

На правах рукописи

Са Бовэнь

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ
ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ И СВОЙСТВ ТОПЛИВА

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

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 « 19 » октября 2021 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.

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 « » 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Тумашев Р.З

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью удовлетворения современных жестких требований к показателям топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей. Значительное влияние на эти показатели оказывает характер протекания процессов топливоподачи, распыливания топлива и смесеобразования, которые, в первую очередь предопределяются конструкцией системы топливоподачи, в особенности, конструкцией форсунок и их распылителей. Проблема обеспечения требуемых параметров процесса топливоподачи особенно актуальна для дизелей небольшой размерности, в которых из-за небольшого объема камеры сгорания (КС) организация чисто объемного смесеобразования, обеспечивающего равномерное распределение топлива по объему КС и наиболее полное сгорание топлива, оказывается очень сложной. Для достижения требуемого характера смесеобразования целесообразно внесение изменений в конструкцию распылителей форсунок, способствующих улучшению качества топливоподачи и распыливания топлива. Использование топлив с заданными свойствами также повышает эффективность процесса их сгорания в КС дизеля. При этом биотоплива на основе растительных масел отличаются хорошими экологическими свойствами. В дизелях, работающих на этих топливах, отмечается пониженное содержание в ОГ токсичных компонентов – оксидов азота и сажи (твердых частиц). Улучшение экологических показателей дизеля достигается и при добавлении в нефтяное дизельное топливо (ДТ) углеродных нанотрубок (УНТ). При этом необходима адаптация дизелей к работе на этих альтернативных топливах. Использование указанных альтернативных топлив в сочетании с внедрением мероприятий по совершенствованию процессов топливоподачи и смесеобразования позволит достичь требуемых эксплуатационно-технических показателей дизелей.

Цель работы: достижение требуемых эксплуатационно-технических показателей дизеля путем совершенствования процесса топливоподачи, использования биотоплив, совершенствования свойств нефтяного топлива добавлением в него углеродных нанотрубок.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов. С помощью теоретических методов проведены расчетные исследования параметров топливоподачи, влияния геометрии проточной части распылителей форсунок на показатели потока топлива в распылителе и параметры процесса распыливания топлива, расчетные исследования самовоспламеняемости различных топлив в КС дизеля. Экспериментальная часть работы заключалась в определении показателей дизеля, оснащенного распылителями различных конструкций, а также в определении показателей дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавкой УНТ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика расчета параметров течения топлива в распылителе форсунки с использованием ПК *Ansys Fluent*, позволяющая оценить влияние геометрии проточной части распылителя форсунки на указанные параметры, как при стационарном течении топлива, так и при работе системы топливоподачи

дачи в импульсном режиме;

- определены константы экспоненциальной зависимости периода задержки воспламенения (ПЗВ) от энергии активации топлива и параметров воздушного заряда в камере сгорания дизеля;
- предложена методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в КС, включающая определение факторов, влияющих на их цетановое число (ЦЧ), и определение наиболее значимых из этих факторов;
- экспериментально доказана возможность улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля при добавлении в него УНТ и проведена оценка количества добавляемых в топливо УНТ на указанные показатели.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- использованием современных методик расчета параметров потока топлива в проточной части распылителей форсунок и применением современных программных комплексов при проведении расчетных исследований;
- сопоставлением результатов расчетных исследований с данными проведенных автором экспериментальных исследований, а также с опубликованными экспериментальными данными.

Практическая ценность состоит в том, что:

- разработанная методика определения параметров потока топлива в проточной части распылителей форсунок и проведенные расчетные исследования позволили выбрать оптимальную конструкцию распылителей форсунок, обеспечивающую наилучшие параметры процессов топливоподачи, распыливания топлива и смесеобразования;
- разработанные конструкции распылителей форсунок обеспечивают улучшение показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизелей;
- полученные значения констант экспоненциальной зависимости ПЗВ от энергии активации топлива и параметров воздушного заряда в КС дизеля и разработанная методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел могут быть использованы при адаптации дизеля к работе на этих топливах и определении целесообразных регулировок дизеля и его систем;
- проведенные испытания дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавками УНТ, подтвердили возможность улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля при использовании таких смесевых топлив.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в соответствии с планами госбюджетных и хоздоговорных работ кафедры поршневых двигателей (Э-2) МГТУ им. Н.Э. Баумана и отдела ЭМ 2.1 НИИ энергетического машиностроения (НИИЭМ) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты исследований внедрены в Российском государственном аграрном университете – МСХА им. К.А. Тимирязева 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 моделировать стационарное течение топлива и импульсный режим течения топлива;
- конструкции распылителей форсунок, обеспечивающие улучшение показателей процесса топливоподачи, распыливания топлива и смесеобразования путем

- выполнения на носке иглы местных гидравлических сопротивлений;
- результаты расчетных исследований параметров течения топлива в проточной части серийного и опытных распылителей форсунки;
 - результаты экспериментальных исследований дизеля с серийными и опытными распылителями форсунок;
 - результаты определения констант экспоненциальной зависимости ПЗВ от энергии активации топлива и параметров воздушного заряда в КС дизеля;
 - методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в КС дизеля, включающая определение факторов, оказывающих влияние на их ЦЧ, и определение наиболее значимых из этих факторов;
 - результаты экспериментальных исследований дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавкой УНТ.

Личный вклад соискателя. Основные результаты работы, методы и модели, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно в ходе теоретических разработок и экспериментальных исследований. Автором разработаны методика расчета параметров течения топлива в распылителе форсунки, методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в КС, экспериментально доказана возможность улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля при добавлении в него УНТ.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

- на заседании кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2021 г.);
- на Международной научно-технической конференции «Двигатель-2017», посвященной 110-летию кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 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 «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016-2021 г.г.);
- на Международной конференции «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering» EECE-2019 (С.-Петербург, 2019 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.);

- на Международной конференции «International Multi-conference on Engineering and Modern Technologies» FarEastCon-2020 (Владивосток, 2020 г.);
- на Международной конференции «Actual Issues of Mechanical Engineering» AIME-2020 (С.-Петербург, 2020 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научных статьи, в том числе 14 статей в журналах, рецензируемых ВАК РФ, и 10 статей, рецензируемых международными системами цитирования *Web of Science* и *Scopus*, а также 16 материалов конференций. Общий объем опубликованных работ – 5,4 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 139 страниц, включая 115 страниц основного текста, содержащего 50 рисунков и 26 таблиц. Список литературы включает 218 наименований на 24 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения работ, направленных на улучшение эксплуатационно-технических показателей дизелей, дана общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе диссертации проведен анализ работ, посвященных проблемам улучшения эксплуатационно-технических показателей дизелей. Рассмотрены требования, предъявляемые к показателям токсичности ОГ современных дизелей и направления улучшения этих показателей дизельных двигателей преимущественно транспортного назначения. Проанализированы направления совершенствования процесса топливоподачи дизелей. Отмечена необходимость использования альтернативных топлив в дизелях транспортного назначения. Перспективность работ, направленных на улучшение эксплуатационно-технических показателей дизелей путем совершенствования процесса топливоподачи и свойств топлива, обоснована в трудах отечественных ученых Л.В. Грехова, С.Н. Девянина, В.И. Ерохова, Р.З. Кавтарадзе, А.В. Козлова, А.С Кулешова, В.А. Лиханова, В.А. Маркова, Н.Н. Патрахальцева, В.М. Фомина, В.В. Фурмана, М.Г. Шатров и ряда других. На основании анализа состояния проблемы были сформулированы цель работы и следующие задачи исследования:

1. Разработка конструкций опытных распылителей, обеспечивающих улучшение качества процессов распыливания топлива и смесеобразования путем выполнения на носке иглы местных гидравлических сопротивлений.
2. Разработка методики расчетных исследований течения топлива в проточной части распылителя форсунки, основанной на использовании программного комплекса *Ansys Fluent*.
3. Проведение расчетных исследований влияния геометрии проточной части распылителей форсунок на показатели потока топлива в распылителе.
4. Проведение экспериментальных исследований дизеля с опытными распылителями форсунок с целью определения их влияния на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ двигателя.
5. Определение констант экспоненциальной зависимости ПЗВ от энергии

активации топлива и параметров воздушного заряда в КС дизеля.

6. Разработка методики сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в КС дизеля, включающей определение факторов, оказывающих влияние на ЦЧ растительных масел, и определение наиболее значимых из этих факторов.

7. Проведение экспериментальных исследований дизеля с целью определения влияния количества добавляемых в нефтяное ДТ углеродных нанотрубок на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ двигателя.

Вторая глава посвящена расчетным исследованиям топливоподачи дизеля, оснащенного распылителями форсунок с различной геометрией проточной части. Автором диссертации предложено несколько вариантов опытных конструкции распылителей с выполнением дополнительных гидравлических сопротивлений на игле серийного распылителя типа 171.07.00 Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ), которым оснащена форсунка типа ФДМ-22 Ногинского завода топливной аппаратуры (НЗТА).

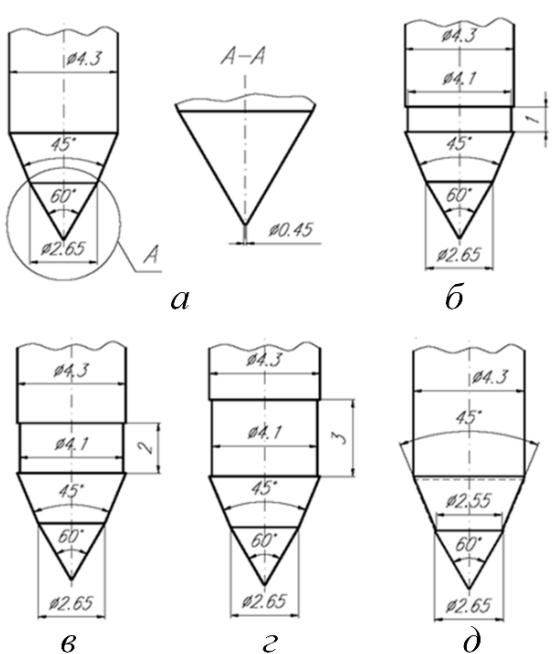


Рис. 1. Схемы конструкции носка иглы распылителя: а – серийный распылитель АЗПИ; б – опытный распылитель по варианту № 1; в – опытный распылитель по варианту № 2; г – опытный распылитель по варианту № 3; д – опытный распылитель по варианту № 4

Для оценки влияния описанных выше доработок иглы распылителя на параметры потока топлива в проточных частях распылителя была разработана методика расчетных исследований течения нефтяного ДТ марки в распылителе с использованием ПК *Ansys Fluent* версии 17.2. Расчетные исследования проведены для стационарного течения нефтяного ДТ. Игла форсунки фиксирована в

Серийный распылитель (Рис. 1,а) выполнен с диаметром иглы $d_i=5,0$ мм (по направляющей), а диаметр цилиндрической части носка иглы равен 4,3 мм. Носок иглы распылителя имел два конусных участка с различными углами этих конусов, равными 45 и 60°. В опытных распылителях по варианту № 1, 2, и 3 (Рис. 1,б, в, г) нижние цилиндрические части носка иглы распылителя с диаметром 4,3 мм сточены на 0,2 мм (по диаметру) выше конусной части носка. В результате такой дообработки образуются цилиндрические канавки глубиной 0,1 мм и высотой, равной 1, 2, и 3 мм. В опытном распылителе по варианту № 4 (Рис. 1,д) конусная часть иглы распылителя с углом конуса 60° выше посадочного диаметра $d_p=2,65$ мм сточена на 0,1 мм (по диаметру). В результате на носке иглы образуется горизонтальный кольцевой уступ с наружным диаметром 2,65 мм и внутренним диаметром 2,55 мм.

положении его максимального подъема $h_u=0,32$ мм. Давление на входе в расчетную область принято равным $p_{bx}=51,5$ МПа, давление на выходе из расчетной области – 8,9 МПа, температура топлива – $t=40$ °С. Для экономии временных затратов на расчеты рассмотрена 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 α – объемная концентрация паров; ρ_v и ρ_l – плотности газовой и жидкой фаз; ρ – 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 - ϵ модель турбулентности. Для оценки турбулизации потока на выходе из распыливающего отверстия использована кинетическая энергия турбулентности (КЭТ или E_{turb}), характеризуемая среднеквадратической флуктуацией скорости течения топлива.

Проведено моделирование стационарного течения ДТ в серийном и опытных распылителях форсунки и определены параметры потока топлива в исследуемых распылителях. Значительное влияние на качество распыливания топлива и смесеобразования оказывают параметры течения топлива внутри распыливающих отверстий. Получены средние по поперечным сечениям распыливающего отверстия значения параметров потока топлива. Добоработка носка иглы опытных распылителей оказывает заметное влияние на турбулентность потока топлива в распыливающих отверстиях (Рис. 2). При этом наличие кольцевого уступа на носке иглы опытного распылителя № 4 значительно сильнее турбулизирует поток топлива по сравнению с цилиндрической

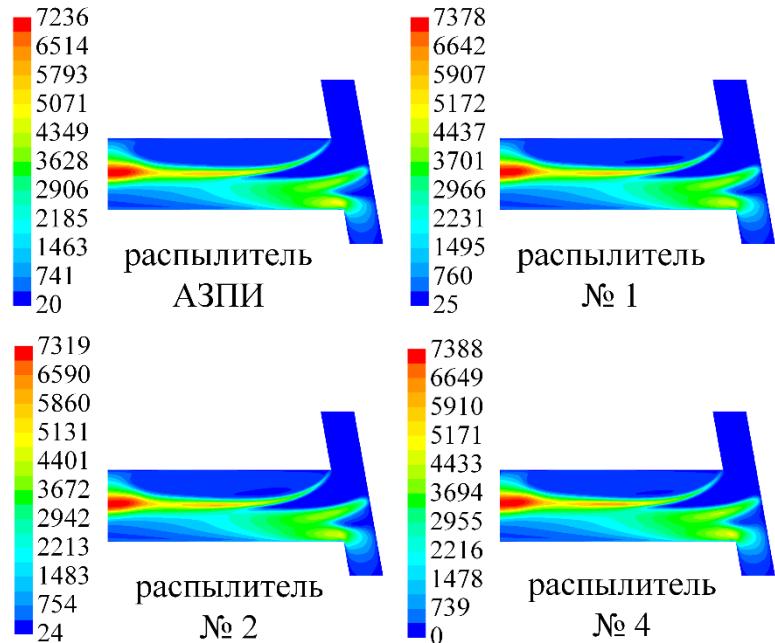


Рис. 2. Распределение КЭТ (m^2/s^2) потока топлива по продольному сечению распыливающего отверстия серийного распылителя АЗПИ и опытных распылителей № 1, 3, 4

канавкой, выполненной на носке иглы опытных распылителей № 1, 2 и 3. Обобщенные данные по параметрам потока топлива (Таблица 1) показывают, что максимальная КЭТ на выходе из распыливающего отмечена в опытном распылителе № 4 – она составляет $2330,30 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Таблица 1.

Параметры потока топлива на выходе из распыливающего отверстия

Варианты распылителей	Массовой расход, кг/с	Средняя КЭТ на выходе из отверстия ($\text{м}^2/\text{с}^2$)	Средняя скорость на выходе из отверстия (м/с)
АЗПИ	0,01502	2260,06	228,41
№ 1	0,01494	2286,09	228,14
№ 2	0,01495	2276,04	227,97
№ 3	0,01495	2274,72	228,04
№ 4	0,01491	2330,30	227,25

Определенный интерес представляет оценка влияния глубины уступа в опытном распылителе № 4 на турбулизацию потока на выходе распылителя. Проведенные по представленной выше методике расчетные исследования показали, что с увеличением глубины уступа значение КЭТ на выходе из распыливающего отверстия возрастает. Если опытный распылитель № 4 (с диаметральной глубиной уступа $\Delta D=0,1 \text{ мм}$) характеризуется ростом этой энергии на $70 \text{ м}^2/\text{с}^2$ по сравнению с серийным распылителем (примерно с 2260 до $2330 \text{ м}^2/\text{с}^2$), то увеличение этой глубины до $0,5$ приведет к росту этой энергии на $140 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (Рис. 3).

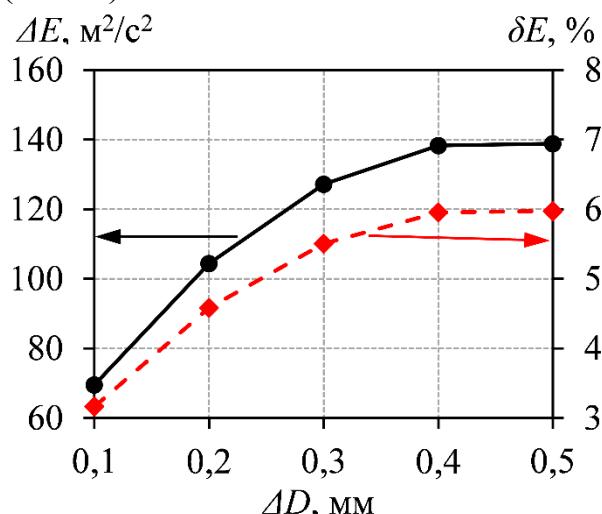


Рис. 3. Абсолютное изменение КЭТ ΔE и ее относительное изменение δE на выходе распыливающего отверстия при различной глубине этого уступа (при уменьшении диаметра ΔD) по сравнению с серийным распылителем

входе в распылитель $P_{\text{вход}}$) и закон перемещения иглы (Рис. 4,а), а также противодавление на выходе из распыливающего отверстия, равное 3,6 МПа. Макси-

Необходимо отметить сравнительно небольшой рост КЭТ δE при переходе от серийного распылителя к опытному распылителю № 4, составляющий около 3% (Рис. 3). Но следует учитывать, что эти данные получены при статических расчетах. В реальных условиях работы системы топливоподачи игла распылителя совершает периодические возвратно-поступательные движения с высокой частотой. В этих условиях местные гидравлические сопротивления будут оказывать более значительное влияние на КЭТ на выходе из распыливающего отверстия. Для оценки этого влияния проведено моделирование нестационарного течения топлива в распылителе. При этом был задан закон подачи топлива (закон изменения давления на

мальное $P_{\text{вход}}$ составило 44,7 МПа, цикловая подача (для пяти отверстий) – 48 мг, продолжительность впрыскивания – 1,03 мс.

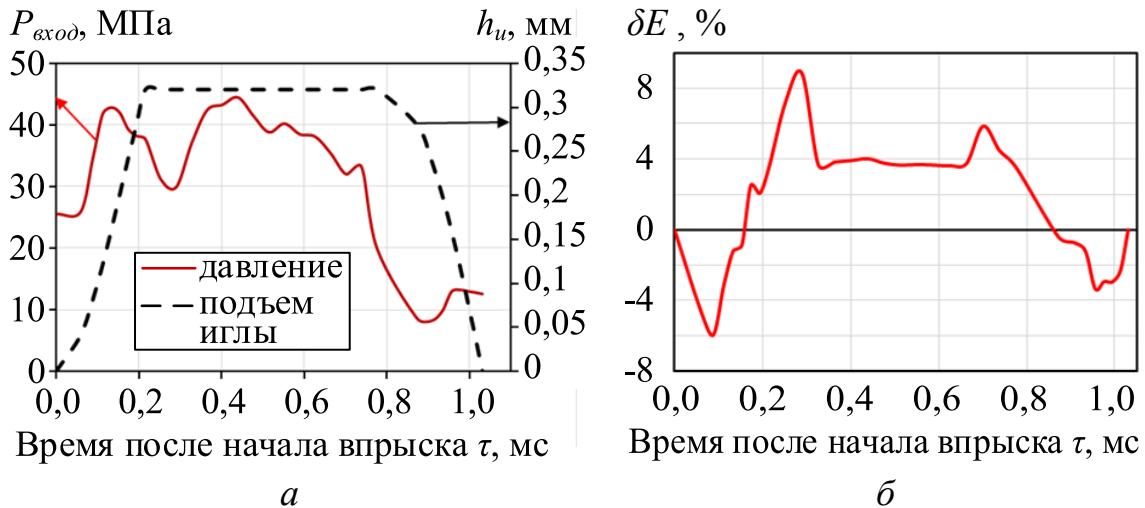


Рис. 4. Зависимость давления $P_{\text{вход}}$ и подъема иглы h_u от времени после начала впрыска τ (а) и зависимость относительного изменения КЭТ δE на выходе распыливающего отверстия для распылителя № 4 по сравнению с распылителем АЗПИ от τ при нестационарном течении топлива (б)

На Рис. 4, б представлена зависимость относительного изменения КЭТ на выходе распыливающего отверстия для распылителя № 4 по сравнению с распылителем АЗПИ от времени после начала впрыска τ при нестационарном течении топлива. Наибольшее увеличение КЭТ ($\delta E = 8,8 \%$) соответствует моменту времени $\tau = 0,29$ мс. Представленные результаты расчетных исследований влияния геометрии проточной части распылителя дизельной форсунки на параметры процесса топливоподачи косвенно подтверждаются результатами экспериментальных исследований, проведенных автором диссертации.

Испытания дизеля со штатными и опытными распылителями № 4 проведены на экспериментальном стенде, созданном на базе дизель-генераторной установки (ДГУ), вырабатывающей переменный электрический ток. Его основным элементом являлся дизель без наддува типа Д-243 (4 Ч 11/12,5) производства Минского моторного завода (Беларусь) и электрический генератор переменного тока типа *ECO-ECP* производства фирмы *RINA* (Италия). При испытаниях вырабатываемая электрогенератором электроэнергия потреблялась тремя тепловентиляторами, максимальная мощность каждого из которых составляет 12 кВт. Дизель Д-243 имел номинальную мощность $N_e = 36$ кВт при $n = 1500$ мин⁻¹ и был оснащен форсунками типа ФДМ-22 производства НЗТА с серийными распылителями АЗПИ (Рис. 1, а). Испытывался также опытный распылитель № 4 (см. Рис. 1, б).

При испытаниях использовалось нефтяное ДТ марки «Л» по ГОСТ 305-2013 и определялись штатные параметры двигателя и показатели дымности и токсичности его ОГ. Дымность ОГ измерялась дымометром «Инфракар Д1.01» ООО «Западприбор». Концентрации в ОГ токсичных компонентов определялись газоанализатором «Инфракар 5М-3.01» ООО «Западприбор». На моторном стенде

дизель Д-243 исследован на режимах предельной регуляторной характеристики при частоте вращения $n = 1500$ мин⁻¹.

Результаты испытаний (Рис. 5), показывают, что оснащение дизеля Д-243 форсунками с опытным распылителем № 4 (см. Рис. 1,д) позволило обеспечить лучшую топливную экономичность и снизить дымность ОГ. На режиме максимальной мощности установка опытных распылителей № 4 позволила уменьшить дымность ОГ K_X на 46,8% от 23,5 до 12,5 % по шкале Хартриджа и снизить удельный эффективный расход топлива на 1,7% от 275,2 до 270,4 г/(кВт·ч). При этом замена серийных распылителей АЗПИ на опытные распылители № 4 привела к росту концентрации оксидов азота в ОГ C_{NOx} от 1743 ppm, т.е. на 10,3 %, и отмечена тенденция снижения содержания в ОГ монооксида углерода и легких углеводородов.

В третьей главе приведены результаты исследований воспламеняемости нефтяного ДТ и растительных масел. Цетановое число (ЦЧ) нефтяного ДТ по ГОСТ 305-2013 составляет 45 единиц и более, а ЦЧ растительных масел обычно колеблется от 33 до 36 единиц. Это приводит к увеличению периода задержки воспламенения (ПЗВ) и более жесткому сгоранию топлива. Среди показателей, характеризующих воспламеняемость топлив в цилиндрах дизелей, важнейшим является ПЗВ τ_i . При проведении анализа влияния вида топлива на ПЗВ использованы экспериментальные данные В. Льотко по тракторному дизелю без наддува типа *Perkins AD3.152* ($N_e=35$ кВт при $n=2000$ мин⁻¹), работающему на режиме с частотой вращения коленчатого вала $n=2000$ мин⁻¹ на нефтяном ДТ и растительных маслах.

Среди формул для определения ПЗВ наибольшую известность получила А.И. Толстова, связывающая задержку воспламенения τ_i с энергией активации E топлива, давлением p и температурой T воздушного заряда в КС:

$$\tau_i = C \cdot p^{-n} e^{\frac{E}{RT}},$$

где C и n – константы, R – универсальная газовая постоянная.

С использованием экспериментальных данных В. Льотко определены константы этой экспоненциальной зависимости для τ_i . Для дизеля типа *Perkins*

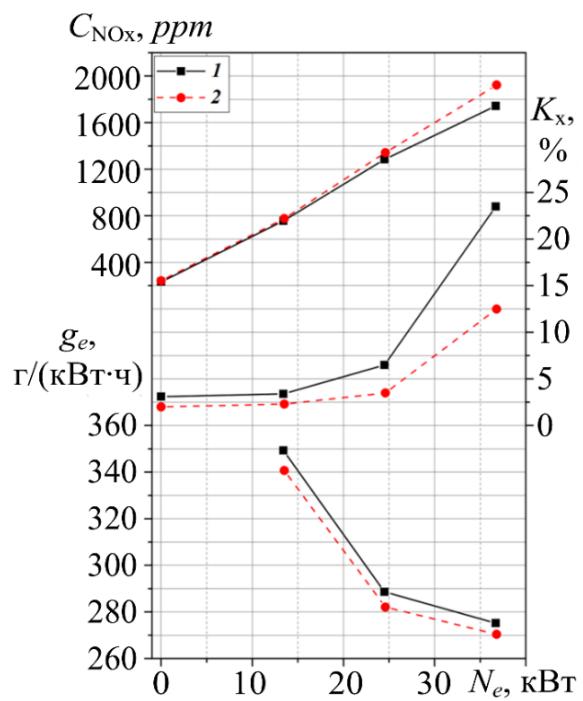


Рис. 5. Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e , объемной концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} и дымности ОГ K_X дизеля типа Д-243 от его эффективной мощности N_e

AD3.152, работающего на режиме с частотой вращения коленчатого вала $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузкой ($p_e=0,84 \text{ МПа}$), получена формула для расчета ПЗВ для ДТ:

$$\tau_i = 0,114 p^{-1,3} e^{\frac{4400}{T}}.$$

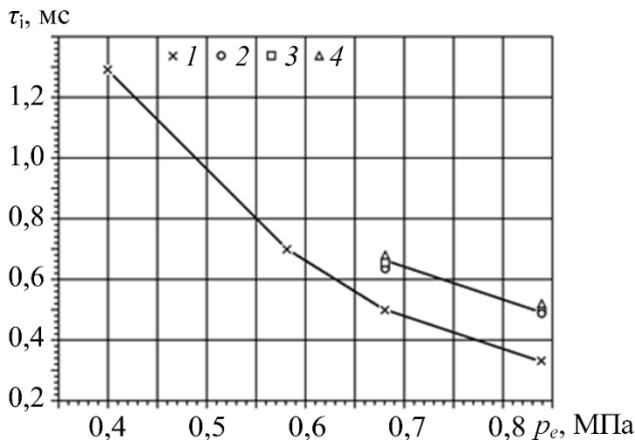


Рис. 6. Период задержки воспламенения топлива в двигателе *Perkins AD3.152*, работающем на режимах с частотой вращения $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ и различными нагрузками на нефтяном ДТ (1), РМ (2), ПМ (3) и СМ (4)

Для случая использования в качестве топлива рапсового (РМ), подсолнечного (ПМ) и соевого (СМ) масел эта формула имеет вид:

$$\tau_i = 0,0735 p^{-1,2} e^{\frac{4800}{T}}.$$

Аналогичные исследования ПЗВ этих топлив проведены и для других нагрузочных режимов. Результаты исследований показывают, что на режиме с $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ и средним эффективным давлением $p_e=0,68 \text{ МПа}$ период задержки воспламенения оказался равен: $\tau_i=0,50 \text{ мс}$ – для нефтяного ДТ и $\tau_i=0,63 \text{ мс}$ – для исследуемых растительных масел (см. Рис. 6).

Другим важнейшим показателем воспламеняемости топлив в КС дизеля является ЦЧ топлива. Целью исследования являлась разработка методики сравнительного анализа критерии воспламеняемости растительных масел в КС дизеля, включающей определение факторов, оказывающих влияние на ЦЧ масел, и определение наиболее значимых из этих факторов.

Растительные масла состоят главным образом (на 95-97%) из триацилглицеридов – органических соединений, сложных эфиров глицерина и различных жирных кислот, а такжеmono- и диацилглицеридов. Ацилглицериды, в свою очередь, содержат в своем составе молекулы различных жирных (карбоновых) кислот, связанных с молекулой глицерина $C_3H_5(OH)_3$. При этом жирнокислотный состав растительных масел включает как ненасыщенные, так и насыщенные кислоты.

При аналитических исследованиях использованы данные *C.E. Goering* по физико-химическим свойствам одинадцати растительных масел. Проведенный анализ этих данных показал, что цетановое число (по стандарту *ASTM D613, cetane number*) исследованных растительных масел зависит от их жирнокислотного состава, в первую очередь – от содержания в них предельных жирных кислот и непредельной олеиновой кислоты (в частности олеиновой кислоты). Это обусловлено тем, что предельные жирные кислоты обладают сравнительно невысокой температурой самовоспламенения. Так температуры самовоспламенения двух наиболее значимых предельных жирных кислот растительных масел – пальмитиновой и стеариновой, составляет соответственно 210 и 320 °C, а ана-

логичная температура для непредельных жирных кислот – линоленовой и эруковой – соответственно 470 и 454 °С. Среди основных непредельных жирных кислот, входящих в состав растительных масел, содержание олеиновой кислоты оказывает самое значительное влияние на ЦЧ, так как эта кислота имеет наименьшую температуру самовоспламенения, составляющую 271 °С. Еще одним фактором, влияющим на воспламеняемость растительных масел в условиях КС дизеля, характеризуемую ЦЧ, является температура их воспламенения, определяемая в соответствии со стандартом *ASTM D93* (температура воспламенения – *flash point*). Методика этого стандарта предполагает определение температуры вспышки нефтепродуктов в закрытом тигле в диапазоне температур от 40 до 360 °С.

Одним из факторов, влияющих на цетановое число растительных масел, является содержание в них предельных жирных кислот.

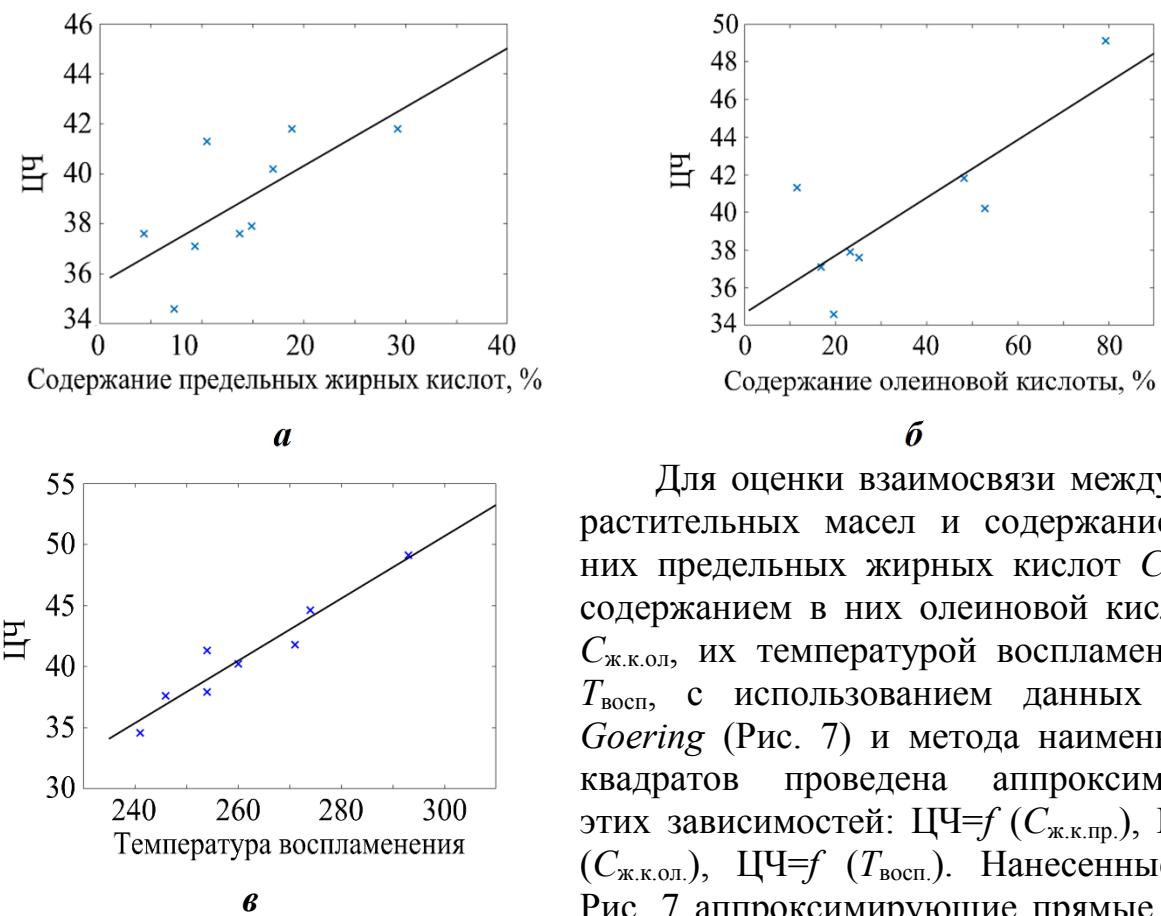


Рис. 7. Зависимость ЦЧ растительных масел от содержания в них предельных жирных кислот (а), олеиновой кислоты (б), от температуры их воспламенения в закрытом тигле (в); экспериментальные данные C.E. Goering показаны точками, прямые линии – аппроксимация

T_{AI} – температура воспламенения этого масла, °С.

Для оценки взаимосвязи между ЦЧ растительных масел и содержанием в них предельных жирных кислот $C_{ж.к.пр.}$, содержанием в них олеиновой кислоты $C_{ж.к.ол.}$, их температурой воспламенения $T_{восп.}$, с использованием данных C.E. Goering (Рис. 7) и метода наименьших квадратов проведена аппроксимация этих зависимостей: $ЦЧ=f(C_{ж.к.пр.})$, $ЦЧ=f(C_{ж.к.ол.})$, $ЦЧ=f(T_{восп.})$. Нанесенные на Рис. 7 аппроксимирующие прямые описываются следующими формулами:

$$ECN = 23,55 \times C_{FA,S} + 35,6;$$

$$ECN = 15,34 \times C_{C18:1} + 34,64;$$

$$ECN = 0,2552 \times T_{AI} - 25,88,$$

где ECN – расчетное значение ЦЧ (*estimated cetane number*); $C_{FA,S}$ – концентрация предельных жирных кислот; $C_{C18:1}$ – концентрация в нем олеиновой кислоты;

Наибольшей плотностью корреляции обладает зависимость ЦЧ исследуемых масел от температур их воспламенения T_{AI} в закрытом тигле с коэффициентом корреляции, равным $R=0,96$ (коэффициентом детерминации – $R^2=0,92$). Сравнительно плотной корреляцией обладает зависимость ЦЧ от содержания в маслах олеиновой кислоты $C_{ж.к.ол}$ с $R=0,81$ ($R^2=0,66$). Наименьшую плотность корреляции имеет зависимость ЦЧ от содержания в маслах предельных жирных кислот $C_{ж.к.пр}$ с $R=0,69$ ($R^2=0,48$).

Разработанная методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в КС дизеля применима и для других растительных масел среднего жирнокислотного состава.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям возможности использования углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве экологической добавки к нефтяному ДТ. В проведенных исследованиях использовались УНТ типа *TNIM1*, произведенные компанией *Timesnano* (КНР). Они имеют длину 10-30 мкм, периферийный диаметр 5-15 Нм, удельную поверхность 220-300 м²/г. Проведенный анализ подтвердил возможность улучшения эксплуатационных показателей дизелей при добавлении в жидкое топливо углеродных нанотрубок. Для определения параметров и характеристик дизеля, работающего на нефтяном ДТ с присадкой УНТ, проведены его исследования на экспериментальном стенде, описанном во второй главе диссертации. При испытаниях использовалось нефтяное ДТ марки «Л» по ГОСТ 305-2013, в которое добавлялись УНТ типа *TNIM1* в количестве от 0 (чистое ДТ) до 500 мг/л. При добавлении в 1 л ДТ 500 мг нанотрубок цена такой добавки составила примерно 3 рубля. Смеси нефтяного ДТ с УНТ получены с использованием ультразвуковой ванны типа УЗВ-10/150-ТН производства Российской электротехнической компании (РЭЛТЕК). Поскольку исследуемые УНТ имели размеры (длина – до 30 мкм), соизмеримые с размерами частиц, задерживаемых фильтром тонкой очистки штатной системы топливоподачи исследуемого дизеля, при его испытаниях на смесях ДТ с УНТ фильтры грубой и тонкой очистки были отключены.

Полученные результаты испытаний дизеля Д-243 (Рис. 8) свидетельствуют о том, что по мере увеличения добавки УНТ в нефтяное ДТ ее влияние на удельный эффективный расход топлива увеличивается. При этом на режимах с большими нагрузками отмечено сравнительно слабое влияние добавки УНТ в нефтяное ДТ на показатели топливной экономичности. В частности, на режиме максимальной мощности увеличение содержания УНТ в нефтяном ДТ от 0 до 500 мг/л приводит к уменьшению удельного эффективного расхода топлива g_e с 273,6 до 273,4 г/(кВт·ч). При работе дизеля на смесевом топливе, содержащем 500 мг/л УНТ, и нагрузке 12,3 кВт, 23,2 кВт и 36,8 кВт удельный эффективный расход топлива составил соответственно 372,4 г/(кВт·ч), 292,2 г/(кВт·ч) и 273,4 г/(кВт·ч). При использовании ДТ этот расход оказался равен 381,3 г/(кВт·ч), 297,4 г/(кВт·ч) и 274,2 г/(кВт·ч), соответственно. Таким образом, добавление в нефтяное ДТ 500 мг/л УНТ позволило снизить удельный эффективный расход

на 0,3 % на режиме с полной нагрузкой ($N_e = 36,8$ кВт), на 1,8% на режиме с $N_e = 23,2$ кВт, на 2,3% на режиме с $N_e = 12,3$ кВт.

При испытаниях дизеля отмечена тенденция улучшения показателей токсичности ОГ при добавлении УНТ в нефтяное ДТ. Наибольшее влияние добавка УНТ оказывает на дымность ОГ. На режиме максимальной мощности увеличение содержания УНТ в нефтяном ДТ от 0 до 500 мг/л приводило к уменьшению дымности ОГ от 26,0 до 11,2 % по шкале Хартриджа (Рис. 8), то есть, более чем в два раза. На режимах с пониженной нагрузкой влияние добавки УНТ в нефтяное ДТ на дымность ОГ снижалась. При добавлении УНТ в нефтяное ДТ эмиссии наиболее значимого газообразного токсичного компонента ОГ – оксидов азота снижается (Рис. 7). Наибольшее уменьшение содержания оксидов азота в ОГ C_{NOx} отмечено на режиме максимальной мощности при росте содержания УНТ в нефтяном ДТ от 0 до 500 мг/л. При этом концентрация C_{NOx} в ОГ снизилась от 1763 до 1670 ppm (на 5,3 %). В зависимости от режима работы дизеля такое снижение содержания оксидов азота в ОГ изменялось в диапазоне от 2,5 до 8,0%.

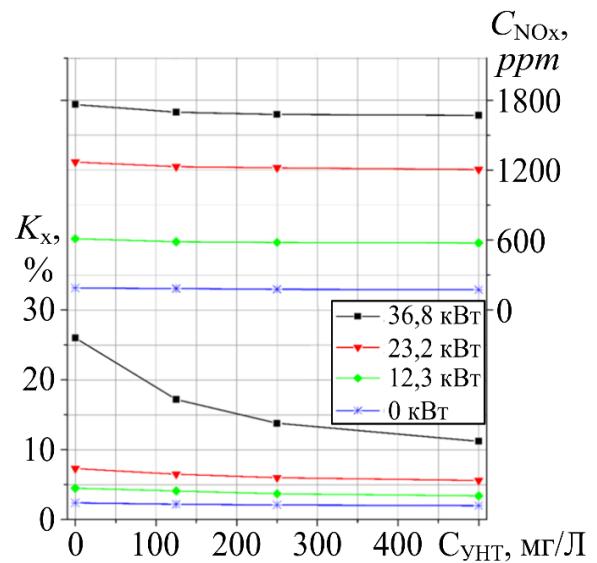


Рис. 8. Зависимость концентраций в ОГ оксидов азота C_{NOx} и дымности ОГ K_x от содержания УНТ в нефтяном ДТ при различной эффективной мощности N_e дизеля Д-243, работающего на

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что добавка УНТ к нефтяному ДТ слабо влияет на содержание в ОГ монооксида углерода C_{CO} и легких несгоревших углеводородов C_{CH_x} . При добавке УНТ в нефтяное ДТ наибольший эффект по снижению содержания монооксида углерода в ОГ достигнут на режиме холостого хода при $n=1590$ мин $^{-1}$. На этом режиме добавление в нефтяное ДТ 500 мг/л УНТ позволило снизить C_{CO} с 0,020 до 0,015%, т.е. на 25%. На режиме с полной нагрузкой добавка УНТ в нефтяное ДТ практически не влияет на выброс CO. Выбросы легких несгоревших углеводородов с ОГ исследуемого дизеля слабо зависят от содержания УНТуглеродных нанотрубок. При этом следует отметить очень низкий выброс этого токсичного компонента с ОГ дизеля, составляющий 9-11 ppm.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. С целью совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования предложено несколько вариантов опытных распылителей форсунок с выполнением гидравлических сопротивлений на носке иглы. Среди этих распылителей наиболее эффективным оказался распылитель по варианту № 4, в котором конусная часть иглы серийного распылителя с углом конуса 60° выше посадочного диаметра (2,65 мм) сточена на 0,1 мм (по диаметру).

2. Разработана методика расчета параметров течения топлива в распылителе форсунки с использованием ПК *Ansys Fluent*. Исследовано стационарное течение нефтяного ДТ в распылителе дизеля типа Д-243 при максимальном подъеме иглы форсунки. Методика позволяет моделировать и динамический процесс течения топлива.

3. С использованием разработанной методики проведены расчетные исследования параметров потока топлива в распылителях с различной геометрией проточной части. При стационарном течении топлива и переходе от серийного распылителя к опытному по варианту № 4 кинетическая энергия турбулентности на выходе из распыливающего отверстия увеличилась от 2260,06 до 2330,30 м 2 /с 2 , т.е. на 3,1%. При работе системы топливоподачи в импульсном режиме и указанном переходе максимальное увеличение кинетической энергии турбулентности на выходе из распыливающего отверстия составило 8,8%.

4. Проведены испытания дизеля со штатными распылителями и опытными по варианту № 4 на моторном стенде, который включает дизель типа Д-243 (4 Ч 11/12,5) и генератор переменного тока типа *ECO-ECP* производства фирмы *RINA* (Италия). На режиме максимальной мощности замена серийных распылителей опытными по варианту № 4 позволила уменьшить дымность ОГ на 46,8% от 23,5 до 12,5 % по шкале Хартриджа и снизить удельный эффективный расход топлива на 1,7% от 275,2 до 270,4 г/(кВт·ч). На этом режиме при замене серийных распылителей на опытные по варианту № 4 концентрации оксидов азота в ОГ возросла от 1743 до 1923 ppm, т.е. на 10,3 %. При этом отмечена тенденция снижения содержания в ОГ монооксида углерода и углеводородов.

5. Определены константы экспоненциальной зависимости периода задержки воспламенения от энергии активации топлива и параметров воздушного заряда в КС дизеля. Для дизеля типа *Perkins AD3.152*, работающего на режиме максимальной мощности со средним эффективным давлением $p_e=0,84$ МПа и частотой вращения $n=2000$ мин $^{-1}$ на рапсовом, подсолнечном и соевом масле, период задержки воспламенения был равен 0,50 мс, а при использовании нефтяного ДТ – 0,33 мс. На этом же скоростном режиме с неполной нагрузкой ($p_e=0,68$ МПа) период задержки воспламенения указанных масел оказался равным 0,63 мс, а у ДТ – 0,50 мс. Худшая воспламеняемость масел привела к снижению эффективности сгорания. На режиме с частотой вращения вала $n=2000$ мин $^{-1}$ и неполной нагрузкой ($p_e=0,68$ МПа) перевод дизеля с нефтяного ДТ на растительные масла привел к снижению эффективного КПД двигателя на 4-5%.

6. Предложена методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в КС дизеля. Она включает определение факторов, оказывающих влияние на их цетановое число, определение наиболее значимых из этих факторов. Проанализированы корреляционные зависимости цетанового числа растительных масел от температур их воспламенения в закрытом тигле, от содержания в маслах олеиновой кислоты и предельных жирных кислот. Наибольшей плотностью корреляции обладает зависимость цетанового числа от температур их воспламенения в закрытом тигле с коэффициентом детерминации $R^2=0,92$. Сравнительно плотной корреляцией обладает зависимость цетанового числа от содержания в маслах олеиновой кислоты с коэффициентом детерминации $R^2=0,66$. Наименьшую плотность корреляции имеет зависимость цетанового числа от содержания в маслах предельных жирных кислот с коэффициентом $R^2=0,48$.

7. Проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-243 в составе ДГУ при добавлении УНТ в нефтяное ДТ. При испытаниях использовалось нефтяное ДТ марки «Л» по ГОСТ 305-2013, в которое добавлялись УНТ типа *TNIMI* компании *Timesnano* (Китай). Добавка УНТ в нефтяное ДТ составляла от 0 (чистое ДТ) до 500 мг/л.

8. На режиме максимальной мощности при увеличении содержания УНТ в нефтяном ДТ от 0 до 500 мг/л удельный эффективный расход топлива снизился от 273,6 до 273,4 г/(кВт·ч). При добавлении в нефтяное ДТ 500 мг/л УНТ этот расход топлива уменьшился на 0,3 % на режиме с полной нагрузкой ($N_e =36,8$ кВт), на 1,8% на режиме с $N_e =23,2$ кВт, на 2,3% на режиме с $N_e =12,3$ кВт. На режиме максимальной мощности увеличение содержания УНТ в нефтяном ДТ от 0 до 500 мг/л привело к уменьшению дымности ОГ от 26,0 до 11,2 % по шкале Хартриджа, то есть, более чем в два раза.

9. При добавлении УНТ в нефтяное ДТ отмечено снижение выбросов оксидов азота. Наибольшее уменьшение содержания NO_x в ОГ отмечено на режиме максимальной мощности при росте содержания УНТ в смеси 0 до 500 мг/л. При этом концентрация NO_x в ОГ снизилась от 1763 до 1670 ppm (на 5,3%). В зависимости от режима работы такое снижение содержания оксидов азота в ОГ изменилось в диапазоне от 2,5 до 8,0%. Добавка УНТ к нефтяному ДТ слабо влияет на содержание в ОГ монооксида углерода СО и несгоревших углеводородов CH_x .

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 / Bowen Sa [et al.] // Energies. 2019. Vol. 12. Issue 14. Art. 4345. P. 1-13 (0,80 п.л./0,20 п.л.).
2. Sa Bowen, Markov V., Liu Y., Kamaltdinov V., Qiao W. Numerical Investigation of the Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube Additive on Nozzle Flow and Spray Behaviors of Diesel Fuel // Fuel. 2020. Art. № 119802. P. 1-30 (2,00 п.л./0,50 п.л.).
3. Sa Bowen, Klyus O., Markov V., Kamaltdinov V. A Numerical Study of the Effect of Spiral Counter Grooves on a Needle on Flow Turbulence in a Diesel Injector // Fuel. 2021. Vol. 290. Art. № 120013. С. 1-16 (1,00 п.л./0,50 п.л.).
4. Optimization of the Composition of Blended Biodiesel Fuels with Additives of Vegetable Oils / Bowen Sa [et al.] // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2019. Vol. 20. № 4. P. 303-319 (1,00 п.л./0,25 п.л.).
5. Emission Performance of a Diesel Engine Running on Petroleum Diesel Fuel with Different Vegetable Oil Additives / Bowen Sa [et al.] // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok. 2020. № 9271091. P. 1-5 (0,50 п.л./0,15 п.л.).
6. Performance of a Diesel Engine Running on Mixed Biofuels with the Addition of Gasoline / Bowen Sa [et al.] // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 140. Art. 11004. P. 1-5 (0,50 п.л./0,15 п.л.).
7. Improvement of Design of Diesel Injector Nozzles / Bowen Sa [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Конференция ARCTIC-2020, С.-Петербург). 2021. Vol. 678. Art. 012008. P. 1-9 (0,70 п.л./0,25 п.л.).
8. Injection and Atomization of Diesel Fuel and Rapeseed Oil in Diesel Engine / Bowen Sa [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Конференция ARCTIC-2020, С.-Петербург). 2021. 678. Art. 012010. P. 1-12 (0,80 п.л./0,20 п.л.).
9. Sa Bowen, Markov V.A., Kamaltdinov V.G., Neverov V.A. Flow Simulation of Petroleum Diesel Fuel and Rapeseed Oil in the Nozzle of a Diesel Injector// IOP Conf. Series: Material Science and Engineering. 2021. Vol. 1035. Art. № 012034. P. 1-14 (0,90 п.л./0,30 п.л.).
10. Совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах / Бовэнь Са [и др.] // Двигателестроение. 2021. № 1. С. 3-12 (0,80 п.л./0,20 п.л.).
11. Показатели токсичности отработавших газов дизельного двигателя, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавками растительных масел / Бовэнь Са [и др.] // Двигателестроение. 2020. № 4. С. 18-24 (0,60 п.л./0,15 п.л.).
12. Марков В.А., Кавтарадзе Р.З., Са Бовэнь. Исследование воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизельного двигателя // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2016. № 12. С. 15-23 (0,70 п.л./0,20 п.л.).
13. Применение углеродных нанотрубок в качестве присадки, улучшающей экологические показатели дизеля / Бовэнь Са [и др.] // Автогазозаправоч-

ный комплекс + альтернативное топливо. 2020. Том 19. № 10. С. 473-481 (0,60 п.л./0,20 п.л.).

14. Моделирование течения эмульгированного биотоплива в распылителе дизельной форсунки. Часть 1 / Бовэнь Са [и др.] // Грузовик. 2017. № 8. С. 21-26 (0,50 п.л./0,20 п.л.).

15. Моделирование течения эмульгированного биотоплива в распылителе дизельной форсунки Часть 2 / Бовэнь Са [и др.] // Грузовик. 2017. № 9. С. 11-18 (0,60 п.л./0,20 п.л.).

16. Улучшение эксплуатационных свойств дизельных топлив для сельскохозяйственных машин / Бовэнь Са [и др.] // Аграрный научный журнал. 2020. № 12. С. 90-92 (0,40 п.л./0,10 п.л.).

17. Марков В.А., Неверова В.В., Са Бовэнь. Использование горчичного масла в качестве экологической добавки к нефтяному дизельному топливу // Безопасность в техносфере. 2016. Том 5. № 5. С. 8-21 (0,80 п.л./0,25 п.л.).

18. Горчичное масло как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу / Бовэнь Са [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2017. Том 16. № 1. С. 10-21 (0,70 п.л./0,20 п.л.).

19. Исследование вязкостных характеристик растительных масел и их смесей с нефтяным дизельным топливом / Бовэнь Са [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 12. С. 3-9 (0,50 п.л./0,15 п.л.).