

На правах рукописи

Бирюков Владимир Владимирович

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ДИЗЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭТАНОЛА
В КАЧЕСТВЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ
К ДИЗЕЛЬНОМУ ТОПЛИВУ**

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2017

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: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева»

Защита диссертации состоится 3 октября 2017 г. в 15.45 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 «____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью улучшения показателей токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей. Эффективным методом улучшения названных показателей является использование этанола в качестве кислородсодержащей добавки к дизельному топливу. Такая добавка этанола позволяет улучшить качество протекания процессов распыливания топлива, смесеобразования и сгорания и, тем самым снизить выбросы оксидов азота и сажи с ОГ. Вместе с тем, одной из основных проблем применения этанола в качестве кислородсодержащей добавки является его плохая смешиваемость с нефтяными и многими альтернативными топливами. Эта проблема может быть решена путем использования абсолютного (безводного) этанола. Другое направление применения этанола в качестве кислородсодержащей добавки – использование эмульсий этанола с различными топливами. При этом возникают эффекты, способствующие улучшению качества процессов распыливания топлива, смесеобразования и сгорания. В первую очередь – это турбулизация потока топлива в распылителях форсунок за счет образования паровой фазы и струй распыливающего эмульгированного топлива за счет быстрого выкипания этанола из топлива. В результате удается заметно снизить выбросы основных токсичных компонентов ОГ дизелей – оксидов азота и сажи. При анализе проблем использования этанола в качестве кислородсодержащей присадки необходимо проведение комплекса расчетно-экспериментальных исследований, направленных на исследование названных эффектов и на исследование параметров дизеля, работающих на смесевых и эмульгированных топливах с добавкой этанола. Результаты этих исследований будут способствовать достижению требуемых показателей токсичности ОГ современных транспортных дизелей.

Цель работы: разработка методов повышения эффективности работы дизеля при использовании этанола в качестве экологической добавки к дизельному топливу.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов. С помощью теоретических методов проведены расчетные исследования вязкости смесевых биотоплив и параметров потока различных топлив в проточной части распылителей форсунок, а также оценка экологических показателей смеси нефтяного дизельного топлива и этанола. Экспериментальная часть работы заключалась в определении показателей дизеля, работающего на смесевых биотопливах с добавкой этанола.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика расчета вязкости биотоплив на основе растительных масел и эмульгированного биотоплива;
- разработана методика расчета показателей потока эмульгированного биотоплива в проточной части распылителей дизельных форсунок;
- разработана методика сравнительной оценки экологических качеств нефтяного дизельного топлива и смесевого биотоплива с добавкой этанола.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- использованием современных методик расчета показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок;
- использованием современных методик сравнительной оценки экологических качеств различных топлив;
- совпадением результатов расчетных и экспериментальных исследований, полученных при испытаниях на развернутом двигателе.

Практическая ценность состоит в том, что:

- разработанная методика расчета вязкости эмульгированного биотоплива и проведенные по этой методике расчеты позволили оценить вязкость эмульсии рапсового масла и этанола;
- разработанная методика расчета показателей потока топлива в проточной части распылителей дизельных форсунок и проведенные расчетные исследования позволили оценить влияние свойств эмульсии рапсового масла и этанола на параметры процесса топливоподачи;
- проведенные экспериментальные исследования дизеля, работающего на эмульсиях рапсового масла и этанола, подтвердили эффективность их использования для улучшения показателей токсичности отработавших газов дизеля;
- проведенные экспериментальные исследования дизеля, работающего на смеси нефтяного дизельного топлива с добавкой абсолютного этанола, подтвердили эффективность ее использования в отечественных дизелях;
- разработанная методика сравнительной оценки экологических качеств нефтяного дизельного топлива и смесевого биотоплива с добавкой этанола и проведенные оптимизационные расчеты показали возможность использования этой методики при разработке практических рекомендаций по выбору оптимальной добавки этанола.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в соответствии с планами госбюджетных и хоздоговорных работ кафедр поршневых двигателей и теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также лаборатории «Автоматика» НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты исследований внедрены в ООО «ППП «Дизельавтоматика», г. Саратов и в ЗАО «Форант-Сервис» (г. Ногинск).

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

- на заседании кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 г.);
- на международной научно-технической конференции «6-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе» в ГТУ «МАДИ» (Москва, 2013 г.);
- на международной научно-технической конференции «Двигатель-2017», посвященной 110-летию кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 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, 2014-2017 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных статей – все в журналах, включенных в перечень ВАК рецензируемых ведущих научных журналов и изданий. Также по теме диссертации опубликовано 6 материалов по итогам конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 171 страница, включая 146 страниц основного текста, содержащего 62 рисунка и 30 таблиц. Список литературы содержит 187 наименований на 20 страницах. Приложение на 8 страницах включает листинг программы аппроксимации экспериментальных данных по вязкости эмульсионной смеси и документы о внедрении результатов диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения работ, направленных на адаптацию дизелей к работе на этаноле и других биотопливах, дана общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе диссертации проведен анализ работ, посвященных проблемам использования биотоплив в дизелях. Рассмотрены направления и тенденции развития мирового топливно-энергетического комплекса и типы биотоплив, используемых в транспортных дизелях. Проведен анализ показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизелей, средств и методов снижения вредных выбросов. Показана эффективность использования биотоплив для снижения токсичности ОГ. При этом наибольшими преимуществами обладают смесевые и эмульгированные топлива. Перспективность использования биотоплив, в особенности смесевых и эмульгированных топлив, обоснована в трудах отечественных ученых Л.В. Грехова, С.В. Гусакова, С.Н. Девянина, В.И. Ерохова, Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе, А.С. Кулешова, А.Р. Кульчицкого, В.А. Лиханова, В.И. Мальчука, В.А. Маркова, Н.Н. Патрахальцева, Г.С. Савельева, А.М. Сайкина, А.С. Хачияна, М.Г. Шатрова и ряда других. На основании анализа состояния проблемы были сформулированы цель работы и следующие задачи исследования:

1. Оценка эффективности различных направлений использования этанола в качестве экологической добавки к дизельному топливу.
2. Разработка методики расчета вязкости нефтяного дизельного топлива, биотоплив на основе растительных масел и эмульгированного биотоплива с добавкой этанола.
3. Расчетные исследования вязкости нефтяного дизельного топлива, биотоплив на основе растительных масел и эмульгированного биотоплива с добавкой этанола.
4. Разработка методики расчета показателей потока эмульгированного биотоплива с добавкой этанола в проточной части распылителей дизельных

форсунок.

5. Расчетные исследования показателей потока эмульгированного биотоплива с добавкой этанола в проточной части распылителей дизельных форсунок.

6. Проведение экспериментальных исследований показателей дизеля, работающего на эмульгированных биотопливах – эмульсиях рапсового масла и этанола.

7. Проведение экспериментальных исследований показателей дизеля, работающего на смесевых биотопливах – смесях нефтяного дизельного топлива и абсолютного этанола.

8. Разработка методики сравнительной оценки экологических качеств нефтяного дизельного топлива и смесевого биотоплива с добавкой этанола.

Во второй главе представлены результаты расчетных исследований течения нефтяного и эмульгированного топлива в распылителях дизельных форсунок. Отмечено значительное влияние вязкостных характеристик биотоплив на процессы топливоподачи, впрыскивание и распыливание топлива. Рассмотрены вязкостные характеристики самих растительных масел, а также их эмульсий с этанолом, и проведены расчетные исследования вязкости этих топлив. При этом использованы известный логарифмический и предложенный авторами алгебраический аппроксимационные подходы для аппроксимации кинематической вязкости топлив от их температуры и состава. К первому подходу относится метод Ниссана и Грюнберга, позволяющий определить кинематическую вязкость смеси в виде:

$$\ln \nu = \sum_i^n x_i \ln \nu_i + \sum_i^n \sum_{j>i}^n x_i x_j D_{ij} + \sum_i^n \sum_{j>i}^n \sum_{k>j}^n x_i x_j x_k D_{ijk} + \dots + D_{ij\dots n} \prod_i^n x_i, \quad (1)$$

где D_{ij} , D_{ijk} , ..., $D_{ij\dots n}$ – коэффициенты, зависящие от температуры и концентрации компонентов в смеси и учитывающие взаимодействие между компонентами. Во втором, предложенном авторами, методе аппроксимации кинематической вязкости топлив используется следующая формула:

$$\nu = \sum_i^n [x_i (A_i + \frac{B_i}{t} + C_i) + \frac{x_i}{2-x_i} (D_i + \frac{E_i}{t})], \quad (2)$$

где A_i , B_i , C_i , D_i , E_i – постоянные коэффициенты, относящиеся к i -ому компоненту и определяемые методом наименьших квадратов.

С использованием этих двух методов получены аппроксимационные формулы для различных видов смесевых и эмульгированных топлив.

На основании экспериментальных данных по эмульсиям рапсового масла (РМ) и этилового спирта (ЭМ) получена зависимость кинематической вязкости эмульсии РМ и ЭС от состава топлива, описываемая нелинейной зависимостью:

$$\nu = 63,9 - 4,005 x_1 + 0,0745 x_1^2. \quad (2)$$

Проведенные исследования вязкостных характеристик многокомпонентных и эмульгированных топлив подтвердили возможность их использования в отечественных дизелях. Полученные формулы для вязкостных характеристик рассмотренных топлив могут быть использованы при выборе целесообразного состава таких топлив, в частности, при расчетных исследованиях течения

топлива в элементах системы топливоподачи. При этом наибольший интерес вызывает течение топлива в распылителях форсунок.

При моделировании течения исследуемых топлив в проточной части распылителя форсунки использован программный комплекс (ПК) *Fluent*, с помощью которого проведены расчетные исследования параметров потока топлива при его течении по каналам распылителя форсунки. Рассчитаны параметры течения нефтяного ДТ и эмульсии 70% РМ и 30% ЭС (по объему) в распылителе дизельной форсунки ФДМ-22 с распылителем типа 171.07.00 Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ). Этот распылитель имеет иглу диаметром $d_i=5$ мм с максимальным ходом $h_i=0,32$ мм, суммарную эффективную площадь в сборе $\mu_p f_p=0,270$ мм² (при полностью поднятой игле) и пять распыливающих отверстий диаметром $d_p=0,35$ мм и длиной $l_p=1,1$ мм. Исследуемое эмульгированное топливо представляет собой эмульсию ЭС в РМ с диаметром капель ЭС, равным 50 мкм.

Расчеты стационарного течения указанных топлив в проточной части распылителя форсунки проведены при максимальном подъеме иглы форсунки $h_{i\max}=0,32$ мм (проливка распылителя, но при повышенном давлении). Давление на входе в расчетную область принято равным $p_{топл\ вх}=51,5$ МПа, что соответствует давлению в процессе топливоподачи серийной топливоподающей аппаратурой (ТПА) дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5). Температура топлива принята постоянной и равной $t=40$ °С. Для ограничения времени расчета рассмотрена симметричная геометрия элемента проточная часть распылителя с одним распыливающим отверстием (Рис. 1).

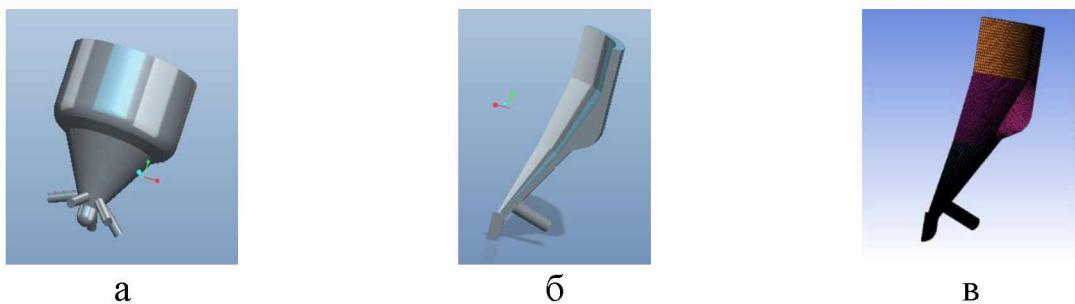


Рис. 1.

Расчетная схема проточной части распылителя АЗПИ (а), принятая геометрия элемента проточная часть распылителя АЗПИ с одним распыливающим отверстием (б) и разбивка на элементы (сетка) принятой геометрии проточной части (в)

На первом этапе исследований моделировалось стационарное течение нефтяного дизельного топлива (ДТ) марки Л (летнее) по ГОСТ 305-82 в проточной части распылителя АЗПИ. Моделирование течения топлива в распылителе проведено при неизменном давлении на входе в расчетную область $p_{топл\ вх}=51,5$ МПа и при двух давлениях на выходе из расчетной области (на выходе из распыливающего отверстия). В первом случае давление на выходе составляло $p_{топл\ вых}=0,1$ МПа (впрыскивание в атмосферу), а во втором – $p_{топл\ вых}=8,878$ МПа, что соответствует давлению в камере сгорания (КС) дизеля Д-245.12С в момент начала впрыскивания.

На Рис. 2, 3 и 4 показаны распределения давления топлива в продольном сечении всей проточной части распылителя, в исследуемом распыливающем отверстии, а также распределение турбулентной энергии потока топлива в распыливающем отверстии.

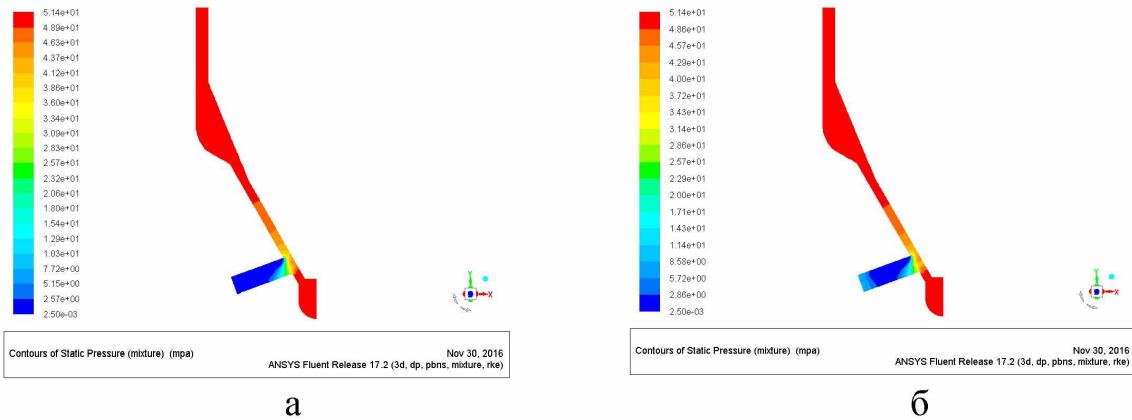


Рис. 2.

Распределение давления топлива в продольном сечении всей проточной части исследуемого распылителя при противодавлениях $p_{\text{топл вых}}=0,1$ МПа (а) и $p_{\text{топл вых}}=8,878$ МПа (б)

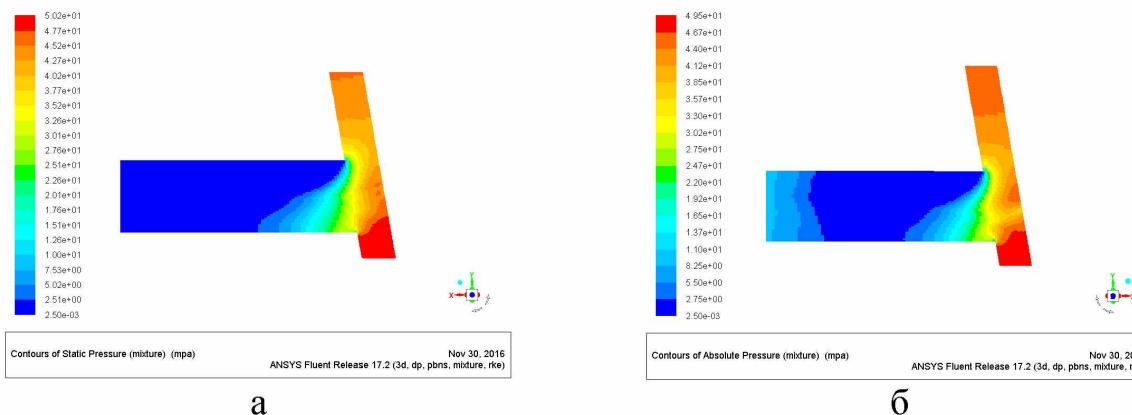


Рис. 3.

Распределение давления топлива в распыливающем отверстии при противодавлениях $p_{\text{топл вых}}=0,1$ МПа (а) и $p_{\text{топл вых}}=8,878$ МПа (б)

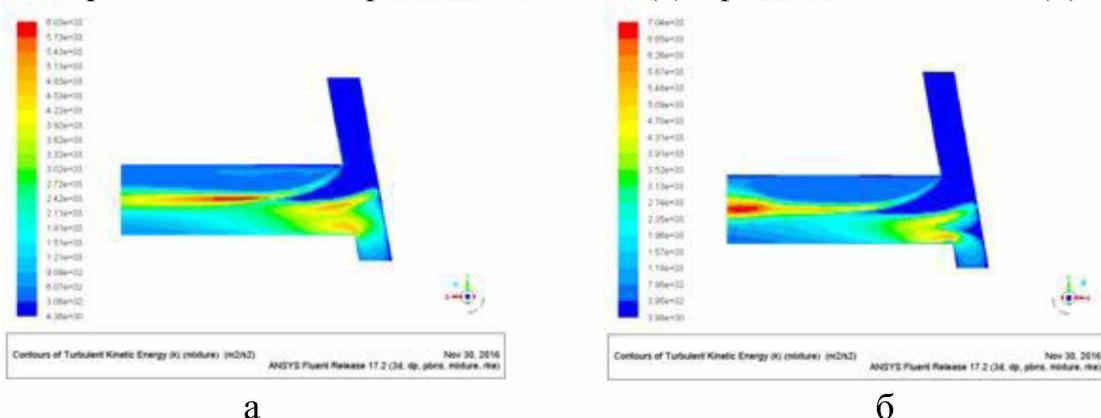


Рис. 4.

Распределение турбулентной энергии потока топлива в распыливающем отверстии при $p_{\text{топл вых}}=0,1$ МПа (а) и $p_{\text{топл вых}}=8,878$ МПа (б)

По полученных расчетным данным получены средние по выбранным сечениям распыливающего отверстия значения параметров потока топлива (Рис. 5, 6).

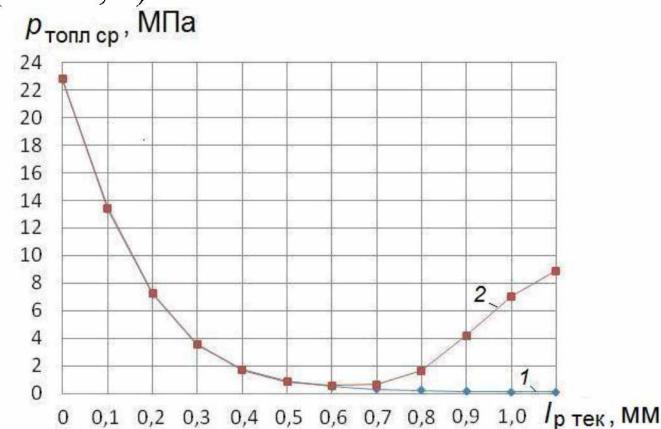


Рис. 5.

Зависимость среднего по сечению давления нефтяного дизельного топлива $p_{\text{топлср}}$ от текущей длины распыливающего отверстия $l_{\text{п тек}}$:

$$p_{\text{топлвых}} = 0,1 \text{ МПа (1)}; \\ p_{\text{топлвых}} = 8,878 \text{ МПа (2)}$$

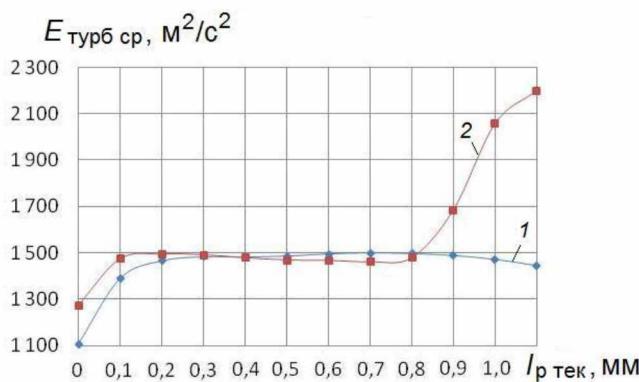


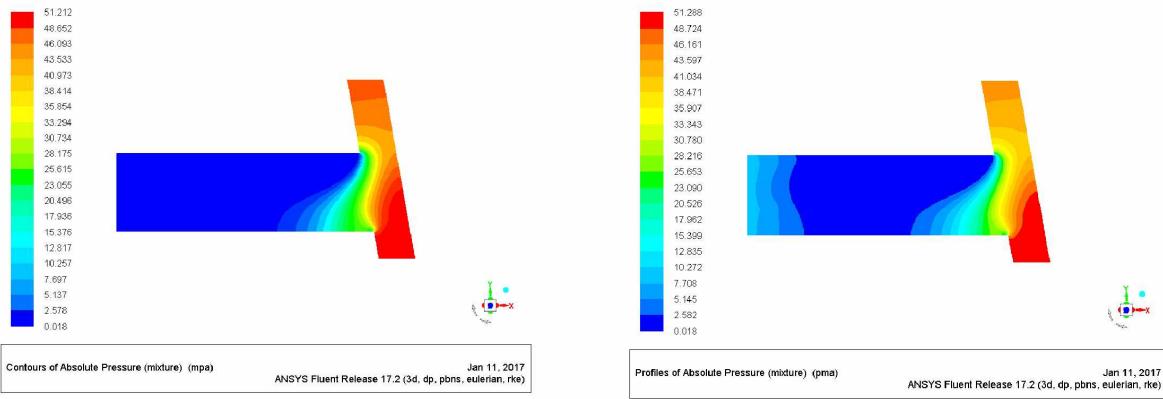
Рис. 6.

Зависимость средней турбулентной энергии потока нефтяного ДТ $E_{\text{турбср}}$ от текущей длины распыливающего отверстия $l_{\text{п тек}}$:

$$p_{\text{топлвых}} = 0,1 \text{ МПа (1)}; \\ p_{\text{топлвых}} = 8,878 \text{ МПа (2)}$$

Полученные аналитические результаты хорошо согласуются с расчетными данными опубликованных расчетных и экспериментальных работ. Это подтверждает возможность использования описанной расчетной методики для моделирования течения эмульгированного биотоплива в распылителе дизельной форсунки. При этом исследовано течение эмульсии 70% РМ и 30% ЭС в проточной части распылителя АЗПИ. При расчетных исследованиях с использованием ПК *Fluent* рассмотрена дисперсная фаза, состоящая из капель ЭС с диаметром 50 мкм, равномерно распределенная по объему РМ. Для учета влияния этих капель на характеристики потока эмульгированного топлива использована многофазная модель Эйлера (*Eulerian Model of Multiphase Flows*) ПК *Fluent*.

На Рис. 7 и 8 показаны распределения давления топлива и турбулентной энергии потока эмульгированного топлива в распыливающем отверстии. По этим данным построены зависимости средних по сечениям отверстия параметров потока топлива от текущей длины отверстия (Рис. 9 и 10).



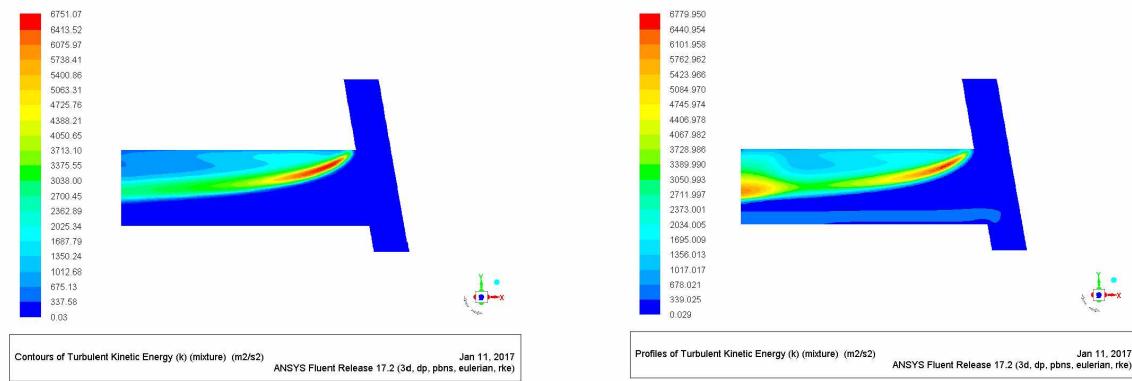
а

б

Рис. 7.

Распределение давления эмульгированного топлива в продольном сечении распыливающего отверстия при давлении на выходе из отверстия

$$p_{\text{топл вых}} = 0,1 \text{ МПа (a) и } p_{\text{топл вых}} = 8,878 \text{ МПа (б)}$$



а

б

Рис. 8.

Распределение кинематической энергии турбулентности потока эмульсии в продольном сечении распыливающего отверстия при давлении на выходе из отверстия $p_{\text{топл вых}} = 0,1 \text{ МПа (a) и } p_{\text{топл вых}} = 8,878 \text{ МПа (б)}$

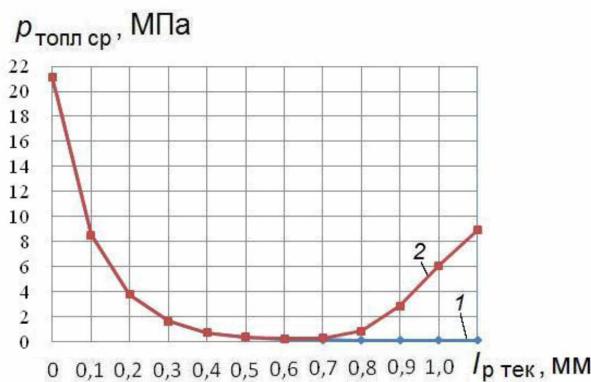


Рис. 9.

Зависимость среднего по сечению распыливающего отверстия давления эмульсии $p_{\text{топл ср}}$ от его текущей длины $l_p \text{ тек}$:

$p_{\text{топл вых}} = 0,1 \text{ МПа (1);}$

$p_{\text{топл вых}} = 8,878 \text{ МПа (2)}$

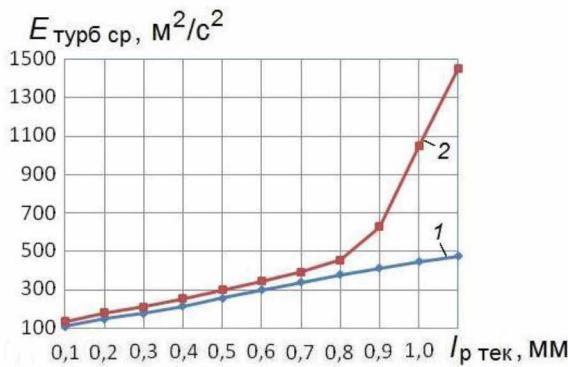


Рис. 10.

Зависимость средней турбулентной энергии потока эмульсии $E_{\text{турб ср}}$ от текущей длины распыливающего отверстия $l_{\text{р тек}}$: $p_{\text{топл вых}}=0,1 \text{ МПа}$ (1); $p_{\text{топл вых}}=8,878 \text{ МПа}$ (2)

Проведенные расчеты показали, что при использовании нефтяного ДТ и эмульгированного биотоплива, содержащего 70% РМ и 30% ЭС параметры потока этих топлив в проточной части распылителя форсунки имеют некоторые различия. Так, поскольку рассматриваемая эмульсия является высоковязкой, то и скорости ее течения оказались заметно меньшими по сравнению с нефтяным ДТ. Так, при наличии противодавления $p_{\text{топл вых}}=8,878 \text{ МПа}$ и работе на нефтяном ДТ средняя по поперечному сечению распыливающего отверстия на выходе из него аксиальная скорость течения составляет 224,7 м/с, а у эмульгированного топлива – 188,7 м/с. Отмечена и существенно меньшая турбулентная энергия потока эмульсии по сравнению с нефтяным ДТ – в указанном сечении турбулентная энергия потока нефтяного ДТ оказалась равна $2198,9 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а у эмульгированного топлива – $1452,4 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Такие различия течения рассматриваемых топлив в проточных частях исследованного распылителя повлияют и на протекание дальнейших процессов распыливания топлива, смесеобразования и сгорания.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований дизеля, работающего на смесях рапсового масла и этанола. Они получены на одноцилиндровой установке ИДТ-69 в Российском университете дружбы народов (РУДН) доцентом П.Р. Вальехо Мальдонадо при участии автора диссертации. Установка представляет собой стенд с вихревакамерным дизелем, приводимым электродвигателем. Она выполнена с ТПА разделенного типа, включающей топливный насос высокого давления (ТНВД), топливопровод высокого давления и форсунку со штифтовым распылителем. Объем вихревой камеры изменяется с помощью регулировочного поршня, что приводит к изменению общей степени сжатия двигателя.

На описанной установке типа ИДТ-69 были исследованы различные топлива: нефтяное ДТ, РМ, смесь (эмulsion) 90% РМ и 10% ЭС, эмульсия 70% РМ и 30% ЭС. При исследованиях использован смеситель для получения устойчивых смесей, которые сразу направлялись в двигатель. Количество топлива, подаваемого в КС установки ИДТ-69, определялось для каждого топлива из условия сохранения постоянства состава смеси (коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне $\alpha \approx 2,25$).

Испытания проведены в два этапа. На первом этапе топлива исследовались при степени сжатия $\epsilon=18$ и различных углах опережения впрыскивания топлива (УОВТ) θ . На втором этапе УОВТ был постоянным и равным $\theta=13$ градусов

поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (п.к.в. до ВМТ), а степень сжатия ε изменялась. Испытания первого этапа показали, что использование РМ или его смеси с 10% ЭС приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на ДТ (Рис. 11). Причем, во всем диапазоне изменения УОВТ (θ от 10 до 26 град. п.к.в. до ВМТ) переход с ДТ на РМ приводит к снижению дымности на 0,2-0,8 единиц по шкале *Bosch* (на 3-19 %), а добавка к РМ 10% этанола дополнительно снижает дымность еще на 0,3-0,7 единиц по шкале *Bosch* (на 7-18%). Максимальное снижение дымности ОГ достигнуто при работе с $\theta=13$ град. п.к.в. до ВМТ на рапсовом масле с 10% ЭС и составило 1,6 единиц по шкале *Bosch* или 24%.

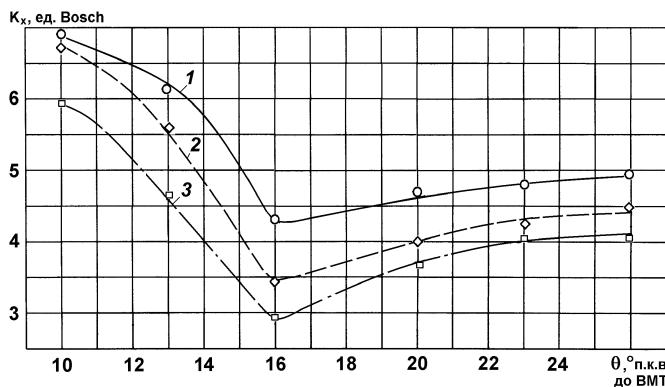


Рис. 11.
Зависимость
дымности ОГ K_x от
УОВТ θ при $\varepsilon=18$ для
различных топлив:
нефтяное ДТ (1); РМ
(2); смесь 90% РМ и
10% ЭС (3)

Результаты второго этапа испытаний (Рис. 12) свидетельствуют о том, что использование РМ или его смесей с 10 и 30% ЭС приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на ДТ. Причем, во всем исследованном диапазоне изменения степени сжатия (ε от 18 до 22) работа на рапсовом масле приводит к снижению дымности на 0,6-1,3 единиц по шкале *Bosch*, добавка к РМ 10% этанола дополнительно уменьшает дымность еще на 0,5-0,7 единиц, а добавка к РМ 30% этанола снижает дымность еще на 0,7-1,1 единиц по шкале *Bosch*.

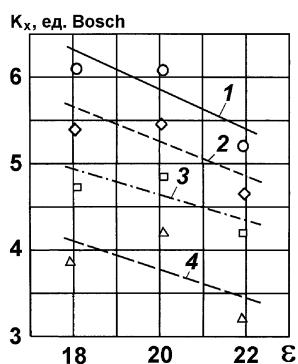


Рис. 12.
Зависимость дымности ОГ K_x от
степени сжатия ε при УОВТ $\theta=13$
град. п.к.в. до ВМТ для различных
топлив: нефтяное ДТ (1); рапсовое
масло (2); смесь 90% РМ и 10% ЭС
(3); смесь 70% РМ и 30% ЭС (4)

Проведенные исследования подтвердили возможность и эффективность применения смесей (эмulsionий) РМ и ЭС в качестве моторного топлива для дизелей. При этом использование указанных смесей оптимального состава обеспечит наибольшую эффективность работы дизеля. Возможна также работа дизеля и на смесях ЭС с другими растительными маслами.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям дизеля, работающего на смесях нефтяного ДТ и абсолютного этанола. Отмечено, что одной из серьезных проблем, возникающих при использовании ЭС в качестве моторного топлива, является его плохая смешиваемость с нефтяными и некоторыми альтернативными топливами. Решение этой проблемы возможно путем использования безводного (абсолютного) этанола, содержащего лишь десятые доли процента воды. Такой этанол хорошо смешивается с нефтяным ДТ, образуя стойкие смеси.

Для оценки показателей дизеля, работающего на нефтяном ДТ и его смеси с абсолютным ЭС, проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5). При испытаниях использован абсолютный спирт Алексинского химического комбината (г. Алексин Тульской обл.) по ТУ 2421-064-07506004-2003. Исследовались нефтяное ДТ марки «Л» по ГОСТ 305-82 и смесь, содержащая 96% ДТ и 4% ЭС (по объему).

Дизель Д-245.12С исследован на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и режимах 13-режимного испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН с установочным УОВТ $\theta=13$ град. п.к.в. до ВМТ и неизменным положением упора рейки ТНВД. Результаты первого этапа испытаний дизеля на режимах ВСХ показаны на Рис. 13.

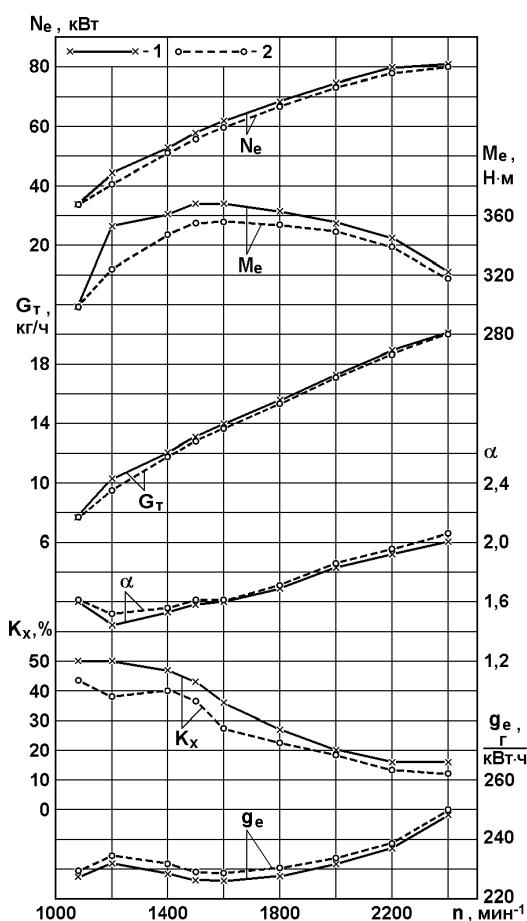


Рис. 13.
Зависимость эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , часового расхода топлива G_t , коэффициента избытка воздуха α , дымности ОГ K_x и удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения n коленчатого вала дизеля типа Д-245.12С на режимах ВСХ: ДТ (1); смесь 96% ДТ и 4% этанола (2)

При использовании смеси 96% ДТ и 4% ЭС на всех исследованных режимах ВСХ удельный эффективный расход топлива g_e оказался несколько выше, чем

при работе на ДТ, но эффективный КПД η_e на этих режимах повысился на 0,5-0,8%. Отмечено заметное уменьшение дымности ОГ при работе дизеля на указанной смеси.

На втором этапе испытаний дизель Д-245.12С исследовался на режимах 13-режимного испытательного цикла. Результаты исследований дизеля на этих режимах представлены на Рис. 14.

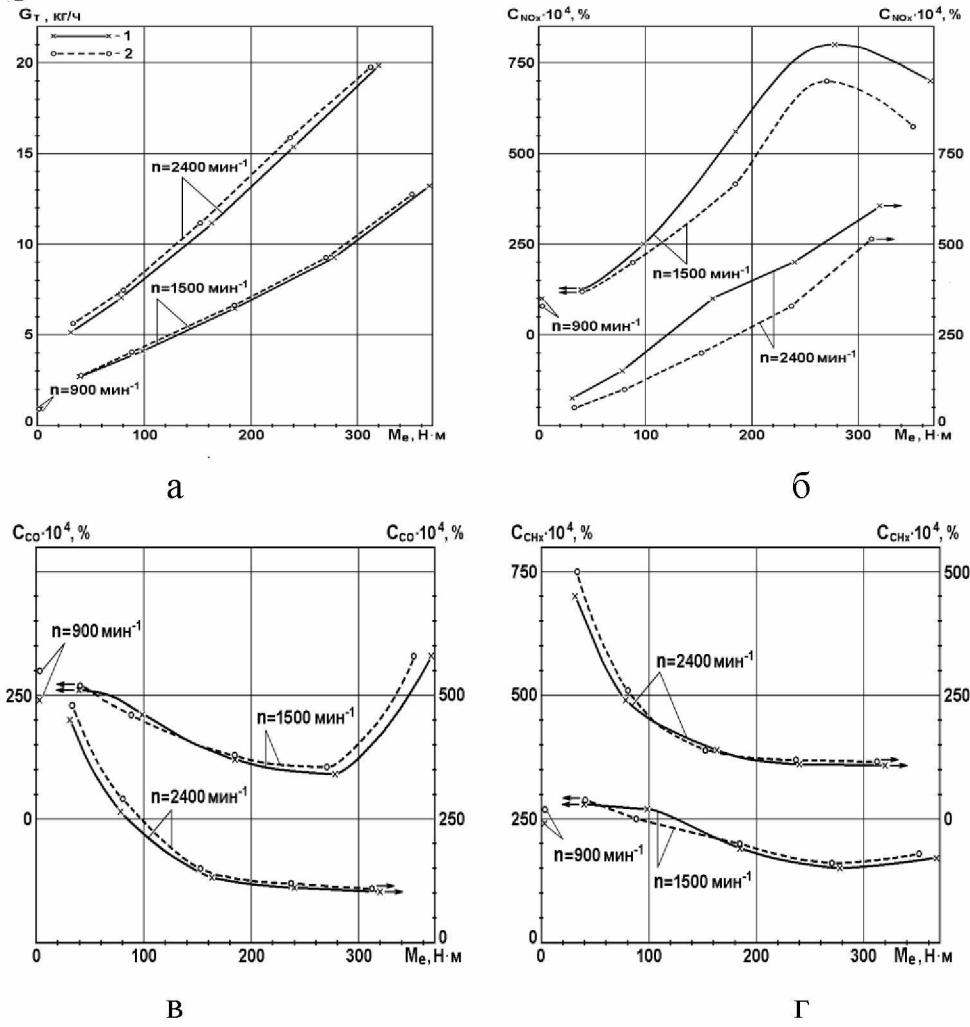


Рис. 14.

Зависимость часового расхода топлива G_T (а), объемной концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} (б),monoоксида углерода C_{CO} (в), легких несгоревших углеводородов C_{CHx} (г) от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизеля Д-245.12С на режимах 13-режимного цикла ECE R49: ДТ (1); смесь 96% ДТ и 4% этанола (2)

Полученные при испытаниях концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} , монооксида углерода C_{CO} , несгоревших углеводородов C_{CHx} пересчитывались в интегральные удельные массовые выбросы (e_{NOx} , e_{CO} , e_{CHx}). Оценка топливной экономичности на режимах 13-режимного цикла проведена по среднему (условному) удельному эффективному расходу топлива и среднему эффективному КПД дизеля, определяемым по формулам:

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{T_i} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{e_i} \cdot K_i}, \quad \eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U \cdot g_{e \text{ усл}}}, \quad (3)$$

где G_{T_i} и N_{e_i} – часовой расход топлива и эффективная мощность двигателя на i -том режиме; K_i – доля времени этого режима в 13-режимном цикле; H_U – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

Результаты расчетов подтвердили возможность улучшения экологических показателей дизеля при его переводе с ДТ на смесь 96% ДТ и 4% ЭС. Так, при подаче в КС дизеля исследуемой смеси на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента дымность ОГ снизилась на 15-25% по сравнению с нефтяным ДТ. Удельный массовый выброс оксидов азота e_{NO_x} на режимах 13-режимного цикла снизился с 7,018 до 5,798 г/(кВт·ч), т.е. на 17,4%. Удельный массовый выбросmonoоксида углерода e_{CO} возрос с 1,723 до 1,879 г/(кВт·ч), т.е. на 9,0%, а выброс углеводородов e_{CH_4} увеличился с 0,788 до 0,856 г/(кВт·ч), т.е. на 8,6%. Условный эффективный КПД дизеля $\eta_{e \text{ усл}}$ незначительно снизился (с 0,341 до 0,338, т.е. на 0,8%). Исследования подтвердили возможность использования абсолютного этанола как экологической добавки к нефтяному ДТ, а также целесообразность разработки методики сравнительной оценки экологических качеств нефтяного ДТ и смесевого биотоплива с добавкой этанола. Эта задача не имеет однозначного решения и является многокритериальной оптимизационной задачей.

Для сравнительной оценки экологических качеств нефтяного ДТ и смесевого биотоплива использован метод свертки, в котором частные критерии оптимальности сведены к обобщенному критерию J_o , определяемому в виде суммы частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ оксидов азота J_{NO_x} и дымность ОГ по шкале Хартриджа J_{K_X} , по выражению:

$$J_o = J_{NO_x} + J_{K_X}. \quad (4)$$

Указанные основные показатели токсичности ОГ дизеля учитывались на двух основных режимах – максимальной мощности N_{max} и максимального крутящего момента M_{max} , т.е. выражение (4) принимает вид

$$J_o = J_{NO_x \text{ Nmax}} + J_{NO_x \text{ Mmax}} + J_{K_X \text{ Nmax}} + J_{K_X \text{ Mmax}}, \quad (5)$$

где $J_{NO_x \text{ Nmax}}$, $J_{NO_x \text{ Mmax}}$, $J_{K_X \text{ Nmax}}$, $J_{K_X \text{ Mmax}}$ – частные критерии на этих режимах.

Так как в предлагаемой методике частные критерии имеют различную размерность, целесообразно их использование в относительных величинах:

$$\begin{aligned} J_{NO_x \text{ Nmax}} &= C_{NO_x \text{ Nmax}i} / C_{NO_x \text{ Nmax DT}}; & J_{NO_x \text{ Mmax}} &= C_{NO_x \text{ Mmax}i} / C_{NO_x \text{ Mmax DT}}; \\ J_{K_X \text{ Nmax}} &= K_{X \text{ Nmax}i} / K_{X \text{ Nmax DT}}; & J_{K_X \text{ Mmax}} &= K_{X \text{ Mmax}i} / K_{X \text{ Mmax DT}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где параметры с индексом «дт» соответствуют нефтяному ДТ, а параметры с индексом « i » – смесевому биотопливу с добавкой этанола. Обобщенный критерий оптимальности (5) также использован в относительном виде:

$$\bar{J}_o = J_{o,i} / J_{o,DT}, \quad (7)$$

Предложенная методика использована для сравнительной оценки экологических качеств нефтяного ДТ и смесевого биотоплива с добавкой этанола для дизеля Д-245.12С. Результаты вычислений частных критериев оптимальности по выражениям (6) и обобщенного критерия оптимальности (целевой функции) по формулам (5) и (7) приведены в Таблице 1.

Таблица 1.
Экологические качества нефтяного ДТ и его смеси
с абсолютным спиртом для дизеля Д-245.12С

Вид топлива	Показатели дизеля									
	$C_{NOx,Mmax}$ ppm	$J_{NOx,Mmax}$	$C_{NOx,Mmax}$ Ppm	$J_{NOx,Mmax}$	$K_{X,Mmax}$ %	$J_{K_X,Mmax}$	$K_{X,Mmax}$ %	$J_{K_X,Mmax}$	J_o	\bar{J}_o
ДТ	605	1,000	700	1,000	16,0	1,000	43,0	1,000	4,000	1,000
96% ДТ+4% ЭС	515	0,851	575	0,821	12,0	0,750	36,5	0,849	3,271	0,818

Как следует из данных Таблицы 1, исследованная смесь 96% нефтяного ДТ и 4% абсолютного этанола обладает заметно лучшими экологическими качествами по сравнению с чистым ДТ. Для дизеля Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ, обобщенный критерий оптимальности \bar{J}_o был равен единице, а при переходе на указанную смесь он снизился до $\bar{J}_o=0,818$. Причем, при переводе дизеля на эту смесь все четыре частных критерия оптимальности выражения (5) уменьшились. В целом, проведенные исследования подтвердили эффективность использования предложенной методики сравнительной оценки экологических качеств нефтяного ДТ и смесевого биотоплива с добавкой этанола.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали, что путем использования этанола в качестве экологической добавки к дизельному топливу можно обеспечить значительное улучшение показателей токсичности ОГ транспортного дизеля. Полученные при исследованиях результаты сводятся к следующим основным выводам и рекомендациям:

1. В качестве наиболее перспективных биотоплив для дизелей рассматриваются биоэтанол и топлива, производимые из растительных масел. Использование этих биотоплив осложняется различиями физико-химических свойств этих биотоплив от аналогичных свойств нефтяного ДТ.

2. Разработана методика расчета вязкости нефтяного дизельного топлива, биотоплив на основе растительных масел и эмульгированного биотоплива с добавкой этанола и проведены расчетные исследования. Полученные аппроксимационные формулы для определения вязкости указанных топлив хорошо согласуются с экспериментальными данными.

3. Разработана методика расчета показателей потока эмульгированного биотоплива с добавкой этанола в проточной части распылителей дизельных форсунок с использованием ПК *Fluent*. Проведены расчетные исследования показателей потока смеси РМ и ЭС в распылителях форсунок.

4. При работе на смеси 70% РМ и 30% ЭС отмечена существенно меньшая турбулентная энергия потока смеси по сравнению с нефтяным ДТ. При противодавлении 8,878 МПа и работе на нефтяном ДТ средняя по поперечному сечению распыливающего отверстия на выходе из него аксиальная скорость течения составила 224,7 м/с против 188,7 м/с у эмульгированного топлива. В этом сечении турбулентная энергия потока нефтяного ДТ была равна 2198,9 $\text{м}^2/\text{с}^2$, а у эмульгированного топлива – 1452,4 $\text{м}^2/\text{с}^2$.

5. Проведенные на установке ИДТ-69 испытания показали, что использование смесей ЭС в количестве 10 и 30% с РМ приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на ДТ. При добавлении в РМ 30% спирта достигнуто снижение дымности ОГ в 2 раза большее, чем при добавлении 10% ЭС. Эффект по снижению дымности сохраняется при изменении УОВТ от 10 до 26 град. п.к.в. до ВМТ и изменении степени сжатия от 18 до 22.

6. При использовании смесевых биотоплив, степени сжатия $\varepsilon=18$ и УОВТ $\theta=13$ град. п.к.в. до ВМТ максимальный эффект при снижении дымности ОГ достигнут при работе на РМ с 10% ЭС и составил 1,6 единиц по шкале *Bosch* или 24% по сравнению с работой на ДТ. При степени сжатия $\varepsilon=22$ и УОВТ $\theta=13$ град. п.к.в. до ВМТ максимальный эффект при снижении дымности ОГ достигнут при работе на смеси РМ с 30% ЭС и составил 2,0 единицы по шкале *Bosch* или 38% по сравнению с работой на ДТ.

7. Рассмотрена возможность использования в дизеле Д-245.12С смеси 96% ДТ и 4% абсолютного этанола. При смешении этих компонентов образуются стойкие однородные смеси, обладающие хорошими экологическими качествами из-за наличия в их составе значительного количества кислорода.

8. Проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С на нефтяном ДТ и на смеси 96% ДТ и 4% абсолютного этанола на режимах ВСХ и режимах 13-режимного цикла *ECE R49*. При переходе от нефтяного ДТ к смеси 96% ДТ и 4% абсолютного этанола интегральный на режимах 13-режимного цикла удельный массовый выброс оксидов азота снизился на 17,4%, выбросmonoоксида углерода возрос на 9,0%, выброс несгоревших углеводородов e_{CH_x} увеличился на 8,6%. При этом дымность ОГ на режимах ВСХ снизилась на 15-25%.

9. Разработана методика сравнительной оценки экологических качеств нефтяного ДТ и смесевого биотоплива с добавкой этанола, базирующаяся на использовании обобщенного критерия оптимальности в виде суммы относительных безразмерных критериев, характеризующих выбросы оксидов азота и сажи (дымность ОГ). Указанные частные критерии оптимальности определены на двух основных режимах работы дизеля – на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента.

10. Оптимизационные расчеты показали, что смесь 96% нефтяного ДТ и 4% абсолютного этанола обладает заметно лучшими экологическими качествами по сравнению с чистым нефтяным ДТ. Для дизеля Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ, обобщенный критерий оптимальности равен единице, а при переводе дизеля на указанную смесь он снизился до 0,818.

11. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования предложенной методики сравнительной оценки экологических качеств нефтяного ДТ и смесевого топлива с добавкой этанола, ее информативность при оценке экологических качеств различных топлив и сравнительно небольшой объем расчетных исследований.

Основные положения диссертации опубликованы следующих работах:

1. Сравнительные испытания альтернативных топлив для дизельных двигателей / В.В. Бирюков [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2014. № 6. С. 59-72 (1,00 п.л. / 0,25 п.л.).

2. Марков В.А., Бирюков В.В., Девягин С.Н. Работа дизеля на дизельном топливе с добавкой этанола // Транспорт на альтернативном топливе. 2015. № 2. С. 18-28 (0,80 п.л. / 0,25 п.л.).

3. Марков В.А., Вальехо Мальдонадо П.Р., Бирюков В.В. Спиртовые топлива для дизельных двигателей // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2015. № 11. С. 39-52 (1,00 п.л. / 0,25 п.л.).

4. Марков В.А., Бирюков В.В., Кас'ков С.И. Использование этанола как экологического энергоносителя для теплоэнергетических установок // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 28-35 (0,60 п.л. / 0,20 п.л.).

5. Markov V.A., Biryukov V.V., Kas'kov S.I. Ethanol used as an environmentally sustainable energy resource for thermal power plants // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. № 9. P. 628-635 (0,60 п.л. / 0,20 п.л.).

6. Вязкостные характеристики многокомпонентных и эмульгированных топлив / В.В. Бирюков [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2017. № 3. (1,00 п.л. / 0,25 п.л.).

7. Моделирование течения эмульгированного биотоплива в распылителе дизельной форсунки. Часть 1 / В.В. Бирюков [и др.] // Грузовик. 2017. № 8 (0,60 п.л. / 0,20 п.л.).

8. Моделирование течения эмульгированного биотоплива в распылителе дизельной форсунки. Часть 2 / В.В. Бирюков [и др.] // Грузовик. 2017. № 9 (0,60 п.л. / 0,20 п.л.).