

На правах рукописи

Неверов Всеволод Анатольевич

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭФФЕКТИВНЫХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ  
ПРОЦЕССА РАСПЫЛИВАНИЯ  
НЕФТЯНОГО И АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Марков Владимир Анатольевич,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Ерохов Виктор Иванович,**  
заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры экологической безопасности технических систем ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»  
**Козлов Андрей Викторович,**  
доктор технических наук, заведующий отделом теории рабочих процессов и имитационного моделирования энергетических установок ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет»

Защита диссертации состоится «14» июня 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан « » 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Тумашев Р.З

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность диссертационной работы** обусловлена необходимостью удовлетворения возрастающих требований к экологическим и эффективным показателям дизелей. Данные показатели в значительной мере зависят от качества процессов распыливания топлива и смесеобразования, которые определяются параметрами потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки. При этом значительное влияние на качество распыливания топлива оказывается степень турбулизации на выходе из распыливающего отверстия потока топлива. Оценка этой турбулизации может быть проведена по кинетической энергии турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и вязкости распыливаемого топлива. Улучшение показателей качества процесса распыливания топлива и последующих процессов смесеобразования и сгорания может быть достигнуто при использовании экологических добавок к нефтяному дизельному топливу. В качестве таких добавок рассматриваются растительные масла, в частности подсолнечное масло, и углеродные нанотрубки. Содержащиеся в молекулах подсолнечного масла атомы кислорода благоприятно влияют на процесс сгорания топлива. Добавка углеродных нанотрубок в жидкое моторное топливо способствует ускорению процессов тепло- и массообмена, повышению реакционной активности смесевого топлива, что позволяет улучшать качество процессов распыливания топлива и смесеобразования и сгорания, сократить период задержки воспламенения и длительность процесса сгорания. Использование указанных добавок к нефтяному дизельному топливу в сочетании с совершенствованием процессов распыливания топлива и смесеобразования позволит достичь требуемых экологических и эффективных показателей дизелей.

**Цель работы:** достижение требуемых экологических и эффективных показателей дизеля путем совершенствования процесса распыливания нефтяного и альтернативных топлив.

**Объект исследования.** Транспортные и стационарные дизели типов Д-245 и Д-243.

**Предмет исследования.** Экологические и эффективные показатели дизелей.

**Методы исследований.** Для достижения сформулированной цели исследования используются теоретические и экспериментальные методы. Теоретические методы необходимы для проведения расчетные исследования параметров течения топлива в распылителе форсунки и определения параметров потока топлива на выходе из распыливающих отверстий. Также теоретическими методами проведены расчетные исследования процесса распыливания топлива дизеля, работающего на смесевом биотопливе с добавкой углеродных нанотрубок. Определены количественные характеристики взаимосвязи показателей качества распыливания топлива с кинетической энергией турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и с вязкостью топлива с использованием методов корреляционного анализа. В экспериментальной части работы показатели дизеля, работающего на нефтяном дизельном топливе с до-

бавками подсолнечного масла и углеродных нанотрубок, определены при испытаниях на моторном стенде.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработана методика расчета параметров течения топлива в распылителе форсунки с использованием ПК *Ansys Fluent*, позволяющая оценить параметры потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки;
- предложен критерий  $E/v^{0,5}$ , характеризующий кинетическую энергию турбулентности  $E$  потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и вязкость  $v$  распыливаемого топлива;
- определены количественные характеристики взаимосвязи показателей мелкости распыливания и угла раскрытия конуса струи топлива с кинетической энергией турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и с предложенным критерием  $E/v^{0,5}$ ;
- расчетным и экспериментальным путем доказана возможность улучшения показателей качества процесса распыливания топлива, экологических и эффективных показателей дизеля при добавлении к нефтяному дизельному топливу подсолнечного масла и углеродных нанотрубок.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяются:

- применением современных программных комплексов для расчета показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок и использованием общепринятых методов корреляционного анализа;
- сопоставлением полученных расчетных параметров с данными проведенных автором экспериментальных исследований, а также с опубликованными экспериментальными данными.

**Практическая ценность** состоит в том, что:

- разработанная методика определения параметров потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки позволяет оценить эффективность мероприятий, направленных на турбулизацию струй распыливаемого топлива;
- предложенный критерий  $E/v^{0,5}$ , характеризующий кинетическую энергию турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и вязкость распыливаемого топлива, позволяет оценить показатели мелкости распыливания топлива и угол раскрытия конуса струи топлива без проведения трудоемких экспериментальных исследований;
- проведенные экспериментальные исследования дизеля, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавками подсолнечного масла и углеродных нанотрубок, подтвердили возможность улучшения экологических и эффективных показателей дизеля при использовании исследуемых смесевых топлив.

**Реализация результатов работы**. Работа проводилась в соответствии с планами госбюджетных и хоздоговорных работ кафедры комбинированных двигателей и альтернативных энергоустановок МГТУ им. Н.Э. Баумана и отдела ЭМ 2.1 НИИ энергетического машиностроения (НИИЭМ) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты исследований внедрены в «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) и в ЗАО «Форант-Сервис» (г. Ногинск).

### **Положения, выносимые на защиту:**

- методика расчета параметров течения топлива в распылителе форсунки с использованием ПК *Ansys Fluent*, позволяющая оценить параметры потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки;
- результаты расчетных исследований параметров потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки;
- выбор кинетической энергии турбулентности и критерия  $E/v^{0.5}$ , характеризующих турбулентность струй распыливаемого топлива;
- количественные характеристики взаимосвязи показателей мелкости распыливания и угла раскрытия конуса струи топлива с кинетической энергией турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и с предложенным критерием  $E/v^{0.5}$ ;
- результаты испытаний дизеля, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавками подсолнечного масла и углеродных нанотрубок;
- результаты расчетных исследований процесса распыливания топлива дизеля, работающего на смесевом биотопливе с добавкой углеродных нанотрубок.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы, методы и модели, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно в ходе теоретических разработок и экспериментальных исследований.

### **Апробация работы:**

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

- на заседании кафедры комбинированных двигателей и альтернативных энергоустановок МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2022 г.);
- на Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018», посвященной 150-летию факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018 г.);
- на международной научно-технической конференции «8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса» (Москва, МАДИ (ГТУ), 2019 г.);
- на международной научно-технической конференции «9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса» (Москва, МАДИ (ГТУ), 2021 г.);
- на заседаниях Всероссийской научно-технической конференции (ВНТК) им. проф. В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок при кафедре теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018-2022 г.г.);
- на Международной конференции «The II International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy» TPCASE-2020 (Воронеж, 2020 г.);
- на Международной конференции «Scientific and Technical Findings of the Arctic Exploration 2020: Present and Future» ARCTIC-2020 (С.-Петербург, 2020 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных статьи, в том числе 8 статей в журналах, рецензируемых ВАК РФ, и 4 статьи, рецензируемые международными системами цитирования *Web of Science* и *Scopus*, а также 13 материалов конференций. Общий объём опубликованных работ - 8,95 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 158 страниц, включая 136 страниц основного текста, содержащего 54 рисунка и 30 таблиц. Список литературы включает 191 источник информации на 20 страницах. Приложение на двух страницах включает документы о внедрении результатов работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проведения работ, направленных на улучшение экологических и эффективных показателей дизеля, дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** диссертации проведен анализ работ, посвященных проблемам улучшения экологических и эффективных показателей дизелей. Проанализированы показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов современных дизелей. Рассмотрены процессы и модели впрыскивания и распыливания топлива в дизелях. Отмечена необходимость использования альтернативных топлив в дизелях транспортного назначения и некоторые особенности процессов их распыливания. Перспективность работ, направленных на улучшение экологических и эффективных показателей дизеля путем совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования нефтяного и альтернативных топлив, обоснована в трудах отечественных ученых Л.В. Грехова, С.В. Гусакова, С.Н. Девянина, В.И. Ерохова, Р.З. Кавтарадзе, А.В. Козлова, А.С Кулешова, В.А. Лиханова, А.С. Лышевского, В.А. Маркова, Н.Н. Патрахальцева, В.И. Трусова, В.М. Фомина, М.Г. Шатров и ряда других. На основании анализа состояния проблемы были сформулированы цель работы и следующие задачи исследования:

1. Разработка методики расчета параметров течения топлива в распылителе форсунки с использованием программного комплекса (ПК) *Ansys Fluent*, позволяющей оценить параметры потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки.

2. Расчетное исследование параметров течения топлива в распылителе форсунки при его работе на нефтяном дизельном топливе и рапсовом масле с использованием разработанной методики.

3. Анализ параметров, характеризующих взаимосвязь процессов топливоподачи и распыливания топлива, и критериев качества процесса распыливания топлива.

4. Выбор критерия, характеризующего кинетическую энергию турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и вязкость распыливаемого топлива.

5. Определение количественных характеристик взаимосвязи показателей мелкости распыливания и угла раскрытия конуса струи топлива с кинетической энергией турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки и с выбранным критерием качества распыливания топлива.

6. Проведение расчетных исследований процессов топливоподачи и распыливания дизельного топлива и рапсового масла в условиях реальной работы дизеля.

7. Проведение экспериментальных исследований дизеля, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавкой подсолнечного масла и углеродных нанотрубок.

8. Проведение расчетных исследований процесса распыливания топлива дизеля, работающего на смесевом биотопливе с добавкой углеродных нанотрубок.

**Вторая глава** посвящена расчетным исследованиям процесса топливоподачи нефтяного дизельного топлива (ДТ) и рапсового масла (РМ). Объектом исследований являлась форсунка дизеля типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5) с распылителем Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ) с пятью распыливающими отверстиями диаметром  $d_p=0,35$  мм. Разработана методика расчета течения ДТ и РМ в проточной части распылителя форсунки с использованием программного комплекса (ПК) *Ansys Fluent*. При этом исследовано стационарное течение указанных топлив при нахождении иглы форсунки в положении ее максимального подъема  $h_i=0,32$  мм. Давление на входе в расчетную область принято равным  $p_{\text{вх}}=51,5; 40,0$  и  $20,0$  МПа, давление на выходе из расчетной области –  $8,9$  МПа, температура топлива –  $t=40$  °С. Использована симметричная геометрическая модель распылителя с одним распыливающим отверстием. При моделировании двухфазного течения топлива в распылителе рассмотрена многофазная модель (*Model mixture*). Для описания процесса кавитации использована модель *Schnerr-Sauer*, в которой уравнение переноса имеет вид:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \nabla(\alpha \rho_v \vec{V}_v) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt},$$

где  $\alpha$  – объемная концентрация паров;  $\rho_v$  и  $\rho_l$  – плотности газовой и жидкой фаз;  $\rho$  – плотность смеси ( $\rho = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l$ );  $\vec{V}_v$  – скорость газовой фазы. Выражение, описывающее скорость переноса масс, имеет вид:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_n} \sqrt{\frac{2}{3} \left| \frac{p_v - p}{\rho_l} \right|},$$

где  $n_n$  – число пузырьков пара на единицу объема;  $p_v$  – давление пара в пузырьке,  $p$  – давление во внешней жидкой фазе;  $R_n$  – радиус пузырька, рассчитанный по формуле  $R_n = \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n_n} \right)$ . Использована  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности. Для оценки турбулизации потока на выходе из распыливающего отверстия использована кинетическая энергия турбулентности, характеризуемая среднеквадратической флуктуацией скорости течения топлива.

С использованием описанной методики проведено моделирование стационарного течения нефтяного ДТ и РМ в проточной части распылителя дизельной форсунки и получены распределения основных параметров потока этих топлив в расчетной области – давления топлива, скорости его течения, кинетической энергии турбулентности (Рисунок 1), объемной концентрации паров топлива. По результатам расчетов получены средние по поперечным сечениям распыливающего отверстия значения кинетической энергии турбулентности потока

нефтяного ДТ и РМ при различных давлениях на входе в расчетную область, представленные в Таблице 1.

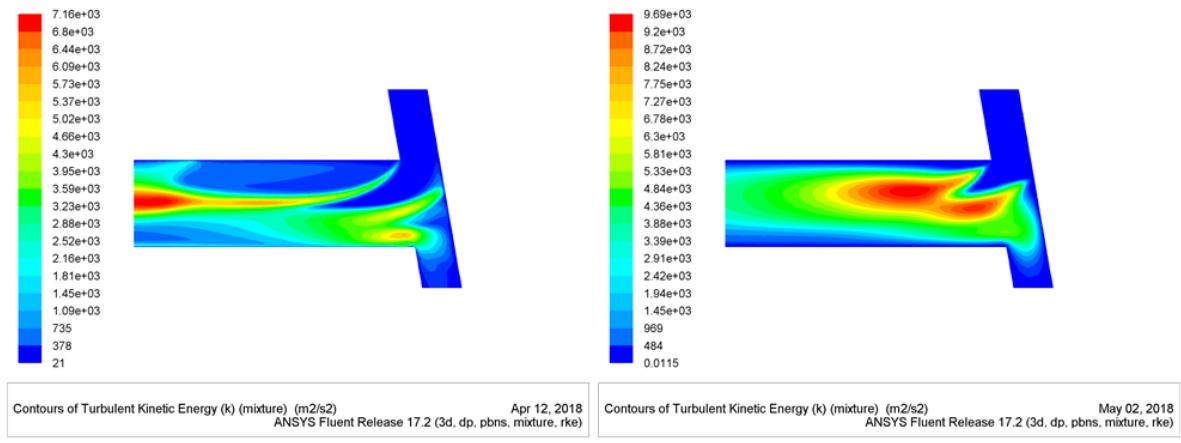


Рисунок 1 – Распределение кинетической энергии турбулентности потока нефтяного ДТ и РМ в продольном сечении распыливающего отверстия при температуре 40 °С, давлении на входе в расчетную область – 51,5 МПа и давлении на выходе из расчетной области – 8,9 МПа: *а* – нефтяное ДТ; *б* – РМ

Таблица 1 – Средние по поперечным сечениям распыливающего отверстия значения кинетической энергии турбулентности потока нефтяного ДТ и РМ при различных давлениях на входе в расчетную область ( $p_{вх}$ )

Координата $l_{p\text{ тек}}$ , мм	Средняя кинетическая энергия турбулентности потока топлива $E_{m,\text{сред}}$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>					
	$p_{вх} = 51,5$ МПа		$p_{вх} = 40$ МПа		$p_{вх} = 20$ МПа	
	ДТ	РМ	ДТ	РМ	ДТ	РМ
0	1637,35	1914,69	1307,32	1236,83	626,25	1,79
0,03	1710,88	2243,38	1367,69	1445,90	687,64	3,84
0,1	1804,73	3070,31	1450,62	2149,03	764,12	69,68
0,2	1826,49	3718,86	1467,94	2834,90	836,17	289,44
0,3	1791,53	3897,49	1432,98	3002,16	892,58	448,74
0,4	1753,88	3977,22	1397,47	2941,61	940,59	543,83
0,5	1736,34	3891,60	1375,03	2746,15	965,93	555,86
0,6	1724,25	3656,54	1374,64	2504,83	958,44	537,02
0,7	1722,97	3329,64	1533,85	2248,04	912,98	498,98
0,8	1743,52	3008,93	1901,21	2017,35	847,41	463,90
0,9	1954,08	2707,81	2115,53	1811,71	771,00	430,75
1,0	2377,49	2439,32	2136,59	1634,01	694,56	399,53
1,1	2574,37	2208,06	2057,61	1483,19	623,43	371,37

**В третьей главе** приведены результаты исследований процесса распыливания нефтяного ДТ и растительного масла. Среди показателей, характеризующих качество распыливания топлива, выделены дисперсность (мелкость) распыливания топлива и параметры струй распыливаемого топлива – их длина и угол раскрытия конуса струи. Эти параметры в значительной степени предопределяют экологические и эффективные показатели дизеля.

Для оценки мелкости распыливания топлива А.С. Лышевский предложил методику, в которой мелкость распыливания определяется в критериальном виде с использованием критериев:

- критерий Вебера  $We = \frac{V^2 \cdot \rho_t \cdot d_p}{\sigma_t}$ ;

- критерий  $M = \frac{\mu_t^2}{\rho_t \cdot d_p \cdot \sigma_t}$  (величина  $M$  является обратной величине критерия Лапласа  $L_p$ );

- критерий  $\rho = \frac{\rho_v}{\rho_t}$  (величина  $\rho$  – относительная плотность воздуха),

где  $V$  – скорость истечения топлива из распыливающего отверстия [м/с];  $d_p$ , = 0,00035 – диаметр распыливающего отверстия [м];  $\mu_t$  – динамическая вязкость топлива [Па·с];  $\sigma_t$  – коэффициент поверхностного натяжения топлива [Н/м];  $\rho_t$  и  $\rho_v$  – плотность топлива и воздуха [кг/м<sup>3</sup>], соответственно.

Используя названные критерии, А.С. Лышевский предложил следующие зависимости для расчета средних диаметров капель:

- средний арифметический диаметр  $d_{10} = 1,8 \cdot d_p \cdot (\rho \cdot We)^{-0,266} \cdot M^{0,0733}$ ;

- средний объемный диаметр  $d_{30} = 2,21 \cdot d_p \cdot (\rho \cdot We)^{-0,266} \cdot M^{0,0733}$ ;

- средний диаметр капель по Заутеру  $d_{32} = 2,68 \cdot d_p \cdot (\rho \cdot We)^{-0,266} \cdot M^{0,0733}$ .

Для оценки мелкости распыливания топлива В.А. Кутовой предложил использовать средний медианный диаметр капель, который может быть рассчитан по зависимости:

$$d_m = d_0 \left[ \left( 1 + \frac{d_p}{d_2} \right) + 2 \left( 1 - \frac{p_{cp}}{2p_1} \right) \frac{p_1}{p_{cp} + \frac{p_1 d_2}{\pi d_p}} \left( \frac{l_p}{d_p} \right)^{0,125} \right] \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^{0,15},$$

где  $d_m$  – средний медианный диаметр капель [мкм];  $d_p$  и  $l_p$  – диаметр и длина распыливающего отверстия [мм];  $p_{cp}$  – среднее давление впрыскивания (при расчетах принято равным значениям постоянного давления впрыскивания, указанным в таблице 2);  $\nu$  – вязкость топлива [мм<sup>2</sup>/с]; константы:  $d_0 = 16,5$  мкм;  $d_2 = 0,30$  мм;  $p_1 = 15,0$  МПа;  $\nu_0 = 5,23$  мм<sup>2</sup>/с. Важнейшим показателем является и угол раскрытия струй распыливаемого топлива  $\beta$ , который может быть рассчитан по зависимости А.С. Лышевского в виде:

$$\operatorname{tg} \left( \frac{\beta}{2} \right) = D_a \cdot \frac{We^{0,32} \cdot \rho^m}{M^{0,07}}.$$

В этой формуле по рекомендации А.С. Лышевского использованы следующие значения коэффициентов:  $D_a = 0,0112$  и  $m = 0,5$ .

На кинетическую энергию турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки значительное влияние оказывают давление на выходе из распыливающего отверстия форсунки и свойства топлива. В таблице 2 приведены параметры топлива на выходе из распыливающего отверстия, полученные при расчетах течения топлива в проточной части распылителя форсунки. Анализ расчетных данных показал, что при увеличении кинетической энергии турбулентности  $E$  с 500 до 2500 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> медианный диаметр капель нефтяного ДТ по В.А. Кутовому  $d_m$  и максимальный диаметр капель по А.С. Лышевскому  $D_k$  уменьшаются примерно вдвое.

Таблица 2 – Параметры потока топлива на выходе из распыливающего отверстия (при  $l_p = 1,1$  мм) и показатели качества распыливания топлива для различных топлив (ДТ и РМ) и различных давлениях на входе в расчетную область ( $p_{вх}$ )

Показатель	Значение показателя для каждого вида топлива при различных давлениях на входе $p_{вх}$					
	$p_{вх} = 51,5\text{ МПа}$		$p_{вх} = 40\text{ МПа}$		$p_{вх} = 20\text{ МПа}$	
	ДТ	РМ	ДТ	РМ	ДТ	РМ
Скорость истечения $V$ , м/с	322	309	275	264	165	158
Плотность топлива $\rho_t$ , кг/м <sup>3</sup>	822,7	896,3	822,7	896,3	822,7	896,3
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ , мН/м	27,1	33,2	27,1	33,2	27,1	33,2
Динамическая вязкость топлива $\mu$ , мПа·с	1,97	37,2	1,97	37,2	1,97	37,2
Кинематическая вязкость топлива $v$ , мм <sup>2</sup> /с	2,4	41,5	2,4	41,5	2,4	41,5
Критерий $E/v^{0,5}$ , м/с <sup>1,5</sup>	1661749	342757	1328182	230236	402422	57648
Критерий Вебера $We$	1102952	900301	805904	657831	289299	236145
Критерий $M$	0,0005	0,133	0,0005	0,133	0,0005	0,133
Критерий $\rho$	0,0204	0,0187	0,0204	0,0187	0,0204	0,0187
Средний арифметический диаметр $d_{10}$ , мкм	25	41	27	44	36	58
Средний объемный диаметр $d_{30}$ , мкм	31	50	34	54	44	72
Средний диаметр капель по Заттеру $d_{32}$ , мкм	37	61	41	66	53	87
Средний медианный диаметр $d_m$ , мкм	31,4	48,1	35,4	54,3	50,8	77,8
Тангенс угла раскрытия струи $tg(\beta/2)$	0,234	0,142	0,212	0,128	0,152	0,093

Примечание: значения плотности топлив, их кинематической и динамической вязкости топлив приведены при температуре  $t = 40$  °C, значения коэффициента поверхностного натяжения топлив даны при температуре  $t = 20$  °C

С использованием результатов Таблицы 2 проведён анализ влияния средней кинетической энергии турбулентности  $E$  потока топлива на выходе из распыливающего отверстия и кинематической вязкости топлива  $v$  на показатели распыливания топлива. При этом предложен критерий (комплекс)  $E/v^{0,5}$  [м/с<sup>1,5</sup>], характеризующий качество процесса смесеобразования. При анализе влияния этого комплекса на качество распыливания определены корреляционные зависимости средних диаметров капель при впрыскивании и распыливании топлива от значений критерия  $E/v^{0,5}$ . В результате проведенных исследований получены следующие зависимости показателей мелкости распыливания топлива:

- средний арифметический диаметр капель  $d_{10}$  и его корреляция по коэффициенту корреляции  $R$  со значениями комплекса  $(E/v^{0,5})$ :

$$d_{10} = 165,7 - 9,85 \ln(E/v^{0,5}), \text{ мкм}$$

$$R = 0,9940.$$

- средний объемный диаметр капель  $d_{30}$  и коэффициент корреляции  $R$  со значениями комплекса ( $E/v^{0,5}$ ):

$$d_{30} = 203,4 - 12,09 \ln(E/v^{0,5}), \text{ мкм} \quad R = 0,9941.$$

- средний диаметр капель по Заутеру  $d_{32}$  и коэффициент корреляции  $R$  со значениями комплекса ( $E/v^{0,5}$ ):

$$d_{32} = 246,7 - 14,66 \ln(E/v^{0,5}), \text{ мкм} \quad R = 0,9943.$$

- средний медианный диаметр капель  $d_m$  и коэффициент корреляции  $R$  со значениями комплекса ( $E/v^{0,5}$ ):

$$d_m = 220,5 - 13,25 \ln(E/v^{0,5}), \text{ мкм} \quad R = 0,9886.$$

Таким образом, выявлена тесная взаимосвязь мелкости распыливания топлива и значений критерия  $E/v^{0,5}$ . При этом кинематическая вязкость топлив изменялась в широких пределах –  $\nu = 2,4 \text{ мм}^2/\text{с}$  у нефтяного ДТ и  $\nu = 41,5 \text{ мм}^2/\text{с}$  у РМ (при температуре  $t = 40^\circ\text{C}$ ).

Проведены исследования влияния кинетической энергии турбулентности  $E$  и критерия  $E/v^{0,5}$  на угол раскрытия конуса струй топлива  $\beta$ . В Таблице 2 приведены полученные значения тангенса угла конуса раскрытия струи  $\tan(\beta/2)$  для рассматриваемых вариантов подачи различных топлив. На Рисунке 2 показана зависимость тангенса угла раскрытия конуса струи  $\tan(\beta/2)$  от критерия ( $E/v^{0,5}$ ). При расчетах получена корреляционная зависимость тангенса  $\tan(\beta/2)$  с критерием  $E/v^{0,5}$  и их корреляция по коэффициенту корреляции  $R$ :

$$\tan(\beta/2) = 4,41 \cdot 10^{-3} \cdot (E/v^{0,5})^{0,2749} \quad R = 0,9968.$$

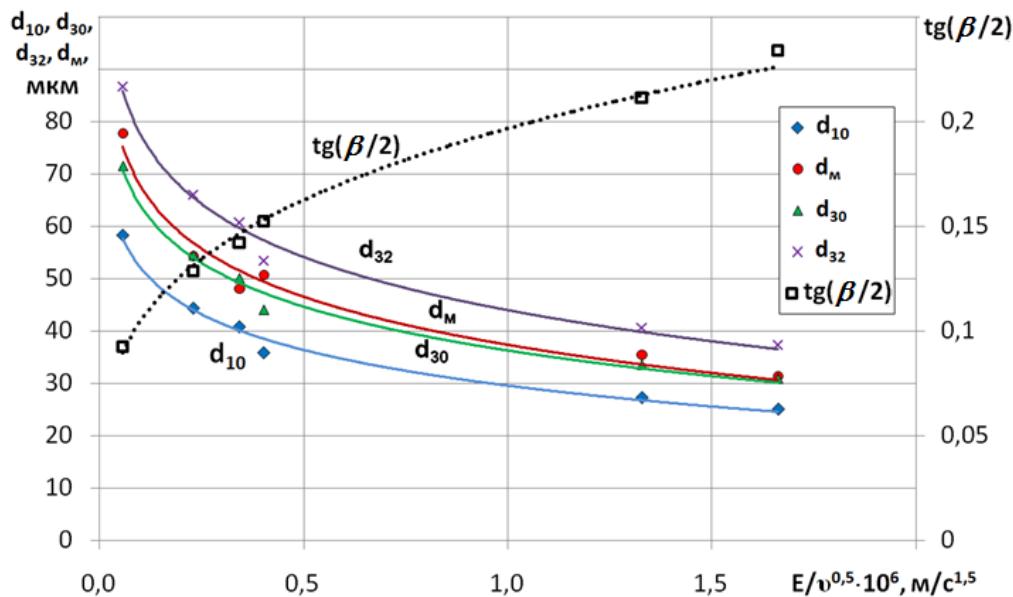


Рисунок 2 – Зависимость показателей мелкости распыливания топлива  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{32}$  и  $d_m$ , а также тангенса угла раскрытия конуса струи  $\tan(\beta/2)$  от критерия  $E/v^{0,5}$

Рассмотренные выше характеристики топливоподачи и распыливания нефтяного ДТ и РМ получены при моделировании стационарного течения указанных топлив в проточной части распылителя форсунки дизеля типа Д-245 при максимальном подъеме иглы форсунки, равном 0,32 мм. В условиях реальной работы дизеля система топливоподачи работает в импульсном режиме –

подача топлива осуществляется в конце такта сжатия. В связи с этим целесообразно исследование такой работы системы топливоподачи. Такое исследование проведено расчетным путем с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного профессором А.С. Кулешовым. Для расчета смесеобразования и сгорания в дизелях используется РК-модель, в основе которой лежит расчетный метод, предложенный в начале 90-х годов профессором Н.Ф. Разлейцевым и доработанный профессором А.С. Кулешовым. РК-модель учитывает особенности характеристики впрыска, включая многофазный впрыск, мелкость распыливания топлива, ориентацию струй в объеме КС, динамику развития топливных струй, взаимодействие струй с воздушным вихрем и стенками. Учитываются условия развития каждой топливной струи и образованных струями пристеночных потоков, а также их взаимодействие между собой. По своей идеологии РК-модель близка к модели, разработанной проф. Хироясу, но имеются существенные отличия, связанные с более детальным рассмотрением взаимодействия топливных струй со стенками камеры сгорания (КС) и между собой.

Объектом исследования являлся дизель типа Д-245. При расчетных исследованиях задавался закон подачи, формируемый кулачками ТНВД на номинальном режиме работы дизеля типа Д-245 с частотой вращения коленчатого вала  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  и цикловой подачей топлива  $q_{ц}=80 \text{ мм}^3$ .

Расчетные характеристики распыливания исследуемых топлив и смесеобразования на режиме максимальной мощности ( $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ,  $q_{ц}=80 \text{ мм}^3$ ) получены в диапазоне изменения объемной концентрации РМ в смесевом биотопливе  $C_{РМ}$  от 0% (чистое ДТ) до 100% (чистое РМ). Следует отметить тенденцию ухудшения характеристик процессов впрыскивания и распыливания топлива с увеличением содержания РМ в смеси с ДТ. Так, в диапазоне изменения  $C_{РМ}$  от 0 до 100% средний диаметр капель по Заутеру  $d_{к.ср}$  возрастает от 24,3 до 39,4 мкм, длина струи на момент окончания впрыскивания  $L$  увеличивается от 41,9 до 48,4 мм, угол раскрытия внешнего контура струи  $\beta$  уменьшается от 20,8 до 15,8 град. Таким образом, возможна работа дизеля при любой концентрации РМ в смесевом биотопливе. Но в ряде исследований дизелей, работающих на чистых растительных маслах или на смесях нефтяного ДТ и растительных масел, показано, что длительная работа на этих топливах может сопровождаться закоксовыванием распыливающих отверстий и отложением нагара на стенках КС. В связи с этим, предпочтительна работа дизеля не на чистых растительных маслах, а на нефтяном ДТ с небольшими добавками масел.

Последующие расчеты проведены для дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавками РМ в количестве от 0 до 10% по объему. Результаты этих расчетных исследований (Таблица 3) показали, что на номинальном режиме в указанном диапазоне изменения  $C_{РМ}$  удельный эффективный расход топлива  $g_e$  возрастает от 225,7 до 228,7 г/(кВт·ч). При этом эффективный КПД дизеля  $\eta_e$  изменяется незначительно, а концентрация в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$  снижается от 677 до 660  $ppm$ . В этом же диапазоне изменения концентрации  $C_{РМ}$  дымность ОГ  $K_X$  снижается от 11,2 до 9,0 % по шкале Хартриджа.

Таблица 3 – Расчетные характеристики показателей рабочего процесса дизеля Д-245 на режиме максимальной мощности с  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> и  $q_{ц}=80$  мм<sup>3</sup>

Параметры дизеля	Топлива				
	ДТ	97,5 % ДТ + 2,5 % РМ	95,0 % ДТ + 5,0 % РМ	92,5 % ДТ + 7,5 % РМ	90,0 % ДТ + 10,0 % РМ
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч)	225,7	226,6	227,4	228,1	228,7
Эффективный КПД дизеля $\eta_e$	0,3753	0,3749	0,3747	0,3747	0,3748
Объемное содержание оксидов азота в ОГ $C_{NOx}$ , ppm	677	674	670	665	660
Дымность ОГ по шкале Хартриджа $K_X$ , %	11,2	10,6	10,0	9,5	9,0
Средний диаметр капель по Заутеру $d_{32}$ , мкм	24,30	24,75	25,20	25,65	26,10
Длина струи на момент окончания впрыскивания $L$ , мм	41,9	42,1	42,3	42,5	42,7
Угол раскрытия конуса струи на момент окончания впрыскивания $\beta$ , град	20,80	20,65	20,50	20,35	20,20

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным и расчетным исследованиям возможности использования подсолнечного масла (РМ) и углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве экологических добавок к нефтяному ДТ. В проведенных исследованиях использовались УНТ типа *TNIM1* компании *Timesnano* (КНР). Они имеют длину 10-30 мкм, периферийный диаметр 5-15 Нм, удельную поверхность 220-300 м<sup>2</sup>/г. При испытаниях использовалось нефтяное ДТ марки «Л», в которое добавлялись УНТ типа *TNIM1* в количестве от 0 (чистое ДТ) до 500 мг/л. Смеси нефтяного ДТ с УНТ получены с использованием ультразвуковой ванны типа УЗВ-10/150-ТН производства РЭЛТЕК.

Исследования проведены на дизель-генераторной установке (ДГУ), содержащей дизель без наддува типа Д-243 (4 Ч 11/12,5) и электрический генератор переменного тока типа *ECO-ECP* производства *RINA* (Италия). Дизель исследован на режимах предельной регуляторной характеристики. При испытаниях статический угол опережения впрыскивания топлива был равен  $\theta = 13^\circ$  поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки. При испытаниях определялись штатные параметры дизеля и показатели дымности и токсичности его ОГ. Дымность ОГ измерялась дымометром «Инфракар Д1.01» ООО «Западприбор», г. Москва, а концентрации в ОГ токсичных компонентов (оксидов азота NO<sub>x</sub>,monoоксида углерода CO, углеводородов CH<sub>x</sub>) – газоанализатором «Инфракар 5М-3.01» той же фирмы.

Испытания дизеля Д-243 проведены на режимах с нагрузками  $N_e = 36$ , 12 и 0 кВт (холостой ход). Режим максимальной мощности соответствовал частоте вращения  $n=1480$  мин<sup>-1</sup> и мощности дизеля  $N_e=36,6$  кВт (Таблица 4). На этом режиме часовой расход нефтяного ДТ составлял около 10,5 кг/ч.

Таблица 4 – Частота вращения дизеля  $n$ , эффективная мощность  $N_e$ , удельный эффективный расход топлива  $g_e$ , дымность ОГ  $K_x$ , объемное содержание оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$ ,monoоксида углерода  $C_{\text{CO}}$ , углеводородов  $C_{\text{CH}_x}$  в ОГ дизеля Д-243

Работа на жидким моторном топливе (смесь 90% нефтяного ДТ и 10% ПМ)							
№ режимов	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$N_e$ , кВт	$g_e$ , г/(кВт·ч)	$K_x$ , % (Хартридж)	$C_{\text{NOx}}$ , ppm	$C_{\text{CO}}$ , %	$C_{\text{CH}_x}$ , ppm
1	1480	36,6	289,3	12,9	1626	0,016	9
2	1510	23,6	305,5	4,5	1203	0,017	10
3	1540	12,3	398,4	2,8	585	0,018	11
4	1590	0	-	1,4	179	0,018	12
Работа на жидком моторном топливе с добавкой 125 мг/л нанотрубок							
1	1480	36,6	288,5	11,5	1605	0,016	9
2	1510	23,6	303,8	4,3	1185	0,017	10
3	1540	12,3	394,3	2,3	579	0,017	10
4	1590	0	-	1,2	177	0,017	11
Работа на жидком моторном топливе с добавкой 250 мг/л нанотрубок							
1	1480	36,6	287,7	10,2	1580	0,016	8
2	1510	23,6	302,1	3,8	1169	0,016	9
3	1540	12,3	389,4	1,9	572	0,017	10
4	1590	0	-	1,1	175	0,017	11
Работа на жидком моторном топливе с добавкой 500 мг/л нанотрубок							
1	1480	36,6	287,2	9,0	1552	0,015	8
2	1510	23,6	300,8	3,2	1151	0,015	8
3	1540	12,3	385,4	1,6	564	0,016	9
4	1590	0	-	1,0	174	0,016	9

Примечание: указано объемное процентное содержание компонентов в ОГ; ppm – миллионые объемные доли  $C_{\text{NOx}}$ ,  $C_{\text{CO}}$ ,  $C_{\text{CH}_x}$ .

На режиме с полной нагрузкой наличие УНТ в топливе отказывает слабое влияние на удельный эффективный расход топлива, однако на режимах с частичной нагрузкой это влияние становится более значительным. По мере увеличения добавки УНТ ее влияние на удельный эффективный расход топлива увеличивается. При нагрузке 12,3; 23,6 и 36,6 кВт и использовании смеси 90% ДТ и 10% ПМ без добавления УНТ этот расход составил 398,4; 305,5 и 289,3 г/(кВт·ч), а при использовании смесевого топлива, содержащего 500 мг/л УНТ – соответственно 385,4; 300,8 и 287,2 г/(кВт·ч).

Среди показателей токсичности ОГ добавка УНТ оказывает наибольшее влияние на дымность ОГ. На режиме с максимальной нагрузкой увеличение содержания УНТ в топливе от 0 до 500 мг/л приводит к снижению дымности ОГ от 12,9 до 9,0 % по шкале Хартриджа (на 30%). Отмечена тенденция снижения эмиссии оксидов азота при добавлении УНТ в топливо. Наиболее снижение содержания оксидов азота в ОГ  $C_{\text{NOx}}$  с 1626 до 1552 ppm (на 4,6 %) отмечено при росте содержания УНТ в топливе от 0 до 500 мг/л на режиме максимальной мощности. Добавка УНТ к топливу слабо влияет на содержание в ОГ monoоксида углерода  $C_{\text{CO}}$  и углеводородов  $C_{\text{CH}_x}$ . Отмечена тенденция снижения содержания в ОГ monoоксида углерода  $C_{\text{CO}}$  и углеводородов  $C_{\text{CH}_x}$ .

Для оценки характеристик распыливания указанных смесей проведено моделирование процесса распыливания нефтяного ДТ, смеси 90% ДТ с 10% ПМ (по объему) и этой смеси с добавкой УНТ, равной 1000 мг/л. При этом исследовано впрыскивание топлива в камеру постоянного объема (КПО) с использованием ПК *Converge CFD*. При моделировании распыливания топлива с испарением применен подход Эйлера-Лагранжа. Первичный распад моделировался с помощью модели *KH-ACT* с учетом динамической стабильности поверхности струи и эффектов турбулентности и кавитации потока топлива на выходе распыливающего отверстия. Для описания вторичного распада струи использована модель *RT*. Столкновение и объединение капель описано численной схемой *No Time Counter*. Скорость испарения капели описывается скоростью изменения радиуса капли  $r_d$ , которая определяется с помощью корреляции *Frossling*:

$$dr_d/dt = -\alpha_m \rho_g DB_m Sh_d / (2r_d \rho_l),$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент масштабирования для массопереноса;  $\rho_g$  и  $\rho_l$  – плотность окружающего газа и жидкого топлива;  $D$  – коэффициент массопереноса паров топлива в окружающем газе;  $B_m$  – число Спaldинга (*Spalding*);  $Sh_d$  – число Шервуда (*Sherwood*). Температура внутри капли описывается уравнением:

$$c_{pl} \rho_l \partial T / \partial t = \lambda_l \left( \partial^2 T / \partial R^2 + \frac{2}{R \partial T / \partial R} \right),$$

где  $c_{pl}$  – удельная теплоемкость жидкого топлива, кДж/(кг·К);  $\lambda_l$  – его теплопроводность, Вт/(м· К);  $R$  – радиальное расстояние до центра капли, мкм. При отсутствии лучистого теплообмена теплота, поступающая в каплю, определяется выражением

$$Q_{neat} = \beta_h 2\pi r_d Nu_d \lambda_l (T_g - T_{R=r_d}) + 4\pi r_d^2 \rho_l L dr_d / dt,$$

где  $\beta_h$  – коэффициент масштабирования для теплопередачи;  $Nu_d$  – число Нуссельта;  $T_g$  – температура окружающего газа, К;  $L$  – скрытая теплота испарения топлива, кДж/кг. Значения  $\alpha_m$  и  $\beta_h$  для нефтяного ДТ и смеси 90% ДТ и 10% ПМ равны единице, а при добавках УНТ приняты равными 1,081 и 1,159.

Впрыскивание топлива в камеру постоянного объема (КПО) осуществлялось форсункой дизеля Д-243. Параметры потока топлива на выходе из распыливающего отверстия были получены при моделировании течения потока топлива в проточной части распылителя при характерных для режима максимальной мощности дизеля Д-243 среднего давления впрыска  $p_{впр\,ср}=30$  МПа и противодавлении  $p_{ц}=3,6$  МПа. Моделирование выполнено лишь для одной из пяти струй. Температура газов в КПО принята равной 890 К. Использованы следующие расчетные значения параметров потока на выходе из распыливающего отверстия: для нефтяного ДТ - массовой расход топлива через одно отверстие - 11,05 г/с, кинетическая энергия турбулентности -  $1132 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Для смеси 90% ДТ и 10% ПМ эти значения составили 11,06 и 1119, соответственно.

Добавление ПМ и УНТ в нефтяное ДТ изменяет глубину проникновения жидкости и паров топлива в КПО (Рисунок 3). При добавлении УНТ в жидкое топливо угол раскрытия струи уменьшается. Добавление УНТ приводит к росту среднего диаметра капель (Рисунок 4), но отмечена лучшая испаряемость моторных топлив при добавлении в них УНТ.

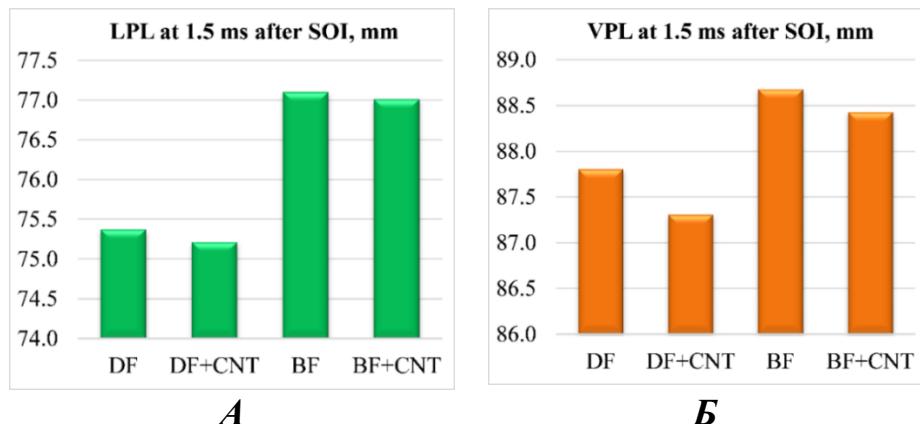


Рисунок 3 – Длина проникновения жидкости топлива (*LPL*) (а) и длина проникновения паров топлива (*VPL*) (б) в момент времени 1,5 мс после начала впрыска для нефтяного ДТ (*DF*), ДТ с УНТ (*DF+CNT*), смеси ДТ и ПМ (*BF*) и смесевого топлива с ДТ, ПМ и УНТ (*BF+CNT*)

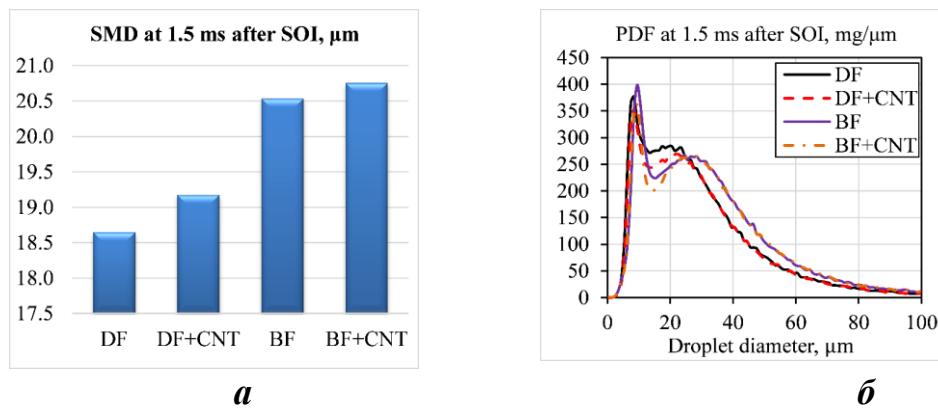


Рисунок 4 – Средний диаметр капель топлива по Заутеру (*SMD*) (а) и распределение массы капель по их диаметру (функция распределения диаметра - *PDF*) (б) в момент времени 1,5 мс после начала впрыска для исследуемых топлив

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

- Показано, что определяющее влияние на процесс распыливания топлива оказывает турбулизация струй топлива. В качестве фактора, характеризующего турбулизацию потока топлива на выходе из распыливающих отверстий форсунки, использована кинетическая энергия турбулентности, которая физически определяемая пульсационными составляющими скорости потока по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
- Разработана методика расчета параметров течения топлива в распылителе форсунки с использованием ПК *Ansys Fluent*, позволяющая оценить параметры потока топлива на выходе из распыливающих отверстий. Исследовано стационарное течение нефтяного ДТ и ПМ в проточной части распылителей дизеля типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5) при максимальном подъеме иглы форсунки, давлениях на входе в расчетную область, равных 51,5, 40 и 20 МПа, и давлении на выходе из расчетной области, равном 8,9 МПа.

3. При использовании РМ в качестве топлива отмечено заметное снижение скорости впрыскивания и турбулентности потока по сравнению с нефтяным ДТ. При давлениях на входе и выходе из расчетной области, равных 51,5 и 8,9 МПа, кинетическая энергия турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия равна, соответственно, 2574,37 и 2208,00 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

4. В качестве показателей качества процесса распыливания рассмотрены средние диаметры капель и угол раскрытия струй распыливаемого топлива. Предложен критерий  $E/v^{0,5}$ , отражающий взаимосвязь показателей распыливания с кинетической энергией турбулентности потока топлива на выходе из распыливающих отверстий  $E$  и его вязкостью  $v$ . Определена взаимосвязь средних диаметров капель распыливаемого топлива и угла раскрытия конуса струй с кинетической энергией турбулентности потока топлива на выходе из распыливающих отверстий  $E$  и критерием  $E/v^{0,5}$ . Корреляционный анализ подтвердил наличие тесной взаимосвязи показателей распыливания топлива с критерием  $E/v^{0,5}$  – коэффициенты корреляции исследованных зависимостей изменяются в диапазоне от 0,9886 до 0,9968.

5. Расчеты процессов топливоподачи и распыливания топлива дизеля Д-245 с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК показали, что при его переводе с нефтяного ДТ на РМ средний диаметр капель по Заутеру возрос от 24,3 до 39,4 мкм, длина струи на момент окончания впрыскивания увеличилась от 41,9 до 48,4 мм, угол раскрытия конуса струи уменьшился от 20,8 до 15,8 град. Уменьшение диаметра капель распыливаемого топлива и сокращение длины его струй сопровождается снижением удельного эффективного расхода топлива и некоторым увеличением содержания оксидов азота в ОГ.

6. При испытаниях дизеля без наддува типа Д-243 (4 Ч 11/12,5) в составе ДГУ в смесь 90% нефтяного ДТ и 10% ПМ добавлялись УНТ типа *TNIM1* компании *Timespano* (Китай) в количестве 0 (чистое ДТ) до 500 мг/л. При работе на смеси 90% ДТ и 10% ПМ без добавления УНТ на режимах предельной регуляторной и нагрузках 12,3; 23,6 и 36,6 кВт удельный эффективный расход топлива составил 398,4; 305,5 и 289,3 г/(кВт·ч), а при работе на смесевом топливе, содержащего 500 мг/л УНТ – соответственно 385,4; 300,8 и 287,2 г/(кВт·ч).

7. Добавка УНТ в смесевое топливо оказывает наибольшее влияние на дымность ОГ. На режиме с полной нагрузкой увеличение содержания УНТ в смесевом топливе от 0 до 500 мг/л приводит к уменьшению дымности ОГ от 12,9 до 9,0 % по шкале Хартриджа, то есть на 30%. При добавлении УНТ в смесевое топливо выбросы оксидов азота снижаются. Наибольшее снижение содержания оксидов азота в ОГ – от 1626 до 1552 ppm (на 4,6 %) отмечено на режиме максимальной мощности при росте содержания УНТ жидким моторным топливом от 0 до 500 мг/л. Добавка УНТ к смесевому топливу сравнительно слабо влияет на содержание в ОГ монооксида углерода и углеводородов.

8. Проведенные расчетные исследования процесса распыливания топлива дизеля, работающего на смесевом биотопливе с добавкой УНТ, с использованием ПК *Converge CFD* показали, что при добавлении углеродных нанотрубок к смесевому биотопливу положительными эффектами являются меньшая глу-

бина проникновения струй топлива в КС и лучшая испаряемость топлива, что обеспечивает лучшее качество процесса смесеобразования.

**Основные положения диссертации изложены в следующих работах:**

1. Study on the Possibility of Improving the Environmental Performance of Diesel Engine Using Carbon Nanotubes as a Petroleum Diesel Fuel Additive / V.A. Neverov [et al.] // Energies. 2019. Vol. 12. Issue 14. Art. 4345. P. 1-13 (0,80 п.л./0,20 п.л.).
2. Investigation on the Effect of the Flow Passage Geometry of Diesel Injector Nozzle on Injection Process Parameters and Engine Performances / V.A. Neverov [et al.] // Energy Science & Engineering. 2022. P. 1-26 (1,5 п.л./0,3 п.л.).
3. Flow Simulation of Petroleum Diesel Fuel and Rapeseed Oil in the Nozzle of a Diesel Injector / V.A. Neverov [et al.] // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering (Конференция TPCASE-2020, Воронеж). 2021. Vol. 1035. Art. no 012034. P. 1-14 (0,90 п.л./0,30 п.л.)
4. Injection and Atomization of Diesel Fuel and Rapeseed Oil in Diesel Engine / V.A. Neverov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Конференция ARCTIC-2020, С.-Петербург). 2021. 678. Art. 012010. P. 1-12 1-13 (0,75 п.л./0,25 п.л.).
5. Совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах / В.А. Неверов [и др.] // Двигателестроение. 2021. № 1. С. 3-12 (0,60 п.л./0,20 п.л.).
6. Показатели токсичности отработавших газов дизельного двигателя, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавками растительных масел / В.А. Неверов [и др.] // Двигателестроение. 2020. № 4. С. 18-24 (0,50 п.л./0,15 п.л.).
7. Исследование воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизельного двигателя / В.А. Неверов [и др.]. // Двигателестроение. 2021. № 3. С. 16-21 (0,50 п.л./0,15 п.л.).
8. Применение углеродных нанотрубок в качестве присадки, улучшающей экологические показатели дизеля / В.А. Неверов [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2020. Том 19. № 10. С. 473-481 (0,60 п.л./0,15 п.л.).
9. Марков В.А., Девягин С.Н., Неверов В.А. Использование в дизелях смесевых биотоплив с добавками соевого масла // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 6. С. 40-50 (0,70 п.л./0,20 п.л.).
10. Исследование возможностей использования соевого масла как экологической добавки в нефтяное дизельное топливо / В.А. Неверов [и др.] // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2022. № 1. С. 39-52 (0,80 п.л./0,20 п.л.).
11. Горчичное масло как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу / В.А. Неверов [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2017. Том 16. № 1. С. 10-21. С. 15-23 (0,70 п.л./0,20 п.л.).
12. Использование водотопливных эмульсий в автомобильных и судовых дизелях / В.А. Неверов [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2018. Том 17. № 10. С. 440-448 (0,60 п.л./0,20 п.л.).