

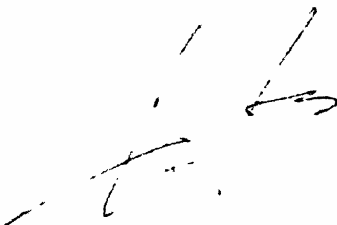
На правах рукописи

Шумовский Владимир Алексеевич

**УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ
ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА И СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ**

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes, located in the lower-left quadrant of the page.

Москва - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре теплофизики.

Научный руководитель: **Марков Владимир Анатольевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
теплофизики ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э.
Баумана

Официальные оппоненты: **Ерохов Виктор Иванович**
заслуженный деятель науки РФ, доктор
технических наук, профессор кафедры
экологической безопасности технических
систем ФГБОУ ВПО «Московский
государственный машиностроительный
университет (МАМИ)»

524

Слепцов Олег Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Ведущее предприятие: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский университет дружбы
народов»**

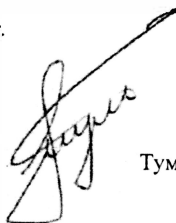
Защита диссертации состоится 17 марта 2016 г. в 14 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

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, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан 25 декабря 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Тумашев Р.З.

524

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью улучшения показателей токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей и их топливной экономичности. Решение проблемы улучшения названных показателей возможно с использованием различных методов, среди которых одним из наиболее эффективных является совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования, обеспечивающее равномерное распределение испарившегося топлива по объему цилиндра и наиболее полное сгорание топлива с наибольшей эффективностью рабочего цикла. Улучшение качества протекания этих процессов может быть достигнуто путем совершенствования конструкции системы топливоподдачи и, в особенности, конструкции форсунок и их распылителей, которые и определяют параметры указанных процессов. Другим направлением улучшения качества указанных процессов является обеспечение работы двигателя на водотопливных эмульсиях (ВТЭ). Использование ВТЭ позволяет не только повысить качество смесеобразования за счет быстрого испарения капель воды из эмульгированного топлива и, соответственно, быстрого распада струй топлива в камере сгорания дизеля, но также и снизить максимальные температуры сгорания, что обеспечивает уменьшение выброса наиболее значимого токсичного компонента ОГ дизелей – оксидов азота.

Для исследования влияния конструкции распылителей форсунок и применения водотопливных эмульсий на процессы распыливания топлива и смесеобразования необходимо проведение комплекса расчетно-экспериментальных исследований по оптимизации конструкции распылителей форсунок и состава водотопливных эмульсий. Результаты этих исследований позволяют достичь требуемых показателей токсичности ОГ и топливной экономичности транспортных дизелей.

Цель работы: улучшение показателей транспортного дизеля путем совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов. С помощью теоретических методов проведены расчетные исследования параметров потока топлива в проточной части распылителей форсунок, а также оптимизационные расчеты состава водотопливной эмульсии. Экспериментальная часть работы заключалась в определении показателей дизеля, работающего на ВТЭ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика расчета показателей потока топлива в проточной части распылителей дизельных форсунок;
- разработаны конструкции распылителей форсунок, обеспечивающих улучшение качества процессов распыливания топлива и смесеобразования, показателей токсичности отработавших газов дизелей и их топливной

экономичности;

- разработана методика оптимизации состава водотопливной эмульсии с учетом показателей токсичности отработавших газов.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- использованием современных методик расчета показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок и параметров процессов распыливания топлива и смесеобразования дизеля;
- использованием современных методик оптимизации состава водотопливной эмульсии;
- совпадением результатов расчетных и экспериментальных исследований, полученных при испытаниях на развернутом двигателе.

Практическая ценность состоит в том, что:

- разработанная методика расчета показателей потока топлива в проточной части распылителей дизельных форсунок и проведенные расчетные исследования позволили оценить влияние конструкции распылителей форсунок на параметры процессов распыливания топлива и смесеобразования;
- проведенные с использованием разработанной методики расчетные исследования показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок дизеля, работающего на водотопливных эмульсиях, позволили оценить влияние состава эмульсии на параметры процессов распыливания топлива и смесеобразования;
- проведенные экспериментальные исследования дизеля, работающего на водотопливных эмульсиях, подтвердили эффективность их использования для улучшения показателей токсичности отработавших газов дизеля и его топливной экономичности;
- разработанная методика оптимизации состава водотопливной эмульсии с учетом показателей токсичности отработавших газов дизеля и проведенные оптимизационные расчеты позволили сформулировать практические рекомендации по выбору состава водотопливной эмульсии.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в соответствии с планами госбюджетных и хоздоговорных работ кафедр «Поршневые двигатели» (Э-2) и «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также лаборатории «Автоматика» НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты исследований внедрены в ГТУ «МАДИ» и в ЗАО «Форант-Сервис» (г. Ногинск).

Апробация работы:

Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Поршневые двигатели» в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2015 г. По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

- на международной научно-технической конференции «6-е Луканинские чтения. Решение энергоскологических проблем в автотранспортном комплексе», 4 февраля 2013 г., Москва, ГТУ «МАДИ» (Москва, 2013);
- на международной научно-технической конференции «7-е Луканинские

чения. Решение энергэкологических проблем в автотранспортном комплексе», 2 февраля 2015 г., Москва, ГТУ «МАДИ» (Москва, 2015);
- на Всероссийском научно техническом семинаре (ВНТС) им. проф. В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок при кафедре «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011-2014 г.г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных статей, в том числе 12 из них опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых ведущих научных журналов и изданий. Также по теме диссертации опубликовано 6 материалов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем работы 165 страниц, включая 160 страниц основного текста, содержащего 47 рисунков, 16 таблиц. Список литературы содержит 190 наименований на 21 странице.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования в дизелях и дана общая характеристика диссертации.

В первой главе проведен анализ работ, опубликованных по теме диссертации. Проанализированы современные требования к показателям топливной экономичности и токсичности ОГ транспортных дизелей. Рассмотрены особенности организации процессов распыливания топлива и смесеобразования в дизелях и методы улучшения их качества. В работах Л.Н. Голубкова, Л.В. Грехова, С.Н. Девянина, А.С. Кулешова, А.Р. Кульчицкого, В.И. Мальчука и других ученых показано, что совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования является эффективным методом достижения требуемых показателей топливной экономичности и токсичности ОГ. На основании проведенного анализа сформулированы цель работы и следующие задачи исследования:

1. Оценка эффективности различных направлений совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования в дизелях.

2. Разработка методики расчета показателей потока топлива в проточной части распылителей дизельных форсунок.

3. Разработка конструкций распылителей форсунок, обеспечивающих улучшение качества процессов распыливания топлива и смесеобразования, показателей токсичности ОГ дизелей и их топливной экономичности.

4. Проведение расчетных исследований показателей потока топлива в проточной части распылителей дизельных форсунок с различной геометрией проточной части.

5. Проведение расчетных исследований показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок дизеля, работающего на ВТЭ.

6. Проведение экспериментальных исследований дизеля, работающего на водотопливных эмульсиях.

7. Разработка методики оптимизации состава ВТЭ с учетом показателей токсичности ОГ и проведение оптимизационных расчетов.

Вторая глава посвящена расчетным исследованиям течения топлива в распылителях дизельных форсунок с различной геометрией проточной части. В ряде работ показано, что для обеспечения высокого качества распыливания топлива и последующего смесеобразования желательно обеспечить высокую турбулизацию потока топлива в проточной части распылителя форсунки. Дополнительная турбулизация потока топлива на выходе из распыливающих отверстий может быть обеспечена при выполнении дополнительных гидравлических сопротивлений на хвостовике иглы распылителя. Для оценки влияния таких сопротивлений на параметры течения топлива в распылителях разработано и изготовлено несколько опытных распылителей на базе серийного распылителя типа 145.1112110-11 производства Ногинского завода топливной аппаратуры (НЗТА). Эти распылители используются в форсунках ФДМ-22 дизелей типа Д-245 производства Минского моторного завода (ММЗ). Серийный распылитель типа 145.1112110-11 выполнен с диаметром иглы $d_n=5,0$ мм (по направляющей, Рис. 1,а). Максимальный ход иглы составляет $h_n=0,26$ мм. Диаметр распыливающих отверстий равен $d_p=0,32$ мм (его длина $l_p=0,90$ мм). Хвостовик иглы распылителя имеет три конусных участка с различными углами этих конусов, равными 45, 60 и 90°. Посадка иглы на седло распылителя осуществляется по диаметру $d_n=2,8$ мм, расположенному на участке с углом конуса 60°. В опытном распылителе по варианту № 1 (рис. 1,б) произведена подрезка части хвостовика иглы серийного распылителя, расположенной ниже посадочного диаметра $d_n=2,8$ мм, под углом конуса 90°. В опытном распылителе по варианту № 2 (Рис. 1,в) конусная часть хвостовика иглы серийного распылителя с углом конуса 60° сточена на 0,1 мм (по диаметру) ниже посадочного диаметра $d_n=2,8$ мм с таким же углом конуса (60°). Опытный распылитель по варианту № 3 (Рис. 1,г) получен в результате дообработки опытного распылителя по варианту 1 (Рис. 1,б). Эта дообработка заключалась в том, что конусная часть хвостовика иглы с углом конуса 45° сточена на 0,1 мм (по диаметру) выше диаметра $d=3,2$ мм с таким же углом конуса (45°).

Исследования разработанных распылителей на безмоторной установке и на моторном стенде дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) подтвердили работоспособность предложенных конструкций распылителей форсунок и возможность значительного улучшения показателей токсичности ОГ и топливной экономичности дизеля при его оснащении опытными распылителями. Наилучшие результаты получены при установке на дизель типа Д-245.12С опытных распылителей по варианту №3 (см. Рис. 1,г).

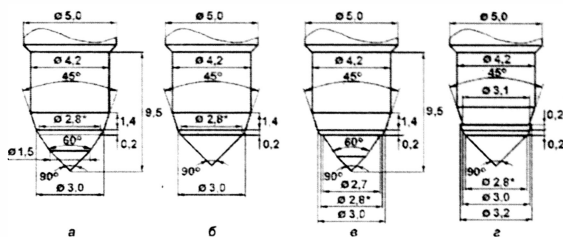


Рис. 1.

Конструктивные схемы носка иглы распылителя: а – серийный распылитель типа 145 производства НЗТА; б – опытный распылитель по варианту № 1; в – опытный распылитель по варианту № 2; г – опытный распылитель по варианту № 3

Для оценки параметров потока топлива в проточной части распылителя проведены его расчетные исследования с использованием программного комплекса (ПК) *Ansys CFX v12.1*, в котором для решения задач гидромеханики используется метод конечных объемов (МКО). При расчетах рассматривалось стационарное течение топлива, при постоянном давлении на входе в форсунку, равном среднему за период впрыскивания давлению. Математическая модель этого ПК содержит уравнения в частных производных, описывающих поток топлива в проточной части распылителя – уравнения неразрывности, количества движения Навье-Стокса, энергии и диффузии, а также уравнения модели турбулентности. Для оценки степени турбулизации потока использовалась величина турбулентной кинетической энергии (удельная кинетическая энергия вихрей в турбулентном потоке) k , которая физически характеризуется среднеквадратической флуктуацией (пульсацией) скорости. При расчетах исследован стационарный поток топлива в распылителях. В качестве расчетной области выбрана проточная часть между хвостовиком иглы и седлом распылителя при максимально поднятой игле. Общий вид расчетной схемы для серийного распылителя (см. Рис. 1,а) представлен на Рис. 2. Для уменьшения времени счёта используется четверть расчетной области, при этом на границах заданы условия симметрии.

Давление топлива на входе в расчетную область было принято равным 51,5 МПа, что соответствует максимальному давлению впрыскивания, обеспечиваемому системой топливоподачи дизеля типа Д-245.12С на номинальном режиме (при частоте вращения $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ и цикловой подаче топлива $q_u=80 \text{ мм}^3$). Расход топлива через распылитель принят равным 0,08 кг/с, что соответствует максимальному расходу топлива через форсунку дизеля типа Д-245.12С на указанном режиме.

Расчетная схема опытного распылителя по варианту 3 (см. Рис. 1,г) имеет вид, аналогичный виду на Рис. 2, а граничные условия оставлены неизменными.

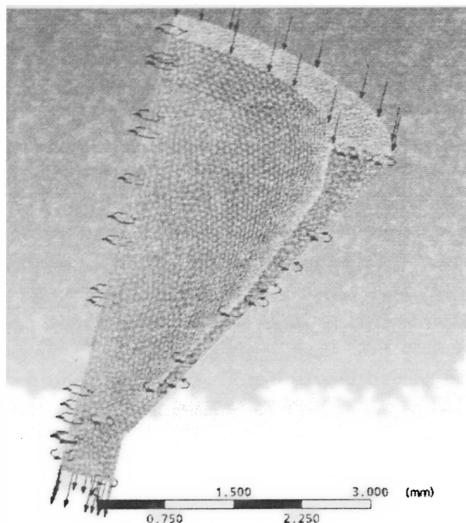


Рис. 2.

Расчетная область проточной части распылителей форсунки

Расчетная схема опытного распылителя по варианту 3 (см. Рис. 1,2) имеет вид, аналогичный виду на Рис. 2, а граничные условия оставлены неизменными. Для уточнения расчета в области кольцевого уступа сгенерирована более мелкая сетка конечных элементов. По полученным визуализациям линий тока можно констатировать, что у опытного распылителя в районе кольцевого уступа наблюдается явный отрыв потока, тогда как в проточной части серийного образца течение является безотрывным. Расчетное распределение давлений топлива в проточных частях исследуемых распылителей показало, что созданное в опытном варианте местное сопротивление увеличивает гидравлические потери, но это практически не приводит к уменьшению давления на выходе расчетной области. Более того, увеличение сечений проточной части опытного распылителя ниже и выше уступа приводит к увеличению давления на выходе из расчетной области данного распылителя. У серийного распылителя это давление оказалось равным 46,8 МПа, а у опытного – 47,6 МПа.

Наибольший интерес с точки зрения турбулизации потока топлива представляет картина распределения турбулентной кинетической энергии в проточных частях распылителей форсунки, представленная на рис. 3. Максимальные значения турбулентной кинетической энергии k зафиксированы в области отрыва потока под кольцевым уступом опытного

распылителя. В этой области турбулентная кинетическая энергия потока топлива достигала значения $k=265 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (см. Рис 3,б.).

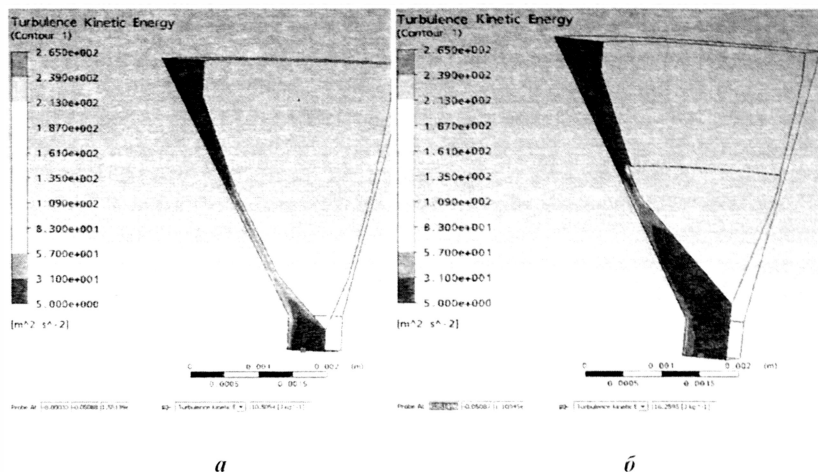


Рис. 3.

Значения турбулентной кинетической энергии потока топлива в проточных частях распылителей форсунки: а – серийный распылитель; б – опытный распылитель

Полученные распределения турбулентной кинетической энергии в сечении потока на выходе из расчетной области (в колодце распылителя) проточных частей серийного и опытного распылителей показали, что средние по сечению значения турбулентной кинетической энергии, полученные на выходе расчетной области опытного распылителя, примерно в 2 раза больше, чем у серийного. Отмечено также, что большие значения энергии в случае с опытным распылителем не имеют столь строгого локального характера, как у серийного образца (около стенки после поворота потока в колодец), а гораздо более равномерно распределены по сечению, что вызвано наличием местного гидравлического сопротивления. Значения турбулентной кинетической энергии в одной и той же точке на выходе из расчетной области для серийного и опытного распылителя были равны соответственно $k=10,5$ и $16,3 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а разница в средних по выходному сечению значений турбулентной кинетической энергии оказалась ещё большей в пользу опытного распылителя по варианту №3.

В третьей главе представлены результаты расчетных исследований течения топлива в распылителях форсунок дизеля, работающего на водотопливных эмульсиях. Проанализированы физико-химические свойства нефтяного дизельного топлива (ДТ) и ВТЭ. Проведено моделирование течения топлива в распылителях форсунок дизеля,

работающего на нефтяных ДТ и ВТЭ. Для определения энергетических показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок использован расчетный метод, основанный на использовании ПК *Ansys CFX 12.0*. Исследовано течение топлива в проточной части серийного распылителя 145.1112110 форсунки типа ФДМ-22 дизеля типа Д-245.12С при его работе на нефтяном ДТ и ВТЭ, содержащей 85% нефтяного ДТ и 15% воды. При расчетах исследован стационарный поток топлива в распылителях. В качестве расчётной области выбрана проточная часть между хвостовиком иглы и седлом распылителя при максимально поднятой игле (см. Рис. 2). Как и при расчетах, проведенных во второй главе, давление топлива на входе в расчетную область было принято равным 51,5 МПа. Расход топлива через распылитель на номинальном режиме принят равным 0,08 кг/с. При расчетах граничные условия оставались неизменными для ДТ и ВТЭ.

В ряде работ показано, что на характеристики течения топлива в элементах системы топливоподачи и показатели рабочего процесса дизеля и его систем оказывает структура водотопливной эмульсии. В связи с этим расчетные исследования проведены для ВТЭ с диаметром капель воды в эмульсии 50 и 5 мкм. При расчетах получена картина течения топлива в проточных частях исследованных распылителей – распределение давлений и скоростей потока топлива, а также распределение его турбулентной кинетической энергии (Рис. 4). Расчетная картина течения нефтяного ДТ и эмульгированных топлив с указанной структурой в проточных частях исследованных распылителей форсунок показывает, что характер течения этих топлив в трех рассматриваемых случаях, достаточно близок.

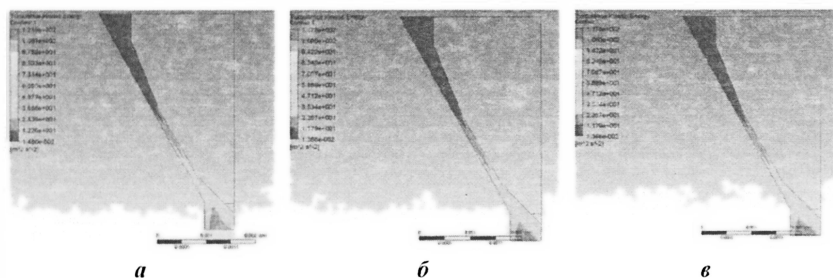


Рис. 4.

Значения турбулентной кинетической энергии потока топлива в проточных частях распылителей форсунки ($k-\epsilon$ – модель турбулентности): а – дизельное топливо; б – ВТЭ с диаметром капель воды 50 мкм; в – ВТЭ с диаметром капель воды 5 мкм

По распределениям давлений, скоростей и турбулентной кинетической энергии потока топлива можно констатировать, что существуют различия указанных распределений энергетических характеристик потока топлива в

распылителе при работе на исследуемых видах топлива, но эти различия не носят глобального характера. Во всех рассматриваемых случаях наибольшие скорость и турбулизация потока топлива отмечены в районе кольцевой щели между иглой распылителя и ее посадочным конусом (седлом). Но наибольший интерес представляют параметры потока на входе в распыливающие отверстия, которые и предопределяют качество распыливания топлива и последующего смесеобразования. Результаты анализа параметров потока исследуемых топлив в указанной расчетной точке свидетельствуют о том, что при использовании ВТЭ наблюдаются максимальные давления топлива на входе в распыливающие отверстия. При переходе от нефтяного ДТ на ВТЭ с 15%-ным содержанием воды это давление увеличилось с 47,6 до 47,8-47,9 МПа (в зависимости от диаметра капели). Впрочем, следует отметить, что в рассматриваемом случае структура эмульсии – диаметр капели воды в эмульсии оказывает слабое влияние на характеристики течения топлива. Хотя увеличение давления в расчетной точке оказалось и не очень значительным, но и этот рост давления впрыскивания способствует более качественному распыливанию топлива.

При использовании эмульгированных топлив несколько снизилась скорость потока топлива в расчетной точке и возросла турбулентная кинетическая энергия потока топлива на входе в распыливающее отверстие (примерно на 0,5-1,5%). В целом результаты расчетов подтвердили перспективность использования эмульгированных топлив в дизелях транспортного назначения. Эти исследования показали, что при переходе от нефтяного ДТ на ВТЭ с 15%-ным содержанием воды наблюдается небольшое увеличение давления перед распыливающими отверстиями форсунки, немного возросла и турбулентная кинетическая энергия потока топлива на входе в распыливающее отверстие. Указанный рост давлений впрыскивания и турбулентной кинетической энергии при использовании ВТЭ способствуют более качественному распыливанию топлива. Дополнительная турбулизация потока топлива достигается уже в КС за счет быстрого испарения капели воды из эмульгированного топлива.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям дизеля, работающего на эмульгированных топливах. Проведен анализ известных экспериментальных данных по дизелям, работающим на ВТЭ различного состава, и показана целесообразность оптимизации состава ВТЭ. С целью получения исходных данных для указанной оптимизации проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С на нефтяном ДТ и на эмульсиях ДТ и воды с содержанием последней от 0 до 15% по объему. Эмульсии ДТ и воды получены с использованием эмульгирующее устройство, работа которого основана на создании высокочастотных колебаний смешиваемых сред с использованием эмульгирующего устройства, содержащего электромагнитный двигатель. Для получения стойких эмульсий этих компонентов применен эмульгатор –

алкенилсукцинимид мочевины (СИМ), производимый по ТУ 38.1011039-85. Содержание эмульгатора в ВТЭ не превышало 0,5 % (масс.).

Дизель был испытан на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) и режимах 13-режимного испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН при неизменном положении упора дозирующей рейки с постоянным штатным для исследуемого дизеля установочным углом опережения впрыскивания топлива, равным $\theta=13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки. Результаты испытаний дизеля на режимах ВСХ (Рис. 5) свидетельствуют о том, что замена нефтяного ДТ эмульсиями приводит к увеличению удельного эффективного расхода топлива g_e . Однако при этом эффективность процесса сгорания, характеризваемая эффективным КПД η_e , на большинстве режимов даже повышается: на режиме максимального крутящего момента при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ переход с ДТ на эмульсии с содержанием воды C_{H_2O} 7,5 и 15,0% привел к росту значения η_e с 0,386 до 0,402, а на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ эффективный КПД η_e сначала повысился с 0,332 до 0,342, а затем снизился до 0,327 (см. Рис. 5). Использование ВТЭ позволило заметно снизить дымность ОГ. Так, при переходе от ДТ на эмульсию с содержанием воды $C_{H_2O}=15,0\%$ на режиме максимального крутящего момента при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ дымность ОГ K_x уменьшилась с 28,0 и 18,0% по шкале Хартриджа, а на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ – с 16,0 до 8,5% по шкале Хартриджа.

Оценка показателей двигателя при его работе на режимах с различной нагрузкой проведена по экспериментальным данным, полученным при работе дизеля на режимах 13-режимного испытательного цикла (Рис. 6).

С использованием данных рис. 6 рассчитаны интегральные на режимах 13-режимного цикла удельные массовые выбросы оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} и несгоревших углеводородов e_{CH_x} . Оценка эксплуатационного расхода топлива на режимах 13-режимного цикла проведена по условному удельному эффективному расходу топлива $g_{e \text{ усл}}$ и соответствующему условному эффективному КПД $\eta_{e \text{ усл}}$.

Приведенные на Рис. 6 данные подтверждают возможность заметного снижения эмиссии оксидов азота с ОГ дизеля Д-245.12С при его переводе с ДТ на ВТЭ. Так, при работе на режимах 13-режимного цикла и переходе с ДТ на эмульсии с содержанием воды C_{H_2O} 7,5 и 15,0% удельный массовый выброс оксидов азота e_{NO_x} уменьшился с 6,610 до 5,916 и до 4,849 г/(кВт·ч), т.е. в целом на 26,6%. При этом эффективный КПД дизеля η_e повысился с 0,341 до 0,360 и до 0,361 (на 5,9%). Более сложная зависимость от содержания воды в эмульгированных топливах характерна для выбросов монооксида углерода e_{CO} и углеводородов e_{CH_x} . При переходе с ДТ на ВТЭ с содержанием воды C_{H_2O} 7,5 и 15,0% удельный массовый выброс монооксида углерода e_{CO} сначала уменьшился с 3,612 до 2,905 г/(кВт·ч), а затем возрос до 4,648 г/(кВт·ч). Выброс углеводородов e_{CH_x} сначала возрос с 1,638 до 2,730 г/(кВт·ч), а затем снизился до 2,522 г/(кВт·ч).

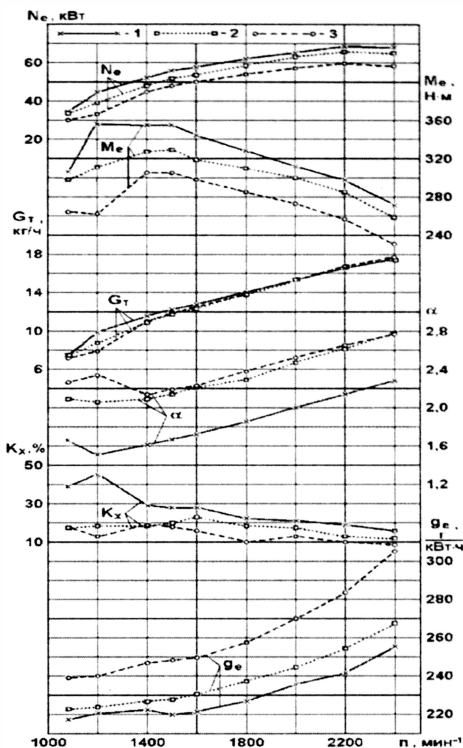


Рис. 5.

Зависимость эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , расхода топлива G_t , коэффициента избытка воздуха α , дымности ОГ K_x и удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения n дизеля типа Д-245.12С на режимах ВСХ: 1 - ДТ; 2 - эмульсия 92,5% ДТ и 7,5% воды; 3 - эмульсия 85,0% ДТ и 15,0% воды

Для оптимизации состава эмульгированного топлива применительно к дизелю типа Д-245.12С использован метод свертки, при котором частные критерии оптимальности сводятся к обобщенному критерию J_0 , определяемому в виде суммы основных частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ оксидов азота J_{NO_x} и дымность ОГ по шкале Хартриджа J_{K_x} . При этом указанные показатели учитывались на двух основных режимах - максимальной мощности N_{max} и максимального крутящего момента M_{max} . В итоге, выражение для обобщенного критерия J_0 принимает вид

$$J_0 = J_{NO_x} N_{max} + J_{NO_x} M_{max} + J_{K_x} N_{max} + J_{K_x} M_{max}, \quad (1)$$

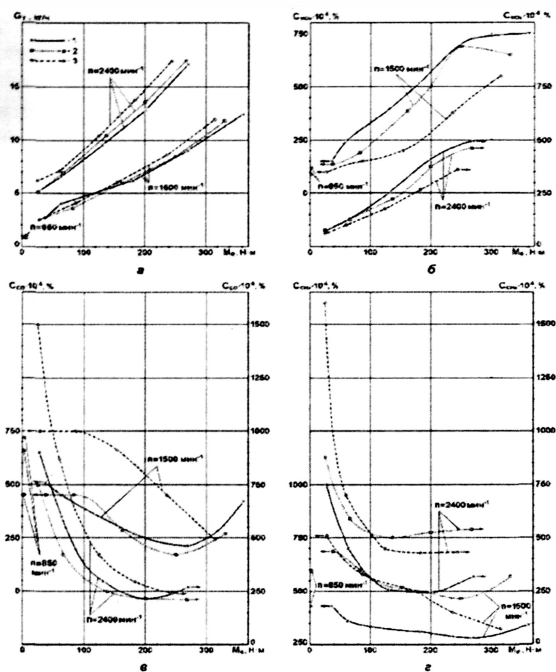


Рис. 6.

Зависимость часового расхода топлива G_T (а), объемных концентраций в ОГ оксидов азота C_{NOx} (б), монооксида углерода C_{CO} (в) и несгоревших углеводородов C_{CHx} (г) от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизеля типа Д-245.12С: 1 - ДТ; 2 – эмульсия 92,5% ДТ и 7,5% воды; 3 – эмульсия 85,0% ДТ и 15,0% воды

где $J_{NOx N_{max}}$, $J_{NOx M_{max}}$, $J_{Kx N_{max}}$, $J_{NOx M_{max}}$ - частные критерии оптимальности (концентрация в ОГ оксидов азота и дымность ОГ по шкале Хартриджа) на указанных режимах. Поскольку в качестве частных критериев выражения (1) выбраны концентрация в ОГ оксидов азота C_{NOx} и дымность ОГ по шкале Хартриджа K_x , имеющие различную размерность, целесообразно их использование в относительных величинах в следующем виде:

$$J_{NOx N_{max}} = C_{NOx N_{max} i} / C_{NOx N_{max} ДТ}; \quad J_{NOx M_{max}} = C_{NOx M_{max} i} / C_{NOx M_{max} ДТ};$$

$$J_{Kx N_{max}} = K_{x N_{max} i} / K_{x N_{max} ДТ}; \quad J_{Kx M_{max}} = K_{x M_{max} i} / K_{x M_{max} ДТ}, \quad (2)$$

где параметры с индексом «ДТ» соответствуют работе на нефтяном ДТ, а параметры с индексом «i» – работе на эмульгированном топливе i-го состава. Обобщенный критерий оптимальности (1) также удобно использовать в относительном виде:

$$\bar{J}_0 = J_0, J_{0\text{дт}},$$

(3)

Минимум этого обобщенного критерия (целевой функции) соответствует оптимальному составу эмульгированного топлива. По этой методике проведена оптимизация состава ВТЭ для дизеля типа Д-245.12С. Полученные результаты оптимизации свидетельствуют о том, что для дизеля типа Д-245.12С, работающем на ВТЭ, оптимальное содержание воды в эмульгированном топливе равно $C_{H_2O}=15\%$. При таком составе ВТЭ достигается минимум обобщенного критерия оптимальности (целевой функции) $\bar{J}_0=0,659$ (при работе на нефтяном ДТ он равен единице). В этом случае обеспечиваются и минимальный выброс оксидов азота на режимах 13-режимного цикла $e_{NOx}=4,849$, г/(кВт·ч), и минимальная дымность ОГ K_x , (8,5 и 18% по шкале Хартриджа, соответственно на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента). При таком составе ВТЭ отмечен максимальный условный на режимах 13-режимного цикла эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}=0,361$ (при работе на нефтяном ДТ $\eta_{e\text{ усл}}=0,341$).

Необходимо отметить, что по мере увеличения содержания воды в ВТЭ обобщенный критерий оптимальности $\bar{J}_0$ монотонно уменьшается, но его снижение происходит более интенсивно при небольшом одержании воды в эмульгированном топливе. Это свидетельствует о том, что даже небольшая добавка воды в нефтяное ДТ значительно улучшает показатели токсичности ОГ исследуемого дизеля. В целом, проведенные исследования подтвердили эффективность использования предложенной методики оптимизации состава ВТЭ, ее информативность при оценке экологических качеств ВТЭ и сравнительно небольшой объем расчетных исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Процессы распыливания топлива и смесеобразования определяют показатели токсичности ОГ дизеля и его топливную экономичность. Улучшение качества процессов распыливания топлива и смесеобразования можно обеспечить за счет совершенствования конструкции распылителей форсунок и путем применения водотопливных эмульсий.

2. Анализ известных конструкций распылителей дизельных форсунок и характера течения топлива в проточной части распылителя форсунки показал, что для интенсификации смесеобразования необходимо обеспечить наибольшую турбулизацию топлива в проточной части распылителя. Для улучшения качества процессов распыливания топлива и смесеобразования предложено несколько вариантов распылителей форсунок с выполненными на хвостовике иглы дополнительными гидравлическими сопротивлениями.

3. Проведенные экспериментальные исследования опытных распылителей показали, что наилучшие показатели топливной

экономичности и токсичности ОГ обеспечил опытный распылитель по варианту № 3, в котором произведена подрезка части хвостовика иглы серийного распылителя, расположенной ниже посадочного диаметра $d_{\text{п}}=2,8$ мм, под углом конуса 90° , а конусная часть хвостовика иглы с углом конуса 45° , расположенная выше диаметра $d=3,2$ мм, сточена на 0,1 мм (по диаметру) с таким же углом конуса (45°). В результате на хвостовике иглы образуется горизонтальный кольцевой уступ с наружным и внутренним диаметрами 3,2 и 3,1 мм.

4. При работе дизеля на режимах 13-режимного цикла и замене серийных распылителей на опытные распылители по варианту № 3 удельный массовый выброс монооксида углерода уменьшился с 3,612 до 2,602 г/(кВт·ч), т.е. на 28,0%, удельный массовый выброс несгоревших углеводородов снизился с 1,638 до 1,234 г/(кВт·ч), т.е. на 24,7%, интегральный (условный) удельный эффективный расход топлива сократился с 248,12 до 238,80 г/(кВт·ч), т.е. на 3,8%. Дымность ОГ на номинальном режиме (на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹) снизилась с 16 до 12% по шкале Хартриджа, т.е. на 25,0%. Удельный массовый выброс оксидов азота e_{NO_x} возрос 6,610 до 7,125 г/(кВт·ч), т.е. на 7,8%.

5. Разработана методика определения показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок, основанная на использовании программного комплекса *Ansys CFX v12.1*. Расчетные исследования серийного распылителя дизеля типа Д-245.12С и опытного распылителя по варианту № 3, проведенные с использованием разработанной методики, позволили выявить преимущества опытного распылителя по варианту № 3 с подрезкой части хвостовика иглы серийного распылителя, расположенной ниже посадочного диаметра, и с горизонтальным кольцевым уступом, выполненным выше посадочного диаметра. По степени турбулизации потока топлива и показателям процесса топливоподачи опытный распылитель по варианту № 3 имеет ряд преимуществ по сравнению с серийным распылителем. Помимо того, что его использование приводит к повышению давления впрыскивания топлива, увеличивается и турбулизация потока (турбулентная кинетическая энергия).

6. Для анализа течения нефтяного дизельного топлива и водотопливной эмульсии в проточной части распылителя форсунки использованы программный комплекс *Ansys CFX v12.1* и разработанная методика определения показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок. При расчетных исследованиях течения нефтяного дизельного топлива и водотопливной эмульсии в проточной части распылителя форсунки рассмотрены эмульгированные топлива, содержащие 85% нефтяного ДТ и 15% воды и имеющие диаметр капель воды в эмульсии 50 и 5 мкм.

7. Полученная при расчетных исследованиях картина течения рассматриваемых нефтяного ДТ и водотопливных эмульсий с диаметром

капель воды в эмульсии 50 и 5 мкм в проточных частях исследованных распылителей свидетельствует о том, что характер течения топлива в трех рассматриваемых случаях достаточно близок. Во всех рассматриваемых случаях наибольшие скорость и турбулизация потока топлива отмечены в районе кольцевой щели между иглой распылителя и ее посадочным конусом (седлом). При использовании эмульгированных топлив с 15%-ным содержанием воды несколько снизилась скорость потока топлива на входе в распыливающее отверстие, увеличилось давление перед распыливающими отверстиями и возросла турбулентная кинетическая энергия потока топлива (примерно на 0,5-1,5%). Указанный рост давлений впрыскивания и турбулентной кинетической энергии при использовании ВТЭ способствуют более качественному распыливанию топлива.

8. Для получения экспериментальных данных, необходимых для проведения оптимизационных расчетов состава эмульгированного топлива, проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) производства ММЗ. Дизель испытывался на нефтяном ДТ и на эмульсиях ДТ и воды с содержанием последней 7,5 и 15% по объему. Для получения эмульсий ДТ и воды использовано эмульгирующее устройство, работа которого основана на создании высокочастотных колебаний смешиваемых сред с использованием эмульгирующего устройства, содержащего электромагнитный двигатель. Для получения стойких эмульсий этих компонентов применен эмульгатор – алкенилсукцинимид мочевины (СИМ), производимый по ТУ 38.1011039-85.

9. Проведенные экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С подтвердили возможность заметного снижения выбросов токсичных компонентов ОГ при использовании ВТЭ. При переводе дизеля с нефтяного ДТ на ВТЭ дымность ОГ K_x на режимах внешней скоростной характеристики уменьшилась в целом на 35-50%. При работе на режимах 13-режимного цикла и переходе с ДТ на эмульсии с содержанием воды C_{H_2O} 7,5 и 15,0% удельный массовый выброс оксидов азота e_{NOx} уменьшился с 6,610 до 5,916 и до 4,849 г/(кВт·ч) – на 26,6%. При этом, эффективный КПД дизеля η_e повысился с 0,341 до 0,360 и до 0,361 – на 5,9%.

10. Отмечено противоречивое влияние состава ВТЭ на выбросы монооксида углерода и несгоревших углеводородов. При переходе с ДТ на ВТЭ с содержанием воды C_{H_2O} 7,5 и 15,0% интегральный выброс монооксида углерода e_{CO} сначала уменьшился с 3,612 до 2,905 г/(кВт·ч), а затем возрос до 4,648 г/(кВт·ч). При этом выброс несгоревших углеводородов e_{CHx} сначала возрос с 1,638 до 2,730 г/(кВт·ч), а затем снизился до 2,522 г/(кВт·ч).

11. Разработана методика оптимизации состава эмульгированного топлива, базирующаяся на использовании обобщенного критерия оптимальности в виде суммы относительных безразмерных критериев, характеризующих выбросы основных токсичных компонентов ОГ дизелей – 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.

12. Проведенные оптимизационные расчеты показали, что для дизеля типа Д-245.12С, работающем на эмульгированных топливах, оптимальное в соответствии с предложенной методикой содержание воды в ВТЭ равно $C_{H_2O}=15\%$. При таком составе ВТЭ достигается минимум обобщенного критерия оптимальности $\bar{J}_0=0,659$ (при работе на нефтяном ДТ он равен единице). В этом случае обеспечиваются и минимальный выброс оксидов азота на режимах 13-режимного цикла $e_{NOx}=4,849$, г/(кВт·ч), и минимальная дымность ОГ K_x (8,5 и 18% по шкале Хартриджа, соответственно на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента). При использовании этого эмульгированного топлива отмечен максимальный условный (средний) на режимах 13-режимного цикла эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}=0,361$ (при работе на нефтяном ДТ $\eta_{e\text{ усл}}=0,341$).

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Метод улучшения качества распыливания топлива в дизеле, работающем на смесевом биотопливе / В.А. Шумовский [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 2. С. 24-29 (0,37 п.л./0,1п.л.).

2. Расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, оснащенного распылителями форсунок с различной геометрией проточной части / В.А. Шумовский [и др.] // Грузовик. 2011. № 3. С. 13-17 (0,31 п.л./0,1 п.л.).

3. Работа дизелей на водотопливных эмульсиях / Шумовский В.А. [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2012. № 3. С. 67-71 (0,31 п.л./0,1 п.л.).

4. Марков В.А., Мизев К.С., Шумовский В.А. Исследование дизеля, оснащенного форсункой с уменьшенной массой подвижных деталей // Грузовик. 2011. № 9. С. 17-26 (0,63 п.л./0,21 п.л.).

5. Марков В.А., Девянин С.Н., Шумовский В.А. Работа дизелей на многокомпонентных водотопливных эмульсиях // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 2. С. 23-32 (0,63 п.л./0,21 п.л.).

6. Расчетные исследования влияния состава смесевых биотоплив на параметры процесса впрыскивания топлива и показатели дизеля / В.А. Шумовский [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2014. № 11. С. 19-32 (0,88 п.л./0,3 п.л.).

7. Влияние состава смесевых биотоплив на параметры процесса впрыскивания топлива в дизеле / В.А. Шумовский [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 12. С. 3-9 (0,44п.л./0,11п.л.).

8. Марков В.А., Шумовский В.А., Акимов В.С. Расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, работающего на водотопливной эмульсии // Транспорт на альтернативном топливе. 2015. № 1. С. 56-65 (0,63 п.л./0,3п.л.).