стоимость, неразвитость инфраструктуры зарядных станций, а также ограниченного запаса хода у электромобилей, особенно в период отрицательных температур. Поэтому преимущества электромобилей – экономичность и отсутствие выбросов парниковых газов – являются неочевидными для их потенциальных покупателей. Кроме того, насыщенность рынка невозполняемыми энергоресурсами – в первую очередь, нефтью и газом – составляет сильную конкуренцию развитию электротранспорта в РФ. Особенно, если учесть тот факт, что массовое производство электромобилей в России отсутствует.

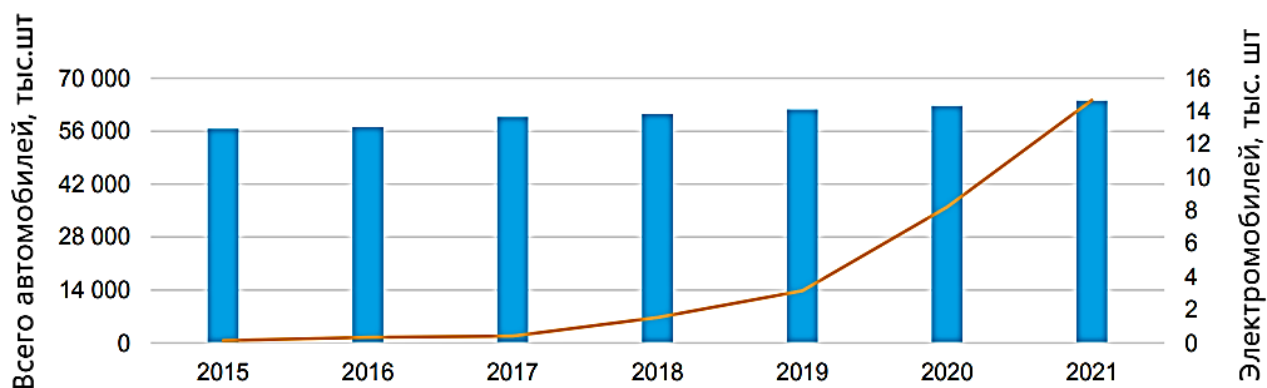


Рисунок 1.9 – Количество автомобилей и электромобилей в России в 2015-2021 гг.

Исходя из вышесказанного, становится понятным, почему электромобили даже не были включены в приоритетные направления развития сельского хозяйства [144].

### 1.3 Методы воздействия на топливо автотранспортных дизельных двигателей

Как было указано выше, для снижения топливной экономичности дизельными двигателями, как правило, сопровождающейся повышением их экологичности [82, 97, 130], наиболее часто воздействуют на топливо ультразвуком, магнитными полями, электростатической и электромагнитной обработкой, а также волнами СВЧ диапазона.

Из основных методов воздействия на топливо автотранспортных средств, являющихся эффективными и экспериментально подтвержденными, можно выделить следующие:

- воздействие ультразвука [70, 73, 87];
- воздействие микроволнового излучения.

Физические основы воздействия ультразвука на жидкость состоят в том, что в ней запускаются кавитационные процессы, следствием которых является разрыв сплошности жидкости (рис 1.10) [71, 100, 171], который существенно изменяет

коэффициент ее поверхностного натяжения, причем он может как увеличиваться (рис. 1.11) [173], так и уменьшаться (рис. 1.12) [172]. В работе [121] было установлено, что эффект от обработки жидкости ультразвуком может сохраняться в течение более чем 72 часов.

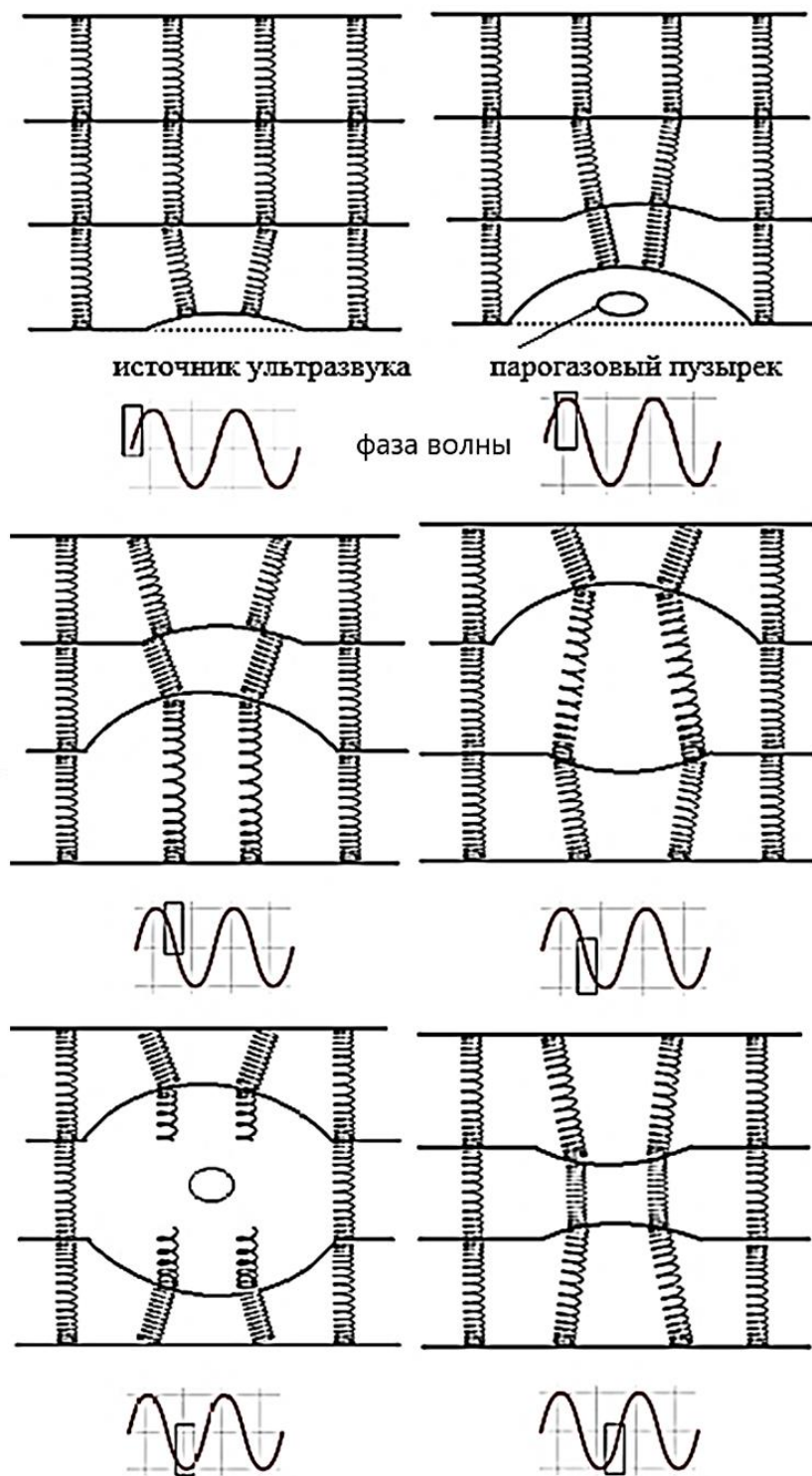


Рисунок 1.10 – Фазы образования кавитационного пузырька



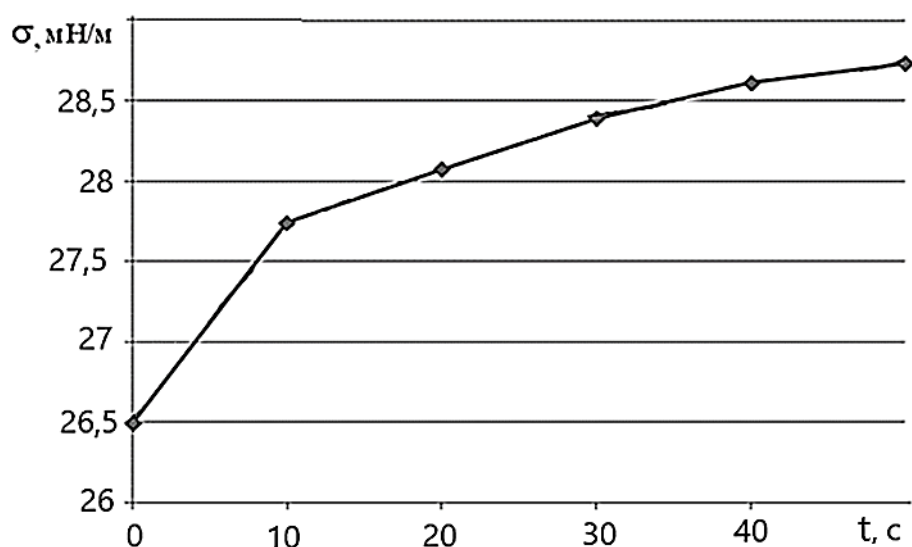


Рисунок 1.11 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  дизельного топлива при его обработке ультразвуком в течение  $t = 50$  с

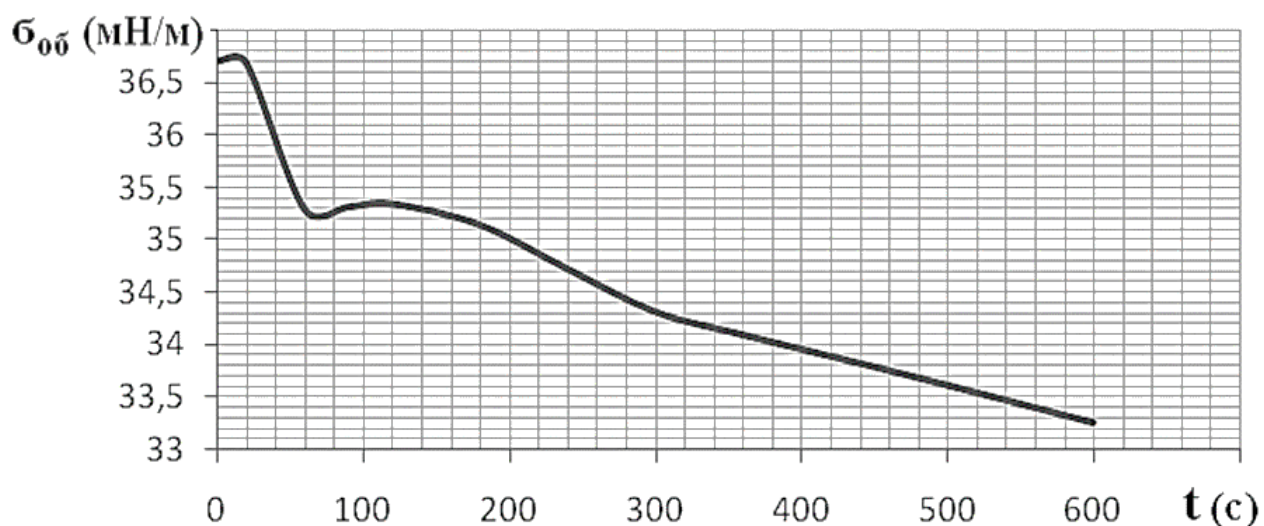


Рисунок 1.12 – График зависимости коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_{06}$  от времени обработки  $t$  масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 ультразвуком

Способы обработки текучих сред ультразвуком представлены рядом устройств, приведенных ниже.

В топливном кавитаторе (рис. 1.13) [96] область кавитации состоит из основного канала, нескольких цилиндрических частей и усеченных конусов, а также конической части штуцера с зоной выхода топлива в топливопровод.

Непосредственно в конической части кавитатора происходит образование кавитационных пузырьков (в основном, за счет присоединенной кавитации), которые увлекаются в основной топливопровод двигателя. К недостаткам устройства следует отнести повышенный кавитационный износ части топливопровода, следующий непосредственно за выходным штуцером кавитатора. Кроме того, эффективность пассивных кавитаторов зависит от скорости течения жидкости – чем она ниже, тем меньше образуется кавитационных пузырьков.

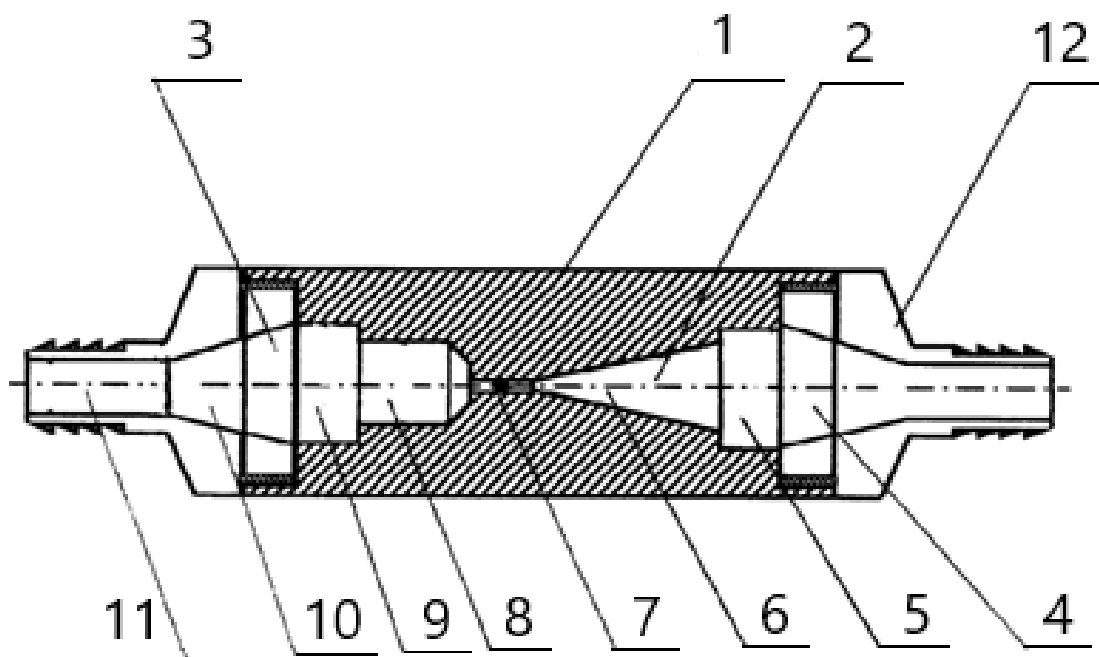


Рисунок 1.13 – Конструкция топливного кавитатора: 1 – корпус; 2 – зона подачи топлива; 3 – зона кавитации; 4, 10 – усеченный конус; 5, 8, 9, 11 – цилиндрическая часть; 6 – коническая часть; 7 – сопло; 12 – штуцер

Принцип действия устройства по обработке топлива ультразвуком (рис. 1.14) [107] основан на подаче топлива с различных направлений в емкость с установленным на ее дне ультразвуковым излучателем так, что ультразвуковые волны могут падать как на перпендикулярно направленный на него поток топлива, так и на текущий ему параллельно. К недостаткам устройства следует отнести невозможность регулирования мощности излучателя ультразвуковых волн при увеличении объема, прокачиваемого насосом топлива, в результате чего его эффективность уменьшается.





Рисунок 1.14 – Устройство для обработки топлива ультразвуком:  
 1 – емкость; 2 – штуцеры; 3 – ультразвуковой излучатель

В устройстве энергонасыщения жидкого топлива (рис. 1.15) [94] кавитационный процесс развивается за счет вращения катушки, управляемой внешним электромагнитным полем, в основном за счет присоединенной кавитации. К недостаткам конструкции следует отнести не прямое возбуждение ультразвукового поля, что несколько снижает эффективность его формирования.

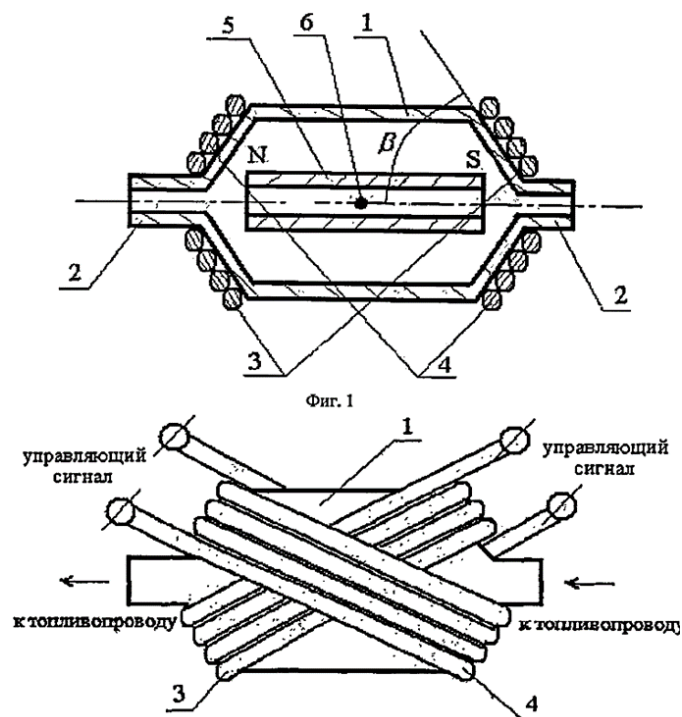


Рисунок 1.15 – Устройство энергонасыщения жидкого топлива: 1 – корпус устройства; 2 – патрубки; 3, 4 – катушки индуктивности; 5 – постоянный магнит; 6 – ось вращения постоянного магнита

Техническая основа устройства для кавитационной обработки бензина (рис. 1.21) [95] состоит в том, что на мембрану типового бензонасоса подаются

высокочастотные колебания, вызывающие кавитационные процессы в топливе, находящемся в накопительной камере. К недостаткам устройства следует отнести невысокую циклическую стойкость мембраны и кавитационную стойкость самой накопительной камеры.

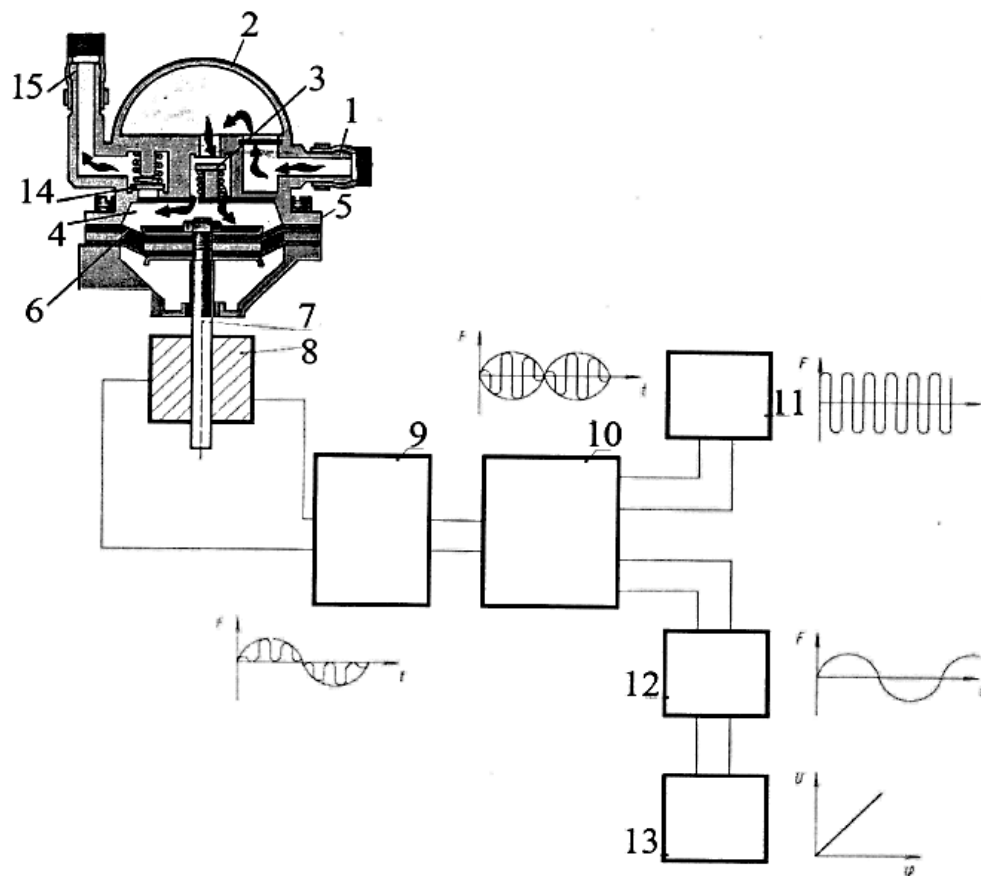


Рисунок 1.16 – Бензонасос с гомогенизацией топлива:

1 – штуцер впускного канала; 2 – компенсационная камера; 3 – впускной клапан; 4 – накопительная камера; 5 – корпус; 6 – мембрана; 7 – шток; 8 – электромагнит; 9 – преобразователь сигнала; 10 – модулятор; 11 – генератор ультразвуковых колебаний; 12 – преобразователь напряжение-частота; 13 – датчик положения дроссельной заслонки; 14 – выпускной клапан; 15 – штуцер выпускного канала

Устройство для обработки жидкого топлива кавитацией (рис. 1.17) [91] состоит из корпуса 1, винтовой вставки 6, перемешивающей поступающее с патрубка 2 топливо, которое далее проходит через ультразвуковой излучатель 7, выполненный в виде двух противоположно направленных спиралей Архимеда (части 7а и 7в). После чего топливо попадает в расширяющуюся камеру 14, откуда

выходит в патрубок 3. Остальные детали, представленные на рисунке, выполняют роль соединительных частей, необходимых для сборки устройства в единое целое.

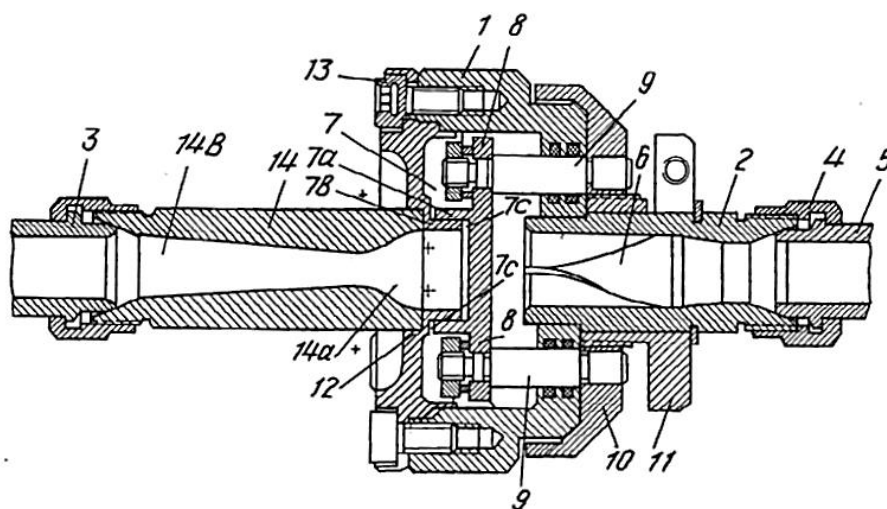


Рисунок 1.17 – Устройство для обработки жидкого топлива кавитацией:

1 – корпус устройства; 2 – патрубок для подачи топлива; 3 – патрубок выхода топлива; 4 – гайка соединения с трубопроводом; 5 – трубопровод подачи топлива, 6 – винтовая вставка; 7 – струйный излучатель; 7а, 7в – спирали Архимеда; 7с – каналы для прохождения обработанного топлива; 8 – основание размещения спирали; 9 – направляющие основания; 10 – регулировочная гайка; 11 – втулка; 12 – крышка с отверстием; 13 – винт закрепления спирали; 14 – камера переменного сечения; 14а, 14в – сужающаяся и расширяющаяся часть камеры

Конструкция данного устройства имеет сложное строение, особенно это касается ультразвуковых излучателей, выполненных в виде спиралей Архимеда. Причем сложность конструкции не обоснована ни с точки зрения повышения эффективности обработки топлива, ни соотношения цена/качество.

Достаточно часто ультразвуковой излучатель используется как дополнительное приспособление при получении смесового топлива [46, 69], состоящего из минерального топлива и растительной составляющей (рис. 1.18) [89].

Для подготовки смешанного топлива и его одновременной обработки ультразвуковой излучатель является одним из наиболее эффективных и недорогих устройств.

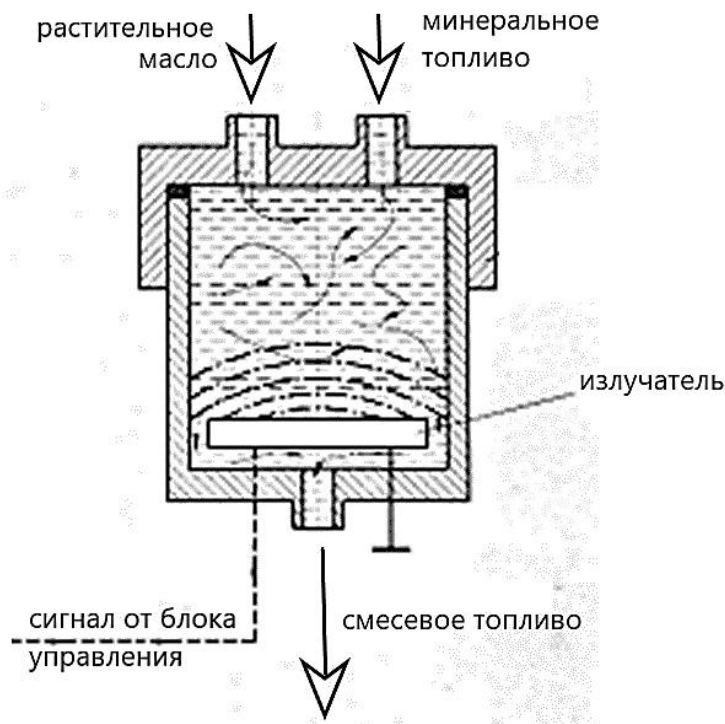


Рисунок 1.18 – Ультразвуковой смеситель растительного масла и минерального топлива

Хорошо видно, что все способы организации кавитационного поля в жидкостях – при высокой эффективности изменения их физико-механических характеристик – имеют существенный недостаток, связанный с воздействием кавитационных пузырьков на стенки емкостей и трубопроводов, в которых эти жидкости находятся или протекают. Кроме того, недостатком является регулирование мощности излучения – как правило, ее придется изменять путем подключения дополнительных источников ультразвукового излучения. Тем не менее источники ультразвука имеют небольшие размеры и их можно сравнительно просто закреплять на стенках емкостей и трубопроводов простым приклеиванием. Необходимо упомянуть еще и тот факт, что ультразвук при мощностях, достаточных для «энергонакачки» топлива не вызывает деструкцию молекул и его

нагревание – как правило, повышается «текучесть» жидкости, что хорошо иллюстрируется применением ультразвука в нефтяной промышленности при добыче нефти и ее транспортировки по трубам [93].

С точки зрения высокой мощности воздействия при малом времени обработки представляется перспективным исследовать воздействие волн диапазона СВЧ на основные характеристики дизельного топлива [124, 151].

Механизм воздействия волн СВЧ диапазона базируется на явлении перемещения диполей, которые представлены полярными молекулами топлива, в окружающих их малых объемах жидкости под воздействием электромагнитного поля. Колебательное движение диполей, сопровождающееся их переориентацией в пространстве, приводит к появлению токов проводимости и токов смещения, что вызывает нагрев окружающих слоев.

С точки зрения воздействия на топливо эффект его нагревания будет носить паразитный характер (рис. 1.19) и может благотворно влиять только при низких температурах, затрудняющих запуск дизельного двигателя [123].

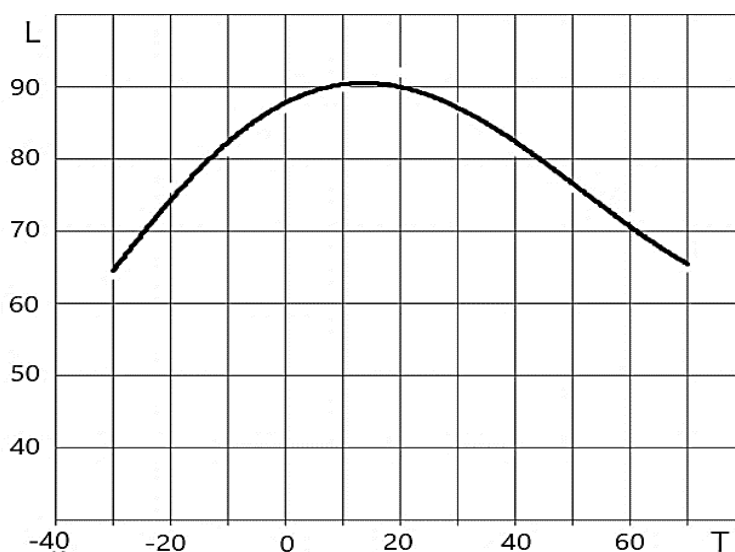


Рисунок 1.19 – Зависимость дальности  $L$  (мм) струи топлива от его температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

При использовании СВЧ излучения необходимо принимать во внимание возможную деструкцию молекул компонентов дизельного топлива и их межмолекулярных соединений. Поэтому время и мощность СВЧ излучения будут существенно влиять на характеристики полученной «композиции», при этом она

не должна существенно отличаться от исходной – в противном случае придется оптимизировать камеру сгорания для топлива фактически с другими характеристиками и перенастраивать топливopодающую аппаратуру. Кроме того, при длительном воздействии СВЧ излучения, вызывающем нагрев топлива, возможно образование «тяжелых» компонентов, усиливающих коксообразование при сгорании топлива [36].

Устройства, используемые для нагрева дизельного топлива (при эксплуатации в условиях отрицательных температур) перед его впрыском в камеру сгорания, как правило, содержат микроволновый излучатель большой мощности, посредством волноводов соединенный с топливопроводом (рис. 1.20) [123].

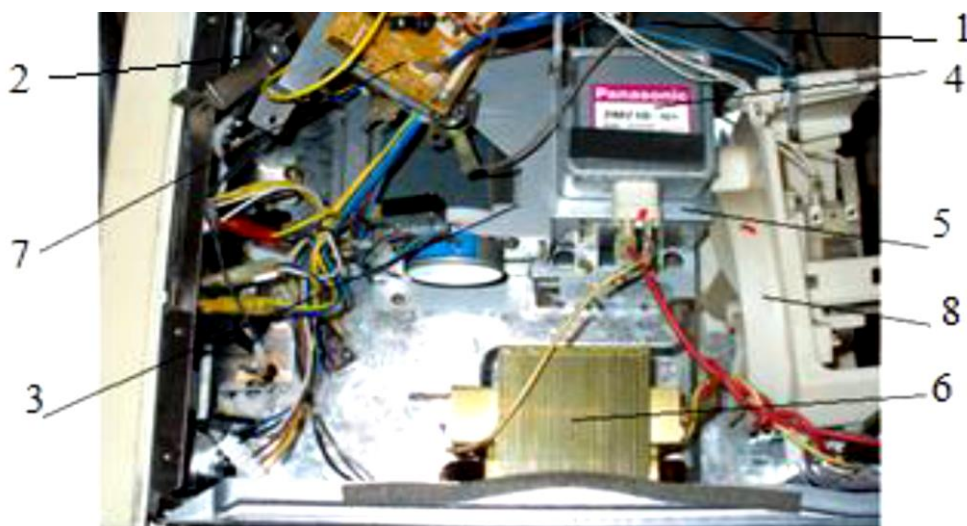


Рисунок 1.20 – Общий вид устройства СВЧ нагрева топлива: 1 – ТНВД; 2 – форсунка; 3 – волновод; 4 – магнетрон; 5 – инвертор напряжения, подключаемый к бортовой сети транспортного средства; 6 – трансформатор; 7 – блок управления; 8 – источник питания

Главной задачей такой конструкции является исключительно нагрев топлива, невзирая на возможные изменения в составе и структуре обрабатываемого топлива. Поэтому возможно получение эффекта повышения расхода топлива вследствие структурных преобразований, вызывающих изменение, в том числе цетанового числа.

Устройство, реализуемое по методу обработки жидкости СВЧ излучением, (рис. 1.21) [166] может быть использовано для нагрева топлива, и реализуется на базе стандартных магнетронов, используемых в домашних микроволновых печах.

Устройство содержит емкость 2 с внешней поверхностью 1, выполненную из нержавеющей стали, стенки 3, 4 и 5 которой образуют цилиндрическую камеру 6. Магнетрон 7, герметично укрытый в корпусе 10, соединен с цилиндрическим входом 8, выполненным в боковой стенке 5, через который волновод 9 магнетрона 7 проходит во внутреннюю часть камеры 6.

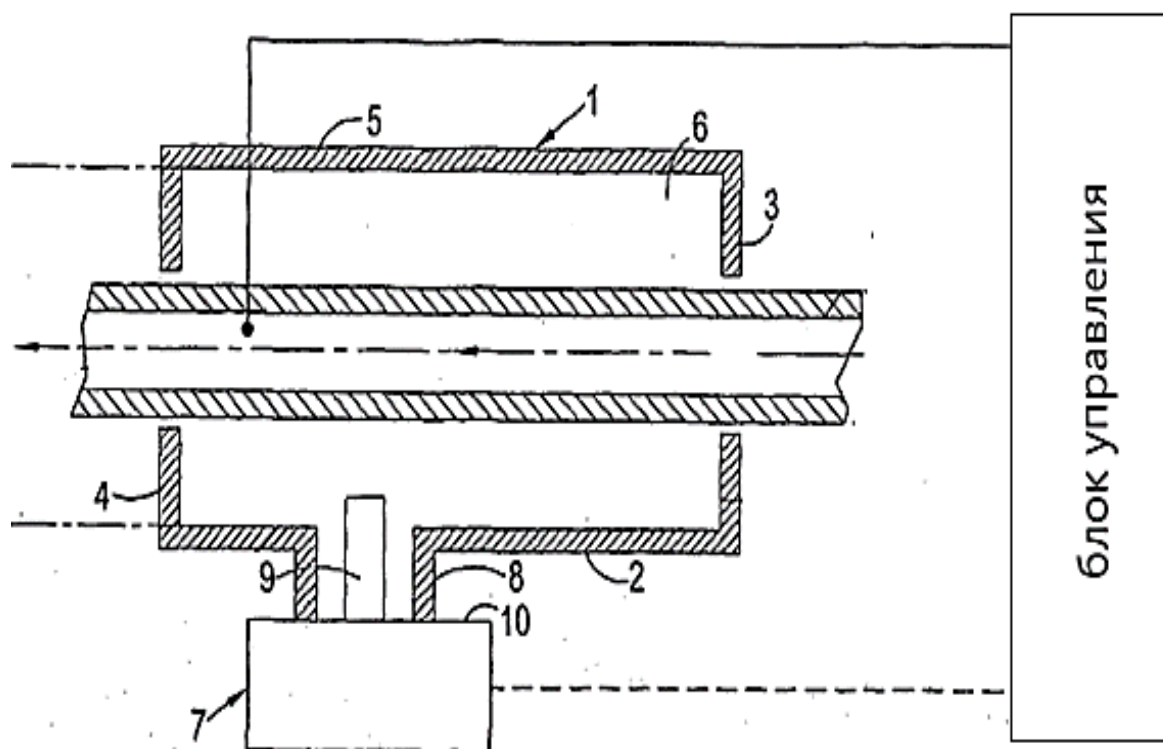


Рисунок 1.21 – Устройство обработки жидкостей СВЧ излучением

Фактически конструкция не является чем-то принципиально новым с точки зрения «соединения» излучателя магнетрона с обрабатываемой средой, а также увеличения мощности обработки за счет увеличения количества последовательно размещаемых друг за другом типовых блоков.

В работе [163] изучено сочетание использования различного расположения СВЧ источника, типа его волновода и комбинация воздействия с источником ультразвука (рис. 1.22).



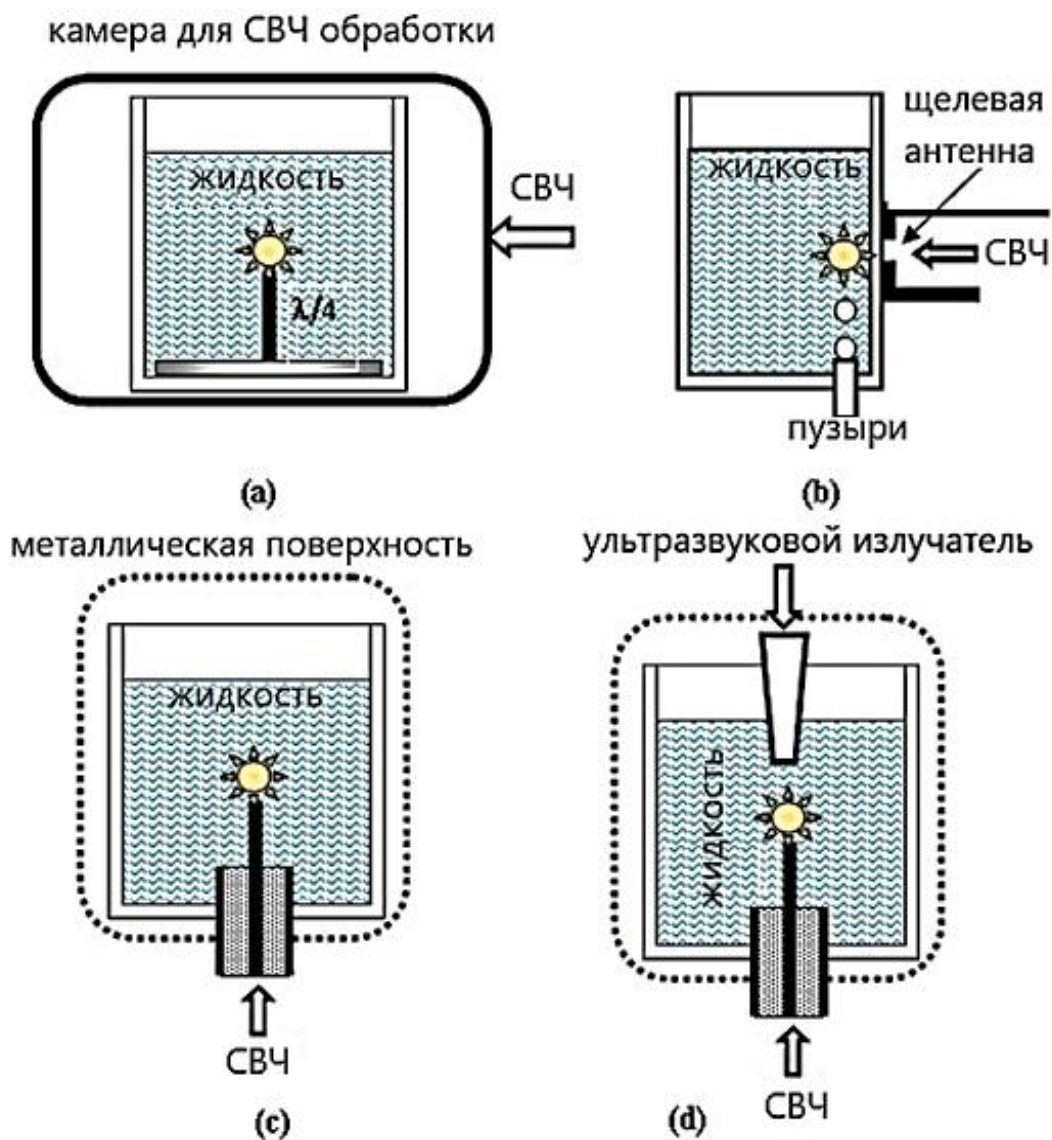


Рисунок 1.22 – Схемы различных типов СВЧ-разрядов в жидкостях: а – разряд на базе четвертьволновой антенны ( $\lambda/4$ ); б – разряд на основании щелевой антенны; в – разряд с вводом энергии через коаксиальную линию; д – микроволновый разряд в сочетании с ультразвуковым излучением

Подобное сочетание излучателей СВЧ волн и ультразвуковых волн позволяет варьировать способ воздействия за счет комбинации источников излучения в очень широком диапазоне. Тем не менее, по словам автора исследования, остаются неизученными вопросы оценки физических параметров разрядов и термодинамического состояния плазмы, а также разрядов с одновременным введением в жидкость химически активных газов.



Одним из направлений использования СВЧ излучения является разработка на их базе эффективных систем зажигания и формирование условий устойчивого горения в камерах сгорания двигателей при их работе на сверх бедных топливовоздушных смесях, что позволяет существенно снизить токсичные выбросы (рис. 1.23) [67]. Предлагаемое техническое решение направлено на двигатели с принудительным поджигом поступающей в камеру сгорания смеси, поэтому, вероятно, потребует изменения ее конструкции/конфигурации.

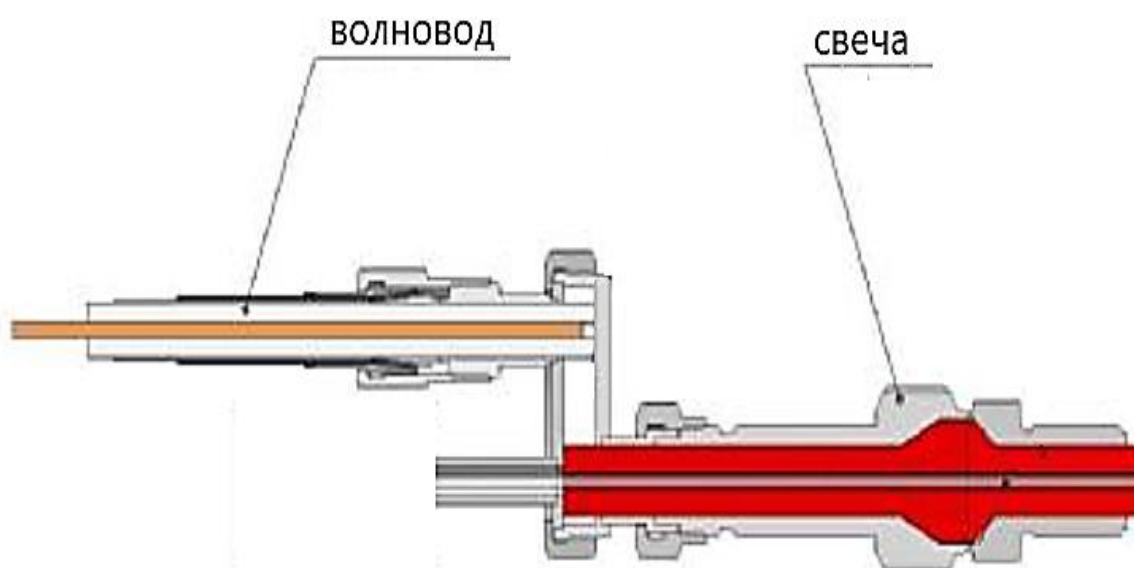


Рисунок 1.23 – СВЧ-подсветка для ввода электромагнитного излучения в сантиметровом и оптическом диапазонах в камеру сгорания двигателя

В части устройств авторы применяют СВЧ обработку именно для изменения параметров жидких углеводородных материалов. Например, в работе [167] (рис. 1.24) подача углеводородного сырья в реакционную трубу, расположенную внутри отверстия СВЧ волновода, сопровождается подачей технологического газа в нее же, при этом энергия микроволнового излучения вызывает реакцию сырья и технологического газа и образование конечного топливного продукта. Способ интересен тем, что в качестве углеводородного сырья и технологического газа могут использоваться различные комбинации в различных пропорциях, зависящих от режимов/нагрузок двигателя.

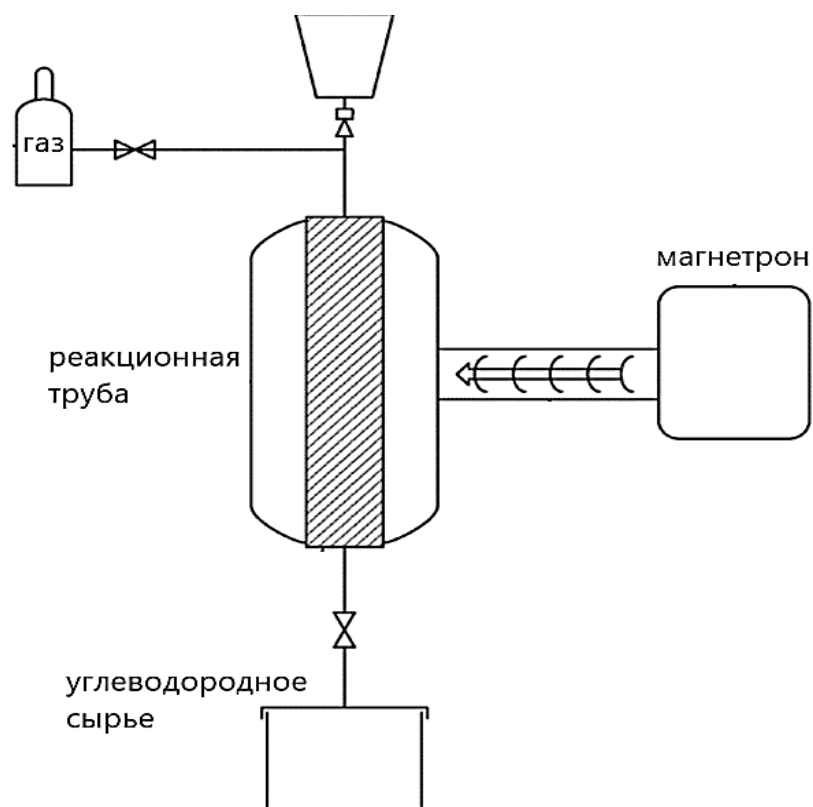


Рисунок 1.24 – Схема смесителя углеводородного сырья и технологического газа

Известен способ предварительной топливоподготовки жидкого топлива к сжиганию в камере сгорания [88], суть которого состоит в том, что перегретая за счет воздействия СВЧ излучения мелкодисперсная воздуховодяная эмульсия впрыскивается в камеру сгорания двигателя, куда затем подается углеводородное топливо. Предполагается, что за счет обмена энергией в цепочке эмульсия-топливо произойдет перераспределение энергии, что, в свою очередь, позволит снизить расход топлива, повысить коэффициент полезного действия двигателя и снизит токсичность выхлопных газов. Техническое решение является достаточно спорным с точки зрения сохранения коррозионной стойкости стенок камеры сгорания из-за высокой агрессивности перегретого водяного пара.

Проведённый анализ способов и устройств СВЧ воздействия на основные характеристики топлива показал, что до конца не решены вопросы оценки воздействия мощности и времени обработки волнами сверхвысокой частоты на физико-химические характеристики топлива такие, как кинематическая вязкость,

коэффициент поверхностного натяжения и цетановое число, что показывает важность и актуальность выбранных научных исследований.

Воздействие микроволнового излучения на жидкости при малых мощностях излучателя достаточно хорошо изучено и может быть описано законом Бугера [119]:

$$I = I_0 e^{-\alpha Z}, \quad (1.1)$$

где  $I$  – интенсивность микроволнового излучения, прошедшего слой жидкости (воды), Вт/м<sup>2</sup>;

$I_0$  – интенсивность микроволнового излучения, падающего на поверхность плоского полубесконечного слоя жидкости (воды), Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha$  – коэффициент поглощения жидкостью микроволнового излучения;

$Z$  – координата вдоль оси, направленной ортогонально к поверхности жидкости, отсчитываемая от ее поверхности вглубь полубесконечного слоя.

Коэффициент  $\alpha$  зависит только от свойств самой жидкости и не зависит ни от глубины проникновения микроволнового излучения, ни от его мощности. При этом, глубина проникновения микроволнового излучения в жидкость (воду) обратно пропорциональна коэффициенту поглощения:

$$d_0 \approx \frac{1}{\alpha}. \quad (1.2)$$

Однако, не до конца описаны процессы воздействия на текучую среду в случае, если энергия, переносимая электромагнитной волной, настолько велика, что вызывает изменения состояния текучей среды, приводя к изменениям в ней, которые не могут быть описаны линейной электродинамикой [50]. В описанных условиях возможны два варианта – могут быть изменены электрические свойства жидкостей (кратковременное облучение описывается линейной моделью, в которой СВЧ воздействие эквивалентно малому времени прохождения электромагнитной волны через жидкость) и изменены диэлектрические свойства жидкостей (описывается нелинейными моделями как воздействие мощного СВЧ излучения на жидкость).

Для первого случая характерно выполнение выражения (1.2), однако остается невыясненным вопрос о зависимости глубины проникновения излучения от

проводимости жидкости. Иначе говоря, проводимость будет определяющим фактором проникновения СВЧ излучения вглубь жидкости (рис. 1.25).

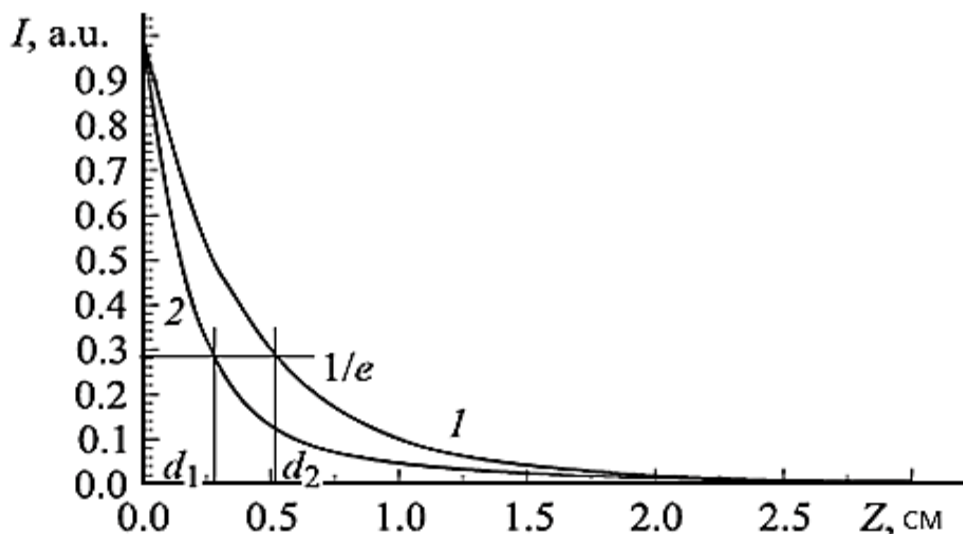


Рисунок 1.25 – Глубина проникновения микроволнового излучения внутрь слоя жидкости при малой мощности излучателя: 1 – вода (проводимость 380  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); 2 – солевой раствор (проводимость 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

При высокой мощности СВЧ воздействия на жидкость или большой длительности ее облучения волнами СВЧ диапазона во внимание придется принимать теплопроводность жидкости:

$$I_{ab} = \rho c_p (T_1 - T_0) / t, \quad (1.3)$$

где  $I$  – интенсивность микроволнового излучения,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\rho$  – плотность жидкости (воды),  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c_p$  – удельная теплоемкость жидкости (воды),  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{K}$ ;

$T_1$  – конечная температура жидкости,  $\text{K}$ ;

$T_0$  – начальная температура жидкости,  $\text{K}$ ;

$t$  – время облучения СВЧ волнами,  $\text{с}$ .

Эффект, связанный с высокой мощностью СВЧ излучения, проявляется в том, что глубина его проникновения в жидкость существенно отличается от глубины проникновения в нее при малых мощностях воздействия или малом времени воздействия на нее (рис. 1.26).

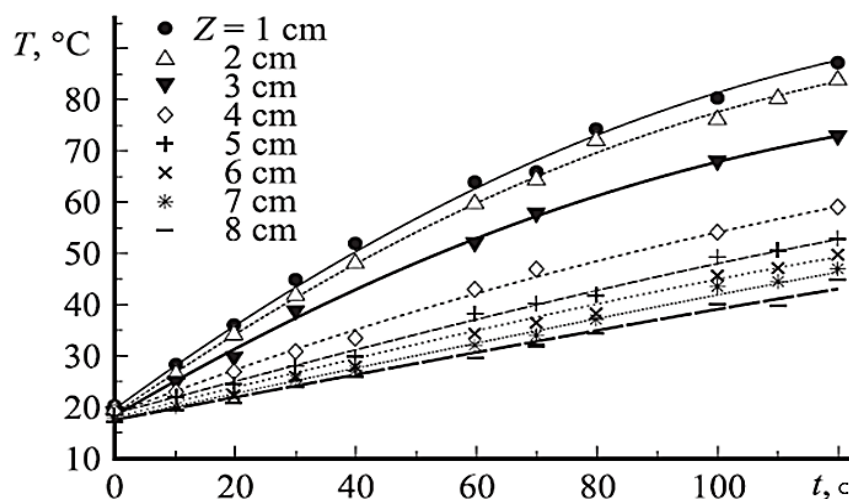


Рисунок 1.26 – Температура слоев, расположенных на различной глубине, в зависимости от времени воздействия микроволнового излучения

Учитывая закон Бернулли, зависимость проникновения СВЧ волн даже большой мощности в подвижной (текущей) среде, которая характерна для топливопровода двигателя, будет иметь еще более сложный характер.

Таким образом, до конца не решены вопросы связанные с обработкой топлива волнами СВЧ диапазона, такие как влияние начальной температуры топлива и изменение его состава, а также не оценено изменение физических показателей (кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения), которые влияют на параметры впрыска топлива в камеру сгорания двигателя.

#### 1.4 Цель и задачи исследования

Согласно с выполненным анализом представленных в литературе способов и устройств для воздействия на основные характеристики дизельного топлива, были сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

**Цель исследования** – улучшение характеристик дизельных двигателей воздействием на топливо волнами сверхвысокой частоты перед распылением на форсунках.

**Задачи исследования:**

- проанализировать существующие способы обработки топлива, которые

улучшают топливную экономичность двигателей;

- смоделировать существующие зависимости процессов впрыска топлива с учетом изменения кинематической вязкости и поверхностного натяжения дизельного топлива;

- провести исследования по влиянию воздействия волн СВЧ диапазона на характеристики дизельного топлива, а также на изменение характеристик топливной экономичности и экологичности отработанных газов дизеля Д-243;

- разработать устройство для обработки топлива волнами СВЧ диапазона, интегрированного в топливную систему дизельных двигателей, оценить экономический эффект от его внедрения.

### **1.5 Выводы по первой главе**

В соответствии с проведенным анализом можно сформулировать следующие выводы.

1. Поскольку нефть и нефтепродукты остаются преобладающим продуктом на международном рынке энергоресурсов, цена которых с течением времени возрастает, то главной задачей в настоящий момент является экономия энергоресурсов, в первую очередь, за счет внедрения недорогих технических решений в устройства топливоподготовки и топливоподдачи двигателей транспортных средств различного назначения, которые являются основными потребителями невозобновляемых источников энергии.

2. Альтернативные (возобновляемые) источники энергии находятся в стадии разработки и апробации различных вариантов реализации и пока не могут полноценно соперничать с невозобновляемыми источниками. При этом использование альтернативных источников энергии требует существенных вложений в инфраструктуру, предваряющих их полноценное использование, и достаточно часто – в изменение конструкции двигателя.

3. Рассмотренные эффективные методы воздействия на углеводородное топливо, такие как ультразвуковое и СВЧ воздействие, показало, что до конца не

решенными остаются те вопросы, что связаны с изменением физико-химических характеристик топлива, которые существенно влияют на процессы смесеобразования и сгорания топлива. При этом методы СВЧ воздействия более эффективны в условиях низких температур и больших объемах обрабатываемого топлива в единицу времени.

Подводя итог, можно сделать вывод, что тема диссертационной работы «Улучшение характеристик дизельных двигателей обработкой топлива волнами СВЧ диапазона» в настоящий момент является весьма актуальной.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ПРОЦЕСС ВПРЫСКА ТОПЛИВА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ

### 2.1. Существующие модели описания процесса впрыска топлива

В работах различных исследователей процессы распыления топлива, его каплеобразования и последующее сгорание в камере сгорания рассматриваются с различных ракурсов. Это связано как с различным теоретическим подходом в решении этой очень сложной задачи, так и с разнообразием конструкций топливоподающей аппаратуры. Ниже представлены подходы, охватывающие конструктивные особенности системы впрыска топлива, и взгляды теоретиков гидромеханики.

Для моделирования таких процессов часто применяется численное моделирование, поскольку аналитические выражения в ряде случаев получить либо невозможно, либо чрезвычайно трудно [30, 54, 77]. В целом к недостаткам математического моделирования, в том числе с использованием численных методов, следует отнести ограничения, иногда существенно сужающие область применения полученных результатов.

В рамках применения численных методов моделирования были рассмотрены аккумуляторные системы Common Rail (CR) 2-го (AC1) и 3-го (AC2) поколений фирмы Bosch [38] с точки зрения управления формой характеристики впрыскивания дизельного топлива (прямоугольной, треугольной и ступенчатой с возможностью изменения их основных параметров) [6]. Разработанные математические модели представлены в уравнениях [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{Ku}{f}, \\ \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \end{cases}, \quad (2.1)$$

где  $t$  – время, с;

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

$u$  – средняя скорость течения топлива в трубопроводе, м/с;



$p$  - давление топлива, Па;

$x$  - координата рассматриваемого сечения трубопровода от его начала;

$K$  - диссипативный множитель.

Уравнения (2.1) решались методом линеаризованного распада-разрыва [31], где в качестве граничных условий выступало уравнение массового баланса в полостях:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{\frac{1}{\rho_i} \sum_{k=1}^K G_{i-k} + \sum_{n=1}^N U_{i-n} f_n + \sum_{j=1}^J \frac{dV_{i-j}}{dt}}{\beta V_i}, \quad (2.2)$$

где  $\rho_i$  - плотность топлива в  $i$ -й полости, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  - время, с;

$U_{i-n}$  - скорость втекания из/в  $n$ -го топливопровода, м/с;

$f_n$  - площадь поперечного сечения  $n$ -го топливопровода, м<sup>2</sup>;

$p_i$  - давление в  $i$ -й полости, Па;

$V_i$  - объем  $i$ -й полости, м<sup>3</sup>;

$\beta$  - коэффициент сжимаемости топлива, Па<sup>-1</sup>;

$G_{i-k}$  - массовая скорость перетечек топлива между  $i$ -й и  $k$ -й полостями, кг/с.

Массовая скорость перетечек топлива  $G_{i-k}$  определяется из уравнения Бернулли:

$$G_{i-k} = \text{sign}(p_k - p_i) (\mu f)_{i-k} \sqrt{2\rho_k |p_k - p_i|}, \quad (2.3)$$

где  $(\mu f)_{i-k}$  - эффективное проходное сечение отверстия между  $i$ -й и  $k$ -й полостями, м<sup>2</sup>;

$\rho_k$  - плотность топлива в  $k$ -й полости, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_i$  - плотность топлива в  $i$ -й полости, кг/м<sup>3</sup>.

Численное моделирование многоструйного впрыска дизельного топлива в двигателях базируется на методе распыла Лагранжа – жидкость впрыскивается в форме капель, имеющих средний размер, определяемый диаметром выходного отверстия сопла форсунки. Для области, в которую попадают капли топлива, выполняется распределение Розина-Раммлера [170]:

$$RR = d_{p_0} + \langle d_p \rangle (-\ln(1 - n_{rand} k_R))^{-q}, \quad (2.4)$$

где  $d_{p_0}$  – минимальный диаметр капель, м;

$\langle d_p \rangle$  – средний диаметр капель, м;

$n_{rand}$  – случайное число;

$q$  – коэффициент разброса;

$k_R$  – коэффициент распределения.

При этом коэффициент  $k_R$  определяется следующей формулой:

$$k_R = 1 - \exp\left(\frac{(d_{pmax} - d_{p0})^q}{\langle d_p \rangle}\right), \quad (2.5)$$

где  $d_{pmax}$  – максимальный диаметр капель, м;

$d_{p0}$  – минимальный диаметр капель, м;

$\langle d_p \rangle$  – средний диаметр капель, м.

Стоит отметить тот факт, что часть исследований – вследствие их сложного теоретического описания – рассматривается авторами с применением регрессионного анализа, который позволяет в ряде случаев достаточно хорошо описать процесс [132, 142, 148]. В этом случае регрессионные уравнения могут рассматриваться как поправочные коэффициенты, к сожалению, также для достаточно узкой области эксперимента. Тем не менее они позволяют предсказывать некоторые параметры протекающего процесса с точностью, достаточной для принятия решения по применению или отказу от реализации того или иного действия на практике. В случае слишком сложных процессов такой подход либо ограничивается очень узкой областью применения, либо не позволяет описать его вообще – это проявляется в виде неадекватности уравнений или большой погрешности представления рассматриваемого процесса.

В частности, в работе [114] были получены поправочные коэффициенты для угла конуса струи распыленного топлива на основе использования регрессионных уравнений (табл. 2.1, где  $t$  – интервал времени увеличения конуса впрыскиваемого топлива, мс;  $A_3$ ,  $l_3$ ,  $k_3$ ,  $n_3$  – числовые коэффициенты, полученные в результате преобразований исходных формул). При выводе зависимостей были использованы уравнения Мещерского [68]:

$$m \frac{dU_{\phi}}{dt} + (U_{\kappa} - U_{\phi}) \frac{dm}{dt} = R, \quad (2.6)$$

где  $m$  – масса топлива, кг;

$U_{\phi}$  – скорость вершины струи, м/с;

$U_{\kappa}$  – скорость элементарной массы, м/с;

$t$  – время, в течение которого развивается данный процесс, с;

$R$  – сила аэродинамического сопротивления движению топливной струи, Н.

Таблица 2.1 – Регрессионные уравнения, необходимые для уточнения угла конуса струи распыленного топлива

t, мс	lg A <sub>3</sub>	l <sub>3</sub>	k <sub>3</sub>	n <sub>3</sub>
0,2-0,6	3,333t <sup>2</sup> -7,99t-0,075	0,24t-0,019	0,019+0,113t-0,025t <sup>2</sup>	1,075t+0,055
0,6-0,8				0,513t+0,402
0,8-1		0,143t+0,058		0,913
1-1,2	3,3t-8,86	0,235		1,84-0,775t
1,2-1,4		0,242-0,02t		
1,4-1,6				
1,6-2,3	0,214t-3,922	0,236-0,0183t		0,146+0,064t-0,0142t <sup>2</sup>
2,3-3				

В работе [61] были представлены аналитические модели, которые описывают путь  $I_T$ , проходимый топливной струей от распылителя форсунки до границы между начальным и основным участками развития струи, время  $\tau_S$  достижения топливной струей стенки камеры сгорания, средний диаметр каплей  $d_k$ , а так же угол  $\gamma_T$  раскрытия топливной струи на основном участке.

Уравнение для пути топливной струи имеет следующий вид [61]:

$$I_T = 8,85 d_c W_e^{0,25} \mu^{0,4} \rho_T^{-0,6}, \quad (2.7)$$

где  $I_T$  – путь, проходимый топливной струей от распылителя форсунки до границы между начальным и основным участками развития струи, м;

$d_c$  – диаметр распыливающего отверстия форсунки двигателя, м;

$W_e$  – критерий Вебера;

$\mu$  – динамическая вязкость топлива, Па·с;

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

Время, за которое топливная струя достигает камеры сгорания, представлено следующим выражением [61]:

$$\tau_S = I_T^2 \frac{D_S \rho \sqrt{2}}{d_c U_0 W_e^{0,21} M^{0,16}}, \quad (2.8)$$

где  $\tau_S$  – время достижения топливной струей стенки камеры сгорания, с;

$I_T$  – путь, проходимый топливной струей от распылителя форсунки до границы между начальным и основным участками развития струи, м;

$D_S$  – коэффициент молекулярной диффузии ( $D_S = 4 \dots 5$ );

$\rho$  – отношение плотностей воздуха и топлива в цилиндре двигателя;

$d_c$  – диаметр распыливающего отверстия форсунки двигателя, м;

$U_0$  – средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива, м/с;

$W_e$  – критерий Вебера;

$M$  – критерий, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости.

Для среднего диаметра капель топлива при впрыске известна формула [61]:

$$d_k = E_k d_c (\rho W_e)^{-0,266} M^{0,0733}, \quad (2.9)$$

где  $d_k$  – средний диаметр капель топливной струи, м;

$E_k$  – коэффициент, характеризующий конструкцию форсунки и способ осреднения размеров капель;

$d_c$  – диаметр распыливающего отверстия форсунки двигателя, м;

$\rho$  – отношение плотностей воздуха и топлива в цилиндре двигателя;

$W_e$  – критерий Вебера;

$M$  – критерий, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости.

Угол раскрытия топливной струи на основном участке описан зависимостью [61]:

$$\gamma_T = 2 \arctg(F_S W_e^{0,32} M^{-0,07} \rho^{0,5}), \quad (2.10)$$

где  $\gamma_T$  – угол раскрытия топливной струи на основном участке, рад;

$F_S$  – постоянный коэффициент ( $F_S = 0,009$ );

$W_e$  – критерий Вебера;

$M$  – критерий, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости;

$\rho$  – отношение плотностей воздуха и топлива в цилиндре двигателя.

В данных уравнениях средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива  $U_0$ , критерий Вебера  $W_e$ , критерий  $M$ , характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости выражены следующими зависимостями [61, 126]:

$$U_0 = \frac{V_{\text{ц}}}{\mu f_c i_c \rho_T \tau_{\text{впр}}}, \quad (2.11)$$

где  $U_0$  – средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива, м/с;

$V_{\text{ц}}$  – цикловая порция топлива, м<sup>3</sup>;

$\mu f_c$  – площадь эффективного проходного сечения распыливающих отверстий форсунки, м<sup>2</sup>;

$i_c$  – количество распыливающих отверстий, шт.;

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

$\tau_{\text{впр}}$  – продолжительность впрыскивания порции топлива, с.

$$W_e = \frac{U_0^2 \rho_T d_c}{\sigma_T}, \quad (2.12)$$

где  $W_e$  – критерий Вебера;

$U_0$  – средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива, м/с;

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

$d_c$  – диаметр распыливающего отверстия форсунки двигателя, м;

$\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м.

$$M = \frac{\mu_T^2}{d_c \rho_T \sigma_T}, \quad (2.13)$$

где  $M$  – критерий, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости;

$\mu_T$  – динамическая вязкость топлива, Па·с;

$d_c$  – диаметр распыливающего отверстия форсунки двигателя, м;

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

$\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м.

Влияние физико-химических характеристик топлива на процессы впрыска и распыливания на форсунках были описаны следующими зависимостями [75]:

$$I_T = A \rho_T^{-0,05} \sigma_T^{-0,65} \mu_T^{0,8}, \quad (2.14)$$

где  $A$  – интегральный коэффициент.

$$\tau_S = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{0,37} \sigma_T^{0,37} \mu_T^{-0,32}. \quad (2.15)$$

$$d_k = B \rho_T^{0,4587} \sigma_T^{0,1927} \mu_T^{0,1466}, \quad (2.16)$$

где  $B$  – интегральный коэффициент, включающий все неизменные величины для различных видов дизельного топлива.

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009 \cdot C \rho_T^{-0,75} \sigma_T^{-0,25} \mu_T^{-0,14}), \quad (2.17)$$

где  $C$  – обобщенный коэффициент.

В формулах (2.14 – 2.17) в место динамической вязкости топлива  $\mu_T$  возможно использовать кинематическую  $\nu_T$ , которая измерялась при проведении экспериментов с помощью вискозиметров. Связь кинематической вязкости с динамической отражается в формуле:

$$\nu_T = \frac{\mu_T}{\rho_T}, \quad (2.18)$$

где  $\nu_T$  – кинематическая вязкость топлива, м<sup>2</sup>/с.

Тогда зависимости (2.14)-(2.17) могут быть преобразованы следующим образом [126]:

$$I_T = A \rho_T^{0,75} \sigma_T^{-0,65} \nu_T^{0,8}. \quad (2.19)$$

$$\tau_S = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{1,17} \sigma_T^{0,37} \nu_T^{-0,32}. \quad (2.20)$$

$$d_k = B \rho_T^{0,6053} \sigma_T^{0,1927} \nu_T^{0,1466}. \quad (2.21)$$

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009 \cdot C \rho_T^{-0,89} \sigma_T^{-0,25} \nu_T^{-0,14}). \quad (2.22)$$

«В эти зависимости, описывающие процесс распыления топлива, можно ввести в качестве поправочных коэффициентов регрессионные уравнения с учетом

изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения дизельного топлива, полученные в ходе экспериментальных исследований, как непосредственно во время обработки СВЧ волнами, так и в период после нее» [126].

Введенные автором поправочные коэффициенты позволили уточнить расчет дальнотойности струи и угла конуса струи распыленного топлива на основе оценки влияния переднего фронта давления впрыска, плотности воздушного заряда и диаметра распыливающих отверстий.

## 2.2. Моделирование изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения дизельного топлива вследствие воздействия на него волн СВЧ диапазона

В результате проведенных исследований, методика которых изложена в Главе 3, и на основе использования статистической обработки результатов измерений [120] были получены регрессионные уравнения, описывающие процессы изменения значений коэффициента поверхностного натяжения, кинематической вязкости дизельного топлива от начальной температуры в интервалах 5...74 °С и в процессе остывания топлива после воздействия в течение от 2 ч до 24 ч с момента окончания воздействия, которые были опубликованы в научном журнале в статье [126].

Сведем эти уравнения, описывающие изменение кинематической вязкости от начальной температуры топлива (рис. 2.1), в таблицу 2.2.

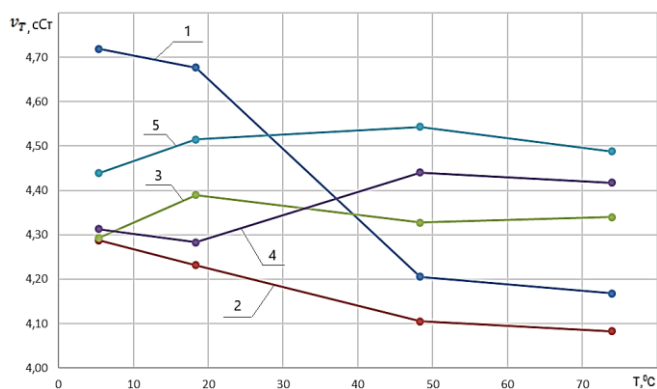


Рисунок 2.1 – Графики изменения кинематической вязкости от начальной температуры топлива в течение 24 ч после его обработки волнами СВЧ диапазона: 1 – до обработки; 2 – сразу после обработки; 3 – через 0,5 ч; 4 – через 1 ч; 5 – через 24 часа

Таблица 2.2. Регрессионные уравнения, описывающие изменение кинематической вязкости от начальной температуры топлива

Время до и после обработки топлива волнами СВЧ диапазона (t, ч)	Зависимость кинематической вязкости ( $\nu_T$ , сСт) от начальной температуры топлива (Т, 0С)	Коэффициент парной корреляции (R)	Критерий Фишера		Средняя ошибка аппроксимации (А, %)
			$F_{\text{выч}}$	$F_{\text{табл}}$ ( $\alpha=0,05$ )	
Исходная (0)	$\nu_T = 0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621$	0,9371	14,41	7,71	1,5
0,025 (после 90 с обработки)	$\nu_T = 4 \cdot 10^{-5}T^2 - 6,6 \cdot 10^{-3}T + 4,3272$	0,9934	150,01		0,3
0,5	$\nu_T = 4 \cdot 10^{-6}T^3 - 0,0005T^2 + 0,0175T + 4,2133$	0,9999	9998,5		0,6
1	$\nu_T = -4 \cdot 10^{-6}T^3 + 0,0005T^2 - 0,0116T + 4,3616$	0,9999	9998,5		5,0
24	$\nu_T = -7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128$	0,9679	29,66		12,5

Рассмотрим изменение кинематической вязкости от времени, прошедшего с момента обработки топлива волнами СВЧ диапазона, при начальной температуре топлива, установленной в диапазоне 5...74 °С (рис. 2.2) [126]. Опишем процессы изменения кинематической вязкости следующими уравнениями (табл. 2.3) [126].



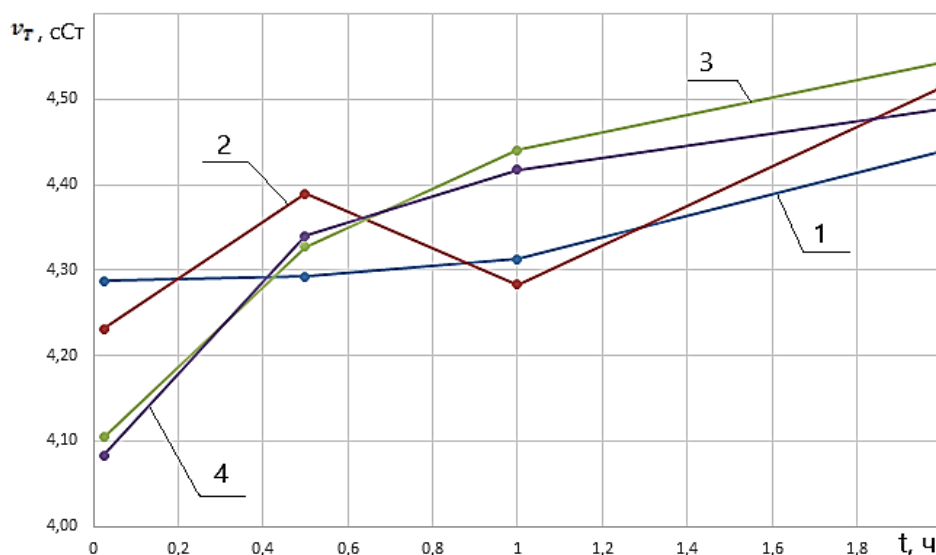


Рисунок 2.2 – Графики изменения кинематической вязкости от времени, прошедшего с момента обработки топлива волнами СВЧ диапазона, при различных начальных температурах топлива: 1 – 5,33<sup>0</sup>С; 2 – 18,33<sup>0</sup>С; 3 – 48,33<sup>0</sup>С; 4 – 74<sup>0</sup>С

Таблица 2.3. Регрессионные уравнения, описывающие изменение кинематической вязкости от времени с момента обработки топлива

Начальная температур а топлива (Т, °С)	Зависимость кинематической вязкости ( $v_T$ , сСт) от времени с момента обработки топлива (t, ч)	Коэффициент парной корреляции (R)	Критерий Фишера		Средняя ошибка аппроксимации (А,%)
			F <sub>выч</sub>	F <sub>табл</sub> (α=0,05)	
5,53	$v_T = 0,04881t^2 - 0,023t + 4,2892$	0,9990	998,5	7,71	0,1
18,33	$v_T = 0,0353t^2 + 0,0486t + 4,2657$	0,7027	1,95		неадекватно
48,33	$v_T = 0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888$	0,9999	9998,5		0,1
74	$v_T = 0,1725t^3 - 0,6595t^2 + 0,8421t + 4,0623$	0,9999	9998,5		0,05

«К сожалению, не удалось описать приемлемым уравнением регрессии изменение кинематической вязкости от времени для температуры 18,33 °С, вблизи которой достаточно длительный период времени эксплуатируются двигатели сельхозтехники. Вероятно, процессы, протекающие в топливе при его обработке при такой начальной температуре, имеют более сложную структуру, а,

следовательно, подчиняются более сложным зависимостям и требуют отдельного исследования» [126].

Проведем аналогичные действия с коэффициентом поверхностного натяжения, используя экспериментально полученные данные (рис. 2.3, табл. 2.4)[126].

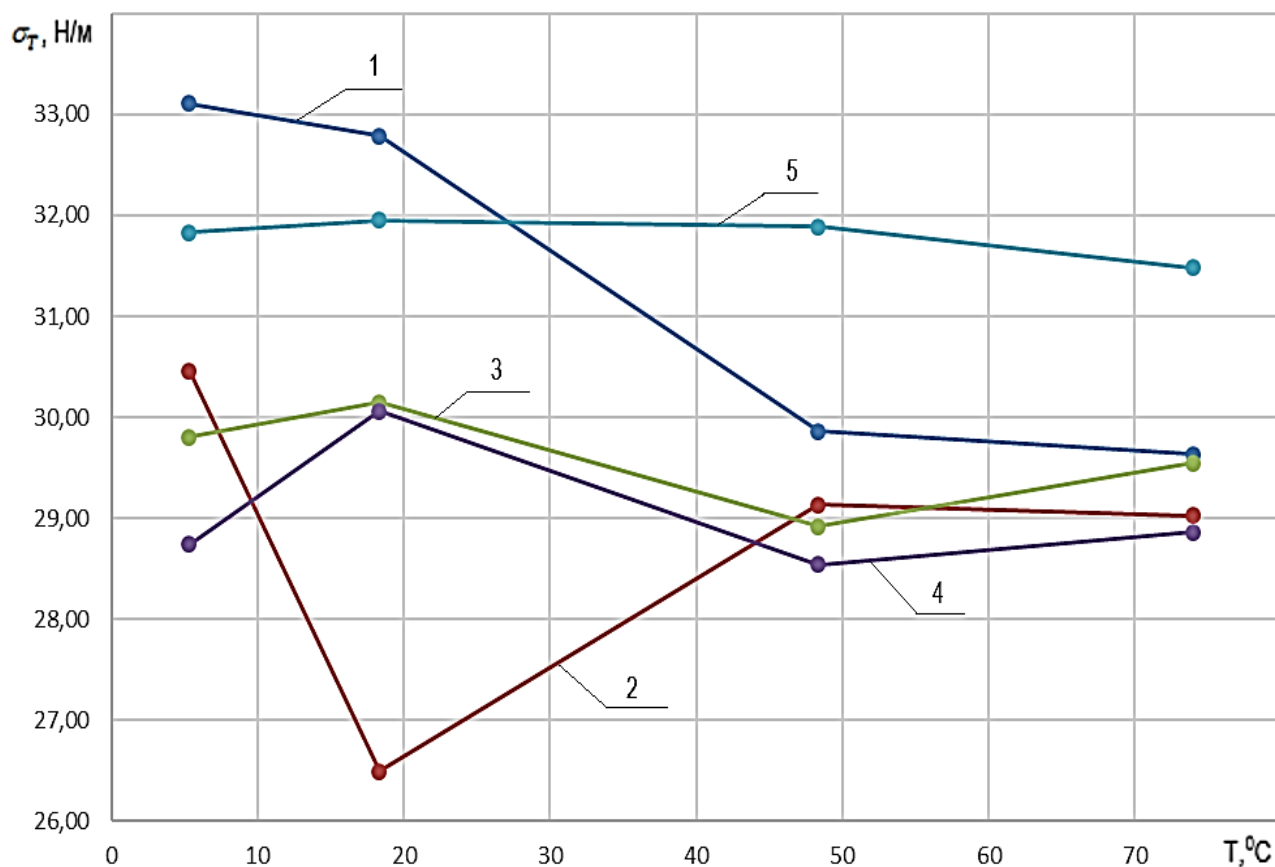


Рисунок 2.3 – Графики изменения коэффициента поверхностного натяжения от начальной температуры топлива в течение 24 ч после его обработки волнами СВЧ диапазона: 1 – до обработки; 2 – сразу после обработки; 3 – через 0,5 ч; 4 – через 1 ч; 5 – через 2 часа

Таблица 2.4. Регрессионные уравнения, описывающие изменение коэффициента поверхностного натяжения от начальной температуры топлива

Время до и после	Зависимость кинематической	Коэффициент парной	Критерий Фишера	Средняя ошибка
------------------	----------------------------	--------------------	-----------------	----------------

обработки топлива волнами СВЧ диапазона (t, ч)	вязкости ( $\sigma_T$ , Н/м) от начальной температуры топлива (Т, °С)	корреляции (R)	$F_{\text{выч}}$	$F_{\text{табл}}$ ( $\alpha=0,05$ )	
Исходная (0)	$\sigma_T = 0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004$	0,9417	15,67	7,71	5,8
0,025 (после 90 с обработки)	$\sigma_T = -0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731$	0,9999	9998,5		31,1
0,5	$\sigma_T = 4 \cdot 10^{-5}T^3 - 0,0044T^2 + 0,1131T + 29,321$	0,9999	9998,5		0,5
1	$\sigma_T = 7 \cdot 10^{-5}T^3 - 0,0084T^2 + 0,2695T + 27,534$	0,9999	9998,5		1,8
2	$\sigma_T = -0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764$	0,9999	9998,5		0,5

«Измерения непосредственно после обработки топлива СВЧ излучением показали, что регрессионное уравнение, хотя и описывает процесс, однако, имеет слишком высокую погрешность представления экспериментальных данных. Вероятно, это связано с различной инерционностью происходящих в топливе процессов воздействия СВЧ излучения на молекулы, находящиеся в различном температурном диапазоне» [126].

Рассмотрим изменения коэффициента поверхностного натяжения от времени, прошедшего с момента обработки топлива волнами СВЧ диапазона, при различных начальных температурах (рис. 2.4) и сведем регрессионные уравнения в таблицу (табл. 2.5)[126].

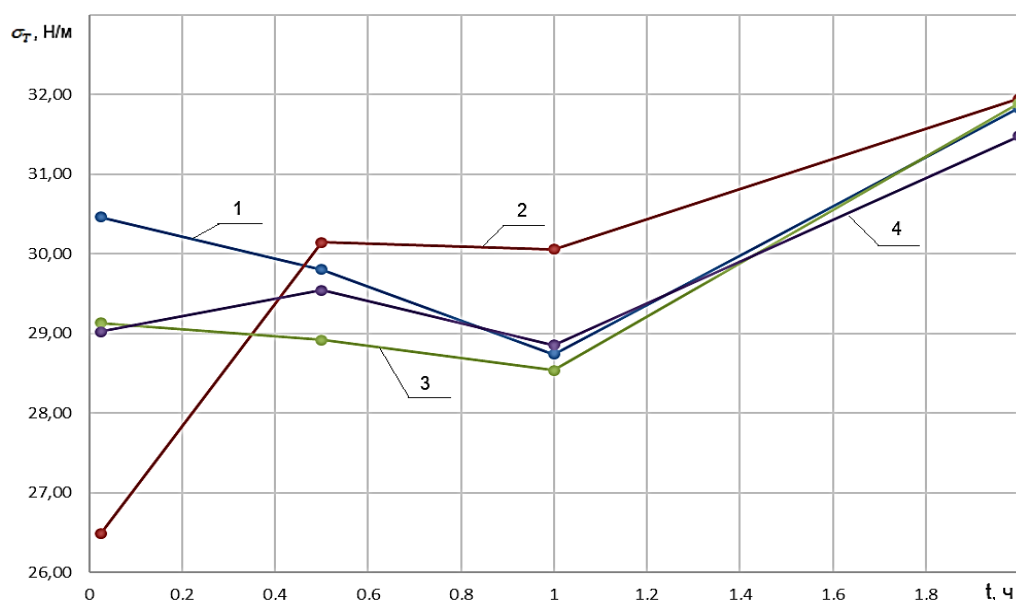


Рисунок 2.4 – Графики изменения коэффициента поверхностного натяжения от времени, прошедшего с момента обработки топлива волнами СВЧ диапазона, при различных начальных температурах топлива: 1 – 5,33<sup>0</sup>С; 2 – 18,33<sup>0</sup>С; 3 – 48,33<sup>0</sup>С; 4 – 74<sup>0</sup>С

Таблица 2.5. Регрессионные уравнения, описывающие изменение коэффициента поверхностного натяжения от времени с момента обработки топлива

Начальная температура топлива (Т, °С)	Зависимость кинематической вязкости (σ <sub>T</sub> , Н/м) от времени с момента обработки топлива (t, ч)	Коэффициент парной корреляции (R)	Критерий Фишера		Средняя ошибка аппроксимации (А, %)
			F <sub>выч</sub>	F <sub>табл</sub> (α=0,05)	
5,53	$\sigma_T = 2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732$	0,9316	13,14	7,71	1,0
18,33	$\sigma_T = 30,711t^{0,0402}$	0,9635	25,91		1,4
48,33	$\sigma_T = 1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317$	0,9745	29,62		0,7
74	$\sigma_T = 1,0781t^2 - 1,0816t + 29,267$	0,8811	6,94		неадекватно

Вероятно, при высокой начальной температуре вклад от нагревания топлива оказывает существенное влияние на коэффициент поверхностного натяжения, следовательно, необходимо искать решение в виде многокритериального уравнения регрессии[126].

«С точки зрения практики интерес представляют зависимости, связывающие параметры до воздействия, непосредственно после обработки СВЧ волнами и спустя некоторое время, по истечении которого вызванные воздействием процессы в топливе в основном завершаются» [126].

Опишем уравнения до воздействия СВЧ излучения[126]:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} (0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{-0,65} (0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{0,8} = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{0,8}}{(0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{0,65}}; \quad (2.23)$$

$$\tau_s = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{1,17} \frac{(0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{0,37}}{(0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{0,32}}; \quad (2.24)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053} (0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{0,1927} (0,0001T^2 - -0,0172T + 4,8621)^{0,1466}; \quad (2.25)$$

$$\gamma_T = 2 \arctan(0,009C\rho_T^{-0,89} (0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{-0,25} (0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{-0,14}). \quad (2.26)$$

«Далее введем полученные регрессионные уравнения непосредственно после СВЧ воздействия в имеющиеся теоретические зависимости» [126]:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,8}}{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,65}}; \quad (2.27)$$

$$\tau_s = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{1,17} \frac{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,37}}{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,32}} = \sqrt{2} A^2 D_S \rho_T^{2,67} \frac{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{1,28}}{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,93}}; \quad (2.28)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053} (-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,1927} (0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,1466}; \quad (2.29)$$

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009C\rho_T^{-0,89}(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{-0,25}(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{-0,14}. \quad (2.30)$$

«Как показали измерения, основные процессы завершаются в течение от 2 ч до 24 ч с момента прекращения СВЧ воздействия. С учетом этого получим следующие зависимости» [126]:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,8}}{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,65}}; \quad (2.31)$$

$$\tau_S = \sqrt{2}A^2D_S\rho_T^{2,67} \frac{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{1,28}}{(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,93}}; \quad (2.32)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053}(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,1927}(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,1466}; \quad (2.33)$$

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009C\rho_T^{-0,89}(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{-0,25}(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{-0,14}. \quad (2.34)$$

«Таким образом, получены зависимости, связывающие характеристики, описывающие распыление топлива в камере сгорания, с начальной температурой необработанного топлива, топлива непосредственно после обработки СВЧ волнами и после завершения в нем процессов взаимного перемещения слоев и межмолекулярного перемешивания» [126].

Введем регрессионные зависимости для кинематической вязкости  $\nu_T$  (табл.2.3) и коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_T$  (табл.2.5) в уравнения (2.20)-(2.23) для параметров  $I_T$ ,  $\tau_S$ ,  $d_k$  и  $\gamma_T$  в зависимости от времени, прошедшего с момента воздействия волн СВЧ диапазона на топливо, при исходной температуре в диапазоне 5...74 °С [126].

«Уточним уравнения для  $I_T$ ,  $\tau_S$ ,  $d_k$  и  $\gamma_T$  для значений температур, которые адекватно описываются регрессионными уравнениями, в частности» [126]:

- для температуры 5,33 °С

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{0,8}}{(2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{0,65}}; \quad (2.35)$$

$$\tau_S = \sqrt{2}A^2 D_S \rho_T^{2.67} \frac{(2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{1,28}}{(0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{0,93}}; \quad (2.36)$$

$$d_k = B \rho_T^{0.6053} (2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{0,1927} (0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{0,1466}; \quad (2.37)$$

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009C \rho_T^{-0.89} (2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{-0,25} (0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{-0,14}). \quad (2.38)$$

- для температуры 48,33 °С

$$I_T = A \rho_T^{0,75} \frac{(0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{0,8}}{(1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{0,65}}; \quad (2.39)$$

$$\tau_S = \sqrt{2}A^2 D_S \rho_T^{2.67} \frac{(1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{1,28}}{(0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{0,93}}; \quad (2.40)$$

$$d_k = B \rho_T^{0.6053} (1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{0,1927} (0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{0,1466}; \quad (2.41)$$

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009C \rho_T^{-0.89} (1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{-0,25} (0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{-0,14}). \quad (2.42)$$

«Таким образом, получены зависимости для двух температур, позволяющие оценить изменение характеристик, описывающих распыление топлива в камере сгорания, от времени, прошедшего с момента обработки топлива волнами СВЧ диапазона до момента завершения основных процессов, вызванных этим воздействием» [126].

Полученные модели процессов впрыска топлива с использованием регрессионных уравнений позволяют выявить зависимость пути  $I_T$ , проходимого топливной струей от распылителя форсунки до границы между начальным и основным участками развития струи, времени  $\tau_S$  достижения топливной струей стенки камеры сгорания, среднего диаметра капель  $d_k$  и угла  $\gamma_T$  раскрытия топливной струи на основном участке от исходной температурой топлива и времени, прошедшего с момента обработки до завершения в нем процессов перемешивания на молекулярном и межмолекулярном уровнях [61, 75, 126].

Наиболее интересными с точки зрения практики являются уравнения,

описывающие распыление топлива при низких температурах, когда СВЧ воздействие на топливо выполняет разогревающий эффект. При этом эффект разогрева – помимо воздействия волн СВЧ на молекулярном уровне – может меняться при изменении мощности источника СВЧ излучения в зависимости от объема, проходящего через зону обработки топлива. И этот эффект также может быть учтен в формулах регрессионных уравнений.

К сожалению, не все уравнения описывают температурные и временные процессы адекватно (проверка проведена по критерию Фишера), что связано с наличием более сложной связи кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения топлива в зависимости от температуры и времени воздействия. Вероятно, СВЧ излучение вызывает изменения на молекулярном уровне топлива в этих диапазонах, что оказывает существенное влияние на оцениваемые параметры.

Дополнительную информацию можно получить для параметров впрыска топлива через 0,5 ч после окончания СВЧ воздействия, что характерно для случая сравнительно кратковременного отключения подачи топлива в двигатель, когда прекращается воздействие СВЧ излучения:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,000004T^3 + 0,0005T^2 - 0,0116T + 4,3616)^{0,8}}{(0,00004T^3 - 0,0044T^2 + 0,1131T + 29,321)^{0,65}}; \quad (2.43)$$

$$\tau_S = \sqrt{2}A^2 D_S \rho_T^{2,67} \frac{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{1,28}}{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,93}}; \quad (2.44)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053} (-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,1927} (0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,1466}; \quad (2.45)$$

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009C\rho_T^{-0,89} (-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{-0,25} (0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{-0,14}). \quad (2.46)$$

Кроме того, интересен случай оценки характеристик впрыска топлива после того, как все процессы, вызванные обработкой СВЧ волнами, в нем в целом завершаются:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,8}}{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,65}}. \quad (2.47)$$



$$\tau_S = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{1,17} \frac{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,37}}{(-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,32}}. \quad (2.48)$$

$$d_k = B \rho_T^{0,6053} (-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,1927} (-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,1466}. \quad (2.49)$$

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009 \cdot C \rho_T^{-0,89} (-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{-0,25} (-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{-0,14}). \quad (2.50)$$

Кроме того, в работе [159] была показана зависимость между скоростью впрыска жидкости и размерами капель. При этом было использовано понятие критического размера капли, который является максимально возможным стабильным размером и определяется равновесием разрушающих гидродинамических сил и противодействующих этому разрушению капиллярных сил. В этом случае критический радиус шаровидной капли с учетом того, что капля в турбулентном потоке не разрушается до момента, когда растягивающие ее внешние силы становятся близкими к силе поверхностного натяжения жидкости [161], может быть представлен выражением:

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{We_{cr} \sigma_T}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} \right)^{3/5}, \quad (2.51)$$

где  $r_{cr}$  – критический радиус шаровидной капли, м;

$\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м;

$We_{cr}$  – критический критерий Вебера ( $We_{cr} = 6 \cdot Oh$ , где  $Oh$  – число Онезорге);

$\varepsilon$  – коэффициент диссипации;

$\rho_g$  – плотность газа, окружающего каплю, кг/м<sup>3</sup>.

При этом для числа Онезорге известна формула [131]:

$$Oh = \frac{\nu_T \rho_T}{\sqrt{\rho_T \sigma_T D_T}}, \quad (2.52)$$

где  $Oh$  – число Онезорге;

$\nu_T$  – кинематическая вязкость топлива, м<sup>2</sup>/с;

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

$D_T$  – толщина слоя топлива на границе с газовой средой, м.

Выполним преобразования и получим критический критерий Вебера:

$$We_{cr} = 6v_T \sqrt{\frac{\rho_T}{\sigma_T D_T}}. \quad (2.53)$$

Тогда критический радиус капли может быть выражен следующим образом:

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{6v_T \sqrt{\frac{\rho_T}{\sigma_T D_T}} \sigma_T}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} \right)^{3/5} = \frac{1}{2} \left( \frac{6 \sqrt{\frac{\rho_T}{D_T}}}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} v_T \sqrt{\sigma_T} \right)^{3/5}. \quad (2.54)$$

Подставим полученные регрессионные уравнения из таблиц 2.2-2.4 в полученное уравнение для определения критического размера капли при различной исходной температуре топлива и времени с момента воздействия:

- исходное состояние (до обработки СВЧ излучением)

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{6 \sqrt{\frac{\rho_T}{D_T}}}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} (0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621) \sqrt{0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004} \right)^{3/5} \quad (2.55)$$

- непосредственно после воздействия СВЧ излучения

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{6 \sqrt{\frac{\rho_T}{D_T}}}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} (4 \cdot 10^{-5}T^2 - 6,6 \cdot 10^{-3}T + 4,3272) \sqrt{-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731} \right)^{3/5} \quad (2.56)$$

- после завершения основных процессов, связанных с СВЧ воздействием

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{6 \sqrt{\frac{\rho_T}{D_T}}}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} (-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,063T + 4,4128) \sqrt{-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,714} \right)^{3/5} \quad (2.57)$$

- для исходной температуры топлива 5,33 °С

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{6 \sqrt{\frac{\rho T}{D T}}}{\varepsilon^3 \rho_g} (0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892) \sqrt{2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732} \right)^{3/5} \quad (2.58)$$

- для исходной температуры топлива 48,33 °С

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{6 \sqrt{\frac{\rho T}{D T}}}{\varepsilon^3 \rho_g} (0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888) \sqrt{1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317} \right)^{3/5} \quad (2.59)$$

В качестве примера оценим, насколько изменяется критический радиус капли топлива при обработке его волнами СВЧ диапазона, для чего разделим уравнение (2.56) на (2.55):

$$\frac{r_{cr}^{СВЧ}}{r_{cr}^{исх.}} = \left( \frac{(4 \cdot 10^{-5} T^2 - 6,6 \cdot 10^{-3} T + 4,3272) \sqrt{-0,0002 T^3 + 0,0205 T^2 - 0,7183 T + 33,731}}{(0,0001 T^2 - 0,0172 T + 4,8621) \sqrt{0,00007 T^2 - 0,1101 T + 34,004}} \right)^{3/5}$$

Рассчитаем это отношение для температурного диапазона, в котором проводились исследования и представим полученные данные в виде рисунка 2.5. Хорошо видно, что обработка топлива волнами СВЧ диапазона приводит к уменьшению соотношения, причем как для низких, так и для высоких температур, что благотворно влияет на процесс первичного нагревания, испарения и последующего сгорания капель в камере сгорания двигателя [3, 23, 129, 133]. Некоторое снижение эффективности обработки топлива волнами СВЧ диапазона можно наблюдать в диапазоне температур 30...55 °С, но и в нем это соотношение не превышает уровень 0,93 (93% от исходного размера). В связи с этим можно констатировать, что обработка топлива волнами СВЧ диапазона позволит улучшить процессы горения за счет предварительного подогрева топлива с последующим образованием более мелких капель.

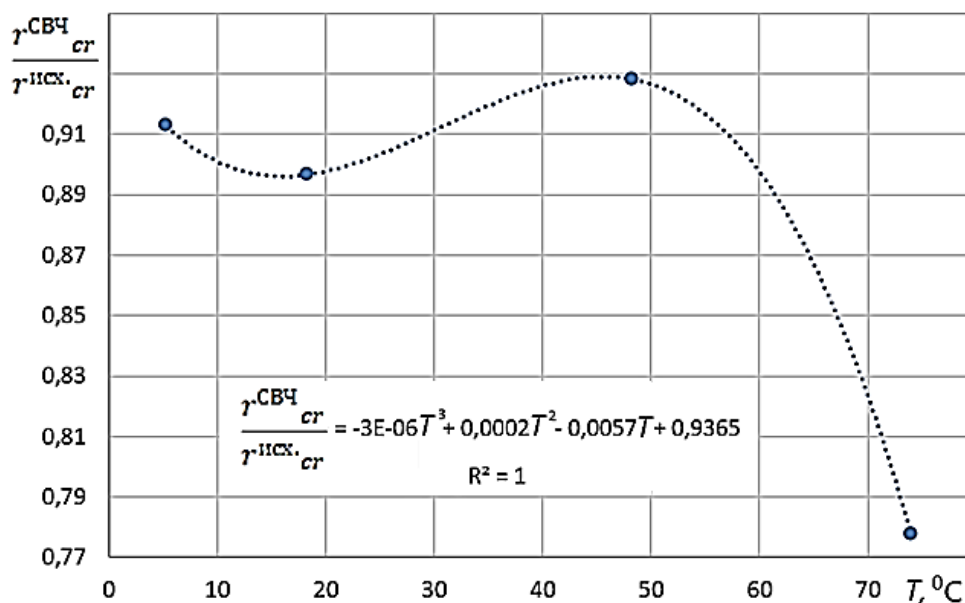


Рисунок 2.5 – Линия тренда, построенная для соотношения критических радиусов капель до ( $r^{исх}_{cr}$ ) и после ( $r^{CBЧ}_{cr}$ ) обработки топлива волнами СВЧ диапазона

Полученные данные подтверждаются результатами экспериментальных исследований, опубликованными другими авторами (рис. 2.6) [87].

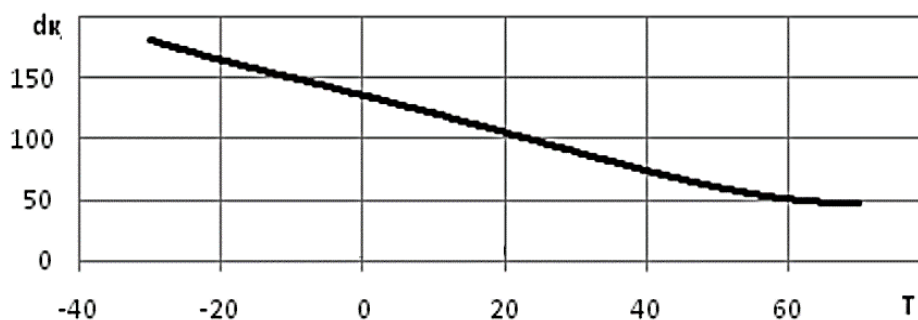


Рисунок 2.6 – Зависимость среднего диаметра  $d_k$  (мкм) капель топлива от его температуры T (°C)

### 2.3 Выводы по второй главе

1. В известные уравнения, описывающие характеристики впрыска топлива в камеру сгорания дизеля, введены поправочные коэффициенты в виде регрессионных уравнений, учитывающих начальную температуру топлива и время, прошедшее с момента его обработки СВЧ излучением. Это позволяет в достаточно

широких диапазонах прогнозировать – на основе оценки изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения топлива – смесеобразование в камере сгорания дизельного двигателя как на этапе его первичного пуска, так и его запуска после кратковременной остановки.

2. Введение регрессионных уравнений в уравнение, позволяющее оценить изменение размера капли на описанных выше этапах СВЧ воздействия или после его завершения, учитывающее изменение температуры топлива вследствие погодных условий, имеет существенное теоретическое значение. Это связано с тем, что в полученных ранее теоретических зависимостях не были учтены факторы температуры топлива, влияющие на каплеобразование и их сгорание, чему уделяется большое внимание при проектировании топливоподающей аппаратуры и камеры сгорания двигателей [18, 62, 101].

## ГЛАВА 3. ОБЩАЯ И ЧАСТНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1. Общая методика и программа исследования

К исследуемым характеристикам дизельного топлива были отнесены следующие.

1. Кинематическая вязкость, которая является удельным коэффициентом внутреннего трения, регламентируется соответствующим стандартом [26]: для летнего (Л) и межсезонного (Е) – 3,0-6,0 сСт; для зимнего (З) – 1,8-5,0 сСт; для арктического (А) – 1,5-4,0 сСт. Физический смысл состоит в способности соседних слоев топлива противодействовать перемещению одного слоя относительно другого. Если кинематическая вязкость превышает установленные стандартом показатели, то ухудшается эффективность распыления форсунок за счет образования больших по размерам капель топлива. В результате увеличивается продолжительность горения и ухудшается полнота сгорания топлива, что приводит к повышенному закоксованию форсунок и деталей цилиндропоршневой группы.

2. Коэффициент поверхностного натяжения, который является мерой внутренней энергии [141, 176], может быть интерпретирован как энергия в джоулях, необходимая для разрыва единицы поверхности жидкости. Следовательно, чем больше значение коэффициента поверхностного натяжения, тем больше энергии находится в капле топлива, которая в дальнейшем попадает в камеру сгорания дизельного двигателя, а, значит, тем на большее расстояние разлетятся ее молекулы при разрыве капли, что позволит улучшить перемешивание топлива с воздушным зарядом и сформировать более качественную топливовоздушную смесь [162].

3. Характеристикой воспламеняемости дизельного топлива является его цетановое число и оценивается временем от впрыска топлива в цилиндр до начала его горения, при этом чем выше цетановое число, тем меньше задержка воспламенения топлива и тем более «спокойно» и «плавно» горит топливная смесь [26]. Обычно дизельное топливо имеет цетановое число в пределах 40...55 единиц,

а топливом с «хорошими» характеристиками считается топливо с цетановым числом 45 единиц, при этом в стандарте Евро-5 принято еще большее значение – 48 единиц.

Кроме того, при проведении эксперимента происходил контроль температуры дизельного топлива, которая играет важную роль на вышеуказанные показатели топлива (повышение температуры приводит к понижению их значений) [40].

Программа исследований включала следующие пункты:

1. Заполнить 4 одинаковые емкости, вмещающие 200 миллилитров жидкости, 50 мл дизельного топлива ГОСТ 305-2013.

2. Первую емкость вместе с топливом охладить до 4-5 °С; вторую использовать при температуре  $18 \pm 2$  °С; третью предварительно нагреть до 50 °С; топливо в четвертой емкости довести до кипения на водяной бане.

3. Провести измерения коэффициента поверхностного натяжения и кинематической вязкости топлива, размещенного в ёмкостях (измерения производятся сразу после доведения температуры до указанных значений).

4. Выставить мощность микроволнового излучателя 350 Вт и осуществить воздействие в течение 90 с на размещенную в зоне излучения емкость. Извлечь емкость и провести измерение коэффициента поверхностного натяжения и кинематической вязкости сразу после истечения 90 с.

5. Провести измерения коэффициента поверхностного натяжения и кинематической вязкости топлива в трех оставшихся емкостях сразу после воздействия СВЧ излучения в течение 90 с.

6. Провести замеры коэффициента поверхностного натяжения и кинематической вязкости топлива, размещенного во всех четырех емкостях, по истечении 0,5 ч, 1 ч и 24 ч.

При проведении лабораторных экспериментов использовалось следующее оборудование: микроволновая печь LG ms-2021 с для СВЧ воздействия на дизельное топливо ,ртутный термометр ТЛ-2 № 1 для измерения температуры дизельного топлива, вискозиметр капиллярный ВПЖ-2 с диаметром капиллярной

трубки 0,56 мм для определения кинематической вязкости, аналитические весы ВЛ-124 и бюретка для измерения коэффициента поверхностного натяжения, весы DEKODKKS 05 для определения массы топлива, стенд испытания и регулировки форсунок М-106 ООО «Бонус», октанометр ПЭ 7300 для определения цетанового числа топлива, трубки индикаторные для газового анализа Dräger со шприцом на 160 мл в качестве прокачивающего устройства, портативный дымомер МЕТА-01МП, лабораторный стенд «Действующий двигатель Д-243» для измерения экологических характеристик выхлопных газов и топливной экономичности.

### **3.2. Методика исследования физико-химических характеристик топлива**

Для измерения кинематической вязкости топлива применялся вискозиметр ВПЖ-2 (рис. 3.1), который предназначен для определения кинематической вязкости прозрачных жидкостей при положительных температурах. Вискозиметры этого типа являются одними из наиболее точных, поскольку конструкция предусматривает образование так называемого «висячего уровня» при истечении жидкости. В результате реализации такой конструкции время течения жидкости не зависит ни от гидростатического давления, ни от количества жидкости, находящейся внутри вискозиметра.



Рисунок 3.1 – Вискозиметры ВПЖ-2

Измерение вязкости жидкости основано на определении времени ее истечения из измерительного резервуара через капилляр диаметром 0,56 мм.



Диапазон измерений вязкости от 2...10 мм<sup>2</sup>/с, номинальное значение постоянной К=0,01 мм<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Методика проведения измерения основана на том, что на отводную трубку стеклянного корпуса надевают резиновую трубку. После чего, зажав колено, стеклянную трубку вискозиметра переворачивают и погружают это колено в резервуар с жидкостью, в которой не должно быть пузырьков. Далее, жидкость засасывают до соответствующей отметки на корпусе прибора, отслеживая, чтобы пузырьки также не появились в течение этой процедуры.

Для определения кинематической вязкости использовалась формула:

$$v_T = \frac{g}{9,807} TK, \quad (3.1)$$

где  $v_T$  – кинематическая вязкость дизельного топлива, м<sup>2</sup>/с;

$K$  – постоянная вискозиметра ВПЖ-2, мм<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;

$T$  – время истечения топлива, с;

$g$  – ускорение свободного падения в городе Рязань ( $g = 9,8145$  Н/кг).

Полученные данные измерений кинематической вязкости дизельного топлива в последующем пересчитывались в динамическую вязкость по формуле (2.18).

Бюретка с аналитическими весами ВЛ-124 (рис. 3.2) использовались для вычисления значений коэффициента поверхностного натяжения дизельного топлива, в основе проведения эксперимента лежит сталагмометрический метод.

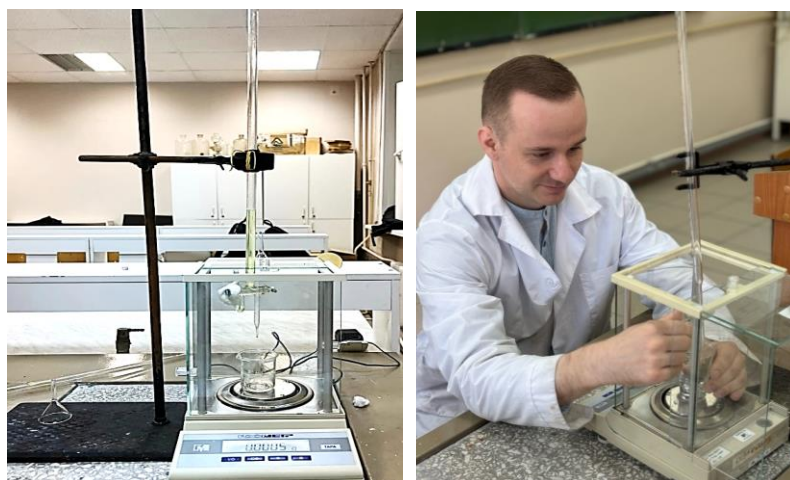


Рисунок 3.2 – Бюретка и аналитические весы для определения коэффициента поверхностного натяжения и процесс измерения

В основе сталагмометрического метода нахождения коэффициента поверхностного натяжения лежит измерение веса  $P$  каплей, находящихся в равновесии при вытекании жидкости из бюретки с радиусом на конце капилляра  $r$ . При этом капля жидкости отрывается от трубки в момент, когда ее объем достигает максимального значения, зависящего от характеристик раствора – в этот момент масса каплей находится в состоянии равновесия с поверхностным натяжением:

$$\sigma = \frac{P}{2\pi r}, \quad (3.2)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

$P$  – вес капли, находящейся в равновесии, Н;

$\pi$  – математическая постоянная ( $\pi = 3,1416$ );

$r$  – радиус капилляра, м.

Кроме того, можно воспользоваться альтернативной методикой для исследования коэффициента поверхностного натяжения:

$$mg = 2\pi r\sigma, \quad (3.3)$$

где  $m$  – масса капли, кг;

$g$  – ускорение свободного падения в городе Рязань ( $g = 9,8145$  Н/кг);

$\pi$  – математическая постоянная ( $\pi = 3,1416$ );

$r$  – радиус капилляра, м;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Так как поверхностное натяжение напрямую зависит от массы капли, то возможно составить пропорцию для сравнения анализируемой жидкости с образцом с известным значением коэффициента поверхностного натяжения [108]:

$$\frac{m_1}{\sigma_1} = \frac{m_2}{\sigma_2}, \quad (3.4)$$

где  $m_1$  – масса капли известного образца, кг;

$\sigma_1$  – коэффициент поверхностного известного образца, Н/м;

$m_2$  – масса капли исследуемой жидкости, кг;

$\sigma_2$  – коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости, Н/м.

К погрешности данного метода относится испарение летучих жидкостей с поверхности образующихся капель, а также возможность передачи стенкам

капиллярной трубки части запасенной энергии (на молекулярном уровне), полученной жидкостью, например, при ультразвуковом или СВЧ воздействии.

Для измерения температуры топлива в исходном состоянии и в процессе его обработки применялся лабораторный термометр с наполнителем ртуть, предназначенный для измерения температуры в лабораториях, промышленности и АПК (рис. 3.3).

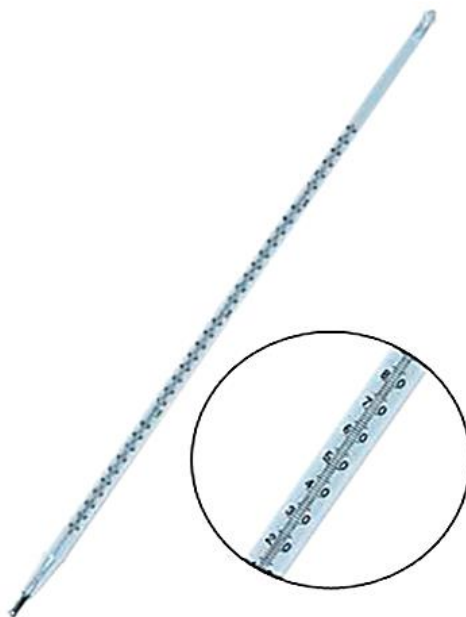


Рисунок 3.3 – Термометр для измерения температуры топлива

Стекланный термометр полного погружения с вложенной шкальной пластиной изготавливается по ТУ 25-2021.003-88 и имеет «Свидетельство об утверждении типа средств измерений». В верхней части термометра для предотвращения разрушений при перегреве имеется запасной резервуар на 20 °С. Термометр имеет диапазон измерений -30...+70 °С с ценой деления шкалы 1 °С.

Для исследования физико-химических показателей дизельного топлива применялась микроволновая печь LG ms-2021 с со следующими характеристиками:

- источник питания 230 В переменного тока, 50 Гц;
- выходная мощность (по стандарту IEC60705) 700 Вт;
- частота микроволн 2,450 МГц;
- потребляемая мощность 1,000 Вт.

Конструкция магнетрона микроволновой печи является стандартной и содержит следующие элементы (рис. 3.4) [140].

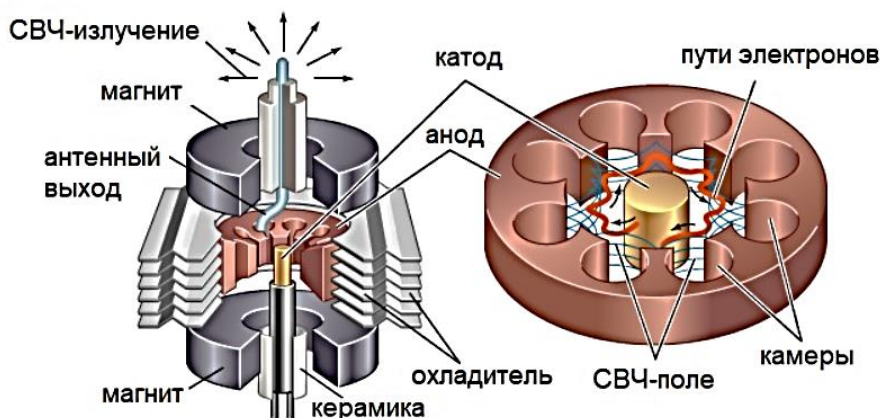


Рисунок 3.4 – Конструкция магнетрона микроволновой печи

Основными оцениваемыми параметрами магнетронов для микроволновых печей являются:

- рабочая частота  $f$  ( $2450 \pm 5$  МГц);
- выходная мощность  $W$  (500-1000 кВт);
- коэффициент полезного действия  $\eta$  (50-85%);
- рабочие токи  $I$  (анодный ток составляет 250-300 мА) и рабочие напряжения  $U$  (определяются по номограмме, приведенной на рис. 3.5).

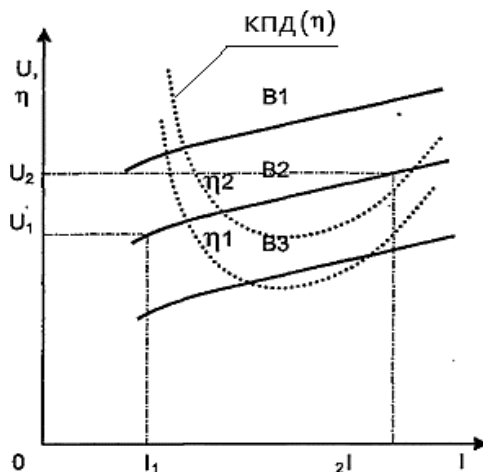


Рисунок 3.5 – Номограмма определения рабочих токов и напряжений магнетрона

### 3.3. Методика оценки площади распыла форсунки и цетанового числа дизельного топлива

Эксперименты по оценке площади распыла форсунки при впрыске проводились с использованием стенда испытания и регулировки форсунок М-106 ООО «Бонус» (рис. 3.6). Форсунка стенда была развернута и установлена перпендикулярно листу миллиметровой бумаги, впрыск топлива форсункой производился при 22 МПа (рис. 3.7). Площадь поверхности распыла определялась для необработанного и обработанного топлива волнами СВЧ диапазона сразу после впрыска (0 с) и в течение 20 с, 40 с, 60 с, 80 с после распыла с помощью программы «Компас 3Д». При проведении экспериментов исходили из того, что площадь распыла топлива прямо пропорциональна углу распыла.



Рисунок 3.6 – Стенд испытания и регулировки форсунок М-106 ООО «Бонус»





Рисунок 3.7 – Определение площади поверхности распыла форсункой

Измерение цетанового числа дизельного топлива, как показателя воспламенения, основано на определении его диэлектрической проницаемости – с использованием измерителя октанового числа «Октанометр ПЭ 7300» (рис. 3.8).



Рисунок 3.8–Октанометр ПЭ-7300 и процесс измерения цетанового числа

Метод определения цетанового числа с помощью октанометра основан на сравнении аттестованных образцов топлив, которые находятся в памяти прибора, содержащего поправки на температуру, и контролируемого дизельного топлива. Помимо отображения информации на экране прибора, поставляемое с октанометром программное обеспечение позволяет выводить через USB порт получаемые данные на персональный компьютер. Результаты измерений могут быть экспортированы в форматах MS Word и MS Excel для последующей обработки и анализа. Основные технические характеристики установки октанометра ПЭ 7300 приведены в Приложении А.

Все эксперименты проводились трижды, после чего результаты замеров статистически обрабатывались с помощью MS Excel.

### 3.4 Методика оценки экологических показателей дизеля

Трубки индикаторные (рис. 3.9) для газового анализа Dräger со шприцом на 160 мл в качестве прокачивающего устройства (рис. 3.10) использовались для определения углеводородов (в пересчете на гексан  $C_6H_{14}$ ), монооксида углерода CO, диоксида азота  $NO_2$ , диоксида серы  $SO_2$ , бензола  $C_6H_6$ , формальдегида  $C_6H_2O$ , паров воды  $H_2O$ . Числа в названии индикаторных трубок показывают максимальную концентрацию газов, которую с их помощью можно определить.



Рисунок 3.9 – Пробоотборный шприц и индикаторные трубки



Рисунок 3.10 – Трубки индикаторные Dräger

Согласно методике измерений с применением индикаторных трубок, для газового анализа Dräger совместно с ручным пробоотборным устройством, концентрацию определяют с помощью комплекта линейно-колористических индикаторных трубок с непосредственным отсчетом показаний по их шкале [127]. Метод измерения концентраций вредных веществ индикаторными трубками установлен ГОСТ 12.1.014-84, сущность которого состоит в том, что в результате реакции химического реагента, находящегося в трубке, с прокачиваемой через нее газовой смесью, изменяется цвет трубки. Шкала прореагировавшего слоя, который изменил свой цвет, указывает массовую концентрацию исследуемого вещества (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Процедура определения содержания выхлопных газов



Подготовку аппаратуры к измерению концентраций вредных веществ проводят в соответствии с нормативной документацией на индикаторные трубки. Перед проведением измерений индикаторными трубками проводится одноразовая качественная оценка для подбора шкалы по определению концентрации на трубочке и объема образца выхлопного газа, который проходит через слой реактива. К воздухозаборному устройству присоединяют индикаторную трубку, предназначенную для измерения концентрации вещества. Измерение следует начинать не позднее 1 мин после разгерметизации трубок, после измерения обломленные концы защищают от окружающей среды. При размытости границы раздела окрасок слоев исходного и прореагировавшего индикаторного порошка отсчет концентрации измеряемого вредного вещества по шкале проводят по нижней и верхней частям границы. За результат измерения принимают среднее значение.

Прибор МЕТА-01 МП используется для измерения дымности выхлопных газов мобильных и стационарных транспортных средств (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Дымомер МЕТА-01 МП

Основные технические характеристики дымомера МЕТА - 01 МП, в соответствии с руководством по эксплуатации [41, 108], приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики дымомера МЕТА - 01

## МП

Название характеристики	Значение
Тип прибора	портативный
Диапазон измерения дымности в единицах коэффициента поглощения К по ГОСТ Р 52160-2003, не менее ( $m^{-1}$ )	0... $\infty$
Диапазон измерения дымности в единицах коэффициента ослабления N по ГОСТ Р 41.24-2003, (%)	0...100
Предел допускаемой абсолютной погрешности при коэффициенте поглощения 1,6-1,8 $m^{-1}$ не более ( $m^{-1}$ )	$\pm 0,05$
Номинальная цена единицы наименьшего разряда для коэффициента поглощения ( $m^{-1}$ )	0,01
Номинальная цена единицы наименьшего разряда для коэффициента ослабления (%)	0,1
Фотометрическая база (м)	0,43
Оптическая пара согласована в видимой области спектра, $\lambda_{max}$ (нм)	560
Время одного измерения, не более (с)	5
Автоматическая коррекция показаний дымности по температуре отработавших газов	есть
Автоматическая коррекция нуля	есть

В соответствии с назначением [41], данный прибор применяется для экспрессного определения дымности выхлопных газов транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия. Результаты измерений выводятся на экран прибора МЕТА-01 МП и представлены в единицах натурального показателя ослабления светового потока К и в единицах коэффициента ослабления N по ГОСТ Р 52160-2003 и ГОСТ Р 41.24-2003 [41]. Измерение дымности дизельных двигателей возможно проводить в режиме свободного ускорения с регистрацией пиковых значений К и N, чем меньше данные значения, тем меньше содержание сажи и мелкодисперсных частиц в отработанных газах [41, 108].

### 3.5 Методика оценки расхода топлива дизелем

Для экспериментальной проверки топливной экономичности дизельного топлива до и после воздействия на топливо волнами СВЧ диапазона использовался лабораторный стенд «Действующий двигатель Д-243» (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Внешний вид лабораторного стенда  
«Действующий двигатель Д-243»

Лабораторный стенд двигателя Д-243 представлен в виде напольной стальной рамной конструкции с использованием стандартной компонентной базы поршневых ДВС семейства Д-243 с серийной топливной аппаратурой, устанавливаемой на трактора семейства МТЗ.

Стенд состоит из следующих компонентов и систем:

- двигатель Д-243, установленный с помощью вибропоглощающих подушек на стальной раме;
- приборная панель с возможностью включения стартера;
- топливная система двигателя;

- автомобильный аккумулятор;
- глушитель двигателя;
- система охлаждения двигателя.

Технические характеристики дизельного двигателя Д-243 приведены в таблице 3.2 [115].

Таблица 3.2 – Технические характеристики дизельного двигателя Д-243

Показатель	Значение
Расположение и число цилиндров	4L
Рабочий объем, л	4,75
Диаметр цилиндра и ход поршня, мм	110 / 125
Степень сжатия	16
Удельный расход топлива, г/кВт (г/л.с.ч)	226 (166)
Мощность, кВт (л.с.)	60 (81)
Частота вращения, об/мин.	1600
Максимальный крутящий момент, Нм (кгм)	241 (24,6)
Частота вращения при максимальном крутящем моменте, об/мин.	1600
Масса, кг	430

Двигатель Д-243 пускается при помощи стартера ключом зажигания на приборной панели. Изменение частоты вращения коленчатого вала в режиме «холостого хода» (без нагрузки двигателя) возможно с панели управления стендом.

Панель управления содержит следующие приборы, сигнализаторы и органы управления штатной, устанавливаемые на тракторы семейства МТЗ:

- тахоспидометр электрический;
- лампа аварийного давления масла;
- блок контрольных ламп;
- рукоять управления положением топливной рейки;

- рукоять останова двигателя;
- выключатель стартера и приборов;
- индикатор включения питания.

Определение топливной экономичности двигателя Д-243 производится в режиме работы 1700 об/мин в течение 10 минут. Масса израсходованного топлива в резервуаре измеряется на весах, исследование по расходу топлива проводится не менее трех раз для каждого образца дизельного топлива (необработанного, обработанного СВЧ волнами при разных мощностях магнетрона) (рис. 3.14).



Рисунок 3.14 – Процедура замера расхода топлива

Определение массы топлива производится с помощью весов DEKODKKS05, имеющих диапазон измерений до 5 кг и погрешность  $\pm 1$  г.(рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Весы DEKODKKS 05 для измерения массы топлива

Вычисление изменения расхода топлива двигателем при обработке дизельного топлива волнами СВЧ диапазона происходит по формуле:

$$m = m_2 - m_1, \quad (3.4)$$

где  $m$ – изменение массы при расходе топлива между необработанным и обработанным топливом СВЧ волнами , г;

$m_2$ – масса израсходованного топлива, которое не подвергалось СВЧ воздействию, г;

$m_1$ – масса израсходованного топлива, подвергнутого СВЧ воздействию, г.

Для определения зависимости потребления топлива дизелем от мощности СВЧ излучателя использовались два фиксированных режима – 500 Вт и 700 Вт.

### **3.6 Выводы по третьей главе**

Таким образом, в третьей главе для проведения экспериментальных исследований представлены методики оценки характеристик распыления топлива на стенде-форсунке, мощности СВЧ излучателя, топливной экономичности и экологичности отработанных газов дизеля Д-243, а также представлена программа исследования по определению физико-химических показателей дизельного топлива (коэффициента поверхностного натяжения, цетанового числа, кинематической вязкости).

## **ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОПЛИВА ВОЛНАМИ СВЧ ДИАПАЗОНА**

#### 4.1. Экспериментальные исследования физических характеристик топлива до и после обработки волнами СВЧ диапазона

Рассмотрим процесс остывания топлива, разлитого по емкостям различного объема (50 мл, 100 мл, 200 мл), до его обработки СВЧ излучением. Это связано с пониманием необходимости (или отсутствия такой необходимости) введения температурного коэффициента в уравнения, описывающие изменения температуры топлива после СВЧ воздействия. Данные измерения температуры дизельного топлива размещены в Приложении Б, а на рисунках 4.1-4.3 представлены графики изменения температуры от времени, начиная с исходной до достижения ею комнатной температуры  $23^{\circ}\text{C}$ .

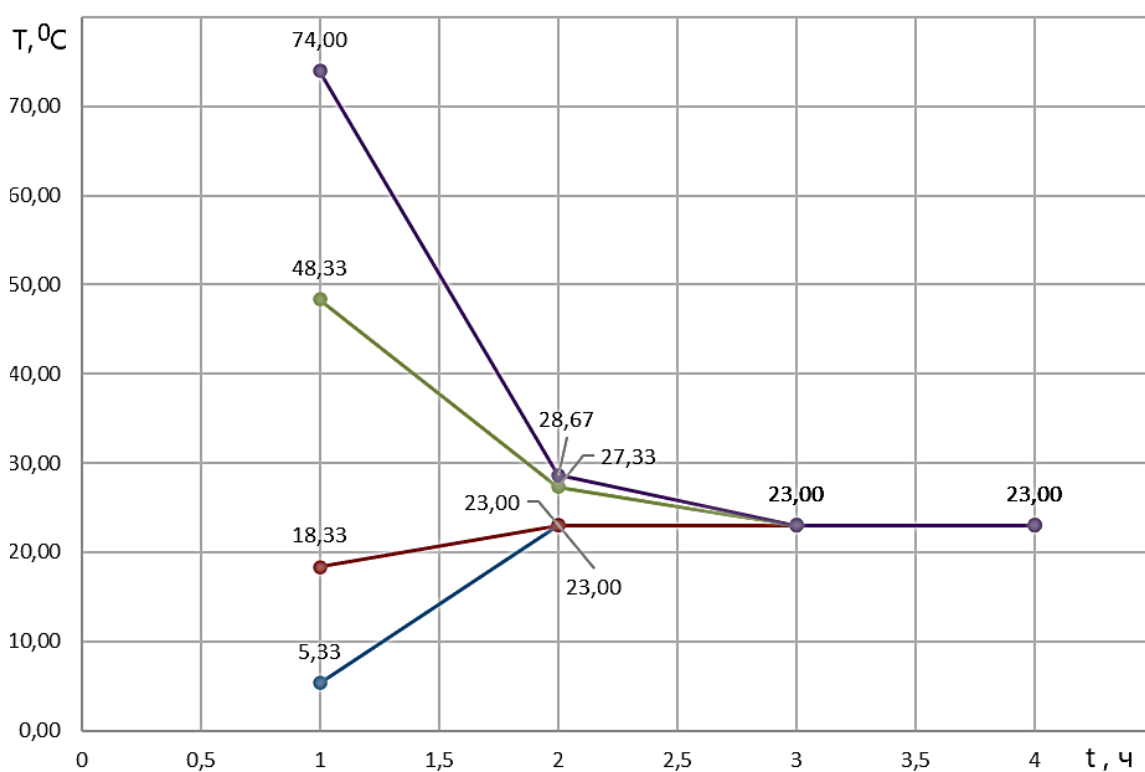


Рисунок 4.1 – Остывание дизельного топлива в емкости 50 мл при различной исходной температуре

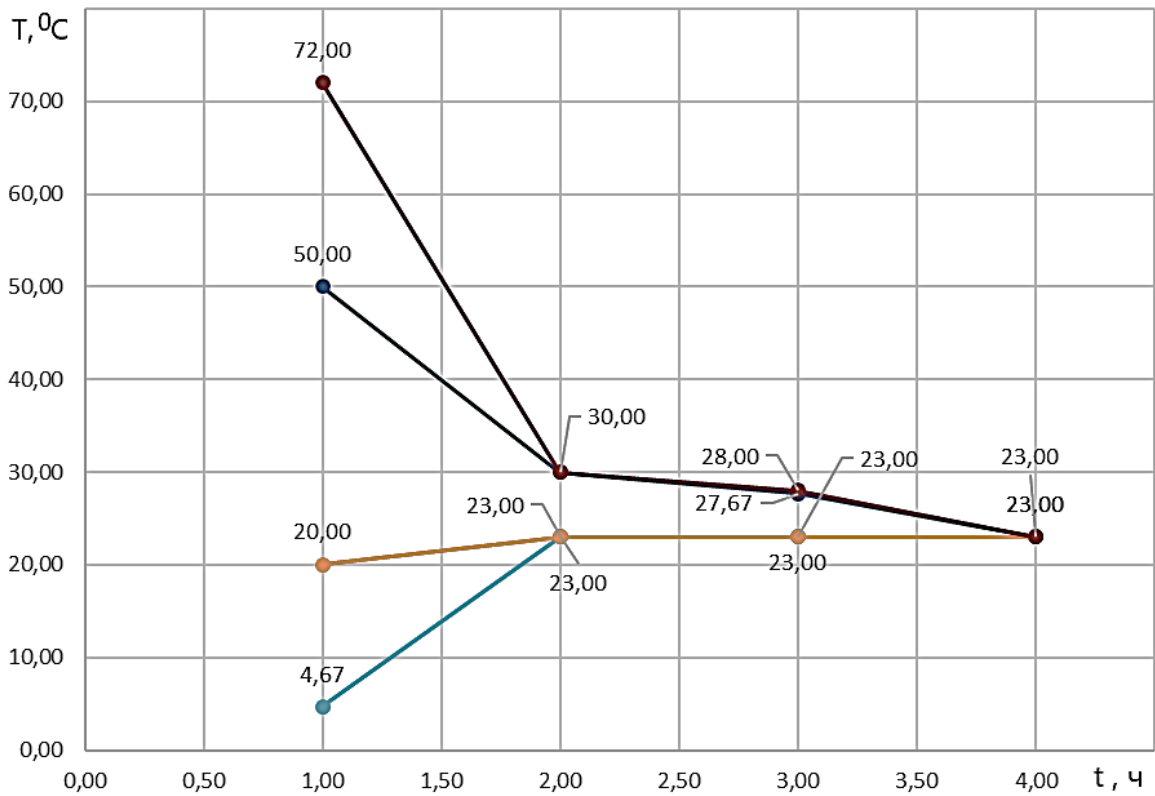


Рисунок 4.2 – Остывание дизельного топлива в емкости 100 мл при различной исходной температуре

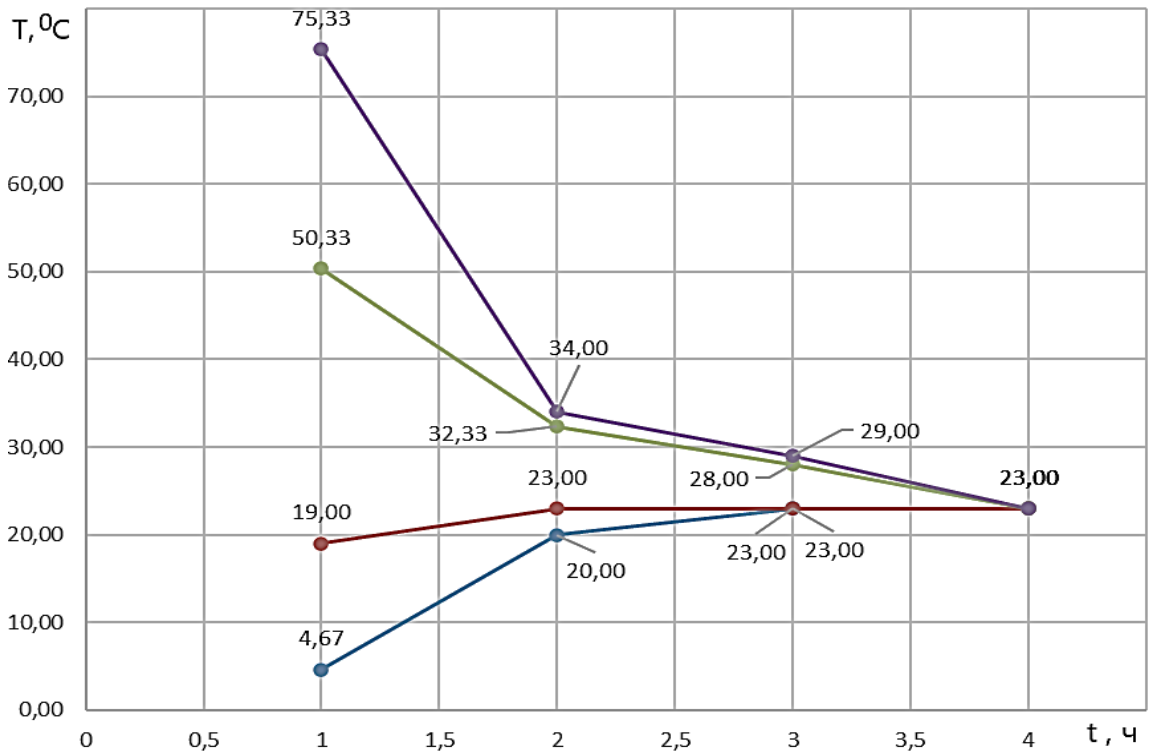


Рисунок 4.3 – Остывание дизельного топлива в емкости 200 мл при различной исходной температуре



Процесс остывания, представленный выше на рисунках, носит классический характер, когда среда с исходно большей запасенной энергией (за счет большего объема), приходит в равновесие с окружающей средой в течение более длительного периода времени.

Рассмотрим изменение температуры дизельного топлива, размещенного в емкости 50 мл, после окончания воздействия СВЧ излучения мощностью 350 Вт (рис.4.4) [125]. «Временной диапазон оценки измерения был уменьшен с 24 ч до 2 ч, поскольку, как показали замеры, изменение температуры до комнатной после воздействия СВЧ излучения указанной мощности в течение 90 с происходит в период длительностью не более двух часов» [125].

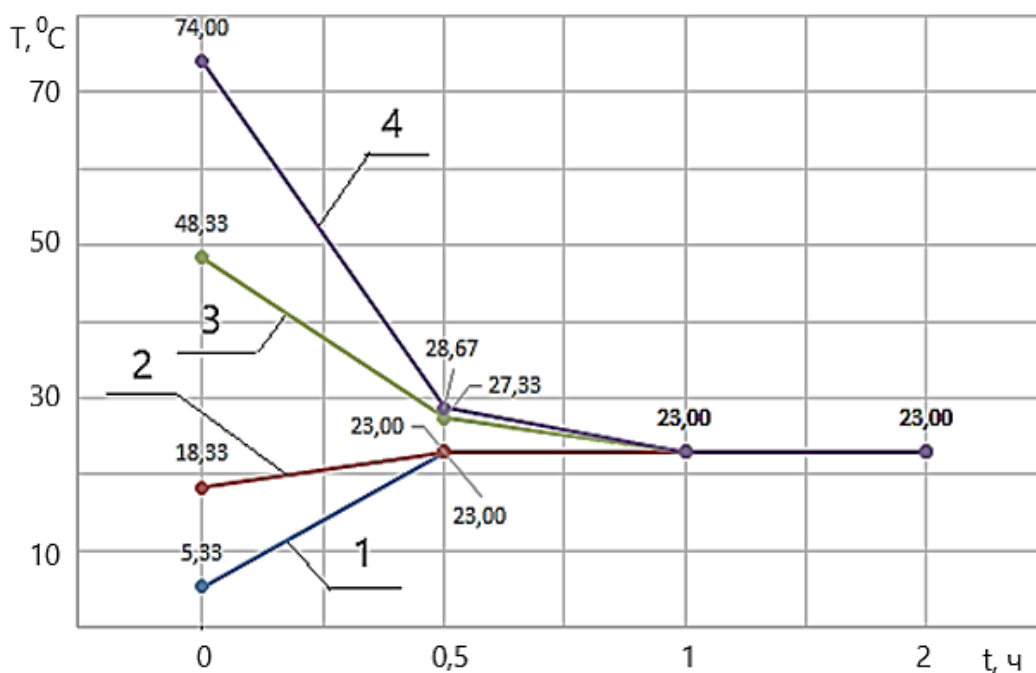


Рисунок 4.4 – Изменение температуры дизельного топлива в течение 2 часов после воздействия СВЧ излучения: 1 – при средней начальной температуре 5,33 °C; 2 – при средней начальной температуре 18,33 °C; 3 – при средней начальной температуре 48,33 °C; 4 – при средней начальной температуре 74 °C

Для аппроксимации зависимостей 1-4 были применены полиномиальные регрессионные уравнения второй степени  $y=ax^2+bx+c$  [19], которые представлены

в таблице 4.1 для описания процессов остывания/нагрева дизельного топлива от начальной температуры до комнатной [125].

Таблица 4.1 – Регрессионные уравнения, описывающие процесс остывания/нагрева дизельного топлива

Температура ДТ до обработки волнами СВЧ диапазона (50 мл), °С	Зависимость температуры (Т, °С) от времени (t, ч)	Коэффициент парной корреляции (R)	Критерий Фишера		Средняя ошибка аппроксимации (А, %)
			F <sub>выч</sub>	F <sub>табл</sub> (α=0,05)	
5,33	$T_1(t) = -11,25t^2 + 30,36t + 6,78$	0,9439	16,33	7,71	13,6
18,33	$T_2(t) = -2,97t^2 + 8,02t + 18,71$				3,1
48,33	$T_3(t) = 14,55t^2 - 41t + 47,2$	0,9822	110,36		6,5
74	$T_4(t) = 30,39t^2 + 84,33t + 71,06$	0,9708	66,49		13,8

«Полученные уравнения с высокой достоверностью описывают процессы остывания дизельного топлива с различной начальной температурой после воздействия СВЧ излучения в течение 90 секунд – все уравнения значимы, а средняя ошибка аппроксимации не превышает 13,8%» [125].

Оценим изменения коэффициентов а, b и с в исследуемом температурном диапазоне – 5,33...74 °С (рис.4.5). Из рисунка хорошо видно, что коэффициенты уравнений изменяются по линейному закону (табл.4.2)[125].

Таблица 4.2 – Регрессионные уравнения, описывающие изменения коэффициентов а, b и с

Изменение коэффициентов а, b и с от (Т, °С)	Коэффициент корреляции (R)	Критерий Фишера		Средняя ошибка аппроксимации (А, %)
		F <sub>выч</sub>	F <sub>табл</sub> (α=0,05)	
$a(T) = 0,603T - 4,316$	0,9999	11996,08	7,71	2,9
$b(T) = -1,664T + 39,005$	-0,9999	39076,45		-1,6
$c(T) = 0,938T + 1,689$	0,9999	176255,98		0,4

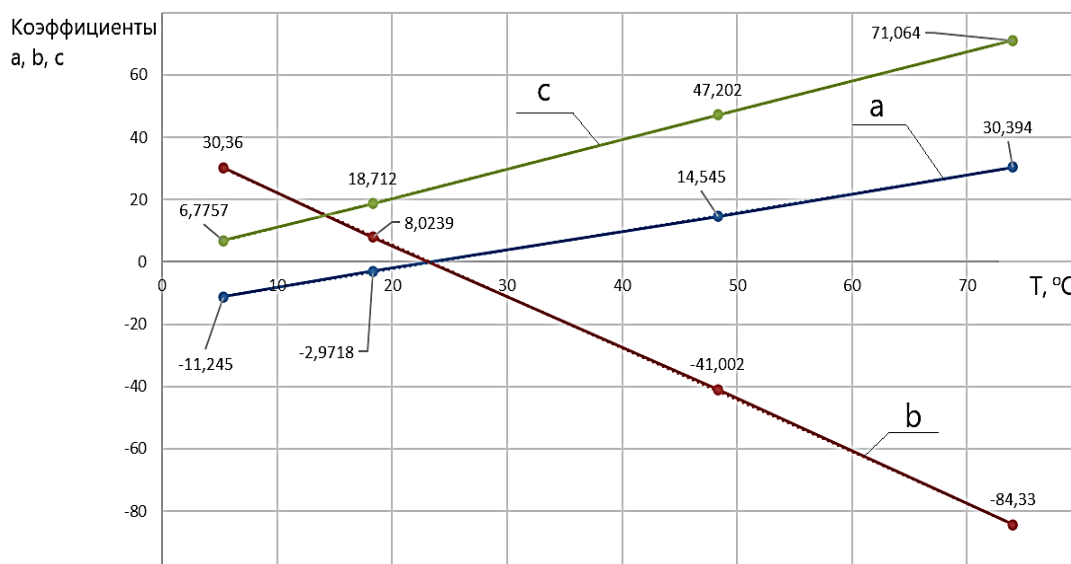


Рисунок 4.5 – Изменение коэффициентов а, b и с в зависимости от температуры дизельного топлива

Возможно было бы проанализировать изменения для коэффициентов а, b и с в условиях низких температур и рассчитать время, которое потребуется для разогрева дизельного топлива до нужной благоприятной температуры для запуска дизеля [125]. Однако расчет средней ошибки аппроксимации по найденному регрессионному уравнению  $A(T) = 0,0082T^2 - 0,614T + 14,819$  показывает, что ее величина существенно возрастает в области отрицательных температур, достигая значения 30,4% при  $-20^{\circ}\text{C}$  (рис.4.6) [125].

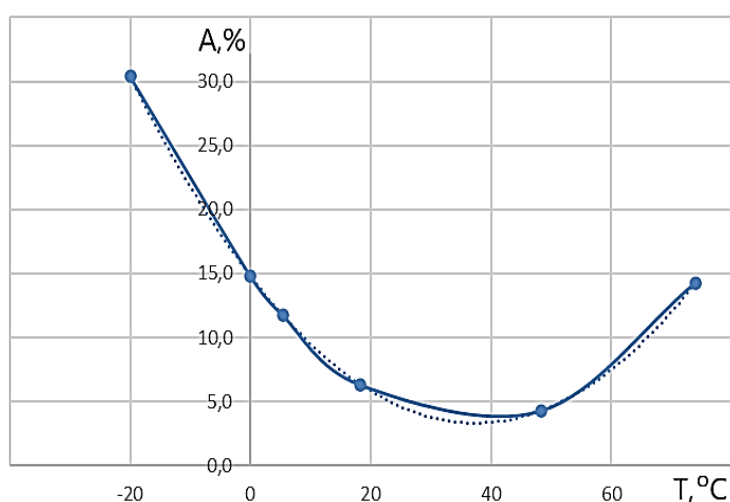


Рисунок 4.6 – Изменение средней ошибки аппроксимации (А) от температуры (Т) дизельного топлива

Тем не менее этот способ предоставляет возможность прогнозирования времени воздействия СВЧ излучения на топливо с целью его разогрева до рекомендуемых температур при пуске дизеля.

#### **4.2 Экспериментальные исследования кинематической вязкости топлива**

Изменение кинематической вязкости топлива объемом 50 мл в течение 24 ч после его обработки волнами СВЧ диапазона мощностью 350 Вт приведено в таблице 4.3и опубликовано в статье [125].

Таблица 4.3 – Изменение кинематической вязкости 50 мл дизельного топлива после его обработки волнами СВЧ диапазона мощностью 350 Вт

Температура топлива до обработки волнами СВЧ диапазона (Т, °С)	Кинематическая вязкость (ν, сСт)				
	исходная	сразу после обработки	через 0,5 ч	через 1 ч	через 24 ч
5,33	4,72	4,29	4,29	4,31	4,44
18,33	4,68	4,23	4,39	4,28	4,51
48,33	4,21	4,10	4,33	4,44	4,54
74	4,17	4,08	4,34	4,42	4,49

«Поскольку наблюдаются существенные и разнонаправленные изменения в значениях кинематической вязкости, можно допустить, что в дизельном топливе происходят структурные преобразования»[125]. Для оценки изменения в структуре молекул дизельного топлива [2], обработанного волнами СВЧ диапазона, необходимо провести дополнительное исследование по качественному составу топлива [146] либо непосредственно по оценке изменения исходных компонентов (парафиновые, нафтеновые и ароматические углеводороды) [136], либо косвенно, например, оценивая изменение цетанового числа [28].

Построив изменение кинематической вязкости по времени с помощью формулы  $(\max - \min) / \min * 100\%$ , можно предположить, что процессы

перемешивания слоев топлива продолжают происходить после 1 часа после завершения обработки (рис.4.7) и завершаются к 24 часам с момента окончания обработки [125].

График изменения кинематической вязкости по истечении 24 часов после обработки топлива относительно его исходной температуры, построенный с помощью формулы  $(v_{24}-v_{исх})/v_{исх} * 100\%$ , позволяет предположить, что существенные изменения в ее значениях завершаются приблизительно к 50 °С (рис.4.8) [125].

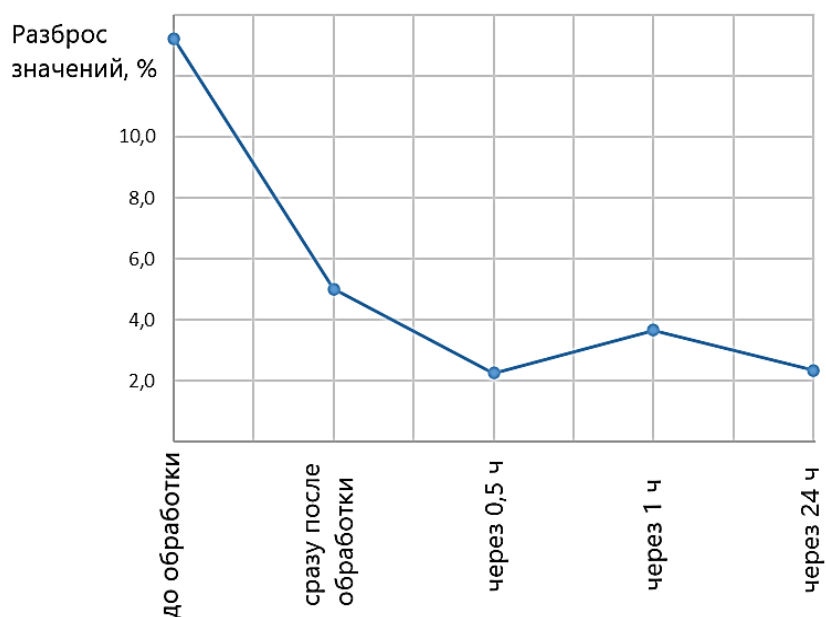


Рисунок 4.7 – Относительный разброс кинематической вязкости по времени, прошедшему с момента окончания обработки

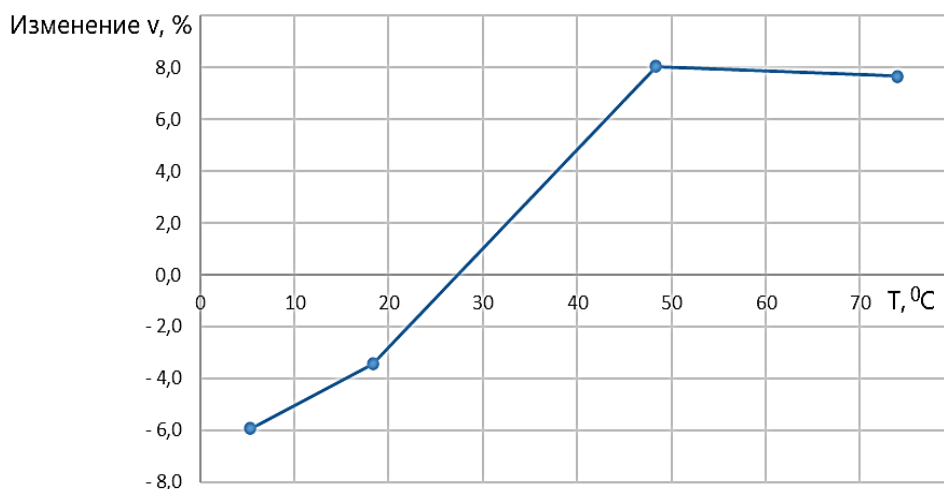


Рисунок 4.8 – Изменение кинематической вязкости  $v$  (%) относительно исходной температуры  $T$  (°C) топлива

Рассмотрим изменение значений кинематической вязкости топлива при различных объемах обрабатываемого топлива (50 мл, 100 мл, 200 мл), мощности излучателя (350 Вт, 500 Вт, 700 Вт) и различной исходной температуре топлива (диапазоны 4...7 °С; 18...20 °С; 48,3...50 °С; 72...74 °С) – результаты представлены на рис.4.9-4.12.

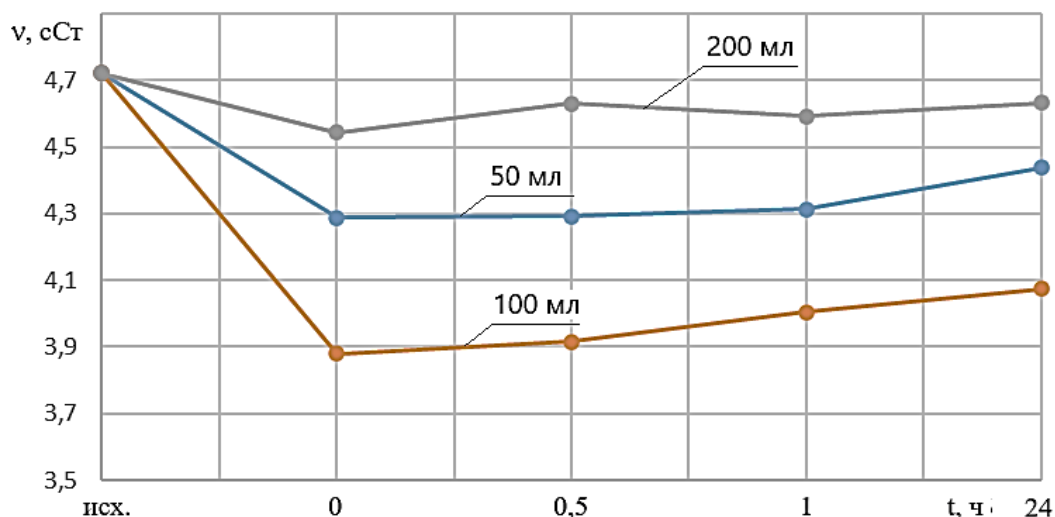


Рисунок 4.9 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 4...5,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

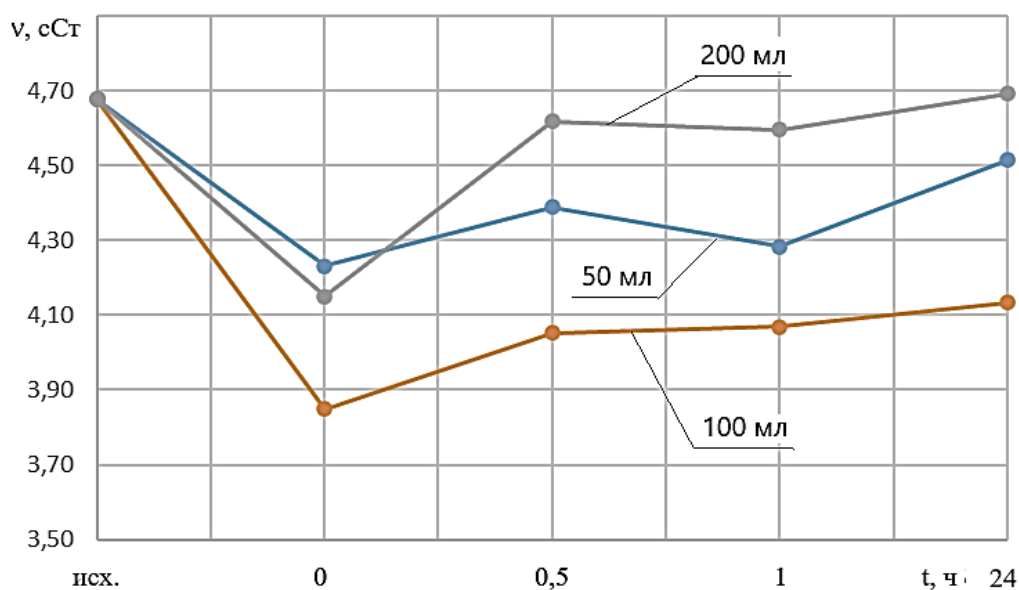


Рисунок 4.10 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 18...20 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

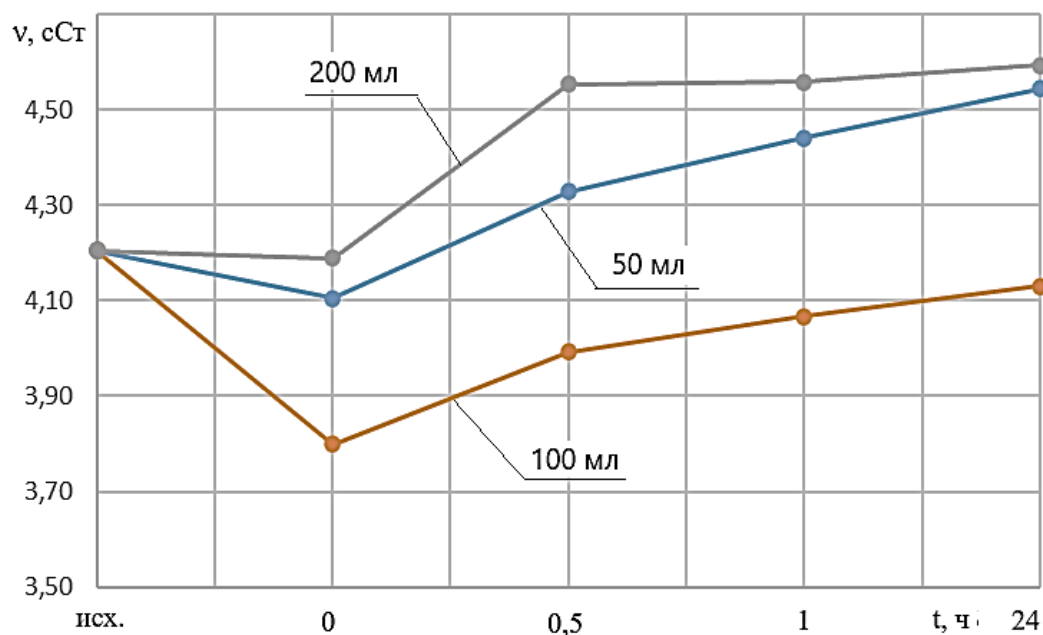


Рисунок 4.11 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 48,3...49,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

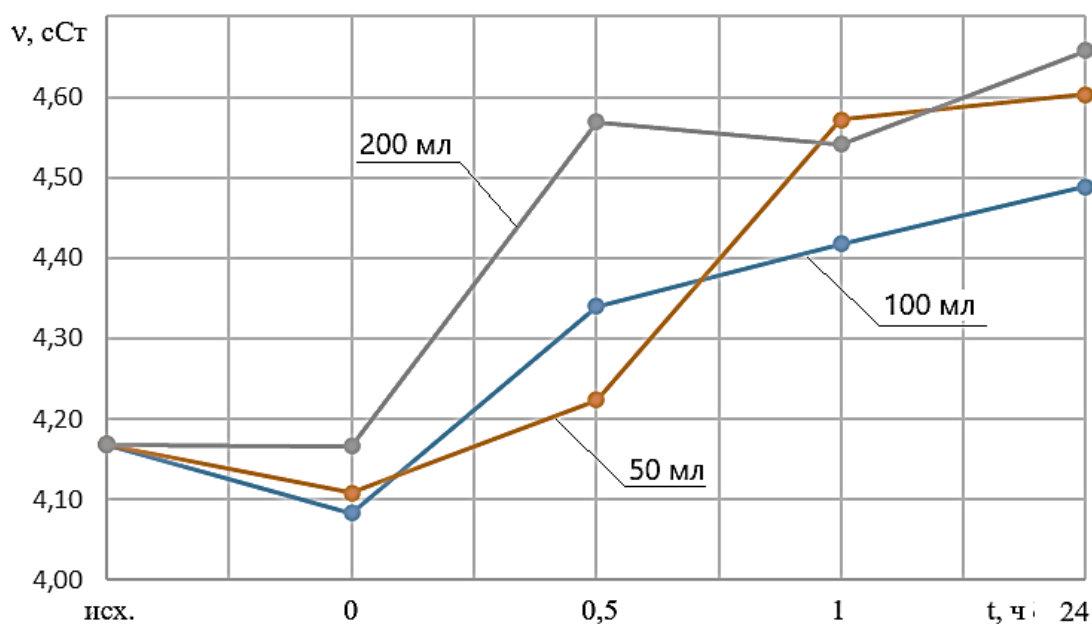


Рисунок 4.12 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 72...74 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

Интересным результатом является то, что объем топлива, равный 100 мл, наиболее подвержен воздействию СВЧ излучения. Это может быть связано с тем,

что для меньшего объема часть энергии СВЧ излучения рассеивается вне его, а при увеличении объема не все топливо подвергается воздействию СВЧ излучения либо мощности излучателя недостаточно для его обработки.

Поэтому были дополнительно проведены исследования воздействия СВЧ излучения мощностью 500 Вт и 700 Вт на эти же объемы топлива (на рисунках 4.13-4.16 приведены данные только для воздействия волн СВЧ диапазона при двукратном увеличении мощности излучателя –700 Вт).

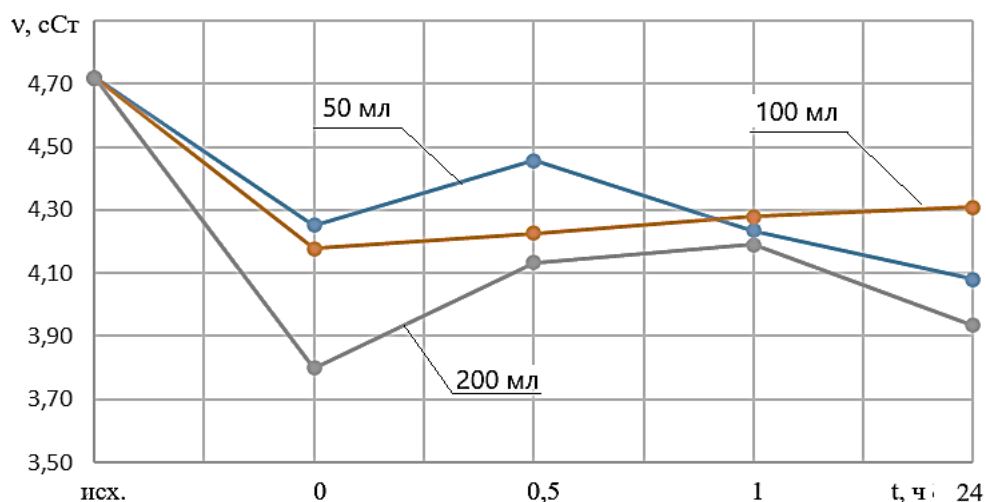


Рисунок 4.13 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 4...5,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с

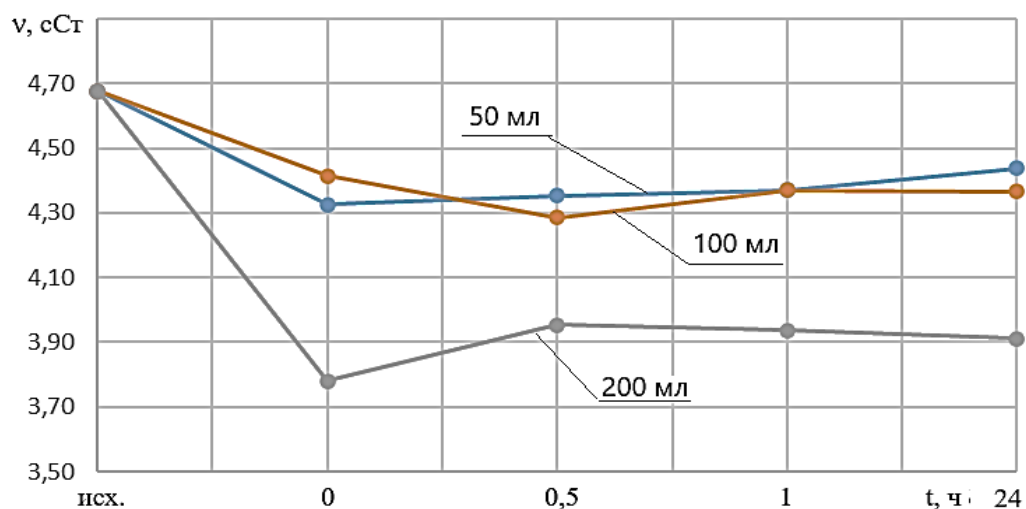


Рисунок 4.14 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 18...20 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с



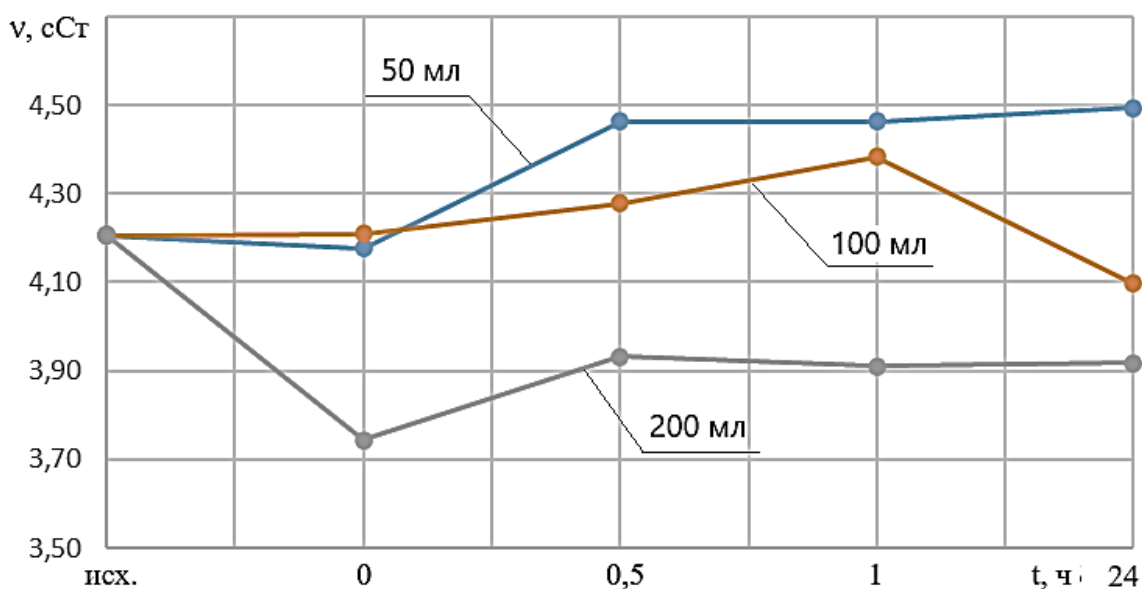


Рисунок 4.15 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 48,3...49,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с

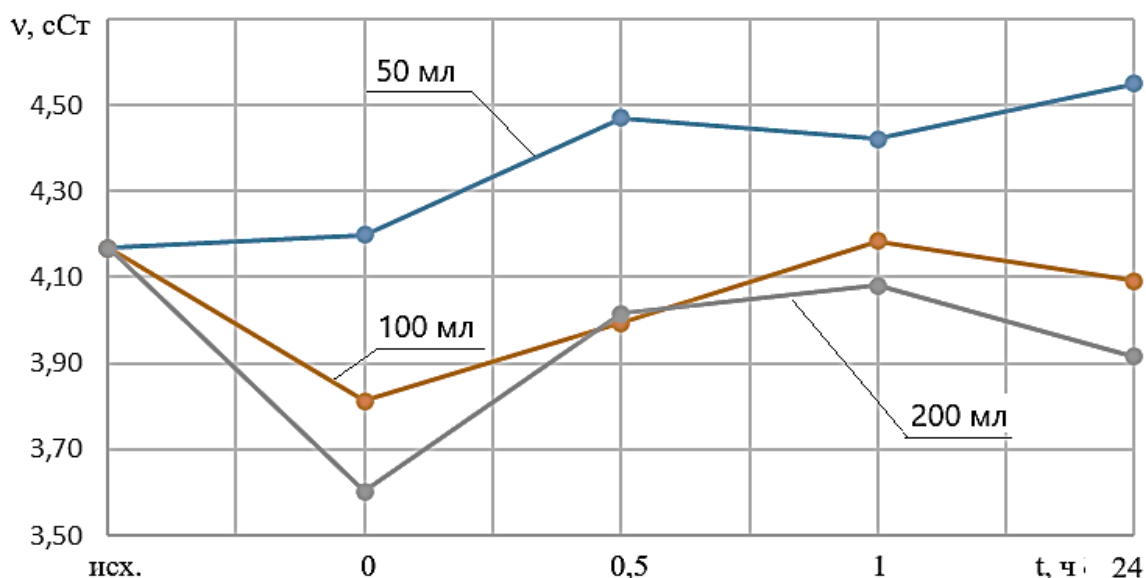


Рисунок 4.16 – Изменение кинематической вязкости топлива при исходной температуре 72...74 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с

Вывод, который можно сделать по результатам анализа графиков при мощности излучателя 700 Вт, состоит в следующем: двукратное увеличение мощности излучателя позволило увеличить емкость топлива, которое полностью

подвергается обработке, также в два раза. Следовательно, для эффективной обработки топлива в двигателе необходимо поддерживать баланс в цепочке «мощность СВЧ излучателя-объем обрабатываемого топлива в секунду».

Снижение времени обработки топлива с 90 с до 60 с и далее до 30 с при сохранении диапазонов мощности излучателя и времени обработки не выявило новых закономерностей (Приложение В).

### **4.3 Экспериментальные исследования изменения коэффициента поверхностного натяжения топлива**

Аналогично экспериментам по изменению кинематической вязкости представлено изменение значений коэффициента поверхностного натяжения в течение 24 ч после воздействия волн сверхвысокой частоты на дизельное топливо(табл.4.4) [125].

Таблица 4.4 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива после его обработки волнами СВЧ диапазона

Температура топлива до обработки волнами СВЧ диапазона (Т, °С)	Коэффициент поверхностного натяжения ( $\sigma$ , мН/м)				
	исходный	сразу после обработки	через 0,5 ч	через 1 ч	через 24 ч
5,33	33,11	30,46	29,80	28,74	31,83
18,33	32,79	26,49	30,15	30,06	31,95
48,33	29,86	29,13	28,92	28,54	31,89
74	29,64	29,03	29,55	28,86	31,48

«Поскольку коэффициент поверхностного натяжения косвенно характеризует энергию, «запасенную» поверхностью жидкости, то желательно, чтобы он увеличивался при обработке топлива» [125]. Как видно из рисунков 4.1-4.4, изменение температуры дизельного топлива в основном завершается после 1...2 часа после окончания обработки топлива – в это время фиксируется снижение

коэффициента поверхностного натяжения в пределах 2,6...13,2%, что весьма существенно [125].

Проанализируем изменение значений коэффициента поверхностного натяжения топлива при изменении объема обрабатываемого топлива (50 мл, 100 мл, 200 мл), мощности излучателя (350 Вт, 500 Вт, 700 Вт) и различной исходной температуре топлива (диапазоны 4...7 °С; 18...20 °С; 48,3...50°С; 72...74 °С) – результаты представлены на рисунках 4.17-4.20.

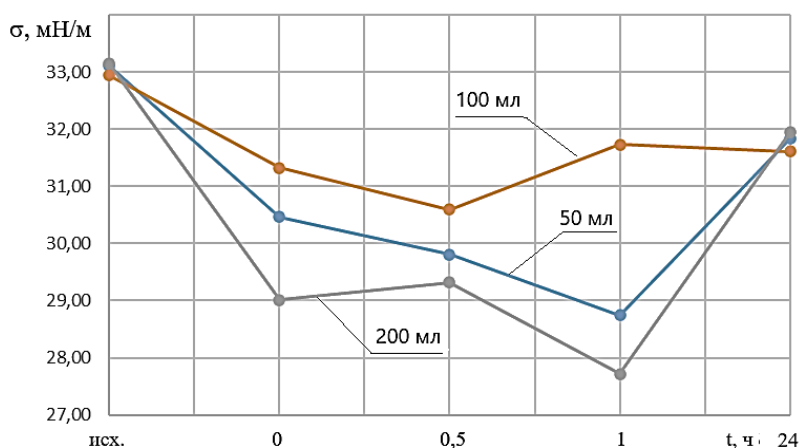


Рисунок 4.17 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 4...5,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

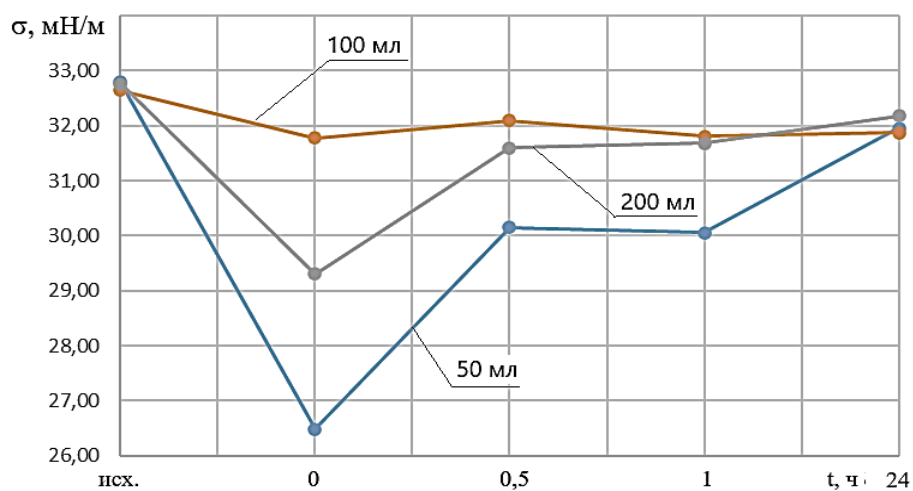


Рисунок 4.18 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 18...20 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

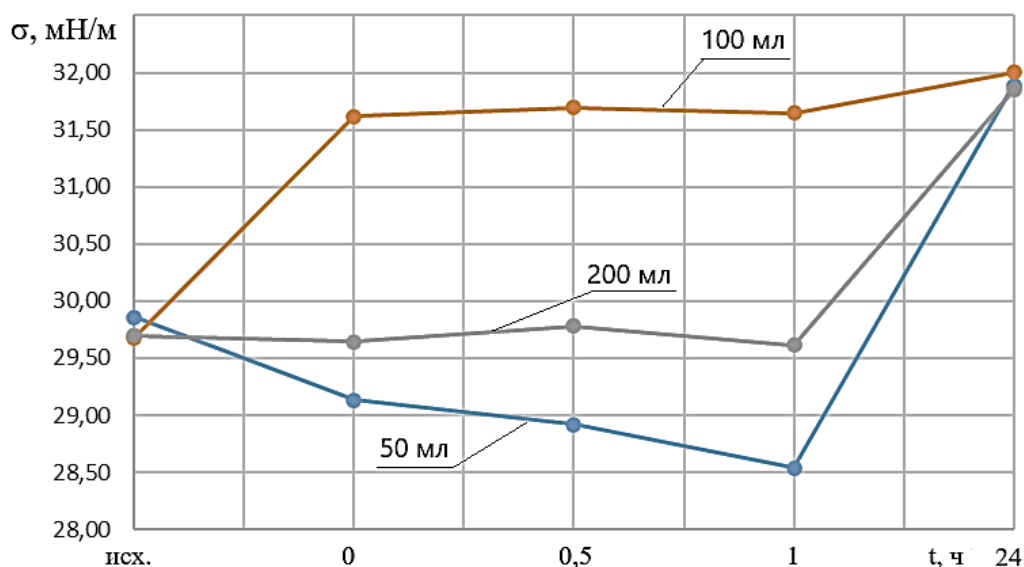


Рисунок 4.19 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 48,3...49,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

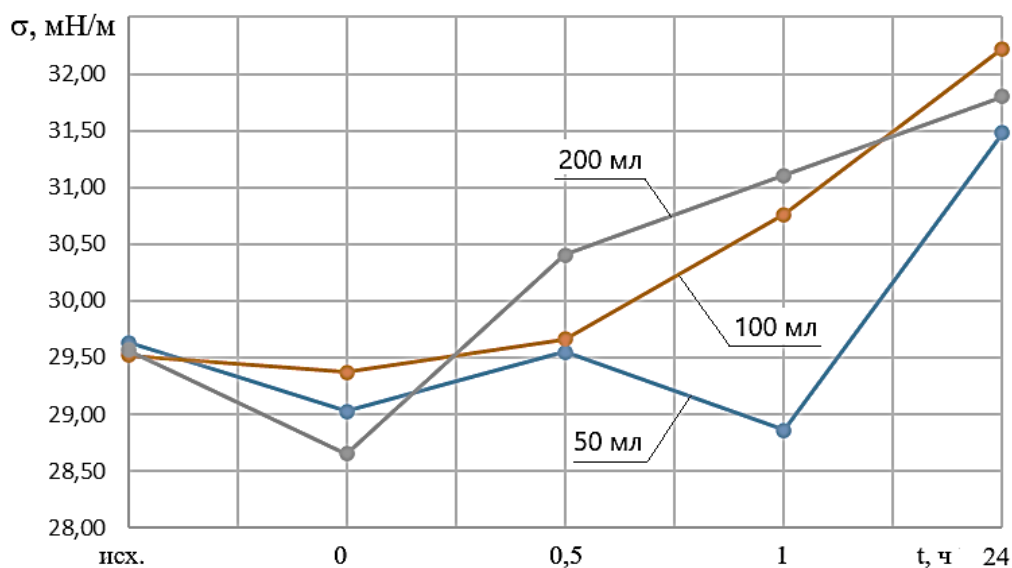


Рисунок 4.20 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 72...74 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 350 Вт и времени обработки 90 с

Для коэффициента поверхностного натяжения наилучшим вариантом является наибольшее значение, которое наблюдается у топлива емкостью 100 мл (кроме диапазона максимальной температуры) (рис.4.17-4.20).

Аналогично выполненным ранее экспериментам для кинематической вязкости были проведены исследования воздействия СВЧ излучения мощностью 500 Вт и 700 Вт на эти же объемы топлива для анализа значений коэффициента поверхностного натяжения вследствие повышения мощности излучателя (на рисунках 4.21-4.24 приведены данные только для воздействия волн СВЧ диапазона при двукратном увеличении мощности излучателя – 700 Вт).

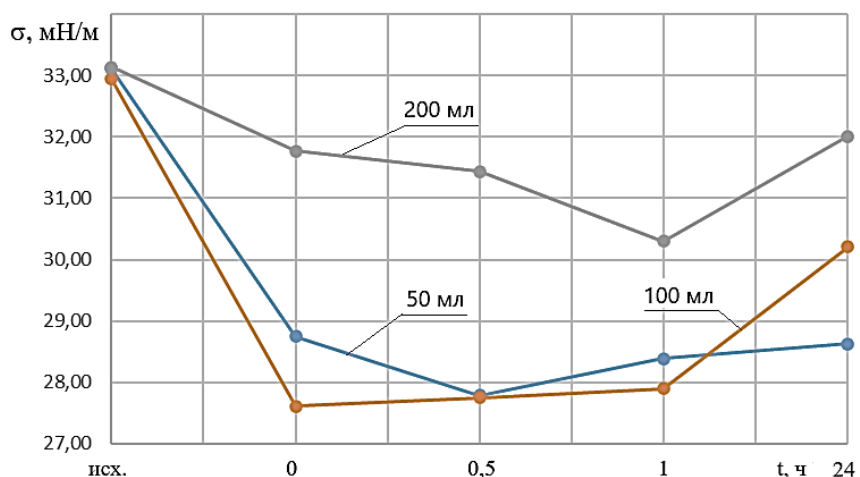


Рисунок 4.21 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 4...5,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с

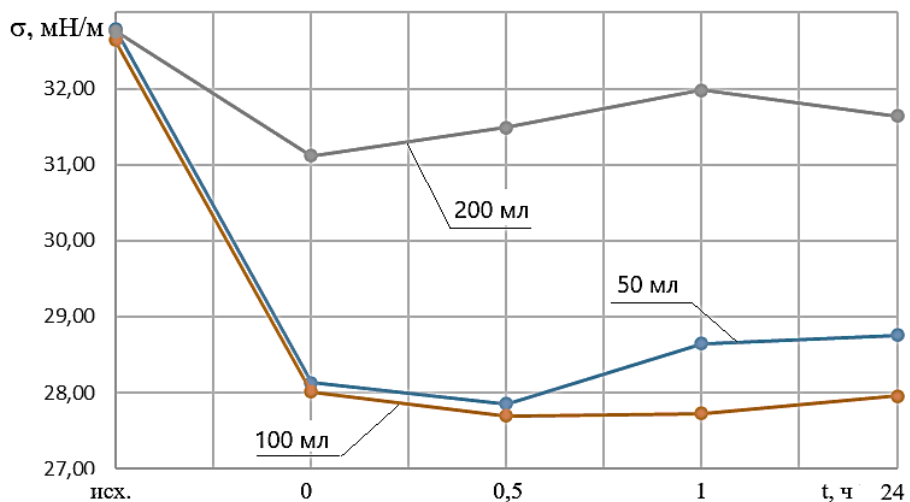


Рисунок 4.22 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 18...20 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с

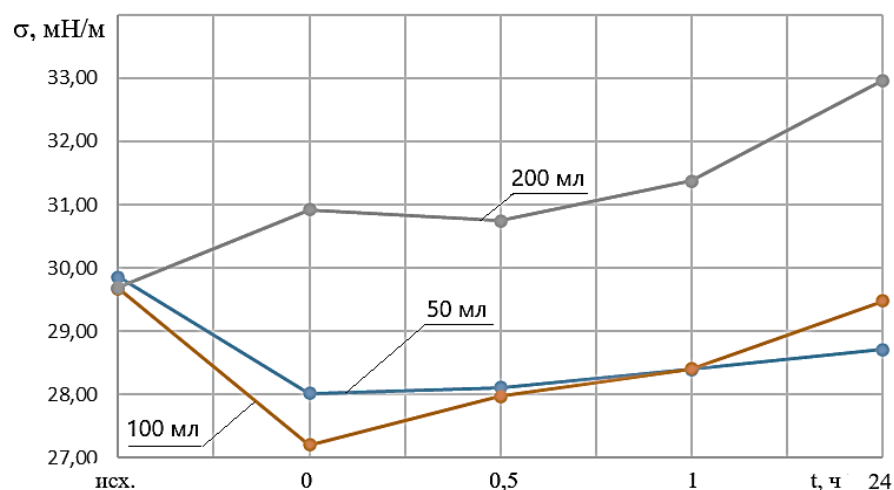


Рисунок 4.23 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 48,3...49,7 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с

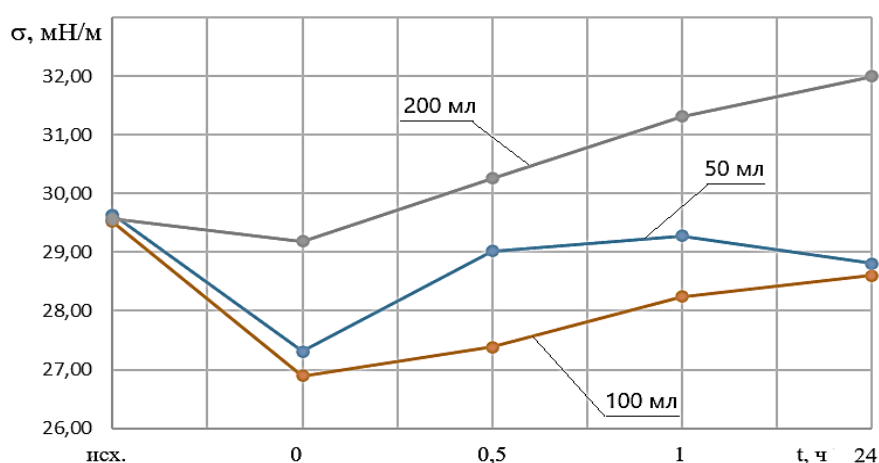


Рисунок 4.24 – Изменение коэффициента поверхностного натяжения топлива при исходной температуре 72...74 °С в зависимости от обрабатываемого объема при мощности излучателя 700 Вт и времени обработки 90 с

Как видно из вышеприведенных рисунков 4.21-4.24, наивысшие показатели коэффициента поверхностного натяжения зафиксированы у топлива, размещенного в емкости 200 мл. Следовательно, сохраняется тенденция, проявляющаяся для кинематической вязкости – двукратное увеличение объема предполагает двукратное увеличение мощности СВЧ излучателя. Для данного

случая также подходит вариант расчета мощности СВЧ излучателя, полученный выше для кинематической вязкости.

Снижение времени обработки топлива с 90 с до 60 с и далее до 30 с при сохранении диапазонов мощности излучателя и времени обработки не выявило новых закономерностей (Приложение Г).

#### 4.4 Экспериментальные исследования распыла топлива форсункой, цетанового числа и его расхода при обработке волнами СВЧ диапазона

На рисунках 4.25 и 4.26 представлены данные по распылу топлива форсунками как без обработки волнами СВЧ диапазона, так и при его обработке на мощностях излучателя 500 Вт и 700 Вт. Замеры производились путем оценки площади распыла на миллиметровой бумаге в течение 0...80 секунд с шагом 20 с.

Был построен график соотношения площадей распыла топлива при воздействии СВЧ излучения к площади его распыла без СВЧ излучения (рис.4.27) и соотношение площадей распыла после истечения 80 секунд с момента распыла к исходной площади (рис.4.28). Из рисунков хорошо видно, что площадь распыла топлива при СВЧ обработке увеличивается на 17...23 % по отношению к исходной, что связано с большим углом распыла обработанного топлива. При этом после 40 секунд она существенно снижается, что, вероятно, связано с испарением более мелких капель топлива, а также – за счет большей мелкодисперсности – их более быстрым проникновением в поры миллиметровой бумаги.

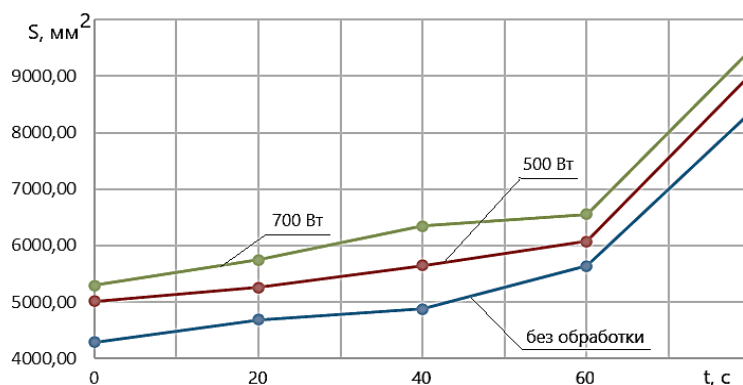


Рисунок 4.25 – Суммарная площадь  $S$  распыла топлива форсункой в зависимости от времени  $t$ , прошедшего с момента распыла, и мощности СВЧ излучателя



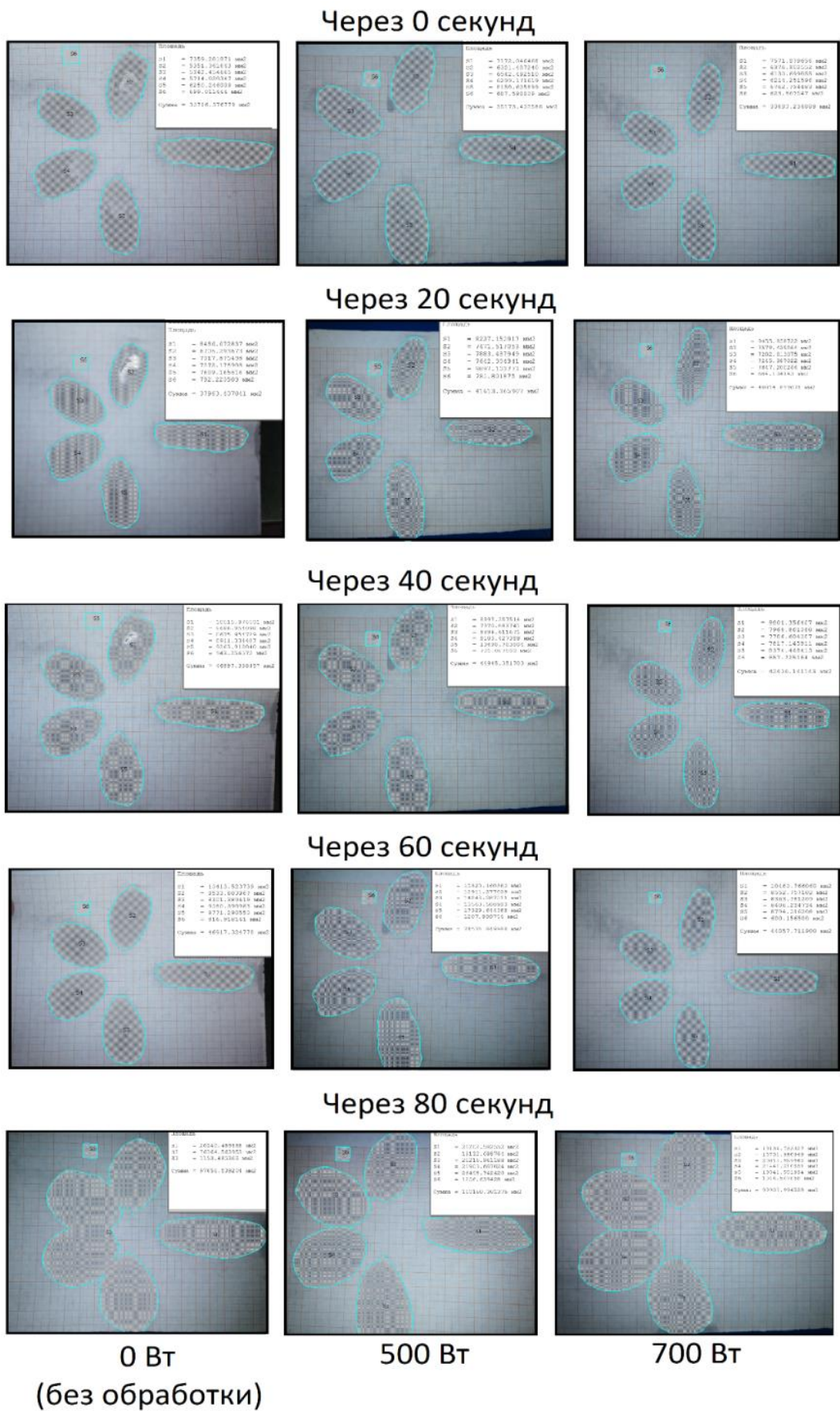


Рисунок 4.26 – Площадь распыла топлива по секторам в течение 80 секунд с момента его завершения



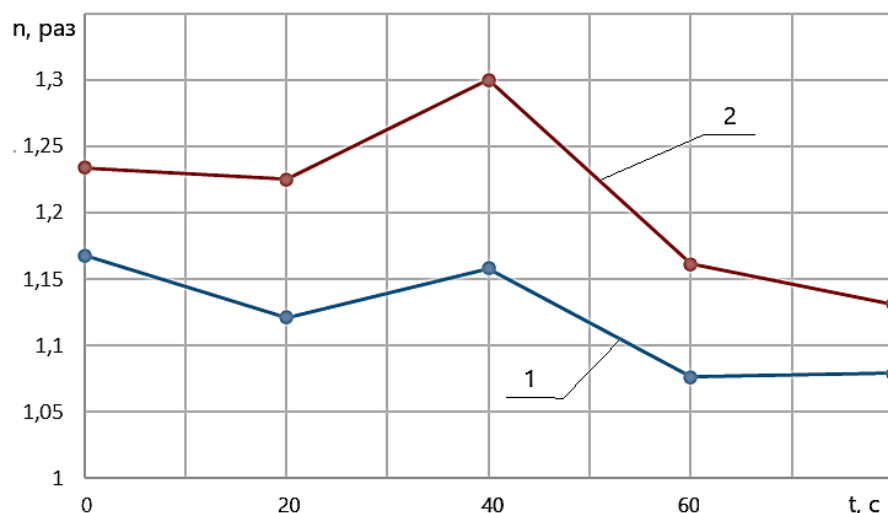


Рисунок 4.27 – Соотношение площадей распыла топлива при его обработке волнами СВЧ диапазона по отношению к площади необработанного топлива:

1 – при мощности излучателя 500 Вт; 2 – при мощности излучателя 700 Вт

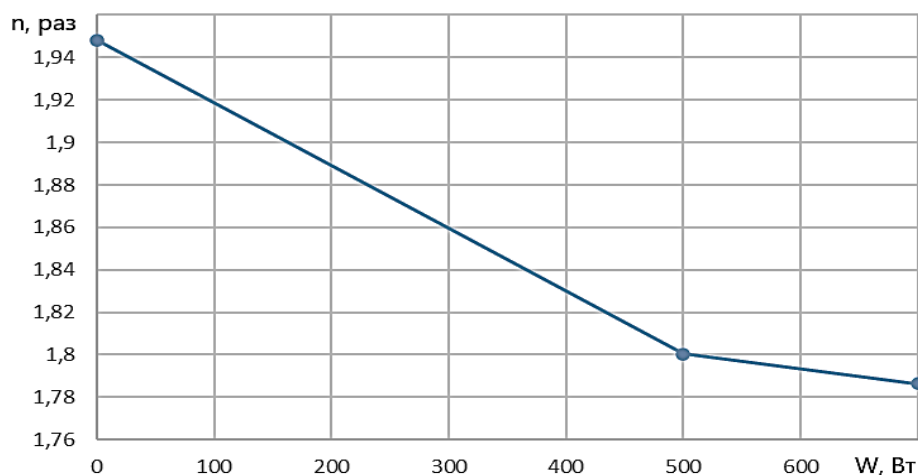


Рисунок 4.28 – Соотношение площадей распыла топлива к исходной площади по истечении 80 с

В пользу этого эффекта свидетельствует и соотношение площадей распыла топлива по истечении 80 секунд к исходной площади – более мелкие капли топлива после обработки СВЧ излучением легче и испаряются, и впитываются. При этом разница в площадях распыла после 80 секунд для мощности излучателя СВЧ волн 500 Вт и 700 Вт незначительна.

Цетановое число измерялось согласно методике, изложенной в разделе 3, результаты представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты измерений цетанового числа при мощности излучателя 700 Вт

Время воздействия СВЧ излучения, с	Цетановое число, ед.
0 (без воздействия)	51
20	51
40	51
60	51
80	51

Отсутствие изменений цетанового числа топлива при его обработке СВЧ излучением позволяют утверждать об отсутствии структурных преобразований.

Далее была проведена оценка расхода топлива дизелем Д-243 согласно методике, указанной в разделе 3 (табл.4.6).

Таблица 4.6 –Изменение расхода топлива дизелем при различной мощности СВЧ излучения

Номер эксперимента	Мощность СВЧ излучения, Вт	Обороты	Время работы, мин	Начальная масса с топливом, г	Конечная масса с топливом, г	Масса израсходованного топлива, г	Отклонение от ср. ОВТ, %
1	0	1700	10	1199	492	707	0,14
2		1700	10	1326	618	708	0,28
3		1700	10	1179	476	703	-0,42
среднее значение		1700	10	1234,7	528,7	706,0	<b>0</b>
1	500	1700	10	1219	588	631	-10,62
2		1700	10	1327	682	645	-8,64
3		1700	10	1274	637	637	-9,77
среднее значение		1700	10	1273,3	635,7	637,7	<b>-9,67</b>
1	700	1700	10	974	293	681	-3,54
2		1700	10	1146	467	679	-3,82
3		1700	10	1265	591	674	-4,53
среднее значение		1700	10	1128,3	450,3	678,0	<b>-3,97</b>

Повышение экономичности дизеля зафиксировано для обоих случаев применения СВЧ обработки топлива, однако наилучшие показатели достигаются при мощности СВЧ излучателя, равной 500 Вт, и составляют 9,67%.

#### 4.5 Результаты оценки экологических показателей дизеля при обработке топлива волнами СВЧ диапазона

Дымность дизеля Д-243 определялась (Приложение Д) с использованием дымомера МЕТА-01 МП (табл.4.7) по методике, представленной в разделе 3.

Таблица 4.7 – Изменение дымности отработавших газов дизеля при воздействии на топливо СВЧ излучения

Номер эксперимента	Мощность СВЧ излучателя, Вт	Показания дымомера МЕТА-01 МП	
		Коэффициент поглощения $K_i$ ( $m^{-1}$ )	Коэффициент ослабления $N_i$ (%)
1	0 (без обработки)	6,32	93,4
2		6,59	94,1
3		8,0	96,8
4		9,29	98,2
Среднее значение		$K_{cp} = 7,55$ $N_{cp} = 96,1$	
1	500	5,24	89,5
2		5,74	92,5
3		5,66	91,2
4		6,11	92,8
Среднее значение		$K_{cp} = 5,7$ $N_{cp} = 91,4$	
1	700	5,19	89,3
2		6,02	92,5
3		5,46	90,4
4		4,41	85,0
Среднее значение		$K_{cp} = 5,27$ $N_{cp} = 89,6$	

Наиболее наглядно продемонстрировать эффективность обработки топлива СВЧ излучением можно на примере коэффициента ослабления светового потока, являющимся частью светового потока от источника света дымомера, не достигшего приемника света из-за поглощения, отражения и рассеяния этой части потока отработавшими газами, проходящими через измерительную камеру дымомера [27]. Из таблицы 4.7 хорошо видно, что обработка топлива СВЧ излучением при мощности излучателя 500 Вт уменьшает дымность выхлопных газов дизеля Д-243 на 4,7%, при мощности 700 Вт – на 6,5%.

Выхлопные газы дизеля были также проанализированы по следующим вредным веществам (Приложение Д): бензол, формальдегид, монооксид углерода, диоксид азота, диоксид серы, которые были идентифицируемы с помощью соответствующих индикаторных трубок (рис.4.29).

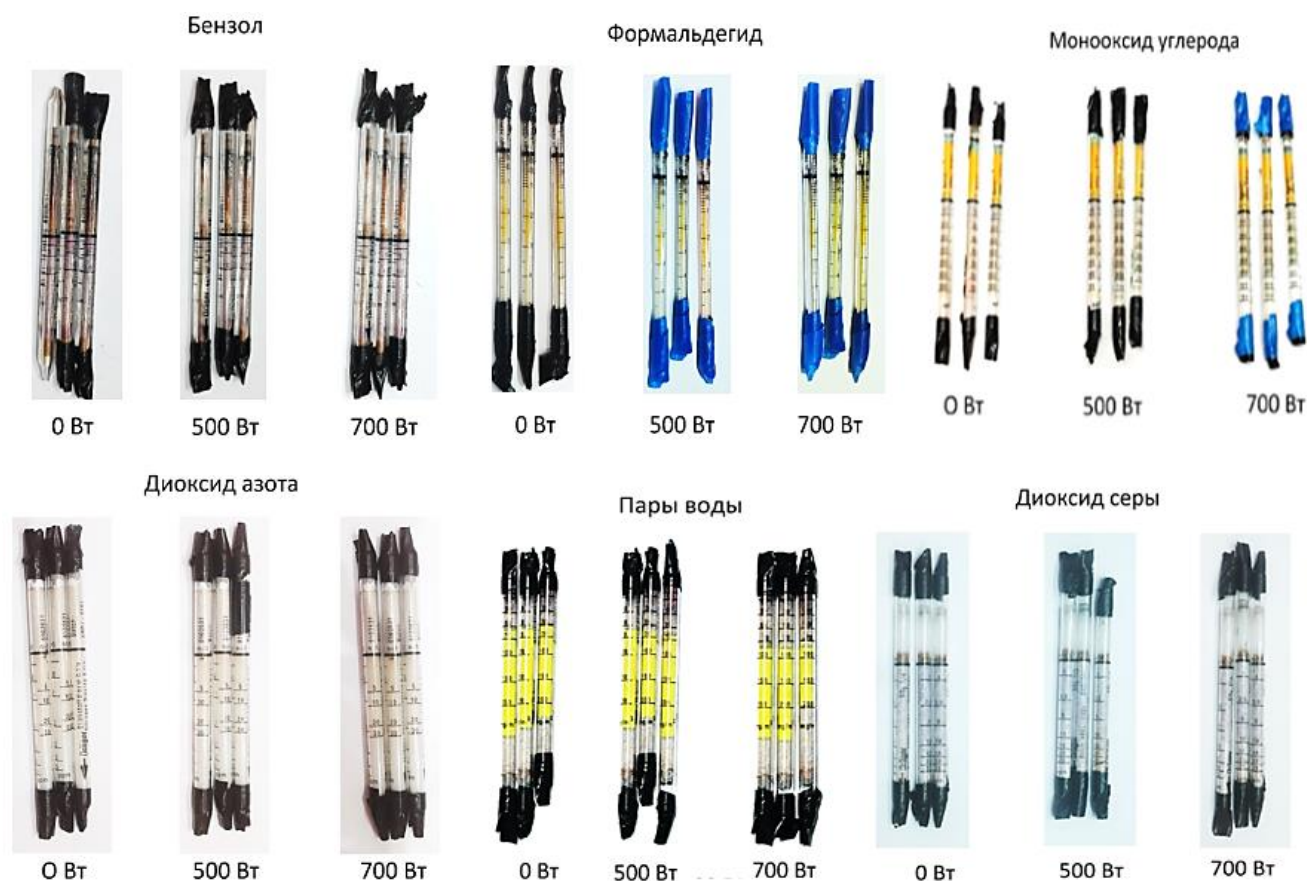


Рисунок 4.29 –Индикаторные трубки после забора вредных веществ в отработавших газах дизеля

На рисунке 4.30 приведен сводный график, демонстрирующий количественный диапазон выбросов вредных веществ в выхлопных газах дизеля Д-243.

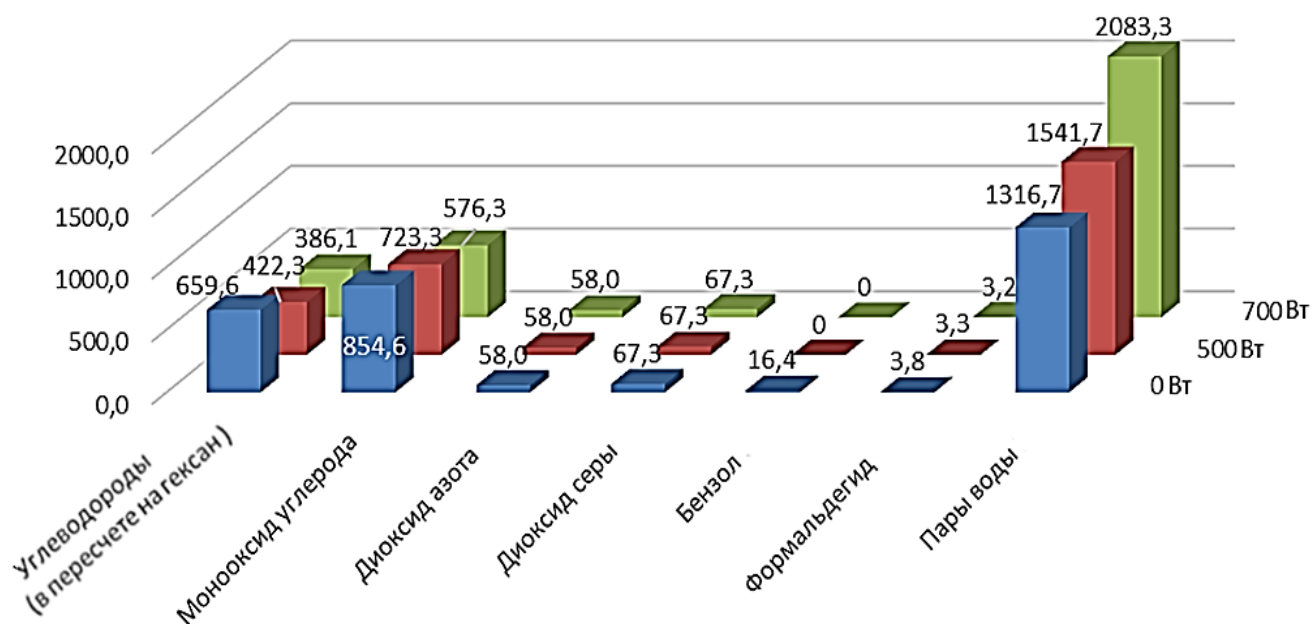


Рисунок 4.30 – Компоненты выхлопных газов дизеля ( $\text{мг}/\text{м}^3$ )

Хорошо видно, что наилучшие показатели получаются при мощности СВЧ излучателя 700 Вт – по отношению к исходным выбросам достигается следующее снижение: углеводороды – на 41,5%; монооксид углерода – на 32,6%; формальдегид – на 15,8%; бензол полностью исключен.

Следует подчеркнуть существенные результаты полученного снижения, для чего укажем негативные последствия, которые наступают при контакте организма человека с выше указанными веществами [49]:

- гексан оказывает раздражающее воздействие на кожу и слизистую оболочку глаз, а при вдыхании приводит к повреждению легких, поражению периферической нервной системы и общему угнетению центральной нервной системы;
- монооксид углерода вызывает сильную головную боль, слабость, головокружение, появление тумана перед глазами, тошноту и рвоту, а также приводит к снижению скорости зрительного восприятия, ухудшению выполнения психологических и психомоторных тестов, ухудшению координации мелких

точных движений и аналитического мышления;

- формальдегид поражает бронхи и легкие, а при остром отравлении наблюдается угнетение функции дыхания;
- бензол вреден для глаз, кожи, дыхательных путей, нервной системы и легких.

#### **4.6 Выводы по четвёртой главе**

1. Получены регрессионные уравнения, описывающие изменение температуры дизельного топлива с различными начальными значениями в процессе его нагревания или остывания до комнатной температуры, которые с высокой достоверностью описывают эти процессы – все уравнения значимы, а средняя ошибка аппроксимации не превышает 13,8%. Кроме того, составлены прогнозы изменения коэффициентов регрессионных уравнений в области отрицательных температур и оценена средняя ошибка аппроксимации.

2. Оценка изменения кинематической вязкости по времени позволяет предположить, что процессы перемешивания слоев дизельного топлива продолжают происходить после 1 часа после завершения обработки СВЧ излучением и завершаются к 24 часам с момента ее окончания, а существенные изменения в значениях кинематической вязкости завершаются приблизительно к 50°C.

3. Основным параметром воздействия на коэффициент поверхностного натяжения и кинематическую вязкость дизельного топлива является не мощность СВЧ излучателя, а соотношение мощности, приходящейся на определенный объем топлива за определенный период времени. При этом при двукратном увеличении объема топлива, подвергающегося СВЧ обработке, требуется двукратно увеличить мощность излучателя при сохранении периода воздействия.

4. Площадь распыла топлива после СВЧ обработки увеличивается на 17...23% по отношению к площади распыла необработанного топлива, что связано с большим углом распыла обработанного топлива и большей мелкодисперсностью образуемых капель дизельного топлива. При этом разница в площадях распыла

топлива по истечении 80 секунд с момента его распыла форсункой для мощности излучателя СВЧ волн 500 Вт и 700 Вт несущественна.

5. Оценка цетанового числа топлива, проведенная до (51 единица) и после воздействия на него СВЧ излучения мощностью 700 Вт (51 единица), позволяет предположить отсутствие в нем существенных структурных преобразований. Снижение расхода топлива дизелем происходит для обоих случаев применения СВЧ обработки, однако наилучшие показатели достигаются при мощности СВЧ излучателя, равной 700 Вт, и составляют 9,67%.

6. Было установлено, что обработка топлива СВЧ излучением при мощности излучателя 500 Вт уменьшает дымность выхлопных газов дизеля Д-243 на 4,7%, при мощности 700 Вт – на 6,5%. Кроме того, при мощности СВЧ излучателя 700 Вт зафиксировано следующее снижение вредных выбросов по отношению к исходным: углеводороды (в пересчете на гексан) – на 41,5%; монооксид углерода – на 32,6%; формальдегид – на 15,8%; бензол полностью исключен.

## 5. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

### 5.1 Выбор параметров устройства СВЧ обработки и методик расчета экономической эффективности

Оценить удельную мощность излучателя для дизельного двигателя Д-243 возможно, определяя из экспериментов «объемную скорость» обработки топлива при мощности излучателя 350 Вт (рис.4.9-4.12):

$$100 \text{ мл в течение } 90 \text{ с} \Rightarrow 100 \text{ мл} : 90 \text{ с} = 1,11 \text{ мл/с.} \quad (5.1)$$

Тогда, принимая во внимание данные таблицы 3.2 по удельному расходу топлива дизелем (166 г/л.с.·ч) при мощности (81 л.с.), определим часовой и объемный расход топлива (для плотности  $\rho = 0,84 \text{ г/мл}$  [106])

$$166 \text{ г/л.с.} \cdot \text{ч} \cdot 81 \text{ л.с.} = 13446 \text{ г/ч;} \quad (5.2)$$

$$13446 \text{ г/ч} : 0,84 \text{ г/мл} = 16007 \text{ мл/ч} \text{ или } 16007 \text{ мл/ч} : 3600 \text{ с/ч} = 4,4 \text{ мл/с.} \quad (5.3)$$

Разделив последнее значение на результат вычисления по формуле (4.1) и умножив на мощность СВЧ излучателя, получим мощность излучателя для дизеля Д-243:

$$W_{\text{Д-243}} = 4,4 \text{ мл/с} : 1,11 \text{ мл/с} \cdot 350 \text{ Вт} = 1402 \text{ Вт.} \quad (5.4)$$

Аналогичные результаты будут получены при одновременном двукратном увеличении объема обрабатываемого топлива и мощности СВЧ излучателя (рис.4.13-4.16).

При КПД магнетрона  $\approx 80\%$  и найденной по формуле (5.4) мощности 1402 Вт, потребляемая мощность устройством для СВЧ обработки топлива составит 1750 Вт.

Для практической реализации устройства для СВЧ обработки топлива была предложена конструкция, представленная на рис.5.1. При его разработке были приняты во внимание наиболее близкие по технической сущности запатентованные решения [90; 165].



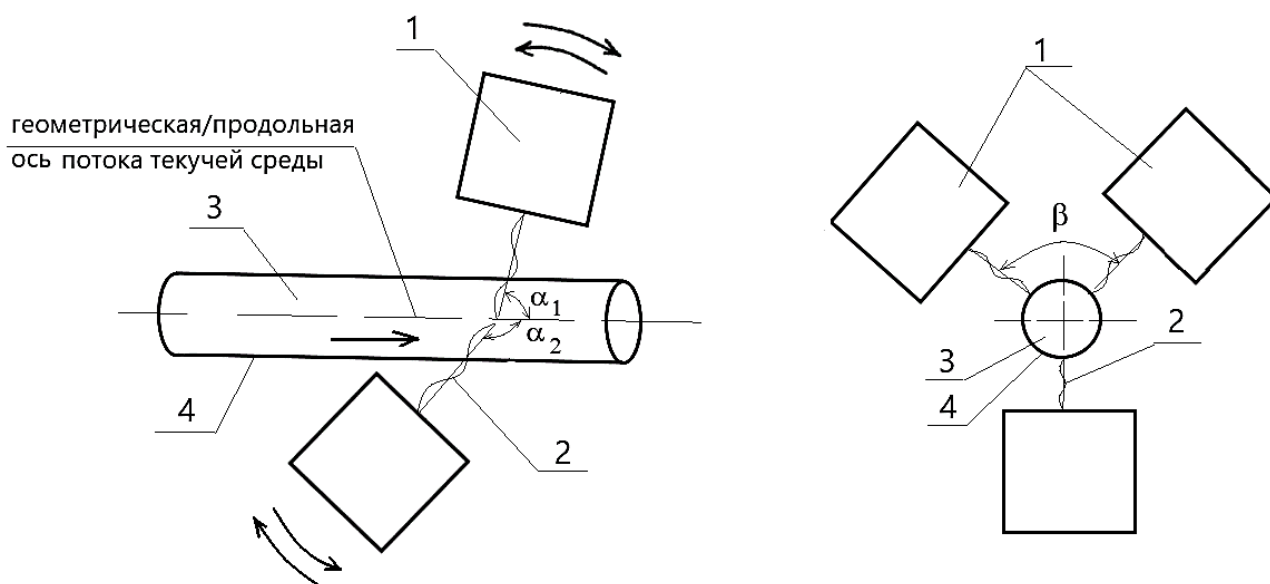


Рисунок 5.1 – Общая схема устройства для СВЧ обработки дизельного топлива:

1 – блок, генерирующий СВЧ излучение; 2 – волновод; 3 – поток текучей среды; 4 – труба со стенками, проницаемыми для СВЧ излучения

Устройство содержит блоки 1 с выходящими из них волноводами 2, они располагаются перпендикулярно к целевому обрабатываемому потоку топлива 3, который движется по топливопроводу 4, изготовленному из проницаемого материала для СВЧ излучения, при этом излучатели располагаются звездообразно под углом  $\beta$  друг к другу. Блоки 1 с волноводами 2 установлены относительно геометрической/продольной оси (плоскости поперечного сечения) потока 3 под углом  $\alpha$  больше либо меньше  $90^0$  относительно нее ( $\alpha_1 < 90^0$ ,  $\alpha_2 > 90^0$ ) и имеют возможность изменять этот угол в процессе обработки, например, с помощью сервоприводов (не показаны). Поскольку  $\alpha \neq 90^0$ , то избегается влияние излучения одного волновода 2 на излучение оппозитно (зеркально) ему расположенного волновода (в случае четного количества волнопроводов 2 или блоков 1).

Работа устройства осуществляется следующим образом. Относительно потока 3 текучей среды, заключенной в трубу 4, материал стенок которой проницаем для СВЧ излучения, располагают блоки 1, генерирующие СВЧ излучение, с выходящими из них волноводами 2. При этом в поперечной плоскости

трубы 4 – перпендикулярно потоку 3 текучей среды – звездообразно устанавливаются четное или нечетное количество волноводов 2 (или блоков 1 с волноводами 2) под углом  $\beta$  друг к другу. Относительно геометрической (продольной) оси трубы 4 (потока 3 текучей среды) волноводы 2 исходно устанавливаются под углом  $0 < \alpha_1 < 90^\circ$  или  $90^\circ < \alpha_2 < 180^\circ$ . Такая установка волноводов 2 относительно продольного и поперечного сечения трубы 4 позволяет в широком диапазоне изменять области СВЧ обработки потока 3 текучей среды, в том числе затрагивая только пристеночные слои потока 3.

Регулировка интенсивности СВЧ обработки потока 3 текучей среды достигается изменением мощности каждого из блоков 1, включением одного, нескольких или всех сразу блоков 1, а также изменением угла  $\alpha$  наклона волновода 2 (блока 1 с волноводом 2) относительно геометрической (продольной) оси трубы 4 (потока 3) – это обеспечивает максимально широкий диапазон обработки потока 3 текучей среды.

Предлагаемое устройство, в отличие от известных, позволяет выборочно или комплексно подключать блоки СВЧ излучения, создавая пространственно-сложные области обработки, что позволяет интенсифицировать этот процесс. Кроме того, в предлагаемой конструкции возможно поочередное использование магнетронов с целью недопущения их перегрева в процессе непрерывной работы.

Для этих же целей может быть использовано жидкостное охлаждение магнетрона, организуемое подключением с помощью шлангов к штатной системе охлаждения двигателя (рис.5.2) [135].

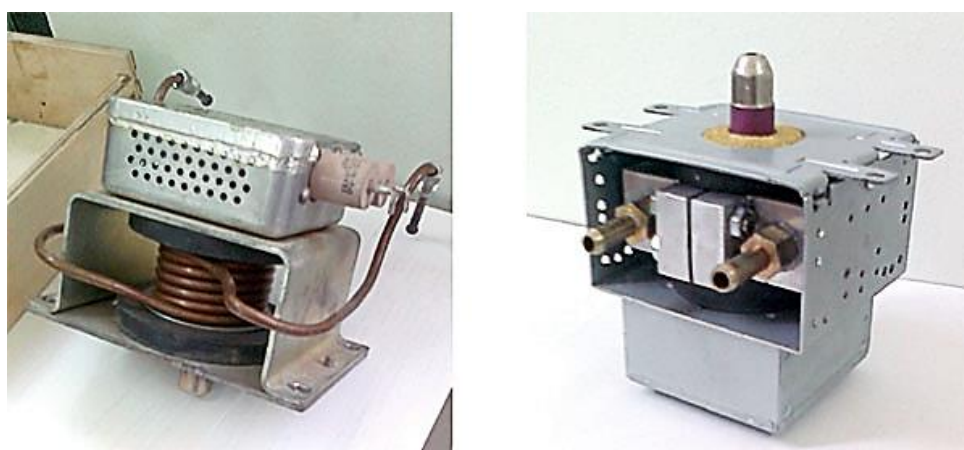


Рисунок 5.2 – Магнетроны с жидкостным охлаждением

Воздушное и жидкостное охлаждение магнетрона позволяют реализовать два независимых варианта его расположения:

1. Магнетрон находится рядом с топливопроводом (перед его входом в ТНВД), и его волновод направлен непосредственно на проникаемую для СВЧ излучения вставку (например, ПВХ трубка), которая врезана в топливную систему дизеля. При этом охлаждение источника излучения возможно вентилятором системы охлаждения дизеля, если он находится в зоне обдува, или отдельным независимым кулером, который будет частью устройства;

2. Топливопровод из системы питания дизельного двигателя, со вставкой из проникаемого материала для СВЧ излучения, подводится к волноводу магнетрона, имеющего возможность жидкого охлаждения. Охлаждение магнетрона будет происходить за счет врезки в штатную систему жидкого охлаждения дизеля.

Первый вариант предполагает размещение магнетрона вдали от панели управления с обязательной защитой от внешних загрязнений, второй – непосредственно интегрированным в ней.

В обоих случаях состав устройства для СВЧ обработки топлива будет содержать большинство компонентов, входящих в состав типовой микроволновой печи (рис.5.3) [112]. Схема микроволновой печи Sharp, которая может быть взята за основу проектирования устройства СВЧ обработки топлива, приведена на рисунке 5.4 [155].

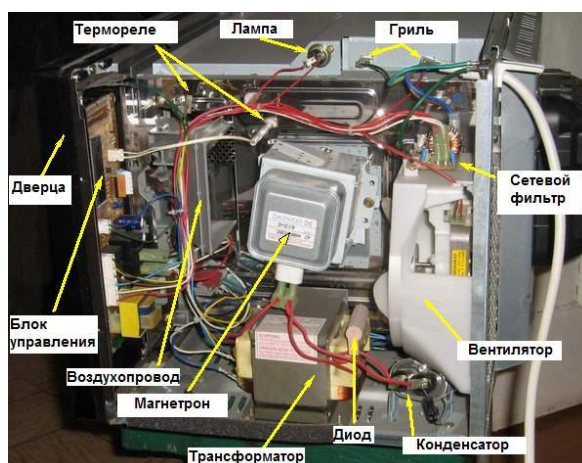


Рисунок 5.3 – Примерный состав устройства для СВЧ обработки топлива

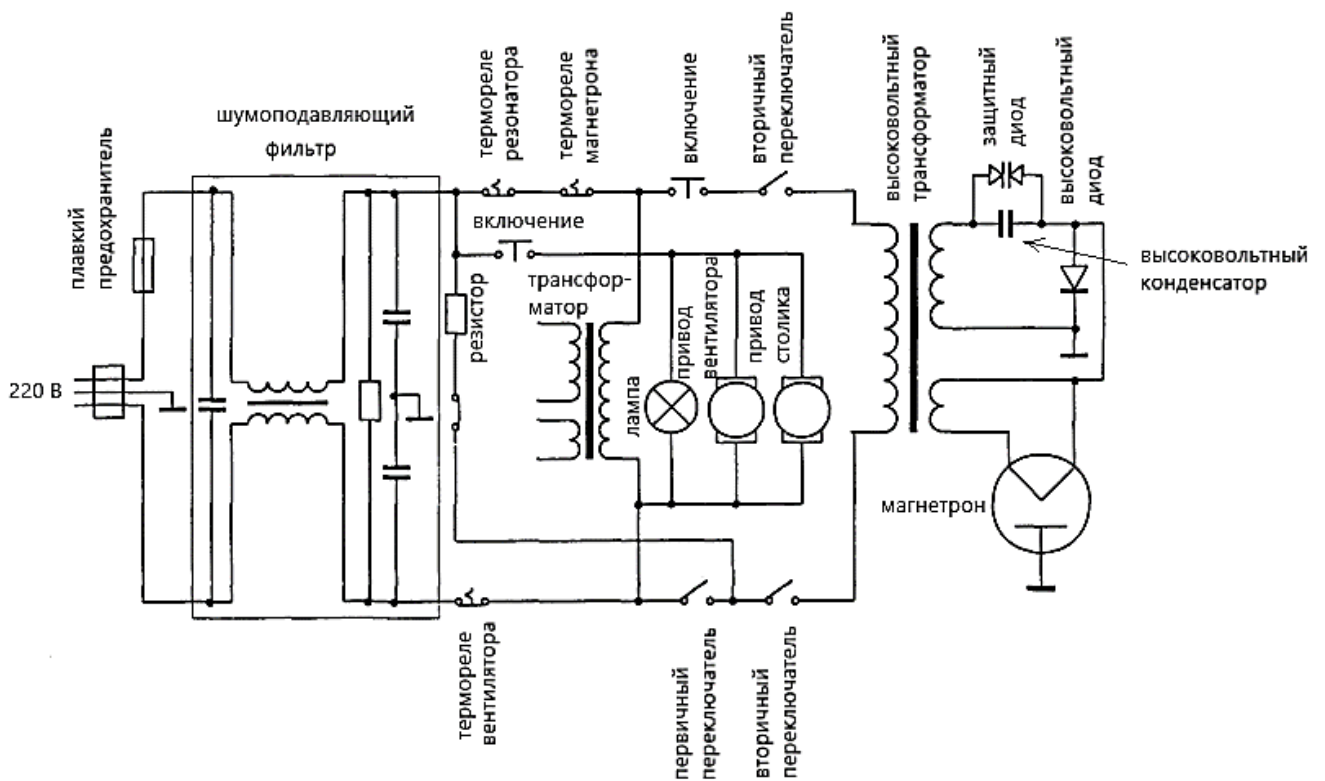


Рисунок 5.4 – Электрическая схема микроволновой печи Sharp

Для внедрения устройства для обработки топлива волнами СВЧ диапазона в топливную систему дизелей, нужно провести изменения в электрической схеме микроволновой печи (рис. 5.4), как показано на рисунке 5.5.

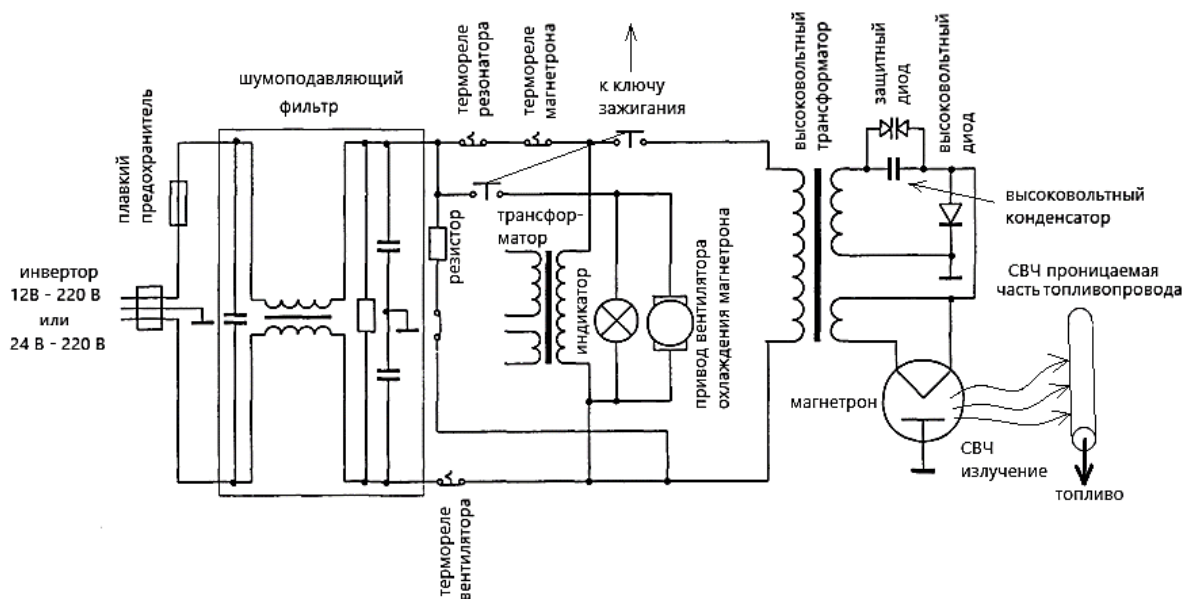


Рисунок 5.5 – Электрическая схема устройства для СВЧ обработки топлива на базе микроволновой печи

В этом случае необходимо изменить и конструкцию зоны воздействия СВЧ излучения на топливо – простейшим вариантом будет сохранение только блока управления магнетроном с выводом его волновода непосредственно на трубку топливопровода (рис.5.6), пронизаемую для СВЧ излучения (рис.5.7).

В качестве основы для выполнения устройства обработки топлива можно выбрать микроволновую печь с механическим управлением мощностью магнетрона (рис.5.8).

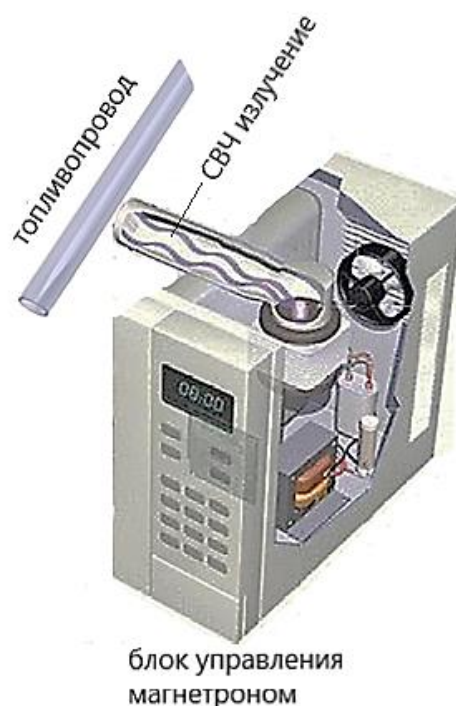


Рисунок 5.6 – Общая схема устройства воздействия волн СВЧ диапазона на топливо



Трубка ПВХ маслобензостойкая 12x15 мм

[ozon.ru/product/](https://ozon.ru/product/)

656 P

Рисунок 5.7 – Трубка топливопровода, пронизаемая для СВЧ излучения





Микроволновая печь соло  
Accesstyle MS20K100W

[market.yandex.ru/product/](https://market.yandex.ru/product/)

4499,

Рисунок 5.8 – Микроволновая печь как основа для реализации устройства обработки топлива

Для запитывания блока управления магнетрона от бортовой сети транспортного средства необходимо использовать инвертор 12 В/220 В или 24 В/220 В мощностью 1500 Вт. Инвертор соединяется непосредственно с аккумулятором транспортного средства проводами большого сечения (рис.5.10), а потребитель – небольшого (рис.5.11).

Общая схема соединения инвертора с потребителем показана на рисунке 5.12, при этом, если выбрана показанная на рисунке система заземления ИТ, то к инвертору в автомобиле можно подключить единственного потребителя [1].



Автомобильный преобразователь  
напряжения 1500 Вт 12В-220В инвертор  
Lvsuan автомобильный 1500w 12v-220v

[market.yandex.ru/product/](https://market.yandex.ru/product/)

3653,



Инвертор с 24 v на 220 v 1500 w

[market.yandex.ru/product/](https://market.yandex.ru/product/)

3590,

Рисунок 5.9 – Инверторы 12 В/220 В и 24 В/220 В мощностью 1500 Вт



Рисунок 5.10 – Провода, соединяющие инвертор с аккумулятором



Рисунок 5.11 – Провода, соединяющие выход инвертора со входом потребителя

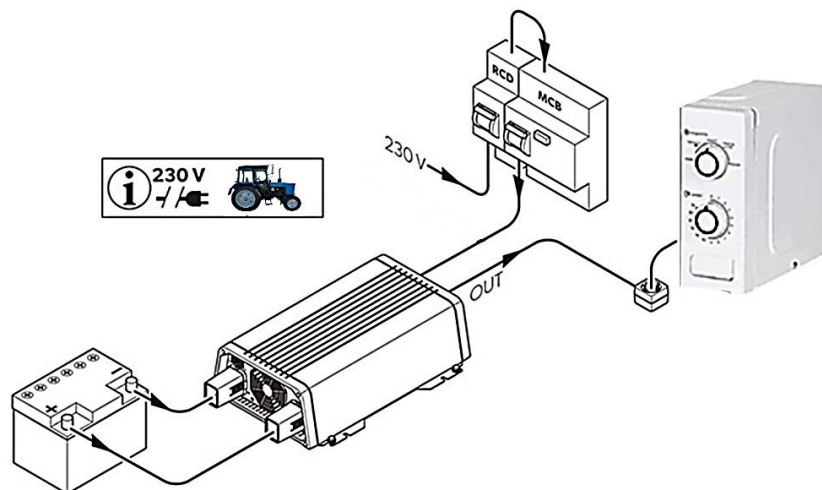


Рисунок 5.12 – Общая схема соединения инвертора с устройством управления магнетроном

Рассчитаем затраты денежных средств на выполнение устройства по обработке топлива волнами СВЧ диапазона с одним магнетроном, выполненном по схеме, показанной на рисунке 5.12, с учетом цен на комплектующие, приведенных на рисунках 5.7-5.11.

Затраты на внедрение устройства для СВЧ обработки топлива в систему питания дизеля определялись по формуле[108]:

$$Z_m = Z_{од} + Z_{пд} + Z_{пр} + Z_{оп}, \quad (5.5)$$

гдеЗм – общие затраты на модернизацию, руб.;

Зод–работы по модернизации СВЧ устройства, руб.;

Зпд– цена деталей и материалов, используемых для изготовления устройства, руб.;

Зпр – фонд заработной платы производственных рабочих, занятых на работах по изготовлению устройства для СВЧ обработки топлива, руб.;

Зоп– общепроизводственные расходы по установке устройства для СВЧ обработки топлива в единицу сельскохозяйственной техники, руб.

Данные по расчету сведены в таблицу 5.1, при этом для автоматических выключателейRCD и МСВ(рис.5.12) принята стоимость 1134 руби 2168 руб, соответственно [157].

Таблица 5.1 – Расчёт затрат на изготовление и установку устройства для обработки топлива волнами СВЧ диапазона

Наименование	Стоимость, руб
Микроволновая печь	4499
Инвертор 12 В/220 В мощностью 1500 Вт	3653
Автоматический выключатель МСВ	2168
Автоматический выключатель RCD	1134
Провода, соединяющие инвертор с аккумулятором, 1 м	900
Провода, соединяющие выход инвертора со входом устройства управления магнетроном, 5 м	221
Трубка ПВХ маслобензостойкая 12х15, 5 м	656
Работы по модернизации электрической схемы устройства управления магнетроном (по аналогии с установкой автомагнитол с резкой металла или пластика – [105])	до 1170
Проводка моторного отсека	до 1800
Подторпедная проводка	до 3600
Нестандартные электротехнические работы 1000 руб/час (за 2 часа)	2000
Работы по проведению топливопровода в зону СВЧ излучения магнетрона и его закреплению на блоке управления (по аналогии с заменой топливопровода [37])	1200
Общая стоимость	23001



Таким образом, затраты на производство и установку одного устройства для СВЧ обработки топлива составят 23001 рубль.

## **5.2. Оценка экономической эффективности трактора МТЗ 80, укомплектованного устройством СВЧ обработки топлива**

Технические характеристики трактора МТЗ-80 [55], который был выбран для проведения производственных исследований по обработке дизельного топлива волнами СВЧ диапазона, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Технические характеристики трактора МТЗ 80

Двигатель	
Тип	дизель без турбонаддува, с непосредственным впрыском топлива
Мощность, л.с./кВт	81,6/60
Модель	Д-243
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об./мин.	2200
Число цилиндров, шт.	4
Диаметр цилиндров/ход поршня, мм	110 x 125
Рабочий объем, л	4,75
Максимальный крутящий момент, Н·м	298
Коэффициент запаса крутящего момента, %	15
Емкость топливных баков, л	130
Трансмиссия	
Коробка передач	механическая, ступенчатая
Муфта сцепления	сухая, однодисковая
Число передач вперед/назад	18/4
Скорость движения, км/ч: вперед/назад	1,9–34,3/4,09–9,22

Задний ВОМ:	
независимый I, об./мин.	540
независимый II, об./мин.	1000
синхронный, об./м пути	3,4
Гидросистема	
Грузоподъемность на оси подвеса, кг	3200
Максимальное давление, Мпа	20
Производительность насоса, л/мин.	45
Емкость гидросистемы, л	25
Размеры и масса	
Общая длина, мм	4120
Ширина, мм	1970
Высота по рулевому колесу, мм	2780
База трактора, мм	2370
Колея, мм	
по передним колесам	1350 – 1850
по задним колесам	1800 – 2100
Агротехнический просвет, мм	645
Наименьший радиус поворота, м	3,8
Масса эксплуатационная, кг	3770
Размеры шин (стандарт)	
передних колес	9,0 – 20
задних колес	15,5R38
Электрооборудование	
Аккумулятор 12V 120Ан 12-120	12 В

Полевые испытания трактора МТЗ-80 с интегрированным устройством для СВЧ обработки топлива происходили на базе хозяйства ООО «Привольное» в Старожиловском районе (Приложение Е).

Целью испытаний было сравнение топливной экономичности трактора МТЗ-80 (рис.5.13), укомплектованного штатной системой топливоподачи двигателя Д-243 и модернизированной системы топливоподачи, включающей устройство для СВЧ обработки топлива, содержащее компоненты, указанные в таблице 5.1 (рис.5.14-5.15).



Рисунок 5.13 – Трактор МТЗ-80, выбранный для производственных испытаний



Рисунок 5.14 – Соединение инвертора с аккумулятором трактора МТЗ-80





Рисунок 5.15 – Врезка в штатный топливопровод дизеля Д-243 трактора МТЗ-80 и заведение ответвления топливопровода в зону обработки волнами СВЧ диапазона

Устройство управления было установлено справа от водителя в кабине трактора, при этом зона обработки микроволновой печи была уменьшена (не нарушая герметичность камеры обработки) и развернута вниз – в сторону подвески трактора (рис.5.16).



Рисунок 5.16 – Микроволновая печь с уменьшенной зоной обработки

Сравнительные испытания проводились в течение 11 месяцев, в период с 01.03.2023 г. по 31.01.2024 г., за это время трактор использовался на различных видах работ, таких как пахота, боронование, культивирование, внесение удобрений, уборка снега. За время производственных испытаний трактор

расходовал от 11 л/ч (уборка снега) до 19 л/ч (пахота), при этом продолжительность его работы за указанный период составила 530 мото-часов (262 мото-часа при выключенном устройстве для СВЧ обработки топлива и 268 мото-часа при включенном) (рис.5.17).



Рисунок 5.17 – Показания контрольных приборов трактора МТЗ-80:  
а – до начала производственных испытаний; б – после их проведения

При эксплуатации трактора МТЗ-80 со штатной системой (при выключенном устройстве для СВЧ обработки топлива) средний расход топлива был зафиксирован на уровне 18,73 л/ч, а при включенном устройстве для СВЧ обработки топлива – 17,55 л/ч. Таким образом, разница в потреблении топлива при включенном и выключенном устройстве для СВЧ обработки топлива составила 1,18 л/ч или 6,3%. Тогда для указанного периода производственных испытаний экономия топлива составила 316,24 л, что позволило получить экономический эффект за этот период в размере 20046,45 руб (цена на дизельное топливо на 24.01.2024 г. составила 63,39 руб/л).

Для определения экономической эффективности устройства для СВЧ обработки топлива рассчитаем величину эксплуатационных расходов [108]:

$$A_0 = \frac{C \cdot B}{100}, \quad (5.6)$$

где  $A_0$  – величина эксплуатационных расходов, руб;

$C$  – балансовая стоимость устройства, руб;

$B$  – норма годовых амортизационных отчислений, %.

Исходные данные для расчёта экономической эффективности представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3– Экономическая эффективность применения устройства для СВЧ обработки топлива

№ п/п	Показатели	Устройство для СВЧ обработки топлива
1	Стоимость устройства СВЧ обработки топлива с его установкой в трактор МТЗ-80, руб	23001
2	Амортизационные отчисления (12,5%), руб	3450,15
3	Среднегодовое время эксплуатации трактора МТЗ-80, мото-часов	600
4	Величина уменьшения расхода топлива (6,3%), л	708
5	Расчётная годовая экономия (при стоимости дизельного топлива 63,39 руб/л), руб	44880
6	Срок окупаемости, лет	0,59

Таким образом, расчетная годовая экономия для одного трактора МТЗ-80, эксплуатируемого на различных видах работ при среднегодовом времени его использования в течение 600 мото-часов, составит 44880 руб при сроке окупаемости устройства для СВЧ обработки топлива 7,5 месяцев.

### 5.3. Выводы по пятой главе

1. Расчетное значение мощности излучателя для дизеля Д-243 – с учетом экономии топлива 9,67% и улучшении основных экологических параметров – составило 1072 Вт. При коэффициенте полезного действия магнетрона порядка 80% потребляемая мощность устройством для СВЧ обработки топлива составит 1340 Вт.

2. Затраты денежных средств на изготовление и монтаж устройства для обработки топлива волнами СВЧ диапазона для широко применяемого в агропромышленном комплексе дизельного двигателя Д-243 трактора МТЗ-80 составили 23001 рублей.

3. Изменение топливной системы дизельного двигателя Д-243 трактора МТЗ-80 путем установки в его топливопровод устройства для СВЧ обработки топлива позволила снизить расход дизельного топлива трактором на 6,3%. При эксплуатации трактора МТЗ-80 на различных видах работ при среднегодовом времени его использования в течение 600 мото-часов расчетная годовая экономия составит 44880 руб при сроке окупаемости устройства для СВЧ обработки топлива 7,5 месяцев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ показал, что до конца не изучены вопросы, связанные с изменением характеристик топлива, которые непосредственно оказывают влияние на процессы распыления дизельного топлива. При этом СВЧ воздействие оказывается более эффективным в условиях низких температур окружающей среды и больших объемах обрабатываемого топлива в единицу времени.

2. Получены зависимости, описывающие распыление топлива в камеру сгорания дизеля, с учетом поправочных коэффициентов в виде регрессионных уравнений, учитывающих начальную температуру топлива и время, прошедшее с момента его обработки СВЧ излучением, что позволяет на основе определения изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения топлива оценивать каплеобразование в камере сгорания дизельного двигателя. При этом все уравнения значимы, а средняя ошибка аппроксимации не превышает 13,8%.

3. Установлено:

- процессы перемешивания слоев дизельного топлива продолжают происходить после 1 часа после завершения обработки волнами СВЧ диапазона и завершаются к 24 часам с момента ее окончания, а существенные изменения в значениях кинематической вязкости завершаются к 50<sup>0</sup>С;

- основным параметром воздействия на значения коэффициента поверхностного натяжения и кинематической вязкости дизельного топлива является соотношение мощности, приходящейся на определенный объем топлива за определенный период времени;

- площадь распыла топлива после СВЧ обработки увеличивается на 17...23% по отношению к площади распыла необработанного топлива, что связано с большим углом распыла обработанного топлива и большей мелкодисперсностью образуемых капель дизельного топлива, при этом разница в площадях распыла топлива по истечению 80 секунд с момента его распыла форсункой для мощности излучателя СВЧ волн 500 Вт и 700 Вт незначительна;



- оценка цетанового числа топлива, проведенная до и после воздействия на него СВЧ излучения, позволяет предположить отсутствие в нем фиксируемых структурных преобразований;

- наибольшее снижение расхода топлива дизелем достигается при мощности СВЧ излучателя, равной 700 Вт, и составляют 9,67%, при этом зафиксировано следующее снижение вредных выбросов по отношению к исходным: углеводороды (в пересчете на гексан) – на 41,5%; монооксид углерода – на 32,6%; формальдегид – на 15,8%; бензол – полностью исключен, а дымность отработанных газов уменьшилась на 6,5%.

4. Данное техническое решение позволило снизить расход дизельного топлива трактором МТЗ-80 на 6,3%. При среднегодовом времени его использования в течение 600 мото-часов, а годовой эффект от экономии денежных средств на дизельное топливо составил 44880 рублей при окупаемости устройства для СВЧ обработки топлива 7,5 месяцев.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Необходимо провести работу по усовершенствованию устройства для СВЧ обработки дизельного топлива с учетом различных характеристик дизельных двигателей и условий эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в агропромышленном комплексе.

### **Рекомендации производству**

Для снижения затрат на топливо рекомендуется изменение топливной системы с учетом использования устройства для обработки топлива волнами СВЧ диапазона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономные энергосистемы. URL: <https://advanced-power.ru/knowledge/kak-podklyuchit-invertor-v-avtomobil/>
2. Анисимов И.А., Горбунова А.Д. Приспособленность технологических машин и транспортных средств к эксплуатации в условиях «умных» городов северных регионов за счет применения СВЧ нагрева // Вестник Евразийской науки, 2019 №6, <https://esj.today/PDF/57SAVN619.pdf>
3. Антонов, Д.В., Ребров, А.К., Стрижак, П.А. Влияние схемы нагрева неоднородной капли на характеристики микровзрывной фрагментации / Доклады Академии наук, 2019, том 488, № 4, с. 372–376
4. Апробированное совершенствование сервиса автотракторных двигателей / А. В. Дунаев, А. Е. Ломовских, И. Ф. Пустовой, А. С. Саяпин // Технический сервис машин. – 2021. – № 1(142). – С. 24-33. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-1-24-33.
5. Апробированное совершенствование сервиса автотракторных двигателей / А. В. Дунаев, Ю. В. Родионов, А. Е. Ломовских [и др.] // Наука в центральной России. – 2020. – № 6(48). – С. 81-90. – DOI 10.35887/2305-2538-2020-6-81-90.
6. Байтимеров, Р.М. Разработка дизельной системы топливоподачи с управляемой формой характеристики впрыскивания с использованием математического моделирования – Автореф. дисс...канд.техн.наук, Челябинск, 2016. – 16 с.
7. Бакланова, Ю.О. Развитие промышленного производства биоэтанола в России как одно из приоритетных направлений развития альтернативной энергетики // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. ISSN 1999-2645. – №4 (12). Номер статьи: 1201. Дата публикации: 30.12.2007. Режим доступа: <https://eee-region.ru/article/1201/>
8. Бартнев, В.И. Влияние санкционного давления на продовольственную безопасность: традиционные и новые измерения / Пути к миру и безопасности. №

2 (63) 2022. – с.11-37

9. Бешлягэ, И.И., Малай, Л.Г. Анализ термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания, работающих на биодизеле / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип. 48. 2018. – с.3-11

10. Бондаренко, И. И. Современные системы инструментального offline-/online-контроля расхода топлива и мониторинга режимов работы автотракторной техники / И. И. Бондаренко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 4 (73). – С. 4–14

11. Бурак, П. И. Анализ наработки на отказ зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов / П. И. Бурак, И. Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 5(299). – С. 27-31. – DOI 10.33267/2072-9642-2022-5-27-31.

12. Бурак, П. И. Обновление парка сельскохозяйственной техники в рамках ведомственного проекта «Техническая модернизация агропромышленного комплекса / П. И. Бурак, И. Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 7(313). – С. 2-7.

13. Бурак, П. И. Обновление парка сельскохозяйственной техники в рамках реализации ведомственного проекта "техническая модернизация агропромышленного комплекса" / П. И. Бурак, И. Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 6(288). – С. 2-5. – DOI 10.33267/2072-9642-2021-6-2-5.

14. Бусин, И. В. Исследование параметров синтеза биотоплива под воздействием ультразвука / И. В. Бусин, Ю. В. Мещерякова // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 3 (55). С. 56-62.

15. Вершинин, О.С. Система измерения расхода топлива на транспортных средствах в условиях эксплуатации и ее аппаратурная реализация. – автореф.дисс...канд.тех. наук. Казань. 2009, 16 с.

16. Винокуров, Е. (ред.), Ахунбаев, А., Чуев, С., Усманов, Н., Забоев, А., Малахов, А., Перебоев, В., Ксенофонтов, М., Ползиков, Д., Потапенко, В., Шалимов, В. (2023) Продовольственная безопасность и раскрытие агропромышленного потенциала Евразийского региона. Доклады и рабочие

документы 23/1. Алматы: Евразийский банк развития. – 128 с. URL: <https://eabr.org/analytics/special-reports/>

17. Власов, А.А., Ильвес, Р.Л., Кюют, А.Я., Ольт, Ю.Р. Применение биоэтанола второго поколения в малообъемном двигателе и влияние на экологические показатели / Транспорт на альтернативном топливе. 2016. №2 – с. 34-42

18. Волков, А.В. Расчет испарения и динамики движущихся капель топлива / «Молодой учёный». № 51 (237). Декабрь 2018. – с.19-30

19. Вуколов Э.А. Регрессионный анализ. Методические указания по курсу «Статистика». – М.: МИЭТ, 2000. – 52 с.

20. Гвоздев, А. А. Уменьшения интенсивности изнашивания при электрическом воздействии на масла / А. А. Гвоздев, А. В. Дунаев // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 3. – С. 385-391.

21. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Редакция 2.2 (6.2019). Королёв, 2019 г. 63 с.

22. Глобальный регистр. Добавление 13: Глобальные технические правила № 13. ECE/TRANS/180/Add.13/Appendix 1. 19 July 2013. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29r-1998agr-rules/ece-trans-180-a13app1r.pdf>

23. Глушков, Д.О., Захаревич, А.В., Стрижак, П.А., Сыродой, С.В. Эволюция во времени температуры капли композиционного жидкого топлива при взаимодействии с потоком нагретого воздуха / Теплофизика и аэромеханика, 2016, том 23, № 6. – с.923-934

24. Голубев, И.Г. Руденко, И.И. Изменение параметров топливоподачи дизеля при работе на смесевом топливе с биодобавками из рапсового масла // Аграрная наука – сельскому хозяйству: XVI Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул, 2021. С. 16–18

25. Горемыко, В.М., Соколов, В.Н. Водородное топливо как способ сохранения окружающей среды / Техническое регулирование в транспортном

строительстве. №1 (27), 2018. – с.85-88

26. ГОСТ 305-2013. Межгосударственный стандарт. Топливо дизельное. Технические условия. – 10 с.

27. ГОСТ Р 51250-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. Дата введения 2000-01-01. – 19 с.

28. ГОСТ Р 52709–2019. Топлива дизельные. Определение цетанового числа. – 30 с.

29. ГОСТ Р ИСО 11898-1-2015. Транспорт дорожный. Местная контроллерная сеть (CAN). Часть 1. Канальный уровень и передача сигналов

30. ГрачевС.В., СмагинД.С., СавельевР.С., НапреенкоК.С., ЗининаА.И. Концепция моделирования топливной системы с учетом требований сертификации // Computational nanotechnology. 2020. Т.7. № 3. С. 45–51

31. Грехов, Л.В. Выбор и обоснование типа и параметров топливоподающей аппаратуры перспективных дизелей / Л.В. Грехов, А.А. Денисов, Е.Е. Старков. Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – №18. – с.11-14

32. Григорович, Д.Н. Применение биотоплива на железнодорожном транспорте / «Транспорт на альтернативном топливе» № 1 (13). 2010. – с.59-65

33. Давыдова, С. А. Класс экологичности современных сельскохозяйственных тракторов / С. А. Давыдова, И. А. Старостин // АгроЭкоИнфо. – 2020. – № 2(40). – С. 19.

34. Данные о мировой энергетике и климате - ежегодник 2023. Внутреннее потребление нефтепродуктов. URL: <https://energystats.enerdata.net/oil-products/world-oil-domestic-consumption-statistics.html>

35. Дергунов, В.С. Анализ состояния рынка компримированного природного газа в России / Транспорт на альтернативном топливе. №5 (77). 2020. – с.70-77

36. Джаббарова, Л.Ю. Мустафаев, И.И. Меликова, С.З. Влияние радиационного излучения на нефтяные топлива / Международный журнал

прикладных и фундаментальных исследований. №7 (ч.2), 2017. – с. 239-243

37. Диагностика топливопровода. URL: <https://red-aleti.ru/diagnostika/diagnostika-toplivnoj-sistemy/>

38. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А. А. Жешко, В. Е. Тарасенко, О. Ч. Ролич, А. В. Дунаев // Технический сервис машин. – 2021. – № 1(142). – С. 55-64. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-1-55-64.

39. Землепользование в сельском хозяйстве в цифрах. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). URL: <http://www.fao.org/sustainability/news/detail/ru/c/1274219/>

40. Иванов, О. Учет расхода топлива и ГСМ. МСС ГЛОНАСС. Федеральный оператор по мониторингу полного цикла. URL: <https://mssglonass.ru/articles/uchet-rashoda-topliva-i-gsm/>

41. Измеритель дымности отработавших газов модификации: МЕТА-01 МП 0.1, МЕТА-01 МП 0.2. Руководство по эксплуатации М 006.000.00-03 РЭ. Научно-производственная фирма «МЕТА». – С. 3-24. URL: [https://eksacom.ru/shop/upload/meta/meta-01mp01\\_manual.pdf](https://eksacom.ru/shop/upload/meta/meta-01mp01_manual.pdf)

42. Индикатор расхода топлива DFM. Руководство по эксплуатации. 14 с. URL: <https://rasxodomer.org/docs>

43. Исследование влияния биодизельного топлива на работу топливной аппаратуры / В. А. Марков, А. Г. Мещеряков, Ю. В. Мещерякова, С. А. Нагорнов // Грузовик. – 2022. – № 2. – С. 17-25. – DOI 10.36652/1684-1298-2022-2-17-25.

44. Исследование влияния водно-топливной эмульсии на эксплуатационные показатели дизельного двигателя / С. В. Борисов, А. Е. Ломовских, А. В. Дунаев [и др.] // Технический сервис машин. – 2021. – № 2(143). – С. 54-61. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-2-54-61.

45. Исследование влияния металлоплакирующей присадки на эксплуатационные характеристики силовых установок машин / А. Ф. Наджи Наджм, А. А. Волков, И. Г. Голубев [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 8(302). – С. 31-34.

46. Исследование дизельного смесевоего топлива, обработанного в комбинированном смесителе / А. Г. Мещеряков, Ю. В. Мещерякова, С. А. Нагорнов [и др.] // Наука в центральной России. – 2022. – № 3(57). – С. 111-119. – DOI 10.35887/2305-2538-2022-3-111-119.

47. Исследование топливоподачи дизеля, работающего на биотопливе / С. А. Нагорнов, В. А. Марков, Ю. В. Мещерякова [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 7-11. – EDN YXZYAM.

48. Каперзов, А.О., Герасимов, В.С. Применение биоэтанола в сельском хозяйстве / Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №2(31). – с. 25-31

49. Каримходжаев Н., Нумонов М.З. Сравнительный анализ токсичности выхлопных газов автомобилей и пути ее снижения // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2020. 11(80). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10963>

50. Князев, В.Ю. Проникновение микроволнового излучения в воду (эффект «самопросветления») /В.Ю.Князев, И.А.Косый, Н.И.Малых, Е.С.Ямпольский / Журнал технической физики. 2003. Т.73, Вып.11. – с.133-136

51. Комитет Государственной Думы по энергетике. Круглый стол на тему «Развитие рынка природного газа как моторного топлива: проблемы и пути решения». 18 апреля 2023. URL: <http://komitet-energo.duma.gov.ru/novosti/af077b04-4933-4b72-9b30-54140512a151>

52. Комитет по энергетике при рассмотрении проекта бюджета особое внимание уделил вопросам донастройки топливного рынка. Государственная Дума федерального собрания Российской Федерации. (9.10.2023). URL: <http://duma.gov.ru/news/58010/>

53. Контроль расхода топлива на предприятии. ЭРА-ГЛОНАСС. Оператор навигационно-телематических услуг. URL: <https://eraglonass.ru/kontrol-rasxoda-topliva-na-predpriyatii/>

54. Крюков Ю.А. Разработка методов математического моделирования ламинарных течений вязкой несжимаемой жидкости в слое с межфазной границей – Дисс. ...канд.техн.наук, Самара, 2018. 143 с.

55. Ксенович, И.П. Тракторы МТЗ-80 и МТЗ-82: учебники и учебные пособия [Текст]/ И. П. Ксенович, С. Л. Кустанович, П. Н. Степанюк и др. – М.: Колос, 1984. – 254 с.
56. Кудрявцева О.В., Митенкова Е.Н., Маликова О.И., Головин М.С. Развитие альтернативной энергетики в России в контексте формирования модели низкоуглеродной экономики // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. 2019. № 4. С. 122–139
57. Кузнецов, Г.В. Производство биотоплива в развивающихся странах: проблемы и перспективы / Национальные интересы: приоритеты и безопасность. №45 (186). 2012. – с.53-63
58. Курдин, А., Скрыбина, В., Федоренко, Д., Федоров, С. Развитие электротранспорта потребует увеличения электрогенерации на 4,8 ТВт⋅ч / Энергетические тренды. №110. июль 2022. – 18 с.
59. Левшин, А. Г. Развитие мобильной энергетики с учётом агротехнологических ограничений / А. Г. Левшин, И. Н. Гаспарян, И. Г. Голубев // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 26-32. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-4-26-32.
60. Литвинова, С. 9 трендов – 2023 Анализируем главное в АПК за истекший год / ЩелковоАргохим. Декабрь 2023. №11(53). URL: [https://betaren.ru/news/9-trendov-2023-analiziruem-glavnoe-v-apk-za-istekshiy-god/?journal\\_id=13932](https://betaren.ru/news/9-trendov-2023-analiziruem-glavnoe-v-apk-za-istekshiy-god/?journal_id=13932)
61. Лышевский, А. С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А. С. Лышевский. – М.: Машгиз, 1963. – 180 с.
62. Ляхов, А. П. Физические характеристики дизельного топлива и их влияние на работу двигателя / А. П. Ляхов, Г. И. Кошля // Перспективные технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. научно-практич. конф., Минск, 11-12 апреля 2013 г.: В 2 ч. Ч. 2. - Минск: БГАТУ, 2013. - С. 104-108
63. Максимова, Е. Второй после рекорда. Производство зерна в России может превысить 140 млн т. Агроинвестор. (22 ноября 2023). URL:



<https://www.agroinvestor.ru/markets/article/41325-vtoroy-posle-rekorda-proizvodstvo-zerna-v-rossii-mozhet-prevysit-140-mln-t/>

64. Мальцев, Н.Г., Карпиевич, Ю.Д. Современные методы контроля расхода топлива и их применение для мониторинга режимов работы автотракторной техники / Пленарные доклады. Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. с.35-39. URL: <https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/3763/1/Malcev-N-G-Sovremennye-metody-kontrolya-raskhoda-topliva-i-ih-primeneniye.pdf>

65. Маматкулов, М.О., Хасилов И.Н. Диметиловыйэфир (ДМЭ) – экологическичистоетопливо / ScienceandInnovationInternationalScientificJournal. Vol.1, Issue 5, UIF-2022: 8.2. – с. 121-124. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7017979>

66. Марков, В.А., Бебенин, Е.В. Использование природного газа в качестве моторного топлива для автотранспорта и сельскохозяйственных машин / Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. №5, 2016. – с.3-11

67. Маслов, Ю.Л., Лавров, Б.П. Использование СВЧ-технологий для активации горения углеводородных топлив в теплоэнергетических установках. URL: <http://piston-engines.ru/images/konferencia/2010/articles/402-406.pdf>

68. Мещерский И. В. «Динамика точки переменной массы» // В кн. И. В. Мещерский. Работы по механике тел переменной массы. Изд. 2-е. – М.: ГИТТЛ, 1952. – 280 с.

69. Мещеряков, А. Г. Исследование работы топливной аппаратуры трактора на смесевом топливе с встроенным модульным смесителем / А. Г. Мещеряков, С. А. Нагорнов, Ю. В. Мещерякова // Наука в центральной России. – 2021. – № 5(53). – С. 90-95. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-5-90-95.

70. 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. – DOI 10.35887/2305-2538-2022-1-71-81.

71. Мещерякова, Ю. В. Исследование кавитационного процесса в ультразвуковом смесителе / Ю. В. Мещерякова, С. А. Нагорнов // Наука в

центральной России. – 2024. – № 1(67). – С. 48-56. – DOI 10.35887/2305-2538-2024-1-48-56.

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

73. Мещерякова, Ю. В. численное моделирование течения потоков моторного топлива в ультразвуковой камере активатора / Ю. В. Мещерякова, С. А. Нагорнов, Е. Б. Ложкина // Наука в центральной России. – 2023. – № 2(62). – С. 17-26. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-2-17-26.

74. Мещерякова, Ю.В. Разработка технологического процесса получения биодобавок из липидных компонентов микроводоросли хлорелла для улучшения свойств дизельного топлива – дисс... канд.техн.наук. Тамбов, 2016. – 174 с.

75. Милютин, Л.В. Моделирование процессов влияния физико-химических показателей метиловых эфиров рапсового масла на характеристики впрыскивания и распыливания топлива / Л. В. Милютин, А. В. Чулков, П. Г. Петров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 25 – 33

76. Мировые тенденции в области использования биодизельного топлива / С. А. Нагорнов, А. Н. Зазуля, И. Г. Голубев, М. Н. Болотина // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 10(316). – С. 2-5. – DOI10.33267/2072-9642-2023-10-2-5.

77. Морозова, В.С. Метод расчета течения вязкой среды в каналах распылительной форсунки дизеля / В.С. Морозова, В.С. Гун, В.Л. Поляцко // Вестник ЮУрГУ Сер. «Машиностроение». – 2013. – Вып. 13. – № 2. – С. 75–80

78. Мосдизель РФ. Цена на дизтопливо автотранспортом (базис - МНПЗ) в руб./тн с 2011 года. Аналитические графики движения цен на дизельное топливо. (23.11.2023). URL:

[http://мосдизель.рф/rynok\\_diztopliva/analitika\\_cen\\_diztopliva.php](http://мосдизель.рф/rynok_diztopliva/analitika_cen_diztopliva.php);

79. Мукатова, М.Д., Чан Ньонг Тхи. Обоснование и разработка технологии производства биодизеля из жиродержащих рыбных отходов / Вестник АГТУ.

Сер. Рыбное хозяйство. 2012. № 2. – с.158-163

80. Нагорный, В.Д., Джагендра, С.Р. Перспективы производства биотоплива в Индии / Вестник РУДН. Сер. Агронимия и животноводство. №2. 2011. – с.16-22

81. Наурусов, А. И. Исследование характеристик смесей нефтяное дизельное топливо/биодизельное топливо из отработанного растительного масла / А. И. Наурусов, И. А. Богданов; науч. рук. И. А. Богданов // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л. П. Кулёва и Н. М. Кижнера, посвященной 85-летию со дня рождения профессора А. В. Кравцова, Томск, 15-19 мая 2023 г.: в 2 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2023. — Т. 2. — С. 95-96

82. Овчинников, Е. В. Автоматизированная система повышения эффективности и экологических показателей гусеничных движителей / Е. В. Овчинников, А. С. Овчаренко, К. С. Дмитриев // Экология промышленного производства. – 2023. – № 2(122). – С. 44-47. – DOI 10.52190/2073-2589\_2023\_2\_44.

83. Овчинников, Е. В. Повышение экологических показателей газодизельного двигателя / Е. В. Овчинников, С. Ю. Уютов, А. С. Овчаренко // Экология промышленного производства. – 2023. – № 4(124). – С. 44-46. – DOI 10.52190/2073-2589\_2023\_4\_44.

84. Овчинников, Е. В. Система подачи жидкого газомоторного топлива в камеру сгорания дизельного двигателя / Е. В. Овчинников, С. Ю. Уютов, В. А. Крючков // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 3(55). – С. 26-33. – DOI 10.18286/1816-4501-2021-3-26-33.

85. Овчинников, Е. В. Улучшение качеств рапсового масла для использования в дизельном двигателе / Е. В. Овчинников, С. Ю. Уютов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15, № 4(60). – С. 85-89. – DOI 10.12737/2073-0462-2021-85-89.

86. Овчинников, Е. В. Экономическая оценка экологических показателей газодизельного трактора / Е. В. Овчинников, С. Ю. Уютов, М. Е. Чаплыгин //

Экология промышленного производства. – 2022. – № 2(118). – С. 49-52. – DOI 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_49.

87. Определение режимов ультразвуковой кавитационной обработки моторного топлива / Ю. В. Мещерякова, И. В. Бусин, С. А. Нагорнов, А. В. Щегольков // Наука в центральной России. – 2023. – № 4(64). – С. 96-106. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-4-96-106.

88. Патент № 2527005 МПК F23K 5/12, F02M 25/022, F02M 31/00, F02M 27/04 Способ подготовки жидкого топлива к сжиганию в камере сгорания / Б.Н. Антипов, А.С. Лопатин, С.М. Купцов, К.Х. Шотиди, А.М. Короленок, заявл. 2013.03 №292013114173/06, опубл. 2014.08.27

89. Патент № 2546891 МПК F02M 43/00, B01F 11/02, B01F 3/08, F02D 19/08. Ультразвуковой смеситель растительного масла и минерального топлива / А.П.Уханов, Д.А.Уханов, И.Ф.Адгамов, заявка № 2014112926/06, заяв.2014.04.02, опубл. 2015.04.10

90. Патент № №2306448 F02M27/04 Способ обработки топлива и устройство для его осуществления / Скотин В.А., Степанов Ю.Б. заявл. 2005-04-07, опубл. 20.09.2007

91. Патент №2075619 МПК F02 M27/08. Устройство для обработки жидкого топлива кавитацией /А.В. Афанасьев, Н.Н.Лимарь, С.А. Андреев, Г.П. Варламов, А.А. Кардаков, В.А. Кардаков, С.К. Левандовский, заявка № 94038565/06, заяв.13.10.1994, опубл. 20.03.1997

92. Патент №2381262. Способ переработки животного жира в жидкое топливо. МПК C11C 3/04 / Лисицын А.Б., Бабурина М.И., Иванкин А.Н., Горохов Д.Г. заявл. 03.04.2008 №2008112639/13, опубл. 10.02.2010 Бюл. № 4

93. Патент №2419745 F23K5/12. Турбулизированный кавитатор-эмульсатор тяжелых нефтепродуктов / В.С.Бороздин. заявл. 15.03.2010, опубл. 27.05.2011

94. Патент на изобретение № 2463472 РФ, F02M27/04, F02B51/04, F02M29/00. Устройство для энергонасыщения жидкого топлива / Симдянкин А.А., Симдянкина Е.В., Кайкацишвили Г.З (РФ). №: 2010112901/06; Заявлено 02.04.2010;

Опубликовано 10.10.2012. Бюл. № 28

95. Патент на изобретение № 2647355 РФ, F02M 37/08, F02M 37/14, F02M 27/08. Бензонасос с гомогенизацией топлива / Пуков Р.В., Симдянкин А.А., Юхин И. А., Бышов Н.В, Борычев С.Н., Успенский И.А., Кокорев Г.Д. (РФ). № 2016123834; Заявлено 15.06.2016; Опубликовано 15.03.2018. Бюл. № 8

96. Патент на изобретение №2435649 РФ, B05B1/00. Топливный кавитатор / Потапков Д.В.; Любинский С.В (РФ). № 2010128402/05; Заявлено 08.07.2010; Опубликовано 10.12.2011. Бюл. № 34

97. Перспективное мобильное энергетическое средство / З. А. Годжаев, Е. В. Овчинников, А. С. Овчаренко, С. Ю. Уютов // Экология промышленного производства. – 2024. – № 1(125). – С. 60-62. – DOI 10.52190/2073-2589\_2024\_1\_60.

98. Перспективные направления использования аддитивных технологий в ремонтном производстве / И. Г. Голубев, А. С. Апатенко, Н. С. Севрюгина [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 6(312). – С. 35-38.

99. Перспективные направления цифровизации в сфере технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники / И. Г. Голубев, В. В. Быков, М. И. Голубев [и др.] // Технический сервис машин. – 2023. – Т. 61, № 4(153). – С. 18-25. – DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-4-18-25.

100. Пирсол И. Кавитация [Текст] / Пер. с англ. Ю. Ф. Журавлёва. под ред., с предисл. и доп. Л. А. Эпштейна. – М.: Мир, 1975. – 96 с.

101. Погуляев, Ю.Д., Байтимеров, Р.М., Наумов, В.Н., Чижов, Д.А., Машков К.Ю. Новая система топливоподачи для дизельного двигателя, позволяющая управлять давлениями предварительных впрысков и впрысков после основного. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 3(105). 2014. – с.178-184

102. Полухин, А.А. Потребление энергоресурсов в сельском хозяйстве Российской Федерации. Агрофорум. Экономика АПК. №1 февраль 2019. – с.24-25

103. Постановление Правительства РФ от 5 октября 2023 года №1635, №1636, №1637. URL: <http://government.ru/news/49711/>

104. Правительство России. Новости. Александр Новак провёл совещание

по ситуации на внутреннем рынке нефтепродуктов. URL:  
<http://government.ru/news/50386/>

105. Прайс-лист на услуги автоэлектрика. URL: [https://angar18.com/wp-content/uploads/2020/06/Prajs\\_Avtoelektrika\\_i\\_elektronika.pdf](https://angar18.com/wp-content/uploads/2020/06/Prajs_Avtoelektrika_i_elektronika.pdf)

106. Приказ Минэнерго России от 19.06.2003 N 231 (зарегистрированным в Минюсте России 20.06.2003, рег. N 4804

107. Пуков, Р. В. Устройство для ультразвуковой обработки топлива / Р. В. Пуков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2017. – № 3(35). – С. 127-131.

108. Пуков, Р.В. Улучшение показателей автотракторных дизельных двигателей путем ультразвуковой обработки топлива. – дисс. на соиск....канд. техн. наук. Рязань. – 2018. – 166 с.

109. Разработка металлоплакирующей присадки для деталей узлов трения сельскохозяйственных машин / С. М. Гайдар, Т. И. Балькова, И. Г. Голубев [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 10(292). – С. 41-44. – DOI 10.33267/2072-9642-2021-10-41-44.

110. Распоряжение Минтранса от 14.03.2008 №АМ-23-р. Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_76009/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_76009/)

111. Расчетная оценка топливной экономичности колесных и гусеничного тракторов на возделывании подсолнечника / В. В. Косенко, З. А. Годжаев, П. В. Потапов, М. П. Горюнков // Тракторы и сельхозмашины. – 2023. – Т. 90, № 1. – С. 73-82. – DOI 10.17816/0321-4443-112161.

112. Ремонт микроволновой печи. URL: [https://www.elremont.ru/svch/bt\\_rem20.php](https://www.elremont.ru/svch/bt_rem20.php)

113. Ресурсосберегающие биотехнологии производства альтернативных видов топлива в животноводстве: науч. аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. – 52 с.

114. Рудаков, В.Ю. Метод расчета геометрических параметров топливной струи для открытых камер сгорания среднеоборотных дизелей / Математическое и

компьютерное моделирование машин и систем. Машиностроение и инженерное образование, 2011, №3. – с. 33-41

115. Руководство по эксплуатации. Двигатели Д-242, Д-243, Д-245 и их модификации. – Минск: Минский тракторный завод, 2009. – С. 5-7. URL: [https://dizelmmz.ru/f/rukovodstvo\\_dizel\\_d242\\_d243\\_245.pdf](https://dizelmmz.ru/f/rukovodstvo_dizel_d242_d243_245.pdf)

116. Руководство по энергетической статистике. Международное энергетическое агентство. 192 с. URL: [https://rosstat.gov.ru/metod/manualrussian\\_web.pdf](https://rosstat.gov.ru/metod/manualrussian_web.pdf)

117. Сафина, Д.Н. Перспективы производства компонентов моторных топлив из биомассы / Д.Н. Сафина, И.Ш. Хуснутдинов, А.Г. Сафиулина, Р.Р. Заббаров, А.З. Шангараева / Вестник технологического университета. 2021. Т.24, №9. С.19-41

118. Севрюгина, Н. С. Повышение ресурсных возможностей технологических машин на мелиоративных работах / Н. С. Севрюгина, А. С. Апатенко, И. Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 1(295). – С. 35-38. – DOI 10.33267/2072-9642-2022-1-35-38. – EDN GPDGHW.

119. Сивухин Д. В. § 89. Поглощение света и уширение спектральных линий // Общий курс физики. – М., 2005. – Т. IV. Оптика. – С. 582–583

120. Сизова Т.М. Статистика: учебное пособие. – СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2013. – 176 с.

121. Симдянкин, А.А. Воздействие ультразвуковой обработки смазочного масла на работу трибосопряжения с оценкой остаточных эффектов в масле / А.А.Симдянкин, И.А.Успенский, Н.В.Бышов, М.Н.Слюсарев // Тезисы: Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2019), 25–28 июня 2019 г. Гомель, Беларусь, с.172

122. Синьков, А.С., Лужнов, В.С. Анализ безопасности CAN-шины транспортных средств / Вестник УрФО. № 27. 2018, с.29–33

123. Смолин А.А. Повышение качества смесеобразования при пуске дизелей в условиях низких температур с помощью СВЧ колебаний – дисс. на соиск....канд.техн. наук, Омск 2013. – 136 с.

124. Соболенко, А.Н., Флорианская М.В. Расчет теплоемкости продуктов сгорания компримированного газового топлива марок «А» и «Б» в дизелях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 65–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-65-74
125. Сорокин, В. Е. Изменение характеристик дизельного топлива при его обработке волнами СВЧ диапазона / В. Е. Сорокин, А. Н. Бачурин, А. А. Симдянкин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2024. Т.16, №1, С. 133-140 [https:// doi.org/ 10.36508/RSATU.2024.48.32.018](https://doi.org/10.36508/RSATU.2024.48.32.018)
126. Сорокин, В. Е. Учет в теоретических зависимостях изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения дизельного топлива вследствие воздействия волн СВЧ диапазона / В. Е. Сорокин, А. Н. Бачурин, А. А. Симдянкин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 196. – С. 101-114. – DOI 10.21515/1990-4665-196-011.
127. Справочник по индикаторным трубкам и MicroTubes компании Dräger Любек. Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2021. – 426 с. URL: <https://www.draeger.com/Content/Documents/Content/tubes-and-cms-hb-9072506-ru.pdf>
128. Спутниковые навигационные системы. Решения мониторинга для сельского хозяйства. URL: <https://navitrust.ru/agro-glonass/>
129. Срезневский Б.И. Об испарении жидкостей / Б.И. Срезневский // ЖРФХО. - 1882. -Т. 14, Вып. 8. - С. 420-442
130. Старостин, И. А. Анализ мировых тенденций снижения экологической нагрузки при использовании мобильных энергетических средств в коммунальном, дорожно-строительном и сельском хозяйстве / И. А. Старостин, Е. В. Овчинников, А. В. Ещин // Экология промышленного производства. – 2023. – № 3(123). – С. 54-60. – DOI 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_54.
131. Статистическое моделирование распада, дисперсии и испарения



жидких капель при высокой турбулентности: Монография /Аскарова А.С., Болегенова С.А., Оспанова Ш.С.- Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 158 с.

132. Султанбеков, Р.Р. Обоснование влияния состава судовых остаточных топлив на образование осадков при хранении в резервуарах – Дисс. ...канд.техн.наук, Санкт-Петербург, 2021. 136 с.

133. Терехов, В.И., Терехов, В.В., Шишкин, Н.Е. Экспериментальное и численное исследование нестационарного процесса испарения жидкости / I Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. MIF 2008. Minsk. May 1-23, 2008

134. Тиунов, В.В., Лыкасов, П.В. Анализ проблем использования водородного топлива на транспорте и в энергетике / Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. Т.1, 2019. – с. 231-236

135. Тихонов, В.Н. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов / Тихонов В.Н., Иванов И.А., Крюков А.Е., Тихонов А.В., Гладышев В.А. / Агроэкотех. URL: <https://agroecotech.ru/index.php/stati/byudzhetye-generatory-dlya-mikrovolnovykh-plazmotronov>

136. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости: учебное пособие / В.В. Остриков, С.А. Нагорнов, О.А. Клейменов, В.Д. Прохоренков, И.М. Курочкин, А.О. Хренников, Д.В. Доровских. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн.ун-та, 2008. – 304 с.

137. Уютов, С. Ю. Оценка эффективности систем адаптации газодизельного двигателя для работы в закрытых помещениях / С. Ю. Уютов, Е. В. Овчинников, М. Е. Чаплыгин // Экология промышленного производства. – 2022. – № 1(117). – С. 42-49. – DOI 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_42.

138. Уютов, С. Ю. Применение сжиженного углеводородного газа в качестве топлива в тракторных дизельных двигателях / С. Ю. Уютов, З. А. Годжаев // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – Т. 89, № 6. – С. 387-393. – DOI 10.17816/0321-4443-123187.

139. ФАО, МФСР, ЮНИСЕФ, ВПП и ВОЗ. 2022. Краткий обзор. Положение дел в области продовольственной безопасности и питания в мире – 2022. Переориентация политики в области продовольствия и сельского хозяйства в

интересах повышения экономической доступности здорового питания. Рим, ФАО.  
<https://doi.org/10.4060/cc0640ru>

140. Федотов, В.В. Создание малогабаритных магнетронов непрерывного действия мощностью 1-3 кВт и СВЧ камеры для кухонных СВЧ печей на частоте 915 МГц. Дисс. на соис...канд.техн. наук. г. Фрязино, 2017. – 92 с.

141. Хайдаров Г. Г., Хайдаров А. Г., Машек А. Ч., Майоров Е. Е. Влияние температуры на поверхностные натяжения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4 (Физика, химия). 2012. Выпуск 1. с.24-28

142. Хлопков, С.В. Улучшение показателей двигателей автомобилей агропромышленного комплекса ультразвуковой очисткой электромагнитных форсунок – Дисс. ...канд.техн.наук, Москва, 2020. 119 с.

143. Цены на топливо: между рынком и регулированием / А.Голяшин, А.Кудрин, А.Коломиец, В.Скрябина, Д.Федоренко, С.Федоров. Энергетический бюллетень, декабрь 2021, №103

144. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты: докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 13-30 апр. 2021 г. / Г. И. Абдрахманова, К. Б. Быховский, Н. Н. Веселитская, К. О. Вишневский, Л. М. Гохберг и др.; рук. авт. кол. П. Б. Рудник; науч. ред. Л. М. Гохберг, П. Б. Рудник, К. О. Вишневский, Т. С. Зинина; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. – 239, [1] с.

145. Чаплыгин, М. Е. Современные требования к техническому уровню зерноуборочных комбайнов / М. Е. Чаплыгин, С. А. Давыдова, А. В. Подзорнов // Технический сервис машин. – 2020. – № 4(141). – С. 29-39. – DOI 10.22314/2618-8287-2020-58-4-29-39.

146. Черепица, С.В. Определение инспектируемых параметров дизельного топлива методом газовой хроматографии / С.В. Черепица, С.М. Бычков, А.Н. Коваленко, А.Л. Мазаник, Н.М. Макоед, Н.Н. Гремяко, Д.Е. Кузменков, Я.Л. Лучинина. Фундаментальные и прикладные физические исследования. 2002–2009 гг.: сборник научных трудов. – с.392-401

147. Членство в Палате – инструмент совместного развития. Торгово-промышленная палата РФ. Новости, мнения, анонсы. (25.01.2023). URL: <https://news.tpprf.ru/ru/regional/4036072/>

148. Шаихов, Р.Ф. Повышение топливной экономичности сельскохозяйственной техники при работе навесного оборудования / Транспорт. Транспортные сооружения. Экология, № 2, 2020. – с. 94-100

149. Шальнова, Г. Альтернативные виды топлива для сельского хозяйства. Аргобизнес. (21 июня 2022). URL: <https://agbz.ru/articles/alternativnyye-vidy-topliva-dlya-selskogo-khozyaystva/>

150. Шамарин, Ю.А., Руденко, И.И., Титов, В.А. Организация рационального использования моторного топлива на АТП / Аграрный научный журнал. 2023. №11. С. 205–211

151. Шибков, В.М. Воспламенение с помощью поверхностного СВЧ-разряда жидких углеводородов в условиях высокоскоростных воздушных потоков / В.М. Шибков, Л.В. Шибкова, А.А. Карачев, Р.С. Константиновский. Теплофизика высоких температур, 2010, № 1 (дополнительный), с. 23–34

152. Шхагошев Р.В., Шхагошев Р.В., Тлябичев Ш.В. Современные вызовы системы продовольственной безопасности Российской Федерации // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2023. № 3. С. 147–152

153. Экологические показатели работы дизелей на моторном топливе с биодобавками из микроводорослей / С. А. Нагорнов, А. Н. Зазуля, Ю. В. Мещерякова, И. Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 2(284). – С. 40-43.

154. Экономическая оценка экологических показателей трактора, работающего на рапсовом масле / Е. В. Овчинников, С. Ю. Уютов, А. В. Лавров, К. С. Дмитриев // Экология промышленного производства. – 2022. – № 4(120). – С. 20-25. – DOI 10.52190/2073-2589\_2022\_4\_20.

155. Электрическая схема микроволновой печи Sharp. URL: <https://vashtehnik.ru/mikrovolnovyue-pechi/ustrojstvo-mikrovolnovoj-pechi.html>

156. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р – 93 с.

157. AliExpress. Автоматические выключатели. URL: <https://aliexpress.ru/popular/mcb-rccb-rcd-type-a.html>

158. Balcombe et al. (2018). The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302983>

159. Gorokhovski M., Jouanguy J., Chtab-Desportes A. Stochastic model of the near-to-injector spray formation assisted by a high-speed coaxial gas jet // *Fluid Dynamics Research*. – 2009. – Vol. 41, №3. – 15 p.

160. IEA (2021). Net Zero by 2050. A roadmap for the global energy sector. Paris: International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

161. Kolmogorov A.N. Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence // *Doklady Akad. Nauk SSSR*. – 1941. – Vol. 32. – P. 16–18.

162. Krause, P., Klyus, O. Application of surface tension parameter for estimation of fuel atomization process in Diesel engines / *Scientific Journals. Maritime University of Szczecin*. 2013, 36(108) z. 2 pp. 98–101

163. Lebedev, Y.A. Microwave Discharges in Liquid Hydrocarbons: Physical and Chemical Characterization. *Polymers* 2021, 13, 1678. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13111678>

164. Narmatovich K. I. et al. Technology of Producing Dme // *Academic Journal of Digital Economics and Stability*. – 2021. – T. 9. – С. 127-133

165. Patent EP 2 490 801 B1 B01J 19/12 (2006.01) H05B 6/80 (2006.01), A23L 3/01 (2006.01), A23L 3/22 (2006.01), A61L 2/00 (2006.01) A61L 2/12 (2006.01), A61L 2/24 (2006.01) Method for treating a fluid with microwave radiation/ Zadyraka Yu.V, Gritsinin S.I., Misakyan M.A., Kossyl I.A., Barkhudarou E.M. Date of publication of application: 29.08.2012, Bulletin 2012/35

166. Patent EP 2 490 801 B1 Int Cl.: B01J 19/12, H05B 6/80, A23L 3/01, A23L 3/22, A61L 2/00, A61L 2/12, A61L 2/24. Method for treating a fluid with microwave

radiation / Yu.V.Zadyraka, S.I.Gritsinin, M.A.Misakyan, I.A.Kossyl, E.M.Barkhudarou, date of filing: 23.10.2009, application number: 09756542.8. Date of publication and mention of the grant of the patent: 28.06.2017 Bulletin 2017/26

167. Patent US9,095,835 B2 MIIK BOI, I/2 CIOG 15/08 Method for processing hydrocarbon fuels using mcrowave energy / G.L. Skoptsov; A.A. Johnson. Appl. No.: 14/464,345 Filed: Aug. 20, 2014, Date of Patent: Aug. 4, 2015

168. Politico. EU aims to inflict more pain on Russia with second oil price cap. URL: <https://www.politico.eu/article/eu-to-suggest-100-a-barrel-price-cap-on-russian-diesel/>

169. Reuters. Russia ramps up diesel supplies to Turkey and Morocco ahead EU embargo. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/russia-ramps-up-diesel-supplies-turkey-morocco-ahead-eu-embargo-2023-01-18/>

170. Rosin P., Rammler E. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal // Journal of the Institute of Fuel. 1933. Vol. 7, no. 31. P. 29-36

171. Simdiankin, A. Qualitative modeling of liquids' aperture of discontinuity during the acoustic cavitation / A. Simdiankin, I.Uspensky, M.Slyusarev, I.Danilov / Advances in the Astronautical Sciences. 2nd. Cep. "2nd IAA/AAS Conference on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials, SciTech Forum 2019" 2021. C. 631-641.

172. Simdiankin, A. The Effect of Ultrasonic Treatment of a Lubricating Oil on the Operation of a Tribological Assembly and the Assessment of the Residual Effects in the Oil / A. Simdiankin, N.Byshov, I.Uspensky, M.Slyusarev / Journal of Friction and Wear, 40(5), 461-467 DOI:10.3103/S1068366619050167

173. Simdiankin, A.A. Accounting for the time of ultrasonic fuel processing in the surface tension coefficient / A.A. Simdiankin, N.V.Byshov, I.A.Uspensky, R.V. Pukov / ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. T. 14. № 21. C. 3753-3756.

174. TASS Russian news agency. Russia's oil output, export remain at December level in January, says Novak. URL: [https://tass.com/economy/1564599?utm\\_source=b1.ru&utm\\_medium=referral&](https://tass.com/economy/1564599?utm_source=b1.ru&utm_medium=referral&)

utm\_campaign=b1.ru&utm\_referrer=b1.ru

175. UNUSAUTO [Электронный ресурс] // Водородный транспорт – URL:  
<http://unusauto.ru>

176. Weisskopf V. F. American Journal of Physics 53 (1985) 19-20.; V. F. Weisskopf, American Journal of Physics 53 (1985) 618—619

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Технические параметры октанометра ПЭ 7300

4.1	Виды контролируемого топлива	-	автомобильные бензины и дизельные топлива всех марок
4.2	Диапазон измерений октанового числа бензинов	-	66 - 98
4.3	Диапазон измерений цетанового числа дт.	-	30 – 70
	Погрешности измерения величины		
	- октанового числа	-	не более $\pm 1,0$
	- цетанового числа	-	не более $\pm 1,0$
4.5	Время измерения, сек	-	не более 10
4.6	Электропитание	-	батарея типа 6F22 напряжением 9 В, сеть 220В $\pm 10\%$ через сетевой адаптер
4.7	Время непрерывной работы, ч	-	не менее 10
4.8	Рабочие условия эксплуатации октанометра:		
	- температура окружающего воздуха, °С	-	от -10 до +35
	- относительная влажность воздуха	-	95% при t=35°С
	- атмосферное давление, мм.рт.ст.	-	630 – 800
4.9	Габаритные размеры, мм, не более:		
	- электронный блок	-	76 × 210 × 23
	- датчик	-	Ø 48 × 110
4.10	Масса всего, кг, не более	-	1,2
	в том числе:		
	- электронный блок	-	не более 0,8
	- датчик	-	не более 0,3
4.11	Показатели безотказной работы “Октанометра”:		
	- наработка на отказ, ч	-	не менее 1000



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты измерения температуры дизельного топлива, разлитого в емкости различного объема, до обработки СВЧ излучением

СВЧ воздействие		Иследуемый образец	Объем	Температура, С			
Мощность	Время			Исходная	Через 0,5 ч	Через 1ч	Через 2ч
0	0	ДТ ( 4-5 °С)	50	5	23	23	23
				5	23	23	23
				6	23	23	23
				<b>5,3</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 18±2 °С)	50	18	23	23	23
				18	23	23	23
				19	23	23	23
				<b>18,3</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 50 °С)	50	48	27	23	23
				48	28	23	23
				49	27	23	23
				<b>48,3</b>	<b>27,3</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( Кипение °С)	50	74	28	23	23
				74	29	23	23
				74	29	23	23
				<b>74,0</b>	<b>28,7</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 4-5 °С)	100	4	23	23	23
				5	23	23	23
				5	23	23	23
				<b>4,7</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 18±2 °С)	100	20	23	23	23
				20	23	23	23
				20	23	23	23
				<b>20,0</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 50 °С)	100	50	30	28	23
				50	30	28	23
				50	30	27	23
				<b>50,0</b>	<b>30,0</b>	<b>27,7</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( Кипение °С)	100	72	30	28	23
				72	30	28	23
				72	30	28	23
				<b>72,0</b>	<b>30,0</b>	<b>28,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 4-5 °С)	200	4	20	23	23
				5	20	23	23
				5	20	23	23
				<b>4,7</b>	<b>20,0</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 18±2 °С)	200	19	23	23	23
				19	23	23	23
				19	23	23	23
				<b>19,0</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( 50 °С)	200	50	32	28	23
				51	33	28	23
				50	32	28	23
				<b>50,3</b>	<b>32,3</b>	<b>28,0</b>	<b>23,0</b>
0	0	ДТ ( Кипение °С)	200	76	34	29	23
				75	34	29	23
				75	34	29	23
				<b>75,3</b>	<b>34,0</b>	<b>29,0</b>	<b>23,0</b>

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Результаты измерений кинематической вязкости при мощности излучателя 350 Вт и воздействии в течение 30 с

СВЧ воздействие		Исследуемый образец	Объем	Температура, С						Кинематическая вязкость			Кинематическая вязкость ( через 0,5 ч)			Кинематическая вязкость ( через 1 ч)			Кинематическая вязкость ( через 24 ч)		
Мощность	Время			Номер опыта	До СВЧ обработки	После СВЧ обработки	через 0,5ч	через 1ч	через 2 ч	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость
350	30	ДТ ( 4-5 °С)	50	1	6	17	23	-	-	1	435	4,85	1	421	4,70	1	405	4,53	1	412	4,60
				2	6	17	23	-	-	2	451	4,42	2	463	4,54	2	465	4,56	2	469	4,60
				3	6	17	23	-	-	3	415	4,44	3	426	4,55	3	421	4,50	3	433	4,63
				ср	6,0	17,0	23,0	-	-	ср	-	4,57	ср	-	4,60	ср	-	4,53	ср	-	4,61
350	30	ДТ ( 18±2 °С)	50	1	19	24	23	-	-	1	391	4,36	1	409	4,56	1	399	4,45	1	412	4,60
				2	19	25	23	-	-	2	450	4,41	2	432	4,24	2	433	4,25	2	474	4,65
				3	19	24	23	-	-	3	405	4,33	3	402	4,30	3	408	4,36	3	425	4,54
				ср	19,0	24,3	23,0	-	-	ср	-	4,48	ср	-	4,37	ср	-	4,35	ср	-	4,60
350	30	ДТ ( 50 °С)	50	1	50	50	26	23	-	1	366	4,08	1	392	4,37	1	405	4,52	1	413	4,61
				2	50	50	26	23	-	2	425	4,17	2	428	4,20	2	463	4,54	2	473	4,64
				3	50	50	26	23	-	3	395	4,22	3	411	4,39	3	421	4,50	3	434	4,64
				ср	50,0	50,0	26,0	23,0	-	ср	-	4,16	ср	-	4,32	ср	-	4,52	ср	-	4,63
350	30	ДТ ( кипение °С)	50	1	71	68	26	23	-	1	360	4,02	1	409	4,56	1	407	4,54	1	413	4,61
				2	72	68	26	23	-	2	401	3,93	2	440	4,31	2	465	4,56	2	462	4,53
				3	72	68	27	23	-	3	383	4,09	3	415	4,44	3	439	4,69	3	423	4,52
				ср	71,7	68,0	26,3	23,0	-	ср	-	4,01	ср	-	4,44	ср	-	4,60	ср	-	4,55
350	30	ДТ ( 4-5 °С)	100	1	4	12	23	-	-	1	417	4,65	1	405	4,52	1	407	4,54	1	415	4,61
				2	4	13	23	-	-	2	454	4,45	2	456	4,42	2	466	4,47	2	476	4,67
				3	4	13	23	-	-	3	425	4,54	3	410	4,38	3	414	4,42	3	421	4,50
				ср	4,0	12,7	23,0	-	-	ср	-	4,55	ср	-	4,44	ср	-	4,48	ср	-	4,59
350	30	ДТ ( 18±2 °С)	100	1	18	24	23	-	-	1	404	4,51	1	415	4,63	1	410	4,57	1	412	4,60
				2	18	24	23	-	-	2	452	4,43	2	451	4,42	2	444	4,35	2	473	4,64
				3	19	25	23	-	-	3	412	4,40	3	432	4,62	3	418	4,47	3	427	4,56
				ср	18,0	24,3	23,0	-	-	ср	-	4,45	ср	-	4,56	ср	-	4,47	ср	-	4,60
350	30	ДТ ( 50 °С)	100	1	51	52	26	23	-	1	383	4,27	1	415	4,63	1	408	4,55	1	415	4,63
				2	51	52	26	23	-	2	415	4,07	2	455	4,46	2	462	4,53	2	465	4,56
				3	51	53	26	23	-	3	395	4,22	3	417	4,46	3	422	4,51	3	432	4,62
				ср	51,0	52,3	26,0	23,0	-	ср	-	4,19	ср	-	4,52	ср	-	4,53	ср	-	4,60
350	30	ДТ ( кипение °С)	100	1	70	66	29	23	-	1	382	4,26	1	405	4,52	1	415	4,63	1	414	4,62
				2	70	65	29	23	-	2	426	4,18	2	454	4,45	2	472	4,63	2	473	4,64
				3	70	66	29	23	-	3	393	4,20	3	415	4,44	3	432	4,62	3	434	4,64
				ср	70,0	65,7	29,0	23,0	-	ср	-	4,21	ср	-	4,47	ср	-	4,63	ср	-	4,63
350	30	ДТ ( 4-5 °С)	200	1	4	11	23	-	-	1	435	4,85	1	405	4,52	1	408	4,55	1	412	4,60
				2	4	11	23	-	-	2	501	4,91	2	444	4,35	2	464	4,55	2	473	4,64
				3	4	11	23	-	-	3	456	4,87	3	408	4,36	3	415	4,44	3	435	4,65
				ср	4,0	11,0	23,0	-	-	ср	-	4,88	ср	-	4,41	ср	-	4,51	ср	-	4,63
350	30	ДТ ( 18±2 °С)	200	1	20	25	23	-	-	1	405	4,52	1	417	4,65	1	415	4,63	1	415	4,63
				2	21	25	23	-	-	2	443	4,34	2	461	4,52	2	458	4,49	2	478	4,69
				3	21	25	23	-	-	3	415	4,44	3	422	4,51	3	415	4,44	3	431	4,61
				ср	20,7	25,0	23,0	-	-	ср	-	4,43	ср	-	4,56	ср	-	4,52	ср	-	4,64
350	30	ДТ ( 50 °С)	200	1	51	51	29	23	-	1	376	4,20	1	398	4,44	1	415	4,63	1	418	4,66
				2	51	51	29	23	-	2	432	4,24	2	431	4,23	2	465	4,56	2	471	4,62
				3	51	51	29	23	-	3	395	4,22	3	405	4,33	3	425	4,54	3	432	4,62
				ср	51,0	51,0	29,0	23,0	-	ср	-	4,22	ср	-	4,33	ср	-	4,58	ср	-	4,63
350	30	ДТ ( кипение °С)	200	1	76	73	29	25	23	1	384	4,28	1	406	4,53	1	405	4,52	1	415	4,63
				2	76	73	29	25	23	2	430	4,22	2	461	4,52	2	468	4,59	2	475	4,66
				3	76	72	29	25	23	3	393	4,20	3	425	4,54	3	427	4,56	3	436	4,66
				ср	76,0	72,7	29,0	25,0	23,0	ср	-	4,23	ср	-	4,53	ср	-	4,56	ср	-	4,65

## Результаты измерений кинематической вязкости при мощности излучателя 500 Вт и воздействии в течение 30 с

СВЧ воздействие		Иследуемый образец	Объем	Температура, С				Кинематическая вязкость			Кинематическая вязкость (через 0,5 ч)			Кинематическая вязкость (через 1 ч)			Кинематическая вязкость (через 24 ч)				
Мощность	Время			Номер опыта	До СВЧ обработки	После СВЧ обработки	Через 0,5ч	Через 1ч	Через 2ч	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость
500	30	ДТ (4-5 °С)	50	1	6	18	23	-	-	1	431	4,81	1	395	4,41	1	407	4,54	1	418	4,66
				2	6	19	23	-	-	2	453	4,44	2	444	4,35	2	435	4,26	2	468	4,59
				3	6	19	23	-	-	3	415	4,44	3	412	4,40	3	421	4,30	3	432	4,62
				ср	6,0	18,7	-	-	ср	-	4,56	ср	-	4,39	ср	-	4,44	ср	-	4,62	
500	30	ДТ (18±2 °С)	50	1	20	27	23	-	-	1	458	5,11	1	398	4,44	1	392	4,37	1	412	4,60
				2	20	27	23	-	-	2	476	4,67	2	448	4,39	2	465	4,56	2	472	4,63
				3	20	27	23	-	-	3	417	4,48	3	410	4,38	3	412	4,40	3	434	4,64
				ср	20,0	27,0	-	-	ср	-	4,64	ср	-	4,41	ср	-	4,45	ср	-	4,62	
500	30	ДТ (50 °С)	50	1	50	51	23	-	-	1	410	4,57	1	425	4,74	1	405	4,52	1	415	4,63
				2	50	52	23	-	-	2	440	4,31	2	473	4,64	2	475	4,66	2	471	4,62
				3	50	52	23	-	-	3	407	4,38	3	425	4,54	3	422	4,51	3	435	4,65
				ср	50,0	51,7	-	-	ср	-	4,41	ср	-	4,64	ср	-	4,56	ср	-	4,63	
500	30	ДТ (кипение °С)	50	1	67	66	23	-	-	1	385	4,30	1	415	4,63	1	411	4,59	1	416	4,64
				2	67	65	23	-	-	2	425	4,17	2	452	4,43	2	455	4,46	2	471	4,62
				3	67	66	23	-	-	3	387	4,14	3	415	4,44	3	422	4,51	3	432	4,62
				ср	67,0	65,7	23,0	-	-	ср	-	4,20	ср	-	4,50	ср	-	4,52	ср	-	4,63
500	30	ДТ (4-5 °С)	100	1	7	20	23	-	-	1	448	5,00	1	421	4,70	1	415	4,63	1	415	4,63
				2	7	19	23	-	-	2	466	4,57	2	451	4,42	2	465	4,56	2	462	4,53
				3	7	19	23	-	-	3	430	4,60	3	425	4,54	3	417	4,46	3	428	4,57
				ср	7,0	19,3	23,0	-	-	ср	-	4,72	ср	-	4,55	ср	-	4,55	ср	-	4,58
500	30	ДТ (18±2 °С)	100	1	20	27	23	-	-	1	426	4,73	1	418	4,66	1	417	4,65	1	419	4,68
				2	20	27	23	-	-	2	445	4,36	2	456	4,47	2	461	4,52	2	461	4,52
				3	20	27	23	-	-	3	434	4,64	3	417	4,46	3	433	4,63	3	429	4,58
				ср	20,0	27,0	23,0	-	-	ср	-	4,59	ср	-	4,53	ср	-	4,60	ср	-	4,59
500	30	ДТ (50 °С)	100	1	49	53	24	23	-	1	387	4,32	1	410	4,57	1	412	4,60	1	420	4,69
				2	49	53	24	23	-	2	437	4,28	2	475	4,66	2	463	4,54	2	458	4,49
				3	49	52	24	23	-	3	402	4,30	3	427	4,56	3	437	4,67	3	425	4,54
				ср	49,0	52,7	24,0	23,0	-	ср	-	4,30	ср	-	4,60	ср	-	4,60	ср	-	4,57
500	30	ДТ (кипение °С)	100	1	63	64	25	23	-	1	391	4,36	1	422	4,71	1	411	4,59	1	418	4,66
				2	63	64	25	23	-	2	437	4,28	2	462	4,53	2	467	4,58	2	464	4,55
				3	63	64	25	23	-	3	398	4,25	3	428	4,57	3	429	4,59	3	435	4,65
				ср	63,0	64,0	25,0	23,0	-	ср	-	4,30	ср	-	4,60	ср	-	4,58	ср	-	4,62
500	30	ДТ (4-5 °С)	200	1	4	11	20	23	-	1	441	4,92	1	400	4,46	1	427	4,76	1	419	4,68
				2	5	11	20	23	-	2	480	4,71	2	453	4,44	2	467	4,58	2	467	4,58
				3	5	10	20	23	-	3	462	4,94	3	421	4,50	3	425	4,54	3	434	4,64
				ср	4,7	10,7	20,0	23,0	-	ср	-	4,86	ср	-	4,47	ср	-	4,63	ср	-	4,63
500	30	ДТ (18±2 °С)	200	1	20	26	23	-	-	1	416	4,64	1	417	4,65	1	417	4,65	1	421	4,70
				2	20	26	23	-	-	2	447	4,38	2	447	4,38	2	451	4,42	2	463	4,54
				3	20	26	23	-	-	3	397	4,24	3	413	4,41	3	420	4,49	3	432	4,62
				ср	20,0	25,7	23,0	-	-	ср	-	4,42	ср	-	4,48	ср	-	4,52	ср	-	4,62
500	30	ДТ (50 °С)	200	1	52	53	24	23	-	1	382	4,26	1	405	4,52	1	418	4,66	1	423	4,72
				2	52	53	24	23	-	2	429	4,21	2	451	4,42	2	457	4,48	2	461	4,52
				3	52	53	24	23	-	3	395	4,22	3	415	4,44	3	435	4,65	3	434	4,64
				ср	52,0	53,0	24,0	23,0	-	ср	-	4,25	ср	-	4,46	ср	-	4,60	ср	-	4,63
500	30	ДТ (кипение °С)	200	1	66	64	26	23	-	1	378	4,22	1	421	4,70	1	407	4,54	1	415	4,63
				2	66	65	26	23	-	2	437	4,28	2	455	4,46	2	462	4,53	2	467	4,58
				3	66	65	26	23	-	3	392	4,19	3	418	4,47	3	425	4,54	3	432	4,62
				ср	65,7	64,7	26,0	23,0	-	ср	-	4,23	ср	-	4,54	ср	-	4,54	ср	-	4,61



## Результаты измерений кинематической вязкости при мощности излучателя 350 Вт и воздействии в течение 60 с

СВЧ воздействие		Исследуемый образец	Объем	Температура, С						Кинематическая вязкость			Кинематическая вязкость ( через 0,5 ч)			Кинематическая вязкость ( через 1 ч)			Кинематическая вязкость ( через 24 ч)		
Мощность	Время			Номер опыта	До СВЧ обработки	После СВЧ обработки	через 0,5ч	через 1ч	через 2 ч	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость
350	60	ДТ (4-5 °С)	50	1	4	22	23	-	-	1	384	4,28	1	394	4,40	1	405	4,52	1	410	4,57
				2	5	23	23	-	-	2	421	4,13	2	437	4,28	2	445	4,36	2	471	4,62
				3	5	23	23	-	-	3	390	4,17	3	407	4,35	3	415	4,44	3	427	4,56
				ср	4,7	22,7	23,0	-	-	ср	-	4,19	ср	-	4,34	ср	-	4,44	ср	-	4,58
350	60	ДТ (18±2 °С)	50	1	20	35	23	-	-	1	375	4,18	1	393	4,39	1	395	4,41	1	412	4,60
				2	19	35	23	-	-	2	423	4,15	2	425	4,17	2	430	4,22	2	475	4,66
				3	19	34	23	-	-	3	387	4,14	3	398	4,25	3	405	4,33	3	423	4,52
				ср	19,3	34,7	-	-	ср	-	4,18	ср	-	4,27	ср	-	4,32	ср	-	4,59	
350	60	ДТ (50 °С)	50	1	48	50	25	23	-	1	387	4,32	1	400	4,46	1	395	4,41	1	412	4,60
				2	48	50	25	23	-	2	431	4,23	2	451	4,42	2	463	4,54	2	475	4,66
				3	48	50	24	23	-	3	394	4,21	3	410	4,38	3	420	4,49	3	423	4,52
				ср	48,0	50,0	24,7	23,0	-	ср	-	4,25	ср	-	4,42	ср	-	4,48	ср	-	4,59
350	60	ДТ ( Кипение °С)	50	1	65	62	25	23	-	1	361	4,03	1	395	4,41	1	441	4,92	1	405	4,52
				2	65	62	26	23	-	2	423	4,15	2	454	4,45	2	480	4,71	2	457	4,48
				3	65	62	26	23	-	3	380	4,06	3	417	4,46	3	446	4,77	3	427	4,56
				ср	65,0	62,0	25,7	23,0	-	ср	-	4,08	ср	-	4,44	ср	-	4,80	ср	-	4,52
350	60	ДТ (4-5 °С)	100	1	5	19	22	23	-	1	406	4,53	1	387	4,32	1	385	4,30	1	412	4,60
				2	5	19	22	23	-	2	451	4,42	2	450	4,41	2	455	4,46	2	475	4,66
				3	5	20	23	23	-	3	423	4,52	3	406	4,34	3	415	4,44	3	412	4,40
				ср	5,0	19,3	-	-	ср	-	4,49	ср	-	4,36	ср	-	4,40	ср	-	4,55	
350	60	ДТ (18±2 °С)	100	1	18	26	23	-	-	1	388	4,33	1	414	4,62	1	405	4,52	1	399	4,45
				2	19	26	23	-	-	2	452	4,43	2	445	4,36	2	437	4,28	2	467	4,58
				3	19	26	23	-	-	3	407	4,35	3	425	4,54	3	417	4,46	3	430	4,60
				ср	18,7	26,0	23,0	-	-	ср	-	4,37	ср	-	4,51	ср	-	4,42	ср	-	4,54
350	60	ДТ (50 °С)	100	1	47	52	24	23	-	1	400	4,46	1	398	4,44	1	395	4,41	1	401	4,47
				2	47	52	24	23	-	2	429	4,21	2	461	4,52	2	457	4,48	2	472	4,63
				3	47	51	24	23	-	3	415	4,44	3	417	4,46	3	413	4,41	3	425	4,54
				ср	47,0	51,7	24,0	23,0	-	ср	-	4,37	ср	-	4,47	ср	-	4,43	ср	-	4,55
350	60	ДТ ( Кипение °С)	100	1	74	71	26	23	-	1	378	4,22	1	403	4,50	1	410	4,57	1	411	4,58
				2	75	72	26	23	-	2	425	4,17	2	446	4,37	2	472	4,63	2	475	4,66
				3	75	72	26	23	-	3	394	4,21	3	412	4,40	3	425	4,54	3	434	4,64
				ср	74,7	71,7	26,0	23,0	-	ср	-	4,20	ср	-	4,42	ср	-	4,58	ср	-	4,63
350	60	ДТ (4-5 °С)	200	1	7	28	23	-	-	1	426	4,75	1	379	4,23	1	412	4,60	1	410	4,57
				2	7	28	23	-	-	2	480	4,71	2	429	4,21	2	475	4,66	2	475	4,66
				3	7	28	23	-	-	3	443	4,73	3	395	4,22	3	427	4,56	3	442	4,72
				ср	7,0	28,0	23,0	-	-	ср	-	4,73	ср	-	4,22	ср	-	4,61	ср	-	4,65
350	60	ДТ (18±2 °С)	200	1	18	32	26	23	-	1	400	4,46	1	415	4,63	1	401	4,47	1	411	4,59
				2	18	32	26	23	-	2	450	4,41	2	455	4,46	2	453	4,44	2	491	4,81
				3	18	32	26	23	-	3	412	4,40	3	420	4,49	3	415	4,44	3	429	4,59
				ср	18,0	32,0	26,0	23,0	-	ср	-	4,43	ср	-	4,53	ср	-	4,45	ср	-	4,66
350	60	ДТ (50 °С)	200	1	48	52	27	24	23	1	390	4,35	1	412	4,60	1	416	4,64	1	417	4,65
				2	50	52	27	24	23	2	420	4,12	2	461	4,52	2	458	4,49	2	471	4,62
				3	50	53	27	24	23	3	390	4,17	3	425	4,54	3	425	4,54	3	431	4,61
				ср	49,3	52,3	27,0	24,0	23,0	ср	-	4,21	ср	-	4,55	ср	-	4,56	ср	-	4,63
350	60	ДТ ( Кипение °С)	200	1	75	75	30	25	23	1	380	4,24	1	395	4,41	1	384	4,28	1	421	4,70
				2	75	75	30	25	23	2	426	4,18	2	442	4,33	2	438	4,29	2	478	4,69
				3	75	75	30	25	23	3	394	4,21	3	402	4,30	3	404	4,32	3	435	4,65
				ср	75,0	75,0	30,0	25,0	23,0	ср	-	4,21	ср	-	4,35	ср	-	4,30	ср	-	4,66

## Результаты измерений кинематической вязкости при мощности излучателя 500 Вт и воздействии в течение 60 с

СВЧ воздействие		Иследуемый образец	Объем	Температура, С						Кинематическая вязкость			Кинематическая вязкость (через 0,5 ч)			Кинематическая вязкость (через 1 ч)			Кинематическая вязкость (через 24 ч)		
Мощность	Время			Номер опыта	До СВЧ обработки	После СВЧ обработки	Через 0,5ч	Через 1ч	Через 2ч	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость
500	60	ДТ (4-5 °С)	50	1	7	28	23	-	-	1	391	4,36	1	395	4,30	1	405	4,53	1	415	4,63
				2	7	28	23	-	-	2	436	4,27	2	438	4,29	2	435	4,26	2	458	4,48
				3	7	28	23	-	-	3	402	4,30	3	401	4,29	3	415	4,44	3	432	4,66
				ср	7,0	28,0	-	-	-	-	ср	-	4,31	ср	-	4,29	ср	-	4,41	ср	-
500	60	ДТ (18±2 °С)	50	1	19	34	23	-	-	1	391	4,36	1	395	4,41	1	385	4,30	1	407	4,54
				2	19	35	23	-	-	2	440	4,31	2	440	4,31	2	482	4,53	2	462	4,53
				3	20	35	23	-	-	3	407	4,35	3	410	4,38	3	405	4,33	3	435	4,65
				ср	19,3	34,7	-	-	-	-	ср	-	4,32	ср	-	4,37	ср	-	4,38	ср	-
500	60	ДТ (50 °С)	50	1	51	62	23	-	-	1	397	4,43	1	404	4,51	1	395	4,41	1	410	4,57
				2	51	62	23	-	-	2	438	4,29	2	445	4,36	2	446	4,37	2	451	4,42
				3	50	62	23	-	-	3	402	4,30	3	415	4,44	3	414	4,42	3	421	4,50
				ср	50,7	62,0	-	-	-	-	ср	-	4,34	ср	-	4,44	ср	-	4,40	ср	-
500	60	ДТ (кипение °С)	50	1	70	75	26	23	-	1	351	3,92	1	425	4,74	1	405	4,52	1	409	4,56
				2	70	75	26	23	-	2	398	3,90	2	448	4,39	2	452	4,43	2	462	4,53
				3	71	75	26	23	-	3	364	3,89	3	411	4,39	3	425	4,54	3	432	4,62
				ср	70,3	75,0	26,0	23,0	-	-	ср	-	3,90	ср	-	4,51	ср	-	4,50	ср	-
500	60	ДТ (4-5 °С)	100	1	6	18	23	-	-	1	429	4,79	1	415	4,63	1	418	4,66	1	407	4,54
				2	6	18	23	-	-	2	548	5,37	2	454	4,45	2	462	4,53	2	455	4,46
				3	6	18	23	-	-	3	425	4,54	3	420	4,49	3	412	4,40	3	435	4,65
				ср	6,0	18,0	23,0	-	-	-	ср	-	4,90	ср	-	4,52	ср	-	4,53	ср	-
500	60	ДТ (18±2 °С)	100	1	20	34	23	-	-	1	409	4,56	1	415	4,63	1	414	4,62	1	418	4,66
				2	20	34	23	-	-	2	470	4,61	2	447	4,38	2	450	4,41	2	451	4,42
				3	20	33	23	-	-	3	425	4,54	3	415	4,44	3	424	4,53	3	422	4,51
				ср	20,0	33,7	23,0	-	-	-	ср	-	4,57	ср	-	4,48	ср	-	4,52	ср	-
500	60	ДТ (50 °С)	100	1	48	55	25	23	-	1	400	4,46	1	398	4,44	1	406	4,53	1	415	4,63
				2	48	55	25	23	-	2	429	4,21	2	461	4,52	2	452	4,43	2	453	4,44
				3	48	55	25	23	-	3	403	4,31	3	424	4,53	3	435	4,65	3	427	4,56
				ср	48,0	55,0	25,0	23,0	-	-	ср	-	4,33	ср	-	4,50	ср	-	4,54	ср	-
500	60	ДТ (кипение °С)	100	1	65	70	26	23	-	1	378	4,22	1	403	4,50	1	408	4,55	1	410	4,57
				2	65	70	26	23	-	2	425	4,17	2	446	4,37	2	468	4,58	2	474	4,63
				3	65	70	26	23	-	3	392	4,19	3	411	4,39	3	428	4,57	3	443	4,73
				ср	65,0	70,0	26,0	23,0	-	-	ср	-	4,19	ср	-	4,42	ср	-	4,57	ср	-
500	60	ДТ (4-5 °С)	200	1	4	22	23	-	-	1	404	4,51	1	414	4,62	1	424	4,73	1	411	4,59
				2	5	22	23	-	-	2	447	4,38	2	444	4,35	2	465	4,56	2	485	4,76
				3	5	21	23	-	-	3	411	4,39	3	425	4,54	3	413	4,41	3	433	4,63
				ср	4,7	21,7	23,0	-	-	-	ср	-	4,43	ср	-	4,51	ср	-	4,57	ср	-
500	60	ДТ (18±2 °С)	200	1	17	26	23	-	-	1	359	4,01	1	414	4,62	1	415	4,63	1	424	4,73
				2	17	26	23	-	-	2	419	4,11	2	444	4,35	2	445	4,36	2	483	4,74
				3	18	26	23	-	-	3	377	4,03	3	415	4,44	3	421	4,50	3	421	4,50
				ср	17,3	26,0	23,0	-	-	-	ср	-	4,05	ср	-	4,47	ср	-	4,50	ср	-
500	60	ДТ (50 °С)	200	1	49	55	28	23	-	1	427	4,76	1	400	4,46	1	421	4,70	1	422	4,71
				2	50	55	28	23	-	2	436	4,27	2	436	4,27	2	462	4,53	2	457	4,48
				3	50	56	28	23	-	3	401	4,29	3	405	4,33	3	431	4,61	3	434	4,64
				ср	49,7	55,3	28,0	23,0	-	-	ср	-	4,44	ср	-	4,36	ср	-	4,61	ср	-
500	60	ДТ (кипение °С)	200	1	71	72	30	23	-	1	372	4,15	1	392	4,37	1	405	4,52	1	431	4,81
				2	70	72	30	23	-	2	406	3,98	2	451	4,42	2	483	4,74	2	465	4,58
				3	70	72	30	23	-	3	384	4,10	3	407	4,35	3	432	4,62	3	443	4,73
				ср	70,3	72,0	30,0	23,0	-	-	ср	-	4,08	ср	-	4,38	ср	-	4,62	ср	-

## Результаты измерений кинематической вязкости при мощности излучателя 700 Вт и воздействии в течение 60 с

СВЧ воздействие		Иследуемый образец	Объем	Температура, С				Кинематическая вязкость			Кинематическая вязкость (через 0,5 ч)			Кинематическая вязкость (через 1 ч)			Кинематическая вязкость (через 24 ч)				
Мощность	Время			Номер опыта	До СВЧ обработки	После СВЧ обработки	Через 0,5 ч	Через 1ч	Через 2ч	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость	Номер опыта	Время истечения, с	Кинематическая вязкость
700	60	ДТ (4-5 °С)	50	1	7	23	23	-	-	1	421	4,70	1	405	4,52	1	385	4,30	1	419	4,68
				2	7	23	23	-	-	2	467	4,58	2	452	4,43	2	442	4,33	2	468	4,59
				3	7	23	23	-	-	3	432	4,62	3	422	4,51	3	407	4,35	3	435	4,65
				ср	7,0	23,0	23,0	-	-	ср	-	4,63	ср	-	4,49	ср	-	4,33	ср	-	4,64
700	60	ДТ (18±2 °С)	50	1	21	40	23	-	-	1	435	4,85	1	425	4,74	1	428	4,78	1	415	4,63
				2	21	40	23	-	-	2	476	4,87	2	468	4,59	2	472	4,83	2	481	4,72
				3	21	40	23	-	-	3	438	4,88	3	435	4,65	3	444	4,73	3	432	4,62
				ср	21,0	40,0	23,0	-	-	ср	-	4,86	ср	-	4,66	ср	-	4,72	ср	-	4,65
700	60	ДТ (50 °С)	50	1	49	61	23	-	-	1	414	4,62	1	405	4,52	1	401	4,47	1	410	4,57
				2	49	61	23	-	-	2	454	4,45	2	448	4,39	2	426	4,18	2	444	4,35
				3	49	61	23	-	-	3	422	4,51	3	416	4,45	3	395	4,22	3	412	4,40
				ср	49,0	61,0	23,0	-	-	ср	-	4,53	ср	-	4,45	ср	-	4,29	ср	-	4,44
700	60	ДТ (Кипение °С)	50	1	72	76	26	23	-	1	383	4,27	1	410	4,37	1	424	4,73	1	421	4,70
				2	72	76	26	23	-	2	465	4,56	2	462	4,53	2	455	4,46	2	457	4,48
				3	72	76	27	23	-	3	399	4,26	3	425	4,54	3	429	4,59	3	432	4,62
				ср	72,0	76,0	26,3	23,0	-	ср	-	4,37	ср	-	4,55	ср	-	4,59	ср	-	4,60
700	60	ДТ (4-5 °С)	100	1	6	27	23	-	-	1	444	4,95	1	433	4,83	1	429	4,79	1	421	4,70
				2	6	27	23	-	-	2	488	4,78	2	469	4,69	2	478	4,77	2	465	4,56
				3	6	26	23	-	-	3	445	4,78	3	445	4,76	3	435	4,55	3	437	4,67
				ср	6,0	26,7	23,0	-	-	ср	-	4,83	ср	-	4,76	ср	-	4,74	ср	-	4,64
700	60	ДТ (18±2 °С)	100	1	18	35	23	-	-	1	399	4,45	1	435	4,85	1	429	4,79	1	415	4,63
				2	18	35	23	-	-	2	471	4,62	2	490	4,80	2	475	4,66	2	468	4,59
				3	18	34	23	-	-	3	421	4,50	3	451	4,82	3	431	4,61	3	435	4,65
				ср	18,0	34,7	23,0	-	-	ср	-	4,52	ср	-	4,83	ср	-	4,68	ср	-	4,62
700	60	ДТ (50 °С)	100	1	51	69	26	23	-	1	390	4,35	1	427	4,76	1	385	4,30	1	411	4,59
				2	52	69	26	23	-	2	451	4,42	2	482	4,73	2	456	4,47	2	445	4,36
				3	52	69	26	23	-	3	393	4,20	3	435	4,65	3	410	4,38	3	425	4,54
				ср	51,7	69,0	26,0	23,0	-	ср	-	4,32	ср	-	4,71	ср	-	4,38	ср	-	4,50
700	60	ДТ (Кипение °С)	100	1	67	69	27	23	-	1	339	3,78	1	395	4,41	1	396	4,42	1	398	4,44
				2	67	68	27	23	-	2	395	3,87	2	446	4,37	2	451	4,42	2	461	4,52
				3	68	68	27	23	-	3	354	3,78	3	412	4,40	3	402	4,30	3	400	4,28
				ср	67,3	68,3	27,0	23,0	-	ср	-	3,81	ср	-	4,39	ср	-	4,38	ср	-	4,41
700	60	ДТ (4-5 °С)	200	1	4	16	23	-	-	1	439	4,90	1	415	4,63	1	416	4,64	1	425	4,74
				2	4	16	23	-	-	2	490	4,80	2	450	4,41	2	462	4,53	2	475	4,66
				3	5	16	23	-	-	3	457	4,88	3	423	4,52	3	438	4,58	3	442	4,72
				ср	4,3	16,0	23,0	-	-	ср	-	4,86	ср	-	4,52	ср	-	4,62	ср	-	4,71
700	60	ДТ (18±2 °С)	200	1	21	31	23	-	-	1	403	4,50	1	389	4,34	1	399	4,45	1	345	3,85
				2	21	31	23	-	-	2	454	4,45	2	432	4,24	2	403	3,95	2	406	3,98
				3	21	32	23	-	-	3	415	4,44	3	425	4,54	3	381	4,07	3	365	3,90
				ср	21,0	31,3	23,0	-	-	ср	-	4,46	ср	-	4,37	ср	-	4,16	ср	-	3,91
700	60	ДТ (50 °С)	200	1	49	55	28	23	-	1	436	4,87	1	396	4,42	1	398	4,44	1	399	4,45
				2	49	55	28	23	-	2	449	4,40	2	428	4,20	2	457	4,48	2	453	4,53
				3	49	55	28	23	-	3	410	4,38	3	408	4,36	3	415	4,44	3	398	4,25
				ср	49,0	55,0	28,0	23,0	-	ср	-	4,55	ср	-	4,33	ср	-	4,45	ср	-	4,41
700	60	ДТ (Кипение °С)	200	1	65	67	28	23	-	1	420	4,69	1	393	4,39	1	397	4,43	1	401	4,47
				2	65	67	28	23	-	2	430	4,22	2	431	4,23	2	435	4,26	2	457	4,48
				3	65	67	28	23	-	3	394	4,21	3	397	4,24	3	405	4,33	3	409	4,37
				ср	65,0	67,0	28,0	23,0	-	ср	-	4,37	ср	-	4,28	ср	-	4,34	ср	-	4,44



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения при мощности излучателя 350 Вт и воздействии в течение 30 с

Поверхностное натяжение					Поверхностное натяжение (через 0,5)					Поверхностное натяжение (через 1ч)					Поверхностное натяжение (через 24ч)				
Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение
1	50	0,7476	0,0150	31,74	1	50	0,7276	0,0146	30,89	1	50	0,7456	0,0149	31,66	1	50	0,7654	0,0153	32,50
2	50	0,7354	0,0147	31,22	2	50	0,7254	0,0145	30,80	2	50	0,7575	0,0152	32,16	2	50	0,7624	0,0152	32,37
3	50	0,7465	0,0149	31,70	3	50	0,7264	0,0145	30,84	3	50	0,7452	0,0149	31,64	3	50	0,7697	0,0154	32,68
ср	50	0,7432	0,0149	31,55	ср	50	0,7265	0,0145	30,85	ср	50	0,7494	0,0150	31,82	ср	50	0,7658	0,0153	32,52
1	50	0,6943	0,0139	29,48	1	50	0,6843	0,0137	29,06	1	50	0,7286	0,0146	30,94	1	50	0,7685	0,0154	32,63
2	50	0,7021	0,0140	29,81	2	50	0,6832	0,0137	29,01	2	50	0,7234	0,0145	30,72	2	50	0,7654	0,0153	32,50
3	50	0,6923	0,0138	29,39	3	50	0,6997	0,0140	29,71	3	50	0,7345	0,0147	31,19	3	50	0,7643	0,0153	32,45
ср	50	0,6962	0,0139	29,56	ср	50	0,6891	0,0138	29,26	ср	50	0,7288	0,0146	30,95	ср	50	0,7661	0,0153	32,53
1	50	0,6578	0,0132	27,93	1	50	0,6785	0,0136	28,81	1	50	0,7258	0,0145	30,82	1	50	0,7565	0,0151	32,12
2	50	0,6612	0,0132	28,07	2	50	0,6825	0,0137	28,98	2	50	0,7158	0,0143	30,39	2	50	0,7643	0,0153	32,45
3	50	0,6538	0,0131	27,76	3	50	0,6854	0,0137	29,10	3	50	0,7184	0,0144	30,50	3	50	0,7698	0,0154	32,69
ср	50	0,6576	0,0132	27,92	ср	50	0,6821	0,0136	28,96	ср	50	0,7200	0,0144	30,57	ср	50	0,7635	0,0153	32,42
1	50	0,6597	0,0132	28,01	1	50	0,6743	0,0135	28,63	1	50	0,7145	0,0143	30,34	1	50	0,7658	0,0153	32,52
2	50	0,6543	0,0131	27,78	2	50	0,6691	0,0134	28,41	2	50	0,7268	0,0145	30,86	2	50	0,7652	0,0153	32,49
3	50	0,6523	0,0130	27,70	3	50	0,6786	0,0136	28,81	3	50	0,7256	0,0145	30,81	3	50	0,7658	0,0153	32,52
ср	50	0,6554	0,0131	27,83	ср	50	0,6740	0,0135	28,62	ср	50	0,7223	0,0144	30,67	ср	50	0,7656	0,0153	32,51
1	50	0,7432	0,0149	31,55	1	50	0,7354	0,0147	31,22	1	50	0,7532	0,0151	31,98	1	50	0,7645	0,0153	32,46
2	50	0,7358	0,0147	31,24	2	50	0,7345	0,0147	31,19	2	50	0,7567	0,0151	32,13	2	50	0,7658	0,0153	32,52
3	50	0,7489	0,0150	31,80	3	50	0,7345	0,0147	31,19	3	50	0,7534	0,0151	31,99	3	50	0,7654	0,0153	32,50
ср	50	0,7426	0,0149	31,53	ср	50	0,7348	0,0147	31,20	ср	50	0,7544	0,0151	32,03	ср	50	0,7652	0,0153	32,49
1	50	0,7246	0,0145	30,77	1	50	0,7583	0,0152	32,20	1	50	0,7564	0,0151	32,12	1	50	0,7684	0,0154	32,63
2	50	0,7257	0,0145	30,81	2	50	0,7524	0,0150	31,95	2	50	0,7563	0,0151	32,11	2	50	0,7629	0,0153	32,39
3	50	0,7256	0,0145	30,81	3	50	0,7536	0,0151	32,00	3	50	0,7523	0,0150	31,94	3	50	0,7693	0,0154	32,66
ср	50	0,7253	0,0145	30,80	ср	50	0,7548	0,0151	32,05	ср	50	0,7550	0,0151	32,06	ср	50	0,7669	0,0153	32,56
1	50	0,6646	0,0133	28,22	1	50	0,6994	0,0140	29,70	1	50	0,7467	0,0149	31,70	1	50	0,7524	0,0150	31,95
2	50	0,6674	0,0133	28,34	2	50	0,7014	0,0140	29,78	2	50	0,7464	0,0149	31,69	2	50	0,7541	0,0151	32,02
3	50	0,6683	0,0134	28,38	3	50	0,7032	0,0141	29,86	3	50	0,7418	0,0148	31,50	3	50	0,7534	0,0151	31,99
ср	50	0,6668	0,0133	28,31	ср	50	0,7013	0,0140	29,78	ср	50	0,7450	0,0149	31,63	ср	50	0,7533	0,0151	31,98
1	50	0,6547	0,0131	27,80	1	50	0,7065	0,0141	30,00	1	50	0,7421	0,0148	31,51	1	50	0,7584	0,0152	32,20
2	50	0,6487	0,0130	27,54	2	50	0,7012	0,0140	29,77	2	50	0,7485	0,0150	31,78	2	50	0,7541	0,0151	32,02
3	50	0,6598	0,0132	28,01	3	50	0,7056	0,0141	29,96	3	50	0,7421	0,0148	31,51	3	50	0,7725	0,0155	32,80
ср	50	0,6544	0,0131	27,79	ср	50	0,7044	0,0141	29,91	ср	50	0,7442	0,0149	31,60	ср	50	0,7617	0,0152	32,34
1	50	0,7508	0,0150	31,68	1	50	0,7408	0,0148	31,45	1	50	0,7476	0,0150	31,74	1	50	0,7625	0,0153	32,38
2	50	0,7586	0,0152	32,21	2	50	0,7456	0,0149	31,66	2	50	0,7453	0,0149	31,65	2	50	0,7676	0,0154	32,59
3	50	0,7567	0,0151	32,13	3	50	0,7432	0,0149	31,56	3	50	0,7441	0,0149	31,59	3	50	0,7693	0,0154	32,66
ср	50	0,7554	0,0151	32,07	ср	50	0,7432	0,0149	31,56	ср	50	0,7457	0,0149	31,66	ср	50	0,7665	0,0153	32,54
1	50	0,7205	0,0144	30,59	1	50	0,7534	0,0151	31,99	1	50	0,7514	0,0150	31,90	1	50	0,7587	0,0152	32,21
2	50	0,7356	0,0147	31,23	2	50	0,7456	0,0149	31,66	2	50	0,7564	0,0151	32,12	2	50	0,7687	0,0154	32,64
3	50	0,7257	0,0145	30,81	3	50	0,7437	0,0149	31,58	3	50	0,7557	0,0151	32,09	3	50	0,7643	0,0153	32,45
ср	50	0,7273	0,0145	30,88	ср	50	0,7476	0,0150	31,74	ср	50	0,7545	0,0151	32,04	ср	50	0,7639	0,0153	32,43
1	50	0,6987	0,0140	29,67	1	50	0,7258	0,0145	30,82	1	50	0,7584	0,0152	32,20	1	50	0,7567	0,0151	32,13
2	50	0,6987	0,0140	29,67	2	50	0,7358	0,0147	31,24	2	50	0,7684	0,0154	32,63	2	50	0,7632	0,0153	32,41
3	50	0,6988	0,0140	29,67	3	50	0,7825	0,0157	33,22	3	50	0,7521	0,0150	31,93	3	50	0,7596	0,0152	32,25
ср	50	0,6987	0,0140	29,67	ср	50	0,7480	0,0150	31,76	ср	50	0,7596	0,0152	32,25	ср	50	0,7598	0,0152	32,26
1	50	0,6985	0,0140	29,66	1	50	0,7167	0,0143	30,43	1	50	0,7584	0,0152	32,20	1	50	0,7584	0,0152	32,20
2	50	0,6845	0,0137	29,06	2	50	0,7258	0,0145	30,82	2	50	0,7512	0,0150	31,90	2	50	0,7624	0,0152	32,37
3	50	0,6987	0,0140	29,67	3	50	0,7248	0,0145	30,77	3	50	0,7568	0,0151	32,13	3	50	0,7638	0,0153	32,43
ср	50	0,6939	0,0139	29,46	ср	50	0,7224	0,0144	30,67	ср	50	0,7555	0,0151	32,08	ср	50	0,7615	0,0152	32,33



Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения при мощности излучателя 500 Вт и воздействии в течение 30 с

Поверхностное натяжение					Поверхностное натяжение (через 0,5)					Поверхностное натяжение (через 1ч)					Поверхностное натяжение (через 24ч)				
Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение
1	50	0,6772	0,0135	28,75	1	50	0,6915	0,0138	29,36	1	50	0,7024	0,0140	29,82	1	50	0,7453	0,0149	31,55
2	50	0,6921	0,0138	29,39	2	50	0,6924	0,0138	29,40	2	50	0,7031	0,0141	29,85	2	50	0,7463	0,0149	31,69
3	50	0,6998	0,0140	29,71	3	50	0,6931	0,0139	29,43	3	50	0,7012	0,0140	29,77	3	50	0,7423	0,0148	31,52
ср	50	0,6897	0,0138	29,28	ср	50	0,6923	0,0138	29,40	ср	50	0,7022	0,0140	29,82	ср	50	0,7446	0,0149	31,62
1	50	0,6638	0,0133	28,18	1	50	0,7312	0,0146	31,05	1	50	0,7021	0,0140	29,81	1	50	0,7487	0,0150	31,79
2	50	0,6663	0,0133	28,29	2	50	0,6583	0,0132	27,95	2	50	0,7025	0,0141	29,83	2	50	0,7465	0,0149	31,70
3	50	0,6663	0,0133	28,29	3	50	0,7066	0,0141	30,00	3	50	0,7089	0,0142	30,10	3	50	0,7456	0,0149	31,66
ср	50	0,6655	0,0133	28,26	ср	50	0,6987	0,0140	29,67	ср	50	0,7045	0,0141	29,91	ср	50	0,7469	0,0149	31,71
1	50	0,5760	0,0115	24,46	1	50	0,6320	0,0126	26,83	1	50	0,6954	0,0139	29,53	1	50	0,7412	0,0148	31,47
2	50	0,6551	0,0131	27,82	2	50	0,6310	0,0126	26,79	2	50	0,6914	0,0138	29,36	2	50	0,7425	0,0149	31,53
3	50	0,6577	0,0132	27,93	3	50	0,6750	0,0135	28,66	3	50	0,6952	0,0139	29,52	3	50	0,7398	0,0148	31,41
ср	50	0,6296	0,0126	26,73	ср	50	0,6460	0,0129	27,43	ср	50	0,6940	0,0139	29,47	ср	50	0,7412	0,0148	31,47
1	50	0,5748	0,0115	24,41	1	50	0,6656	0,0133	28,26	1	50	0,6812	0,0136	28,92	1	50	0,7385	0,0148	31,36
2	50	0,6501	0,0130	27,60	2	50	0,6656	0,0133	28,30	2	50	0,6825	0,0137	28,98	2	50	0,7421	0,0148	31,51
3	50	0,5605	0,0112	23,80	3	50	0,6745	0,0135	28,64	3	50	0,6821	0,0136	28,96	3	50	0,7485	0,0150	31,78
ср	50	0,5951	0,0119	25,27	ср	50	0,6689	0,0134	28,40	ср	50	0,6819	0,0136	28,95	ср	50	0,7430	0,0149	31,55
1	50	0,6915	0,0138	29,36	1	50	0,7385	0,0148	31,36	1	50	0,7521	0,0150	31,93	1	50	0,7541	0,0151	32,02
2	50	0,7058	0,0141	29,97	2	50	0,7548	0,0151	32,05	2	50	0,7512	0,0150	31,90	2	50	0,7548	0,0151	32,05
3	50	0,7058	0,0141	29,97	3	50	0,7589	0,0152	32,22	3	50	0,7535	0,0151	31,99	3	50	0,7564	0,0151	32,12
ср	50	0,7010	0,0140	29,77	ср	50	0,7507	0,0150	31,88	ср	50	0,7523	0,0150	31,94	ср	50	0,7551	0,0151	32,06
1	50	0,6821	0,0136	28,96	1	50	0,6921	0,0138	29,39	1	50	0,7354	0,0147	31,22	1	50	0,7532	0,0151	31,98
2	50	0,6887	0,0138	29,24	2	50	0,7021	0,0140	29,81	2	50	0,7512	0,0150	31,90	2	50	0,7408	0,0148	31,45
3	50	0,6874	0,0137	29,19	3	50	0,6925	0,0139	29,40	3	50	0,7498	0,0150	31,84	3	50	0,7467	0,0149	31,70
ср	50	0,6861	0,0137	29,13	ср	50	0,6956	0,0139	29,53	ср	50	0,7455	0,0149	31,65	ср	50	0,7469	0,0149	31,71
1	50	0,6652	0,0133	28,24	1	50	0,6545	0,0131	27,79	1	50	0,7215	0,0144	30,63	1	50	0,7485	0,0150	31,78
2	50	0,6587	0,0132	27,97	2	50	0,6528	0,0131	27,72	2	50	0,7214	0,0144	30,63	2	50	0,7492	0,0150	31,81
3	50	0,6514	0,0130	27,66	3	50	0,6587	0,0132	27,97	3	50	0,7298	0,0146	30,99	3	50	0,7453	0,0149	31,65
ср	50	0,6584	0,0132	27,96	ср	50	0,6553	0,0131	27,83	ср	50	0,7242	0,0145	30,75	ср	50	0,7477	0,0150	31,75
1	50	0,6561	0,0131	27,85	1	50	0,6825	0,0137	28,98	1	50	0,7158	0,0143	30,39	1	50	0,7541	0,0151	32,02
2	50	0,6661	0,0133	28,28	2	50	0,6958	0,0139	29,54	2	50	0,7126	0,0143	30,26	2	50	0,7512	0,0150	31,90
3	50	0,6654	0,0133	28,25	3	50	0,6925	0,0139	29,40	3	50	0,7196	0,0144	30,55	3	50	0,7425	0,0149	31,53
ср	50	0,6625	0,0133	28,13	ср	50	0,6903	0,0138	29,31	ср	50	0,7160	0,0143	30,40	ср	50	0,7493	0,0150	31,81
1	50	0,6852	0,0137	29,09	1	50	0,7367	0,0147	31,28	1	50	0,7521	0,0150	31,93	1	50	0,7625	0,0153	32,38
2	50	0,7254	0,0145	30,80	2	50	0,7385	0,0147	31,27	2	50	0,7584	0,0152	32,20	2	50	0,7658	0,0153	32,52
3	50	0,7058	0,0141	29,97	3	50	0,7424	0,0148	31,52	3	50	0,7536	0,0151	32,00	3	50	0,7685	0,0154	32,63
ср	50	0,7055	0,0141	29,95	ср	50	0,7385	0,0148	31,36	ср	50	0,7547	0,0151	32,04	ср	50	0,7656	0,0153	32,51
1	50	0,6707	0,0134	28,48	1	50	0,7025	0,0141	29,83	1	50	0,7521	0,0150	31,93	1	50	0,7689	0,0154	32,65
2	50	0,6814	0,0136	28,93	2	50	0,7125	0,0143	30,25	2	50	0,7598	0,0152	32,26	2	50	0,7698	0,0154	32,69
3	50	0,6715	0,0134	28,51	3	50	0,7158	0,0143	30,39	3	50	0,7548	0,0151	32,05	3	50	0,7679	0,0154	32,60
ср	50	0,6745	0,0135	28,64	ср	50	0,7103	0,0142	30,16	ср	50	0,7556	0,0151	32,08	ср	50	0,7689	0,0154	32,65
1	50	0,6838	0,0137	29,03	1	50	0,7125	0,0143	30,25	1	50	0,7458	0,0149	31,67	1	50	0,7687	0,0154	32,64
2	50	0,6847	0,0137	29,07	2	50	0,7025	0,0141	29,83	2	50	0,7358	0,0147	31,24	2	50	0,7686	0,0154	32,63
3	50	0,6821	0,0136	28,96	3	50	0,7085	0,0142	30,08	3	50	0,7385	0,0148	31,36	3	50	0,7743	0,0155	32,88
ср	50	0,6835	0,0137	29,02	ср	50	0,7078	0,0142	30,05	ср	50	0,7400	0,0148	31,42	ср	50	0,7705	0,0154	32,72
1	50	0,6830	0,0137	29,00	1	50	0,7065	0,0141	30,00	1	50	0,7358	0,0147	31,24	1	50	0,7645	0,0153	32,46
2	50	0,6813	0,0136	28,93	2	50	0,6987	0,0140	29,67	2	50	0,7418	0,0148	31,50	2	50	0,7685	0,0154	32,63
3	50	0,6860	0,0137	29,13	3	50	0,7089	0,0142	30,10	3	50	0,7321	0,0146	31,08	3	50	0,7697	0,0154	32,68
ср	50	0,6834	0,0137	29,02	ср	50	0,7047	0,0141	29,92	ср	50	0,7366	0,0147	31,27	ср	50	0,7697	0,0154	32,68

Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения при мощности излучателя 700 Вт и воздействии в течение 30 с

Поверхностное натяжение					Поверхностное натяжение (через 0,5)					Поверхностное натяжение (через1ч)					Поверхностное натяжение (через 24ч)				
Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение
1	50	0,7698	0,0154	32,69	1	50	0,7487	0,0150	31,79	1	50	0,7458	0,0149	31,67	1	50	0,7584	0,0152	32,20
2	50	0,7589	0,0152	32,22	2	50	0,7574	0,0151	32,16	2	50	0,7452	0,0149	31,64	2	50	0,7514	0,0150	31,90
3	50	0,7684	0,0154	32,63	3	50	0,7457	0,0149	31,66	3	50	0,7425	0,0149	31,53	3	50	0,7568	0,0151	32,13
ср	50	0,7657	0,0153	32,51	ср	50	0,7506	0,0150	31,87	ср	50	0,7445	0,0149	31,61	ср	50	0,7555	0,0151	32,08
1	50	0,6684	0,0134	28,38	1	50	0,6785	0,0136	28,81	1	50	0,6725	0,0135	28,55	1	50	0,7359	0,0147	31,25
2	50	0,6625	0,0133	28,13	2	50	0,6887	0,0138	29,24	2	50	0,6725	0,0135	28,55	2	50	0,7245	0,0145	30,76
3	50	0,6687	0,0134	28,39	3	50	0,6721	0,0134	28,54	3	50	0,6657	0,0133	28,27	3	50	0,7485	0,0150	31,78
ср	50	0,6665	0,0133	28,30	ср	50	0,6798	0,0136	28,86	ср	50	0,6702	0,0134	28,46	ср	50	0,7363	0,0147	31,26
1	50	0,6421	0,0128	27,26	1	50	0,6684	0,0134	28,38	1	50	0,6587	0,0132	27,97	1	50	0,7354	0,0147	31,22
2	50	0,6425	0,0129	27,28	2	50	0,6687	0,0134	28,39	2	50	0,6512	0,0130	27,65	2	50	0,7458	0,0149	31,67
3	50	0,6487	0,0130	27,54	3	50	0,6658	0,0133	28,27	3	50	0,6523	0,0130	27,70	3	50	0,7371	0,0147	31,30
ср	50	0,6444	0,0129	27,36	ср	50	0,6676	0,0134	28,35	ср	50	0,6541	0,0131	27,77	ср	50	0,7394	0,0148	31,40
1	50	0,6354	0,0127	26,98	1	50	0,6584	0,0132	27,96	1	50	0,6521	0,0130	27,69	1	50	0,7324	0,0146	31,10
2	50	0,6314	0,0126	26,81	2	50	0,6425	0,0129	27,28	2	50	0,6421	0,0128	27,26	2	50	0,7425	0,0149	31,53
3	50	0,6387	0,0128	27,12	3	50	0,6651	0,0133	28,24	3	50	0,6487	0,0130	27,54	3	50	0,7354	0,0147	31,22
ср	50	0,6352	0,0127	26,97	ср	50	0,6553	0,0131	27,83	ср	50	0,6476	0,0130	27,50	ср	50	0,7368	0,0147	31,28
1	50	0,7521	0,0150	31,93	1	50	0,7258	0,0145	30,82	1	50	0,7254	0,0145	30,80	1	50	0,7541	0,0151	32,02
2	50	0,7452	0,0149	31,64	2	50	0,7158	0,0143	30,39	2	50	0,7245	0,0145	30,76	2	50	0,7523	0,0150	31,94
3	50	0,7358	0,0147	31,24	3	50	0,7142	0,0143	30,32	3	50	0,7214	0,0144	30,63	3	50	0,7615	0,0152	32,33
ср	50	0,7444	0,0149	31,61	ср	50	0,7186	0,0144	30,51	ср	50	0,7238	0,0145	30,73	ср	50	0,7560	0,0151	32,10
1	50	0,6621	0,0132	28,11	1	50	0,6425	0,0129	27,28	1	50	0,6521	0,0130	27,69	1	50	0,7458	0,0149	31,67
2	50	0,6687	0,0134	28,39	2	50	0,6412	0,0128	27,23	2	50	0,6547	0,0131	27,80	2	50	0,7528	0,0151	31,98
3	50	0,6645	0,0133	28,21	3	50	0,6487	0,0130	27,54	3	50	0,6581	0,0132	27,94	3	50	0,7412	0,0148	31,47
ср	50	0,6651	0,0133	28,24	ср	50	0,6441	0,0129	27,35	ср	50	0,6550	0,0131	27,81	ср	50	0,7466	0,0149	31,70
1	50	0,6587	0,0132	27,97	1	50	0,6647	0,0133	28,22	1	50	0,6514	0,0130	27,66	1	50	0,7458	0,0149	31,67
2	50	0,6658	0,0133	28,27	2	50	0,6612	0,0132	28,07	2	50	0,6587	0,0132	27,97	2	50	0,7584	0,0152	32,20
3	50	0,6587	0,0132	27,97	3	50	0,6521	0,0130	27,69	3	50	0,6573	0,0131	27,91	3	50	0,7657	0,0153	32,51
ср	50	0,6611	0,0132	28,07	ср	50	0,6593	0,0132	27,99	ср	50	0,6558	0,0131	27,84	ср	50	0,7566	0,0151	32,13
1	50	0,6564	0,0131	27,87	1	50	0,6420	0,0128	27,26	1	50	0,6354	0,0127	26,98	1	50	0,7400	0,0148	31,42
2	50	0,6367	0,0127	27,03	2	50	0,6465	0,0129	27,45	2	50	0,6372	0,0127	27,06	2	50	0,7452	0,0149	31,64
3	50	0,6370	0,0127	27,05	3	50	0,6487	0,0130	27,54	3	50	0,6458	0,0129	27,42	3	50	0,7295	0,0146	30,97
ср	50	0,6434	0,0129	27,32	ср	50	0,6457	0,0129	27,42	ср	50	0,6395	0,0128	27,15	ср	50	0,7382	0,0148	31,35
1	50	0,7643	0,0153	32,45	1	50	0,7425	0,0149	31,53	1	50	0,7325	0,0147	31,10	1	50	0,7514	0,0150	31,90
2	50	0,7685	0,0154	32,63	2	50	0,7485	0,0150	31,78	2	50	0,7354	0,0147	31,22	2	50	0,7512	0,0150	31,90
3	50	0,7565	0,0151	32,12	3	50	0,7432	0,0149	31,56	3	50	0,7384	0,0148	31,35	3	50	0,7614	0,0152	32,33
ср	50	0,7631	0,0153	32,40	ср	50	0,7447	0,0149	31,62	ср	50	0,7354	0,0147	31,23	ср	50	0,7547	0,0151	32,04
1	50	0,741	0,0148	31,46	1	50	0,7458	0,0149	31,67	1	50	0,7512	0,0150	31,90	1	50	0,7458	0,0149	31,67
2	50	0,7458	0,0149	31,67	2	50	0,7423	0,0148	31,52	2	50	0,7584	0,0152	32,20	2	50	0,7526	0,0151	31,96
3	50	0,7354	0,0147	31,22	3	50	0,7485	0,0150	31,78	3	50	0,7568	0,0151	32,13	3	50	0,7584	0,0152	32,20
ср	50	0,7407	0,0148	31,45	ср	50	0,7455	0,0149	31,65	ср	50	0,7555	0,0151	32,08	ср	50	0,7523	0,0150	31,94
1	50	0,6684	0,0134	28,38	1	50	0,7325	0,0147	31,10	1	50	0,7458	0,0149	31,67	1	50	0,7684	0,0154	32,63
2	50	0,6674	0,0133	28,34	2	50	0,7321	0,0146	31,08	2	50	0,7425	0,0149	31,53	2	50	0,7528	0,0151	31,96
3	50	0,6642	0,0133	28,20	3	50	0,7258	0,0145	30,82	3	50	0,7489	0,0150	31,80	3	50	0,7621	0,0152	32,36
ср	50	0,6667	0,0133	28,31	ср	50	0,7301	0,0146	31,00	ср	50	0,7457	0,0149	31,66	ср	50	0,7611	0,0152	32,32
1	50	0,6725	0,0135	28,55	1	50	0,7158	0,0143	30,39	1	50	0,7458	0,0149	31,67	1	50	0,7625	0,0153	32,38
2	50	0,6890	0,0137	29,08	2	50	0,7258	0,0145	30,82	2	50	0,7428	0,0149	31,54	2	50	0,7684	0,0154	32,63
3	50	0,6854	0,0137	29,10	3	50	0,7241	0,0145	30,74	3	50	0,7463	0,0149	31,69	3	50	0,7687	0,0154	32,64
ср	50	0,6810	0,0136	28,91	ср	50	0,7219	0,0144	30,65	ср	50	0,7450	0,0149	31,63	ср	50	0,7665	0,0153	32,55

Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения при мощности излучателя 350 Вт и воздействии в течение 60 с

Поверхностное натяжение					Поверхностное натяжение (через 0,5)					Поверхностное натяжение (через14)					Поверхностное натяжение (через 24ч)				
Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение
1	50	0,6905	0,0138	29,32	1	50	0,6983	0,0140	29,65	1	50	0,7498	0,0150	31,84	1	50	0,7698	0,0154	32,69
2	50	0,6987	0,0140	29,67	2	50	0,6831	0,0137	29,00	2	50	0,7475	0,0150	31,74	2	50	0,7586	0,0152	32,21
3	50	0,6973	0,0139	29,61	3	50	0,6915	0,0138	29,36	3	50	0,7345	0,0147	31,19	3	50	0,7532	0,0151	31,98
ср	50	0,6955	0,0139	29,53	ср	50	0,6910	0,0138	29,34	ср	50	0,7439	0,0149	31,59	ср	50	0,7605	0,0152	32,29
1	50	0,6823	0,0136	28,97	1	50	0,6815	0,0136	28,94	1	50	0,7154	0,0143	30,38	1	50	0,7576	0,0152	32,17
2	50	0,6921	0,0138	29,39	2	50	0,6422	0,0128	27,27	2	50	0,7157	0,0143	30,39	2	50	0,7632	0,0153	32,41
3	50	0,6916	0,0138	29,36	3	50	0,6447	0,0129	27,37	3	50	0,7475	0,0150	31,74	3	50	0,7559	0,0151	32,10
ср	50	0,6887	0,0138	29,24	ср	50	0,6561	0,0131	27,86	ср	50	0,7262	0,0145	30,83	ср	50	0,7589	0,0152	32,22
1	50	0,6355	0,0127	26,98	1	50	0,6509	0,0130	27,64	1	50	0,7086	0,0142	30,09	1	50	0,7576	0,0152	32,17
2	50	0,6491	0,0130	27,56	2	50	0,6731	0,0135	28,58	2	50	0,7073	0,0141	30,03	2	50	0,7452	0,0149	31,64
3	50	0,6668	0,0133	28,31	3	50	0,6574	0,0131	27,91	3	50	0,7073	0,0141	30,03	3	50	0,7486	0,0150	31,79
ср	50	0,6505	0,0130	27,62	ср	50	0,6605	0,0132	28,04	ср	50	0,7077	0,0142	30,05	ср	50	0,7505	0,0150	31,86
1	50	0,6532	0,0131	27,73	1	50	0,6601	0,0132	28,03	1	50	0,7065	0,0141	30,00	1	50	0,7532	0,0151	31,98
2	50	0,6723	0,0134	28,55	2	50	0,6578	0,0132	27,93	2	50	0,7087	0,0142	30,09	2	50	0,7532	0,0151	31,98
3	50	0,6752	0,0135	28,67	3	50	0,6574	0,0131	27,91	3	50	0,7175	0,0144	30,46	3	50	0,7562	0,0151	32,11
ср	50	0,6669	0,0133	28,32	ср	50	0,6584	0,0132	27,96	ср	50	0,7109	0,0142	30,18	ср	50	0,7542	0,0151	32,02
1	50	0,6984	0,0140	29,66	1	50	0,7107	0,0142	30,18	1	50	0,7456	0,0149	31,66	1	50	0,7575	0,0152	32,16
2	50	0,7052	0,0141	29,94	2	50	0,7258	0,0145	30,82	2	50	0,7432	0,0149	31,56	2	50	0,7632	0,0153	32,41
3	50	0,7058	0,0141	29,97	3	50	0,7241	0,0145	30,74	3	50	0,7408	0,0148	31,45	3	50	0,7587	0,0152	32,21
ср	50	0,7031	0,0141	29,86	ср	50	0,7202	0,0144	30,58	ср	50	0,7432	0,0149	31,56	ср	50	0,7598	0,0152	32,26
1	50	0,7147	0,0143	30,35	1	50	0,7457	0,0149	31,66	1	50	0,7456	0,0149	31,66	1	50	0,7543	0,0151	32,03
2	50	0,7125	0,0143	30,25	2	50	0,7498	0,0150	31,84	2	50	0,7456	0,0149	31,66	2	50	0,7578	0,0152	32,18
3	50	0,7245	0,0145	30,76	3	50	0,7587	0,0152	32,21	3	50	0,7576	0,0152	32,17	3	50	0,7632	0,0153	32,41
ср	50	0,7172	0,0143	30,45	ср	50	0,7514	0,0150	31,90	ср	50	0,7496	0,0150	31,83	ср	50	0,7584	0,0152	32,20
1	50	0,6646	0,0133	28,22	1	50	0,6994	0,0140	29,70	1	50	0,7467	0,0149	31,70	1	50	0,7524	0,0150	31,95
2	50	0,6674	0,0133	28,34	2	50	0,7014	0,0140	29,78	2	50	0,7464	0,0149	31,69	2	50	0,7541	0,0151	32,02
3	50	0,6683	0,0134	28,38	3	50	0,7032	0,0141	29,86	3	50	0,7418	0,0148	31,50	3	50	0,7534	0,0151	31,99
ср	50	0,6668	0,0133	28,31	ср	50	0,7013	0,0140	29,78	ср	50	0,7450	0,0149	31,63	ср	50	0,7533	0,0151	31,98
1	50	0,6576	0,0132	27,92	1	50	0,6956	0,0139	29,53	1	50	0,7353	0,0147	31,22	1	50	0,7575	0,0152	32,16
2	50	0,6658	0,0133	28,27	2	50	0,6965	0,0139	29,57	2	50	0,7352	0,0147	31,22	2	50	0,7632	0,0153	32,41
3	50	0,6557	0,0131	27,84	3	50	0,6915	0,0138	29,36	3	50	0,7315	0,0146	31,06	3	50	0,7572	0,0151	32,15
ср	50	0,6597	0,0132	28,01	ср	50	0,6945	0,0139	29,49	ср	50	0,7340	0,0147	31,17	ср	50	0,7593	0,0152	32,24
1	50	0,7054	0,0141	29,95	1	50	0,6954	0,0139	29,53	1	50	0,7425	0,0149	31,53	1	50	0,7698	0,0154	32,69
2	50	0,7148	0,0143	30,35	2	50	0,7054	0,0141	29,95	2	50	0,7425	0,0149	31,53	2	50	0,7684	0,0154	32,63
3	50	0,7019	0,0140	29,80	3	50	0,6923	0,0138	29,39	3	50	0,7384	0,0148	31,35	3	50	0,7586	0,0152	32,21
ср	50	0,7074	0,0141	30,03	ср	50	0,6977	0,0140	29,62	ср	50	0,7411	0,0148	31,47	ср	50	0,7656	0,0153	32,51
1	50	0,7145	0,0143	30,34	1	50	0,7489	0,0150	31,80	1	50	0,7487	0,0150	31,79	1	50	0,7587	0,0152	32,21
2	50	0,7134	0,0143	30,29	2	50	0,7365	0,0147	31,27	2	50	0,7418	0,0148	31,50	2	50	0,7687	0,0154	32,64
3	50	0,7106	0,0142	30,17	3	50	0,7453	0,0149	31,65	3	50	0,7489	0,0150	31,80	3	50	0,7643	0,0153	32,45
ср	50	0,7128	0,0143	30,27	ср	50	0,7436	0,0149	31,57	ср	50	0,7465	0,0149	31,69	ср	50	0,7639	0,0153	32,43
1	50	0,6947	0,0139	29,50	1	50	0,7208	0,0144	30,60	1	50	0,7356	0,0147	31,23	1	50	0,7567	0,0151	32,13
2	50	0,6984	0,0140	29,65	2	50	0,7146	0,0143	30,34	2	50	0,7286	0,0146	30,94	2	50	0,7632	0,0153	32,41
3	50	0,6957	0,0139	29,54	3	50	0,7166	0,0143	30,43	3	50	0,7328	0,0147	31,11	3	50	0,7596	0,0152	32,25
ср	50	0,6963	0,0139	29,56	ср	50	0,7173	0,0143	30,46	ср	50	0,7323	0,0146	31,09	ср	50	0,7598	0,0152	32,26
1	50	0,6976	0,0140	29,62	1	50	0,7034	0,0141	29,87	1	50	0,7404	0,0148	31,44	1	50	0,7585	0,0152	32,21
2	50	0,6943	0,0139	29,48	2	50	0,7042	0,0141	29,90	2	50	0,7395	0,0148	31,40	2	50	0,7693	0,0154	32,66
3	50	0,6912	0,0138	29,35	3	50	0,7003	0,0140	29,73	3	50	0,7309	0,0146	31,03	3	50	0,7595	0,0152	32,25
ср	50	0,6944	0,0139	29,48	ср	50	0,7026	0,0141	29,83	ср	50	0,73693333	0,0147	31,29	ср	50	0,7624	0,0152	32,37



Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения при мощности излучателя 500 Вт и воздействии в течение 60 с

Поверхностное натяжение					Поверхностное натяжение (через 0,5)					Поверхностное натяжение (через 1ч)					Поверхностное натяжение (через 24ч)				
Номер опыта	Количество капль	Масса капль	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капль	Масса капль	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капль	Масса капль	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капль	Масса капль	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение
1	50	0,6905	0,0138	29,32	1	50	0,6831	0,0137	29,00	1	50	0,6984	0,0140	29,65	1	50	0,7356	0,0147	31,23
2	50	0,6987	0,0140	29,67	2	50	0,6883	0,0138	29,22	2	50	0,6978	0,0140	29,63	2	50	0,7354	0,0147	31,22
3	50	0,6973	0,0139	29,61	3	50	0,6915	0,0138	29,36	3	50	0,6921	0,0138	29,39	3	50	0,7354	0,0147	31,22
ср	50	0,6955	0,0139	29,53	ср	50	0,6876	0,0138	29,20	ср	50	0,6961	0,0139	29,56	ср	50	0,7355	0,0147	31,23
1	50	0,6752	0,0135	28,67	1	50	0,6817	0,0136	28,94	1	50	0,6921	0,0138	29,39	1	50	0,7321	0,0146	31,08
2	50	0,6823	0,0136	28,97	2	50	0,6422	0,0128	27,27	2	50	0,7045	0,0141	29,91	2	50	0,7354	0,0147	31,22
3	50	0,6789	0,0136	28,83	3	50	0,6444	0,0129	27,36	3	50	0,6921	0,0138	29,39	3	50	0,7321	0,0146	31,08
ср	50	0,6788	0,0136	28,82	ср	50	0,6561	0,0131	27,86	ср	50	0,6962	0,0139	29,56	ср	50	0,7332	0,0147	31,13
1	50	0,6335	0,0127	26,90	1	50	0,6509	0,0130	27,64	1	50	0,6523	0,0130	27,70	1	50	0,7321	0,0146	31,08
2	50	0,6378	0,0128	27,08	2	50	0,6734	0,0135	28,59	2	50	0,6421	0,0128	27,26	2	50	0,7414	0,0148	31,48
3	50	0,6414	0,0128	27,23	3	50	0,6754	0,0135	28,68	3	50	0,6421	0,0128	27,26	3	50	0,7387	0,0148	31,36
ср	50	0,6376	0,0128	27,07	ср	50	0,6666	0,0133	28,30	ср	50	0,6455	0,0129	27,41	ср	50	0,7374	0,0147	31,31
1	50	0,6534	0,0131	27,74	1	50	0,6601	0,0132	28,03	1	50	0,6452	0,0129	27,39	1	50	0,7215	0,0144	30,63
2	50	0,6425	0,0129	27,28	2	50	0,6578	0,0132	27,93	2	50	0,6421	0,0128	27,26	2	50	0,7321	0,0146	31,08
3	50	0,6478	0,0130	27,51	3	50	0,6574	0,0131	27,91	3	50	0,6454	0,0129	27,40	3	50	0,7321	0,0146	31,08
ср	50	0,6479	0,0130	27,51	ср	50	0,6584	0,0132	27,96	ср	50	0,6442	0,0129	27,35	ср	50	0,7286	0,0146	30,93
1	50	0,7100	0,0142	30,15	1	50	0,7595	0,0152	32,25	1	50	0,7514	0,0150	31,90	1	50	0,7412	0,0148	31,47
2	50	0,7015	0,0140	29,79	2	50	0,7514	0,0150	31,90	2	50	0,7520	0,0150	31,93	2	50	0,7514	0,0150	31,90
3	50	0,7095	0,0142	30,13	3	50	0,7658	0,0153	32,52	3	50	0,7532	0,0151	31,98	3	50	0,7512	0,0150	31,90
ср	50	0,7070	0,0141	30,02	ср	50	0,7589	0,0152	32,22	ср	50	0,7522	0,0150	31,94	ср	50	0,7479	0,0150	31,76
1	50	0,6582	0,0132	27,95	1	50	0,6661	0,0133	28,28	1	50	0,7354	0,0147	31,22	1	50	0,7532	0,0151	31,98
2	50	0,6722	0,0134	28,54	2	50	0,6643	0,0133	28,21	2	50	0,7512	0,0150	31,90	2	50	0,7408	0,0148	31,45
3	50	0,6871	0,0137	29,17	3	50	0,6671	0,0133	28,32	3	50	0,7498	0,0150	31,84	3	50	0,7467	0,0149	31,70
ср	50	0,6725	0,0135	28,55	ср	50	0,6658	0,0133	28,27	ср	50	0,7455	0,0149	31,65	ср	50	0,7469	0,0149	31,71
1	50	0,6523	0,0130	27,70	1	50	0,6370	0,0127	27,05	1	50	0,7058	0,0141	29,97	1	50	0,7425	0,0149	31,53
2	50	0,6214	0,0124	26,38	2	50	0,6274	0,0125	26,64	2	50	0,7088	0,0142	30,10	2	50	0,7428	0,0149	31,54
3	50	0,6521	0,0130	27,69	3	50	0,6562	0,0131	27,86	3	50	0,7056	0,0141	29,96	3	50	0,7385	0,0148	31,36
ср	50	0,6419	0,0128	27,26	ср	50	0,6402	0,0128	27,18	ср	50	0,7067	0,0141	30,01	ср	50	0,7413	0,0148	31,47
1	50	0,6752	0,0135	28,67	1	50	0,6947	0,0139	29,50	1	50	0,7018	0,0140	29,80	1	50	0,7485	0,0150	31,78
2	50	0,7186	0,0144	30,51	2	50	0,6925	0,0139	29,40	2	50	0,6847	0,0137	29,07	2	50	0,7425	0,0149	31,53
3	50	0,7098	0,0142	30,14	3	50	0,6987	0,0140	29,67	3	50	0,7155	0,0143	30,38	3	50	0,7418	0,0148	31,50
ср	50	0,7012	0,0140	29,77	ср	50	0,6953	0,0139	29,52	ср	50	0,7007	0,0140	29,75	ср	50	0,7443	0,0149	31,60
1	50	0,6875	0,0138	29,19	1	50	0,6983	0,0140	29,65	1	50	0,7476	0,0150	31,74	1	50	0,7567	0,0151	32,13
2	50	0,7159	0,0143	30,40	2	50	0,6985	0,0140	29,66	2	50	0,7567	0,0151	32,13	2	50	0,7654	0,0153	32,50
3	50	0,6832	0,0137	29,01	3	50	0,6914	0,0138	29,36	3	50	0,7578	0,0152	32,18	3	50	0,7687	0,0154	32,64
ср	50	0,6955	0,0139	29,53	ср	50	0,6961	0,0139	29,55	ср	50	0,7540	0,0151	32,02	ср	50	0,7636	0,0153	32,42
1	50	0,6753	0,0135	28,67	1	50	0,6789	0,0136	28,83	1	50	0,7495	0,0150	31,82	1	50	0,7625	0,0153	32,38
2	50	0,6721	0,0134	28,54	2	50	0,6873	0,0137	29,18	2	50	0,7643	0,0153	32,45	2	50	0,7628	0,0153	32,39
3	50	0,6741	0,0135	28,62	3	50	0,6851	0,0137	29,09	3	50	0,7479	0,0150	31,76	3	50	0,7684	0,0154	32,63
ср	50	0,6738	0,0135	28,61	ср	50	0,6838	0,0137	29,03	ср	50	0,7539	0,0151	32,01	ср	50	0,7646	0,0153	32,46
1	50	0,6981	0,0140	29,64	1	50	0,6921	0,0138	29,39	1	50	0,7321	0,0146	31,08	1	50	0,7565	0,0151	32,12
2	50	0,6883	0,0138	29,22	2	50	0,6952	0,0139	29,52	2	50	0,7254	0,0145	30,80	2	50	0,7634	0,0153	32,41
3	50	0,6853	0,0137	29,10	3	50	0,6924	0,0138	29,40	3	50	0,7287	0,0146	30,94	3	50	0,7567	0,0151	32,13
ср	50	0,6906	0,0138	29,32	ср	50	0,6932	0,0139	29,43	ср	50	0,7287	0,0146	30,94	ср	50	0,7589	0,0152	32,22
1	50	0,6579	0,0132	27,93	1	50	0,6852	0,0137	29,09	1	50	0,7254	0,0145	30,80	1	50	0,7625	0,0153	32,38
2	50	0,6512	0,0130	27,65	2	50	0,6921	0,0138	29,39	2	50	0,7258	0,0145	30,82	2	50	0,7624	0,0152	32,37
3	50	0,6631	0,0133	28,15	3	50	0,6952	0,0139	29,52	3	50	0,7269	0,0145	30,86	3	50	0,7682	0,0154	32,62
ср	50	0,6574	0,0131	27,91	ср	50	0,690833333	0,0138	29,33	ср	50	0,7260	0,0145	30,83	ср	50	0,7644	0,0153	32,45

Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения при мощности излучателя 700 Вт и воздействии в течение 60 с

Поверхностное натяжение					Поверхностное натяжение (через 0,5)					Поверхностное натяжение (через 1ч)					Поверхностное натяжение (через 24ч)				
Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение	Номер опыта	Количество капель	Масса капель	Масса 1 капли	Поверхностное натяжение
1	50	0,7643	0,0153	32,45	1	50	0,7465	0,0149	31,70	1	50	0,7345	0,0147	31,19	1	50	0,7454	0,0149	31,65
2	50	0,7685	0,0154	32,63	2	50	0,7462	0,0149	31,68	2	50	0,7395	0,0148	31,40	2	50	0,7456	0,0149	31,66
3	50	0,7654	0,0153	32,50	3	50	0,7425	0,0149	31,53	3	50	0,7314	0,0146	31,05	3	50	0,7462	0,0149	31,68
ср	50	0,7661	0,0153	32,53	ср	50	0,7451	0,0149	31,64	ср	50	0,7351	0,0147	31,21	ср	50	0,7457	0,0149	31,66
1	50	0,6822	0,0136	28,97	1	50	0,6584	0,0132	27,96	1	50	0,6328	0,0127	26,87	1	50	0,7359	0,0147	31,25
2	50	0,6465	0,0129	27,45	2	50	0,6598	0,0132	28,01	2	50	0,6287	0,0126	26,69	2	50	0,7245	0,0145	30,76
3	50	0,6675	0,0134	28,34	3	50	0,6521	0,0130	27,69	3	50	0,6345	0,0127	26,94	3	50	0,7343	0,0147	31,18
ср	50	0,6654	0,0133	28,25	ср	50	0,6568	0,0131	27,89	ср	50	0,6320	0,0126	26,83	ср	50	0,7316	0,0146	31,06
1	50	0,6373	0,0127	27,06	1	50	0,6542	0,0131	27,78	1	50	0,6295	0,0126	26,73	1	50	0,7103	0,0142	30,16
2	50	0,6321	0,0126	26,84	2	50	0,6345	0,0127	26,94	2	50	0,6247	0,0125	26,52	2	50	0,7237	0,0145	30,73
3	50	0,6328	0,0127	26,87	3	50	0,6358	0,0127	27,00	3	50	0,6212	0,0124	26,38	3	50	0,7295	0,0146	30,97
ср	50	0,6341	0,0127	26,92	ср	50	0,6415	0,0128	27,24	ср	50	0,6251	0,0125	26,54	ср	50	0,7212	0,0144	30,62
1	50	0,6001	0,0120	25,48	1	50	0,6254	0,0125	26,55	1	50	0,6215	0,0124	26,39	1	50	0,7105	0,0142	30,17
2	50	0,6321	0,0126	26,84	2	50	0,6395	0,0128	27,15	2	50	0,6340	0,0127	26,92	2	50	0,7234	0,0145	30,72
3	50	0,6254	0,0125	26,55	3	50	0,6452	0,0129	27,39	3	50	0,6370	0,0127	27,05	3	50	0,7139	0,0143	30,31
ср	50	0,6192	0,0124	26,29	ср	50	0,6367	0,0127	27,03	ср	50	0,6308	0,0126	26,78	ср	50	0,7159	0,0143	30,40
1	50	0,6224	0,0124	26,43	1	50	0,6467	0,0129	27,46	1	50	0,6425	0,0129	27,28	1	50	0,7484	0,0150	31,78
2	50	0,6128	0,0123	26,02	2	50	0,6305	0,0126	26,77	2	50	0,6615	0,0132	28,09	2	50	0,7412	0,0148	31,47
3	50	0,6125	0,0123	26,01	3	50	0,6368	0,0127	27,04	3	50	0,6398	0,0128	27,17	3	50	0,7403	0,0148	31,43
ср	50	0,6159	0,0123	26,15	ср	50	0,6380	0,0128	27,09	ср	50	0,6479	0,0130	27,51	ср	50	0,7433	0,0149	31,56
1	50	0,6213	0,0124	26,38	1	50	0,6264	0,0125	26,60	1	50	0,6465	0,0129	27,45	1	50	0,7379	0,0148	31,33
2	50	0,6417	0,0128	27,25	2	50	0,6276	0,0126	26,65	2	50	0,6423	0,0128	27,27	2	50	0,7394	0,0148	31,39
3	50	0,6501	0,0130	27,60	3	50	0,6254	0,0125	26,55	3	50	0,6487	0,0130	27,54	3	50	0,724	0,0145	30,74
ср	50	0,6377	0,0128	27,08	ср	50	0,6265	0,0125	26,60	ср	50	0,6458	0,0129	27,42	ср	50	0,7338	0,0147	31,16
1	50	0,6620	0,0132	28,11	1	50	0,635	0,0127	26,96	1	50	0,6347	0,0127	26,95	1	50	0,7506	0,0150	31,87
2	50	0,6538	0,0131	27,76	2	50	0,6232	0,0125	26,46	2	50	0,6425	0,0129	27,28	2	50	0,7635	0,0153	32,42
3	50	0,653	0,0131	27,73	3	50	0,6358	0,0127	27,00	3	50	0,6350	0,0127	26,96	3	50	0,7395	0,0148	31,40
ср	50	0,6563	0,0131	27,86	ср	50	0,6313	0,0126	26,81	ср	50	0,6374	0,0127	27,06	ср	50	0,7512	0,0150	31,90
1	50	0,6564	0,0131	27,87	1	50	0,6420	0,0128	27,26	1	50	0,6354	0,0127	26,98	1	50	0,7400	0,0148	31,42
2	50	0,6367	0,0127	27,03	2	50	0,6465	0,0129	27,45	2	50	0,6372	0,0127	27,06	2	50	0,7452	0,0149	31,64
3	50	0,6370	0,0127	27,05	3	50	0,6487	0,0130	27,54	3	50	0,6458	0,0129	27,42	3	50	0,7295	0,0146	30,97
ср	50	0,6434	0,0129	27,32	ср	50	0,6457	0,0129	27,42	ср	50	0,6395	0,0128	27,15	ср	50	0,7382	0,0148	31,35
1	50	0,7431	0,0149	31,55	1	50	0,7476	0,0150	31,74	1	50	0,7046	0,0141	29,92	1	50	0,7344	0,0147	31,18
2	50	0,7499	0,0150	31,84	2	50	0,7453	0,0149	31,65	2	50	0,7203	0,0144	30,58	2	50	0,7691	0,0154	32,66
3	50	0,7520	0,0150	31,93	3	50	0,7286	0,0146	30,94	3	50	0,7164	0,0143	30,42	3	50	0,7584	0,0152	32,20
ср	50	0,7483	0,0150	31,77	ср	50	0,7405	0,0148	31,44	ср	50	0,7138	0,0143	30,31	ср	50	0,7540	0,0151	32,01
1	50	0,7301	0,0146	31,00	1	50	0,7463	0,0149	31,69	1	50	0,7591	0,0152	32,23	1	50	0,7471	0,0149	31,72
2	50	0,7275	0,0146	30,89	2	50	0,7405	0,0148	31,45	2	50	0,7523	0,0150	31,94	2	50	0,7325	0,0147	31,10
3	50	0,7413	0,0148	31,48	3	50	0,7381	0,0148	31,34	3	50	0,7481	0,0150	31,76	3	50	0,7559	0,0151	32,10
ср	50	0,7330	0,0147	31,12	ср	50	0,7417	0,0148	31,49	ср	50	0,7532	0,0151	31,98	ср	50	0,7452	0,0149	31,64
1	50	0,7432	0,0149	31,56	1	50	0,7314	0,0146	31,05	1	50	0,7105	0,0142	30,17	1	50	0,7871	0,0157	33,42
2	50	0,7312	0,0146	31,05	2	50	0,7252	0,0145	30,79	2	50	0,7521	0,0150	31,93	2	50	0,7635	0,0153	32,42
3	50	0,7102	0,0142	30,15	3	50	0,7157	0,0143	30,39	3	50	0,7544	0,0151	32,03	3	50	0,7783	0,0156	33,05
ср	50	0,7282	0,0146	30,92	ср	50	0,7241	0,0145	30,74	ср	50	0,7390	0,0148	31,38	ср	50	0,7763	0,0155	32,96
1	50	0,6832	0,0137	29,01	1	50	0,7121	0,0142	30,24	1	50	0,7431	0,0149	31,55	1	50	0,7503	0,0150	31,86
2	50	0,6875	0,0138	29,19	2	50	0,7056	0,0141	29,96	2	50	0,7394	0,0148	31,39	2	50	0,7700	0,0154	32,69
3	50	0,6912	0,0138	29,35	3	50	0,7203	0,0144	30,58	3	50	0,7297	0,0146	30,98	3	50	0,7405	0,0148	31,44
ср	50	0,6873	0,0137	29,18	ср	50	0,712666667	0,0143	30,26	ср	50	0,7374	0,0147	31,31	ср	50	0,7536	0,0151	32,00



«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО РГАТУ

Г.К. Рембалович

«5» февраля 2024 г.

АКТ

**о проведении лабораторных исследований устройства для СВЧ  
обработки топлива**

Мы, нижеподписавшиеся, представители федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» в лице: заведующего кафедрой «Эксплуатация машинно-тракторного парка», к.т.н., доцента А.Н. Бачурина, аспиранта кафедры ЭМТП В.Е. Сорокина, доцента кафедры ЭМТП, к.т.н., Д.О. Олейника, доцента кафедры ЭМТП, к.т.н., И.Ю. Богданчикова, доцента кафедры ЭМТП, к.т.н., М.А. Есенина составили настоящий акт в том, что 4 сентября 2023 года были проведены лабораторные исследования изменения экологических показателей дизельного двигателя Д-243 в процессе работы с применением дизельного топлива ДТ ГОСТ 305-2013 с устройством для СВЧ обработки топлива в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева».

Исследование экологических показателей дизельного двигателя Д-243 было проведено в направлении оценки изменения состава и показателей дымности отработавших газов при использовании СВЧ устройства для обработки топлива (режим работы магнетрона 500 Вт и 700 Вт).



Для определения количественных изменений в составе отработавших газов использовались трубки индикаторные для газового анализа Dräger со шприцом на 160 мл в качестве прокачивающего устройства. Каждый компонент выхлопных газов подвергался трехкратному измерению.

Для определения наличия изменений показателей дымности отработавших газов применялся портативный дымомер «МЕТА - 01 МП».

Камера СВЧ обработки топлива установлена в разрыв топливопровода, перед ТНВД. Двигатель работает попеременно, с выключенным и включенным устройством для СВЧ обработки топлива.

Эксперимент по исследованию изменения состава выхлопных газов проводился при работе двигателя Д-243 в режиме 1500 обр/мин, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты эксперимента по исследованию влияния обработки топлива СВЧ диапазона на состав отработавших газов дизельного двигателя

Компонент отработавших газов	Средняя массовая концентрация компонента отработавших газов				
	Без обработки топлива, мг/м <sup>3</sup>	С применением СВЧ устройства для обработки топлива			
		При мощности магнетрона 500 Вт		При мощности магнетрона 700 Вт	
		мг/м <sup>3</sup>	Отклонение, %	мг/м <sup>3</sup>	Отклонение, %
Углеводороды (в пересчете на гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	659,6	422,3	-35,9%	386,1	-41,5
Монооксид углерода CO	854,6	723,3	-15,4%	576,3	-32,6
Диоксид азота NO <sub>2</sub>	58,0	58,0	-	58,0	-
Диоксид серы SO <sub>2</sub>	67,3	67,3	-	67,3	-
Бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	16,4	отсутствует	-	отсутствует	-
Формальдегид CH <sub>2</sub> O	3,8	3,3	-13,2%	3,2	-15,8%
Пары воды H <sub>2</sub> O	1316,7	1541,7	+17,1%	2083,3	+58,2%

Далее, была проведена оценка пиковых значений дымности в режиме свободного ускорения двигателя. Измерялись коэффициенты поглощения  $K$  и ослабления  $N$  ослабления светового потока от источника света дымомера при работе дизеля на необработанном и обработанном топливе, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение дымности отработавших газов дизеля при воздействии на топливо СВЧ излучения

Номер эксперимента	Мощность СВЧ излучателя, Вт	Показатели (коэффициент поглощения $K_i$ ( $m^{-1}$ ); коэффициент ослабления $N_i$ (%))	Значение	
1	0 (без обработки)	$K_1$	6,32	
		$N_1$	93,4	
2		$K_2$	6,59	
		$N_2$	94,1	
3		$K_3$	8,0	
		$N_3$	96,8	
4		$K_4$	9,29	
		$N_4$	98,2	
Среднее значение		$K_{cp} = 7,55$ $N_{cp} = 96,1$		
1		500	$K_1$	5,24
	$N_1$		89,5	
2	$K_2$		5,74	
	$N_2$		92,5	
3	$K_3$		5,66	
	$N_3$		91,2	
4	$K_4$		6,11	
	$N_4$		92,8	
Среднее значение	$K_{cp} = 5,7$ $N_{cp} = 91,4$			
1	700		$K_1$	5,19
		$N_1$	89,3	
2		$K_2$	6,02	
		$N_2$	92,5	
3		$K_3$	5,46	
		$N_3$	90,4	
4		$K_4$	4,41	
		$N_4$	85,0	
Среднее значение		$K_{cp} = 5,27$ $N_{cp} = 89,6$		

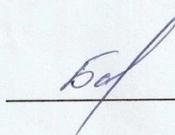


В результате проведения лабораторных исследований установлено:

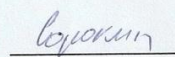
- При использовании устройства для СВЧ обработки топлива, экологические показатели дизельного двигателя Д-243 изменяются в сторону снижения вредных выбросов при мощности магнетрона как 500 Вт, так и 700 Вт;
- Наилучшие показатели по изменению состава отработанных газов достигаются при мощности СВЧ излучателя 700 Вт – по отношению к исходным выбросам, зафиксировано следующее снижение: углеводороды – на 41,5%; монооксид углерода – на 32,6%; формальдегид – на 15,8%; бензол – полностью исключен;
- Дымность (массовая концентрация сажи) выхлопных газов дизеля снижается на 6,5 % при мощности излучателя 700 Вт, а при мощности 500 Вт на 4,7 %.

Исполнители:

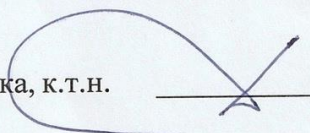
Заведующий кафедрой  
эксплуатации машинно-тракторного парка  
к.т.н., доцент

  
А.Н. Бачурин

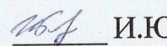
Аспирант кафедры  
эксплуатации машинно-тракторного парка

  
В.Е. Сорокин


Доцент кафедры  
эксплуатации машинно-тракторного парка, к.т.н.

  
Д.О. Олейник

Доцент кафедры  
эксплуатации машинно-тракторного парка, к.т.н.

  
И.Ю. Богданчиков

Доцент кафедры  
эксплуатации машинно-тракторного парка, к.т.н.

  
М.А. Есенин



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО РГАТУ

Г.К. Рембалович

сентября 2024 г.



АКТ

**о внедрении законченной научно-исследовательской,  
опытно-конструкторской и технологической работы**

Мы, нижеподписавшиеся, представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», в лице научного руководителя научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы к.т.н., доцента Бачурина Алексея Николаевича и представитель ООО «Привольное», Рязанская область, Старожиловский район, с. Большие Поляны в лице директора Морозова Евгения Владимировича, составили настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «Улучшение характеристик дизельных двигателей обработкой топлива волнами СВЧ диапазона», выполненной кафедрой «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВО РГАТУ в 2021-2024 гг., внедрены в ООО «Привольное», Рязанская область, Старожиловский район, с. Большие Поляны. При внедрении были проведены сравнительные испытания серийной системы топливоподачи трактора МТЗ-80 с двигателем Д-243 1991 года выпуска, гос. номер 1671 РУ 62 и системы топливоподачи, укомплектованной экспериментальным устройством для СВЧ обработки топлива, базовым элементом которого является магнетрон.



Внедрение результатов исследования дало возможность предприятию (организации) получить следующий технико-экономический эффект:

1. Снизить расход дизельного топлива при использовании устройства СВЧ обработки топлива на 6,3 % по сравнению с расходом топлива дизельного двигателя, оборудованного штатной системой топливopодачи.
2. Снизить затраты на топливо за период использования устройства (с 01.03.2023 г. по 31.01.2024 г.) для СВЧ обработки топлива на 20046,45 рублей при работе трактора в течении 530 моточасов (262 моточаса при выключенном устройстве и 268 моточаса при включенном).

Замечания и предложения о дальнейшей работе по внедрению:

1. Признать конструкцию устройства для СВЧ обработки топлива, позволяющую минимизировать расход дизельного топлива в автотракторных дизельных двигателях, целесообразной и экономически обоснованной.
2. Совместно с кафедрой «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВО РГАТУ продолжить исследования по оптимизации конструктивных параметров устройства и способов его размещения в зависимости от характеристик применяемых дизельных двигателей и условий эксплуатации мобильных сельскохозяйственных агрегатов.

В научно-исследовательской работе принимали участие:

Аспирант кафедры ЭМТП Сорокин В.Е. Сорокин

Представитель ФГБОУ ВО РГАТУ  
научный руководитель работы

к.т.н., доцент

А.Н. Бачурин

(подпись)

» февраля 2024 г.



ООО «Привольное»  
Рязанская область,  
Старожилковский район,  
с. Большие Поляны  
директор

Е.В. Морозов

(подпись)

» февраля 2024 г.

