

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань - 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ)

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Бачурин Алексей Николаевич**

**Официальные оппоненты:** **Голубев Иван Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса», главный научный сотрудник отдела научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК

**Мещерякова Юлия Владимировна,**  
кандидат технических наук, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», старший научный сотрудник лаборатории использования моторного топлива

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Защита диссертации состоится «03» октября 2024 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.031.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: [www.rgatu.ru](http://www.rgatu.ru), с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Юхин Иван Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. По данным Торгово-промышленной палаты (ТПП) России 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.

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). Замена этими видами топлива дизельного топлива сможет покрыть порядка 2% его общего объема потребления, что несущественно в нынешних условиях. 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.

Полученные ими теоретические выводы и практические результаты могут быть использованы при конструировании, сервисном обслуживании и эксплуатации двигателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве.

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.

**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 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.

**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.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, раскрыты научная и практическая значимость работы, изложены основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

**В первой главе «Современное состояние вопроса, цель и задачи исследования»** рассмотрены проблемы потребления дизельного топлива в сельскохозяйственном производстве, проблема энергосбережения, в том числе за счет экономии топлива, получаемого переработкой углеводородного сырья или перехода на альтернативные/возобновляемые источники энергии.

Рассмотрены способы контроля потребления дизельного топлива двигателями и применение альтернативных топлив. Проведён анализ уже существующих устройств для снижения расхода топлива, рассмотрены способы и устройства для обработки топлива (ультразвуковое и СВЧ воздействие), а также достоинства и недостатки рассматриваемых конструкций.

На основании проведенного анализа и в соответствии с поставленной в работе целью сформулированы задачи исследований:

- 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.

**Во второй главе «Теоретические зависимости, описывающие процесс впрыска топлива в камеру сгорания»** проведены теоретические исследования по уточнению аналитических зависимостей, описывающих характеристики впрыска топлива в камеру сгорания дизеля, с помощью поправочных коэффициентов в виде регрессионных уравнений, учитывающих начальную температуру топлива и время, прошедшее с момента его обработки СВЧ излучением.

Известны уравнения, описывающие 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 капель  $d_k$  и угол  $\gamma_T$  раскрытия топливной струи на основном участке:

$$I_T = A \rho_T^{0,75} \sigma_T^{-0,65} \nu_T^{0,8}, \quad (1)$$

где  $A$  – интегральный коэффициент;  $\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м;  $\nu_T$  – кинематическая вязкость топлива м<sup>2</sup>/с.

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

где  $D_S = 4 \dots 5$  – коэффициент молекулярной диффузии;  $\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м;  $\nu_T$  – кинематическая вязкость топлива м<sup>2</sup>/с.

$$d_k = B \rho_T^{0,6053} \sigma_T^{0,1927} \nu_T^{0,1466}, \quad (3)$$

где  $B$  – интегральный коэффициент;  $\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м;  $\nu_T$  – кинематическая вязкость топлива м<sup>2</sup>/с.

$$\gamma_T = 2 \arctg(0,009 \cdot C \rho_T^{-0,89} \sigma_T^{-0,25} \nu_T^{-0,14}), \quad (4)$$

где  $C$  – обобщенный коэффициент;  $\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м;  $\nu_T$  – кинематическая вязкость топлива м<sup>2</sup>/с.

В результате проведенных исследований и на основе использования статистической обработки результатов измерений были получены регрессионные уравнения, описывающие процессы изменения кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения от начальной температуры топлива в интервалах 5...74 °С и в процессе остывания топлива после воздействия в течение от 2 ч до 24 ч с момента окончания воздействия.

Уравнения, описывающие изменение кинематической вязкости от начальной температуры топлива представлены в таблице 1.

Таблица 1 – 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 <sub>выч</sub>	F <sub>табл</sub> ( $\alpha=0,05$ )	
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

Процессы изменения кинематической вязкости от времени, прошедшего с момента обработки топлива волнам СВЧ диапазона, при начальной температуре топлива, установленной в диапазоне 5...74 °С описаны следующими уравнениями (табл.2).



Таблица 2 – Регрессионные уравнения, описывающие изменение кинематической вязкости от времени с момента обработки топлива

Начальная температура топлива (Т, °С)	Зависимость кинематической вязкости ( $\nu_T$ , 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> ( $\alpha=0,05$ )	
5,53	$\nu_T = 0,04881t^2 - 0,023t + 4,2892$	0,9990	998,5	7,71	0,1
18,33	$\nu_T = 0,0353t^2 + 0,0486t + 4,2657$	0,7027	1,95		неадекватно
48,33	$\nu_T = 0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888$	0,9999	9998,5		0,1
74	$\nu_T = 0,1725t^3 - 0,6595t^2 + 0,8421t + 4,0623$	0,9999	9998,5		0,05

К сожалению, не удается описать изменение кинематической вязкости 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.

Проведены аналогичные действия с коэффициентом поверхностного натяжения, используя экспериментально полученные данные (табл.3).

Таблица 3 – Регрессионные уравнения, описывающие изменение коэффициента поверхностного натяжения от начальной температуры топлива

Время до и после обработки топлива волнами СВЧ диапазона (t, ч)	Зависимость кинематической вязкости ( $\sigma_T$ , Н/м) от начальной температуры топлива (Т, °С)	Коэффициент парной корреляции (R)	Критерий Фишера		Средняя ошибка аппроксимации (А, %)
			F <sub>выч</sub>	F <sub>табл</sub> ( $\alpha=0,05$ )	
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. Это связано с различной инерционностью происходящих в топливе процессов воздействия СВЧ излучения на молекулы, находящиеся в различном температурном диапазоне.

Изменения коэффициента поверхностного натяжения от времени, прошедшего с момента обработки топлива волнам СВЧ диапазона, при различных начальных температурах описаны регрессионными уравнениями в таблице 4.

Таблица 4 – Регрессионные уравнения, описывающие изменение коэффициента поверхностного натяжения от времени с момента обработки топлива

Начальная температура топлива (Т, °С)	Зависимость кинематической вязкости ( $\sigma_T$ , 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> ( $\alpha=0,05$ )	
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, то необходимо искать решение в виде многокритериального уравнения регрессии.

Полученные регрессионные зависимости для кинематической вязкости  $\nu_T$  (табл.1) и коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_T$  (табл.3) введены в уравнения (1)-(4) для пути  $l_T$ , 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 в зависимости от начальной температуры топлива  $T$ .

С точки зрения практики интерес представляют зависимости, связывающие параметры до воздействия, непосредственно после обработки

СВЧ волнами и спустя некоторое время, по истечению которого вызванные воздействием процессы в топливе в основном завершаются.

Описаны уравнения до воздействия СВЧ излучения:

$$I_T = A\rho_T^{0,75}(0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{-0,65}(0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{0,8} = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{0,8}}{(0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{0,65}}; \quad (5)$$

$$\tau_S = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{1,17} \frac{(0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{0,37}}{(0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{0,32}}; \quad (6)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053}(0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{0,1927}(0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{0,1466}; \quad (7)$$

$$\gamma_T = 2\arct(0,009C\rho_T^{-0,89}(0,00007T^2 - 0,1101T + 34,004)^{-0,25}(0,0001T^2 - 0,0172T + 4,8621)^{-0,14}). \quad (8)$$

Далее введены полученные регрессионные уравнения непосредственно после СВЧ воздействия в имеющиеся теоретические зависимости:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,8}}{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,65}}; \quad (9)$$

$$\tau_S = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{1,17} \frac{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,37}}{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,32}} = \\ = \sqrt{2} A^2 D_S \rho_T^{2,67} \frac{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{1,28}}{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,93}}; \quad (10)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053}(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,1927}(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,1466}; \quad (11)$$

$$\gamma_T = 2\arctg(0,009C\rho_T^{-0,89}(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{-0,25}(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{-0,14}). \quad (12)$$

Как показали измерения, основные процессы завершаются в течение от 2 ч до 24 ч с момента прекращения СВЧ воздействия. С учетом этого получены следующие зависимости:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,8}}{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,65}}; \quad (13)$$

$$\tau_S = \sqrt{2} A^2 D_S \rho_T^{2,67} \frac{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{1,28}}{(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,93}}; \quad (14)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053}(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,1927}(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,1466}; \quad (15)$$

$$\gamma_T = 2\arctg(0,009C\rho_T^{-0,89}(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{-0,25}(-0,00007T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{-0,14}). \quad (16)$$

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.

Введены регрессионные зависимости для кинематической вязкости  $\nu_T$  (табл.2) и коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_T$  (табл.4) в уравнения (1)-(4) 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.

Уточнены уравнения для  $I_T$ ,  $\tau_S$ ,  $d_k$  и  $\gamma_T$  для значений температур, которые адекватно описываются регрессионными уравнениями, в частности:

- для температуры 5,33 °С

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{0,8}}{(2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{0,65}}; \quad (17)$$

$$\tau_S = \sqrt{2}A^2D_S\rho_T^{2,67} \frac{(2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{1,28}}{(0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{0,93}}; \quad (18)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053} (2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{0,1927} (0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{0,1466}; \quad (19)$$

$$\gamma_T = 2\arctg(0,009C\rho_T^{-0,89} (2,1868t^2 - 3,8492t + 30,732)^{-0,25} (0,0488t^2 - 0,023t + 4,2892)^{-0,14}). \quad (20)$$

- для температуры 48,33 °С

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{0,8}}{(1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{0,65}}; \quad (21)$$

$$\tau_S = \sqrt{2}A^2D_S\rho_T^{2,67} \frac{(1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{1,28}}{(0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{0,93}}; \quad (22)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053} (1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{0,1927} (0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{0,1466}; \quad (23)$$

$$\gamma_T = 2\arctg(0,009C\rho_T^{-0,89} (1,8092t^2 - 2,3517t + 29,317)^{-0,25} (0,0856t^3 - 0,3811t^2 + 0,647t + 4,0888)^{-0,14}). \quad (24)$$

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.

Эти регрессионные уравнения позволяют проследить связь 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 с исходной температурой топлива и временем, прошедшим с момента обработки до завершения в нем процессов перемешивания на молекулярном и межмолекулярном уровнях.

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.

Дополнительная информация получена 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:

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(0,000004T^3 + 0,0005T^2 - 0,0116T + 4,3616)^{0,8}}{(0,00004T^3 - 0,0044T^2 + 0,1131T + 29,321)^{0,65}}; \quad (25)$$

$$\tau_S = \sqrt{2}A^2 D_S \rho_T^{2,67} \frac{(0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{1,28}}{(-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,93}}; \quad (26)$$

$$d_k = B\rho_T^{0,6053} (-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{0,1927} (0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{0,1466}; \quad (27)$$

$$\gamma_T = 2\arctg(0,009C\rho_T^{-0,89} (-0,0002T^3 + 0,0205T^2 - 0,7183T + 33,731)^{-0,25} (0,00004T^2 - 0,0066T + 4,3272)^{-0,14}); \quad (28)$$

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

$$I_T = A\rho_T^{0,75} \frac{(-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,8}}{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,65}}. \quad (29)$$

$$\tau_S = \sqrt{2} \cdot I_T^2 D_S \rho_T^{1,17} \frac{(-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{0,37}}{(-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{0,32}}. \quad (30)$$

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

$$\gamma_T = 2\arctg(0,009 \cdot C\rho_T^{-0,89} (-0,0003T^2 + 0,0147T + 31,764)^{-0,25} (-7 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0063T + 4,4128)^{-0,14}). \quad (32)$$

Известна 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, может быть представлен выражением:

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{We_{cr} \sigma_T}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} \right)^{3/5}, \quad (33)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент диссипации;  $\rho_g$  – плотность газа, окружающего каплю кг/м<sup>3</sup>;  $We_{cr} = 6 \cdot Oh$  – критический критерий Вебера.

При этом  $Oh = \frac{v_T \rho_T}{\sqrt{\rho_T \sigma_T D_T}}$  – число Онезорге,

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

Выполнив преобразования был получен критический критерий Вебера:

$$We_{cr} = 6v_T \sqrt{\frac{\rho_T}{\sigma_T D_T}}, \quad (34)$$

Тогда критический радиус капли может быть выражен следующим образом:

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{6v_T \sqrt{\frac{\rho_T}{\sigma_T D_T} \sigma_T}}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} \right)^{3/5} = \frac{1}{2} \left( \frac{6 \sqrt{\frac{\rho_T}{D_T}} v_T \sqrt{\sigma_T}}{\varepsilon^{2/3} \rho_g} \right)^{3/5} \quad (35)$$

В качестве оценки изменения критического радиуса капли топлива вследствие его обработки волнами СВЧ диапазона, построена линия тренда (с использованием регрессионных уравнений таблиц 1-4) для соотношения критических радиусов капель до ( $r_{исх. cr}$ ) и после ( $r_{СВЧ cr}$ ) обработки топлива волнами СВЧ для температурного диапазона, в котором проводились исследования (рис.1). Хорошо видно, что обработка топлива волнами СВЧ диапазона приводит к уменьшению соотношения  $\frac{r_{СВЧ cr}}{r_{исх. cr}}$ , 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.

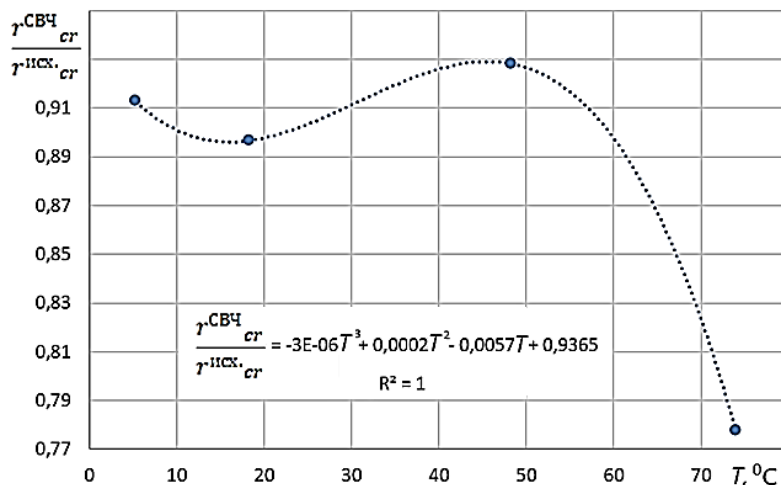


Рисунок 1 – Линия тренда, построенная для соотношения критических радиусов капель до ( $r_{исх. cr}$ ) и после ( $r_{СВЧ cr}$ ) обработки

Можно констатировать, что обработка топлива волнами СВЧ диапазона позволит улучшить процессы горения за счет предварительного подогрева топлива с последующим образованием более мелких капель.

**В третьей главе «Общая и частные методики исследования»** представлены программа и методики экспериментальных исследований.

Программа исследований предусматривала исследования кинематической вязкости, которые производились с применением вискозиметра ВПЖ-2; исследования коэффициента поверхностного натяжения; оценку характеристик впрыска топлива, производимую с применением стенда-форсунки; оценку характеристик воспламеняемости топлива, производимую с применением октанометра ПЭ-7300; оценку расхода топлива и мощности излучателя, производимого на лабораторном стенде двигателя Д-243 с применением устройства СВЧ обработки дизельного топлива; оценку экологических показателей отработанных газов, которые проводились с применением индикаторных трубочек для газового анализа и измерителя дымности отработавших газов МЕТА - 01 МП, согласно ГОСТ Р 52160-2003 и ГОСТ Р 41.24-2003 при работе дизельного двигателя с выключенным и включенным устройством для обработки топлива волнами СВЧ диапазона.

**В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований устройства для обработки топлива волнами СВЧ диапазона»** согласно вышеуказанным методам проведены экспериментальные исследования с последующей их статистической обработкой.

Эксперимент по оценке характеристик впрыска топлива показал, что распыл топлива после СВЧ обработки увеличивается на 17...23% по отношению к площади распыла необработанного топлива (рис. 2).

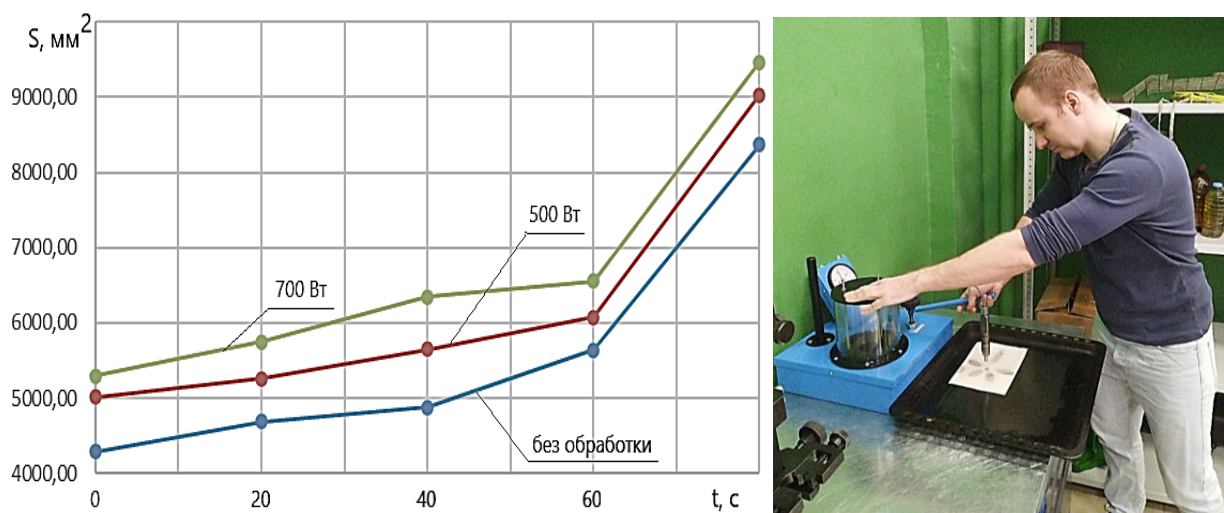


Рисунок 2. – Определение площади поверхности распыла форсункой

Экспериментальные исследования кинематической вязкости и коэффициента поверхностного натяжения топлива проведены при изменении объема обрабатываемого топлива (50 мл, 100 мл, 200 мл), мощности излучателя (500 Вт, 700 Вт) и различной исходной температуре топлива (диапазоны 4...7 °С; 18...20 °С; 48,3...50 °С; 72...74 °С). В результате по полученным данным эксперимента сделан вывод, что для эффективной обработки топлива в двигателе необходимо поддерживать баланс в цепочке «мощность СВЧ излучателя-объем обрабатываемого топлива в секунду».

Изменение цетанового числа с использованием октанометра ПЭ-7300 для дизельного топлива ДТ ГОСТ 305-2013 до и после его обработки не выявлено – во всех случаях оно составило 51 единицу.

По исследованиям расхода топлива зафиксировано повышение экономичности дизеля для обоих случаев применения СВЧ обработки топлива, однако наилучшие показатели достигаются при мощности СВЧ излучателя, равной 500 Вт и составляет 9,67%, а для 700 Вт составляет 3,97%.

Анализ результатов экологических показателей отработанных газов дизеля Д-243 показывает, что обработка топлива СВЧ излучением при мощности излучателя 500 Вт уменьшает дымность на 4,7%, а 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.

**В пятой главе «Производственная проверка предложенных решений и оценка их экономической эффективности»** устройство для ультразвуковой обработки топлива было интегрировано в топливную систему двигателя Д-243 трактора МТЗ-80.

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. Топливоподача осуществлялась через врезку в штатный топливопровод трактора и заведение ответвления топливопровода в зону обработки волнами СВЧ диапазона.

За время проведения производственной апробации (с 01.02.2023 г. по 31.01.2024 г.) зафиксировано снижение расхода топлива на 1,18 л/ч или 6,3% (с 18,73 л/ч до 17,55 л/ч) при работе трактора в течение 530 мото-часов (262 мото-часа при выключенном устройстве для СВЧ обработки топлива и 268 мото-часа при включенном). Экономия топлива предоставила возможность хозяйству ООО «Привольное» при выполнении сельскохозяйственных операций получить экономический эффект в размере 20046,45 рублей (цена на дизельное топливо



на 24.01.2024 г. составляла 63,39 руб/л). При этом, затраты на изготовление и установку одного устройства для СВЧ обработки топлива составят 23001 рубль, расчётная годовая экономия - 44880 руб, срок окупаемости устройства - 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 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 работ, опубликованных автором по теме научно-квалификационной работы (диссертации):**

##### ***Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России***

1. 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)

2. 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.

*Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная  
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №1614 подписано в печать 02.08.2024 г.  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Рязанский государственный агротехнологический университет имени  
П.А. Костычева»  
390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1  
Отпечатано в издательстве учебной литературы и учебно-методических пособий  
ФГБОУ ВО РГАТУ  
390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1*