

На правах рукописи

Стремяков Андрей Васильевич

**УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ,
РАБОТАЮЩЕГО НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ И СМЕСЕВЫХ
БИОТОПЛИВАХ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
КОНСТРУКЦИИ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ФОРСУНОК**

Специальность 05.04.02 - Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Марков Владимир Анатольевич

Научный консультант: доктор технических наук
Гуров Валерий Игнатьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Голубков Леонид Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Пономарев Евгений Григорьевич

Ведущее предприятие: Ногинский завод
топливной аппаратуры (ЗАО «НЗТА»)

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2011 г. в _____ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при Московском государственном техническом университете 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.

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 «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Тумашев Р.З.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- ДТ - дизельное топливо;
КС - камера сгорания;
ОГ - отработавшие газы;
МЭРМ – метиловый эфир рапсового масла;
ТНВД - топливный насос высокого давления;

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью дальнейшего совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования с целью удовлетворения современных жестких требований к показателям топливной экономичности и токсичности отработавших газов транспортных дизелей. В свою очередь эти показатели определяются конструкцией системы топливоподачи и, в особенности, конструкцией форсунок и их распылителей. Проблема обеспечения требуемых параметров процессов распыливания топлива и смесеобразования особенно актуальна для дизелей небольшой размерности. В этих двигателях с небольшим объемом камеры сгорания сложно организовать чисто объемное смесеобразование, обеспечивающее равномерное распределение топлива по объему КС и наиболее полное сгорание топлива с наибольшей эффективностью рабочего цикла. В этом случае целесообразно внесение изменений в конструкцию распылителей форсунок, способствующих совершенствованию процессов распыливания топлива и смесеобразования.

При использовании биотоплив на основе растительных масел указанные проблемы усугубляются отличиями свойств этих топлив от свойств ДТ. В этом случае реализация мероприятий, улучшающих качество распыливания топлива и смесеобразования, становится еще более актуальной. Использование смесевых биотоплив на основе растительных масел в сочетании с внедрением мероприятий по совершенствованию распыливания топлива и смесеобразования позволит достичь требуемых показателей топливной экономичности и токсичности ОГ современных дизелей.

Цель работы: достижение требуемых показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов транспортного дизеля, работающего на дизельном топливе и смесевых биотопливах, путем совершенствования конструкции распылителей форсунок.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов. С помощью теоретических методов проведены расчетные исследования параметров распыливания топлива и смесеобразования, показателей топливной экономичности и токсичности ОГ, влияния геометрии проточной части распылителей форсунок на показатели потока топлива в распылителе и параметры процесса распыливания топлива. Экспериментальная часть работы заключа-

лась в определении показателей дизеля, оснащенного распылителями различных конструкций и работающего на различных топливах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика определения показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок;
- разработаны конструкции распылителей форсунок, обеспечивающие улучшение качества процессов распыливания топлива и смесеобразования, показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизелей;
- разработана методика оптимизации состава смесевоего биотоплива с учетом показателей топливной экономичности и токсичности ОГ.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- использованием современных методик расчета параметров рабочего процесса дизеля и показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок;
- совпадением результатов расчетных и экспериментальных исследований, полученных при испытаниях на развернутом двигателе.

Практическая ценность состоит в том, что:

- разработанная методика определения показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок и проведенные расчетные исследования позволили выбрать оптимальную конструкцию распылителей форсунок, обеспечивающую наилучшие параметры процессов распыливания топлива и смесеобразования;
- разработанные конструкции распылителей форсунок обеспечивают значительное улучшение показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизелей;
- разработанная методика оптимизации позволила сформулировать практические рекомендации по выбору состава смесевоего биотоплива;
- проведенные экспериментальные исследования дизеля, работающего на дизельном топливе и смеси дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла, подтвердили эффективность использования разработанных распылителей форсунок.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в соответствии с планами НИР 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 МГАУ им. В.П. Горячкина и в ЗАО «НЗТА» (г. Ногинск).

Апробация работы:

Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Поршневые двигатели» в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

- на международной научно-технической конференции «4-е Луканинские чтения. Решение энергэкологических проблем в автотранспортном комплексе», 29-30 января 2009 г., Москва, ГТУ «МАДИ»;

- на межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития поршневых ДВС», посвященной 80-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок СПбГМТУ и 120-летию проф. В.А. Ваншейдта, 18 ноября 2010 г., Санкт-Петербург, СПбГМТУ;
- на международной конференции «Двигатель-2010», посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 16 ноября 2010 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- на международной научно-технической конференции «5-е Луканинские чтения. Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе», 14 марта 2011 г., Москва, ГТУ «МАДИ»;
- 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 2009-2011 г.г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 6 статей (из них 6 – по списку ВАК) и 7 материалов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 191 страница, включая 165 страниц основного текста, содержащего 46 рисунков, 20 таблиц. Список литературы включает 152 наименования на 16 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования в дизелях транспортного назначения, работающих на ДТ и смесевых биотопливах, и дана общая характеристика диссертации.

В первой главе проведен анализ работ, опубликованных по теме диссертации. Рассмотрены особенности организации смесеобразования в дизелях с непосредственным впрыскиванием топлива и методы улучшения качества процессов впрыскивания и распыливания топлива. Отмечена актуальность улучшения качества указанных процессов в дизелях, работающих на биотопливах на основе растительных масел. В работах И.В. Астахова, Л.Н. Голубкова, Л.В. Грехова Л.В., С.Н. Девянина, В.И. Трусова, Б.Н. Фанлейба 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. Разработка конструкций распылителей форсунок, обеспечивающих улучшение качества процессов распыливания топлива и смесеобразования.
2. Разработка методики определения показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок.

3. Проведение расчетных исследований влияния геометрии проточной части распылителей форсунок на показатели потока топлива в распылителе и параметры процесса распыливания топлива.

4. Проведение расчетных исследований влияния состава смесового биотоплива на параметры процессов распыливания топлива и смесеобразования, показатели топливной экономичности и токсичности ОГ.

5. Разработка методики оптимизации состава смесового биотоплива с учетом показателей топливной экономичности и токсичности ОГ.

6. Проведение экспериментальных исследований дизеля, оснащенного серийными и усовершенствованными распылителями форсунок, при его работе на дизельном топливе.

7. Проведение экспериментальных исследований дизеля, оснащенного серийными и усовершенствованными распылителями форсунок, при его работе на смеси дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла.

Вторая глава посвящена расчетным исследованиям топливоподачи дизеля, оснащенного распылителями форсунок с различной геометрией проточной части. В работах С.Н. Девянина, А.С. Лышевского, Ю.Б. Свиридова, В.И. Трусова показано, что для обеспечения высокого качества процесса распыливания топлива и последующего смесеобразования желательно обеспечить высокую турбулизацию потока топлива в проточной части распылителя форсунки. Обычно такая турбулизация достигается за счет выполнения распыливающих отверстий с дополнительными гидравлическими сопротивлениями – турбулизаторами. Но их выполнение технологически достаточно сложно ввиду малого диаметра распыливающих отверстий и их большого числа в современных системах топливоподачи. Кроме того, распыливающие отверстия подвержены закоксовыванию. Дополнительная турбулизация потока топлива на выходе из распыливающих отверстий может быть обеспечена при выполнении дополнительных гидравлических сопротивлений на хвостовике иглы распылителя.

Для оценки влияния гидравлических сопротивлений, выполненных на хвостовике иглы распылителя форсунки, и выбора формы таких сопротивлений 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 $d_{и}=5,0$ мм (по направляющей, рис. 1,а). Максимальный ход иглы составляет $h_{и}=0,26$ мм. Диаметр распыливающих отверстий равен $d_{р}=0,32$ мм (его длина $l_{р}=0,90$ 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 $d_{п}=2,8$ мм, расположенному на участке с углом конуса 60°. В опытном распылителе по варианту № 1 (рис. 1,б) произведена подрезка части хвостовика

вика иглы серийного распылителя, расположенной ниже посадочного диаметра $d_{\text{п}}=2,8$ 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 $d_{\text{п}}=2,8$ 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°).

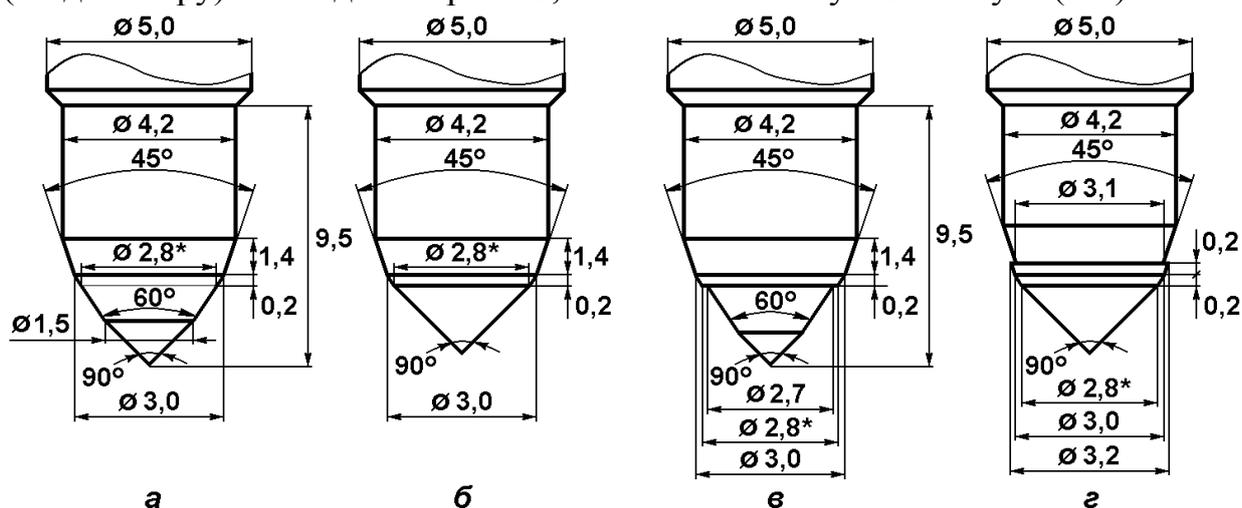


Рис. 1. Конструктивные схемы носка иглы распылителя: а – серийный распылитель типа 145 производства НЗТА; б – опытный распылитель по варианту № 1; в – опытный распылитель по варианту № 2; г – опытный распылитель по варианту № 3

Для оценки параметров потока топлива в проточной части распылителя форсунки проведены его расчетные исследования с использованием программного комплекса 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. Для дизеля типа Д-245.12С давление на входе было принято равным 39,7 МПа, а на выходе – 0.1 МПа (впрыск топлива в атмосферу). При этом температура топлива была принята равной 40°C , а эффективное проходное сечение распылителя $\mu_p f_p = 0,250 \text{ мм}^2$. При моделировании течения топлива принято, что жидкость несжимаема, а процесс течения является адиабатным и изотермическим. Для сравнительного анализа различных распылителей выбран серийный распылитель и опытный распылитель по варианту №3, обеспечивающий наибольший эффект от изменения геометрии проточной части распылителя.

В результате проведенного расчетного исследования потоков топлива в серийном распылителе и в опытном распылителе по варианту №3 полу-

чену распределения скоростей течения топлива в проточных частях этих распылителей. Максимальные скорости течения топлива отмечаются в распыливающих отверстиях форсунок, где они превышают значение 200 м/с для обоих вариантов распылителей. При этом среднеинтегральные значения скоростей течения топлива на выходе из распыливающих отверстий примерно одинаковы (соответственно 172,829 и 172,886 м/с у серийного распылителя и опытного распылителя по варианту №3).

Рассмотрение областей с различной турбулизацией потока топлива в распыливающих отверстиях серийного и опытного распылителей (рис. 2) показывает, что в опытном распылителе по варианту №3 область с повышенной турбулизацией потока топлива смещена ближе к выходной кромке распыливающего отверстия. В этом распылителе наличие местного гидравлического сопротивления в виде ступенчатого уступа, выполненного на хвостовике иглы распылителя, приводит к распространению интенсивных турбулентных вихрей почти на всю длину распыливающего отверстия.

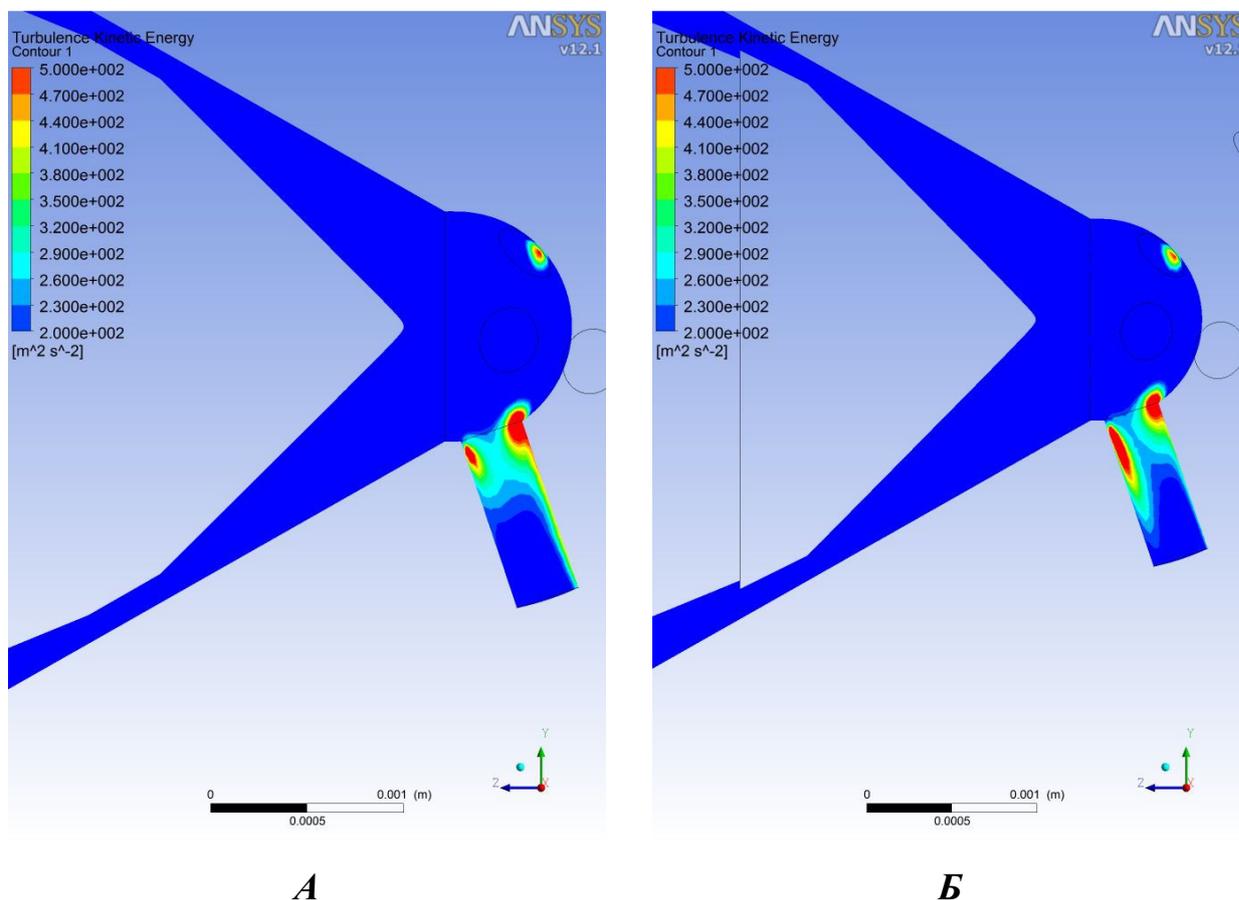


Рис. 2. Распределение кинетической энергии турбулентных вихрей в распыливающих отверстиях распылителей форсунки: *A* – серийный распылитель; *B* – опытный распылитель

При обработке расчетных данных были определены некоторые средние и интегральные значения параметров потока топлива в проточной части исследуемых распылителей. По этим данным следует отметить, что

при изменениях геометрических размеров проточной части распылителя форсунки параметры, характеризующие скорость течения топлива и его расход, изменяются сравнительно слабо, а параметры, характеризующие интенсивность турбулентных вихрей, изменяются в достаточно широком диапазоне. В частности, при переходе от серийной форсунки к опытной форсунке №3 среднее значение энергии диссипации турбулентных вихрей на выходе из распыливающего отверстия уменьшается на 31,54%.

Влияние геометрии проточной части распылителя форсунки усиливается при увеличении диаметра распыливающих отверстий d_p или при уменьшении их длины l_p . В частности, исследованы параметры потока топлива при диаметре распыливающего отверстия $d_p=0,72$ мм (при $l_p/d_p=1,25$) В этом случае при переходе от серийного распылителя к опытному распылителю №3 среднее по площади выходного сечения распыливающего отверстия значение энергии турбулентных вихрей увеличивается в 2 раза – от 160,19 до 330,36 Дж/кг.

Третья глава посвящена расчетным исследованиям влияния состава смесового биотоплива на показатели дизеля. В качестве объекта исследований выбран дизель типа Д-245.12С. Для расчетных исследований использован программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана доц. А.С. Кулешовым. При расчетах задавался закон подачи, формируемый кулачками ГНВД модели *PP4M10U1f* на номинальном режиме с частотой вращения коленчатого вала $n=2400$ мин⁻¹ и цикловой подачей топлива $q_{ц}=80$ мм³. Штатные форсунки дизеля были оснащены распылителями *DOP 119S534 Motorpal* с числом распыливающих отверстий $i_p=5$ и суммарной эффективной площадью распылителя в сборе $\mu_p f_p=0,250$ мм². При расчетах оценивались показатели дизеля, работающего на чистых ДТ и МЭРМ, а также на их смесях с 5, 20, 40, 60, 80-процентным содержанием МЭРМ.

Расчетные результаты свидетельствуют о том, что часовой расход топлива G_T практически не изменяется в зависимости от процентного содержания МЭРМ в смеси $C_{МЭРМ}$ (рис. 3,а). Но при этом крутящий момент дизеля M_e уменьшается с увеличением концентрации МЭРМ в смесовом биотопливе $C_{МЭРМ}$ (рис. 3,б). Это объясняется большим содержанием атомов кислорода в молекулах МЭРМ и пониженной теплотой сгорания смесей ДТ и МЭРМ. Поэтому с ростом $C_{МЭРМ}$ наблюдается увеличение удельного эффективного расхода топлива g_e (рис. 3,в). Но при этом снижение эффективного КПД η_e не очень значительно: при увеличении $C_{МЭРМ}$ с 0 до 40% величина η_e уменьшается с 0,34 до 0,33.

При увеличении концентрации МЭРМ в смеси с ДТ $C_{МЭРМ}$ дымность ОГ K_x сначала снижается. Ее минимум отмечен при $C_{МЭРМ}=50\%$. Однако, при дальнейшем росте $C_{МЭРМ}$ дымность ОГ начинает возрастать, но во всем диапазоне изменения $C_{МЭРМ}$ наибольшая дымность ОГ отмечена при работе именно на чистом ДТ. Увеличение $C_{МЭРМ}$ свыше 10% сопровождается снижением концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} . Но из-за падения

мощности N_e исследуемого дизеля с ростом $C_{MЭРМ}$ удельный массовый выброс оксидов азота (отнесенный к единице вырабатываемой мощности) e_{NOx} все же несколько возрастает (рис. 3,д). Удельный массовый выброс диоксида углерода (углекислого газа) e_{CO_2} также растет с ростом $C_{MЭРМ}$ (рис. 3,е).

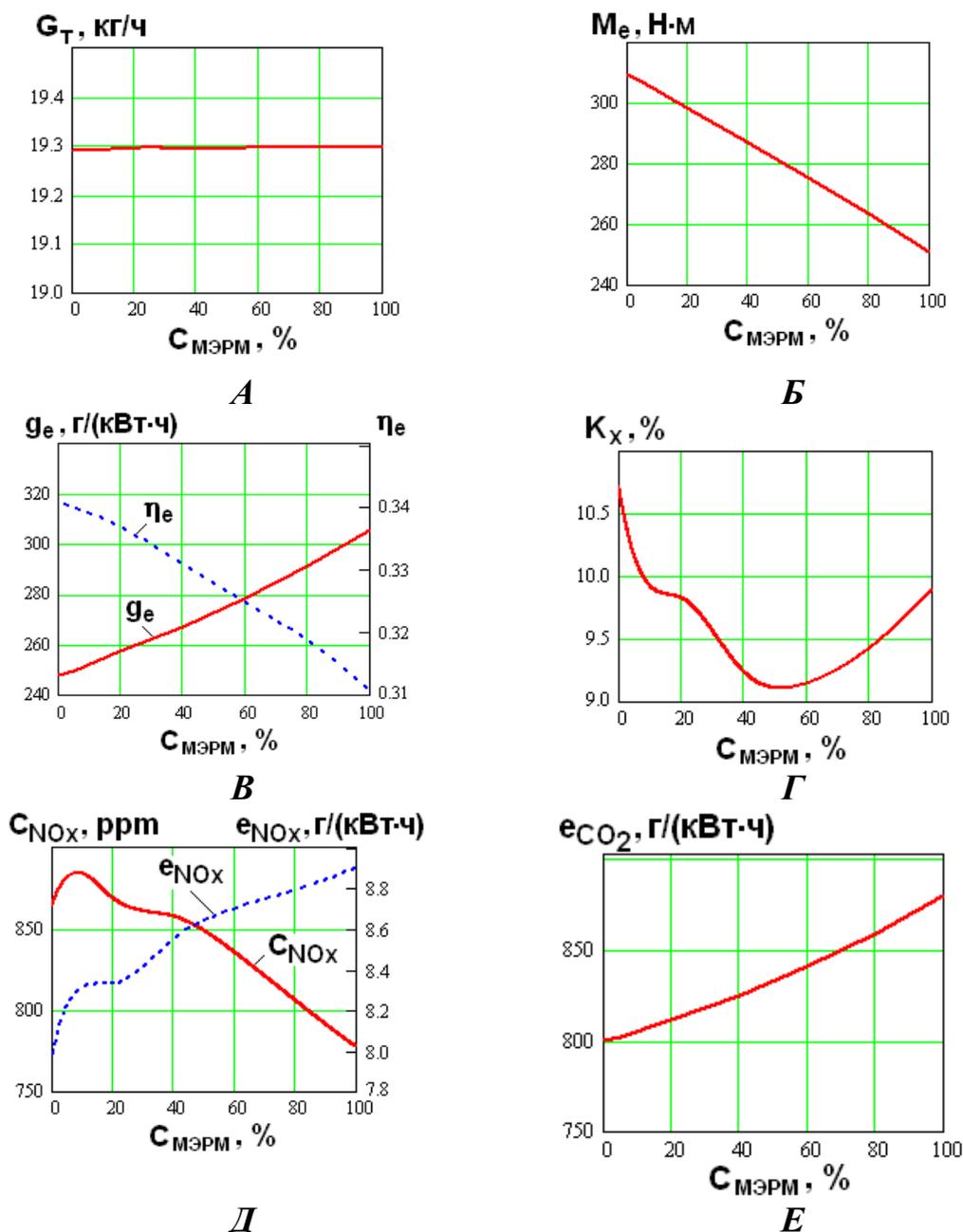


Рис. 3. Зависимость расхода топлива G_T (а), крутящего момента M_e (б), удельного эффективного расхода топлива g_e и эффективного КПД дизеля η_e (в), дымности ОГ K_x (г), концентрации в ОГ оксидов азота C_{NOx} , удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NOx} (д) и углекислого газа e_{CO_2} (е) от содержания МЭРМ в смесевом биотопливе $C_{MЭРМ}$

При оптимизации состава смесевого биотоплива эксплуатационный расход топлива и выбросы токсичных компонентов ОГ рассчитывались для режимов 13-ступенчатого цикла *ECE R49*. Оценка топливной экономичности на режимах этого цикла проведена по интегральному (условно-

му) удельному эффективному расходу топлива $g_{e \text{ усл}}$ и условному эффективному КПД $\eta_{e \text{ усл}}$, которые определялись по зависимостям

$$g_{e \text{ усл}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_{\text{ти}} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot K_i}, \quad \eta_{e \text{ усл}} = \frac{3600}{H_U \cdot g_{e \text{ усл}}},$$

где $G_{\text{ти}}$ и N_{ei} – часовой расход топлива и эффективная мощность на i -том режиме; K_i – весовой коэффициент, отражающий долю времени i -того режима; H_U – низшая теплота сгорания топлива.

В предлагаемой методике оптимизации использован метод свертки, в котором обобщенная целевая функция определялась в виде произведения эффективного КПД $\eta_{e \text{ усл}}$ и удельного массового выброса оксидов азота e_{NOx} на режимах 13-ступенчатого цикла. Поскольку эффективный КПД двигателя $\eta_{e \text{ усл}}$ и массовый выброс с ОГ оксидов азота e_{NOx} имеют различную размерность, то при оптимизации состава смесового биотоплива использованы приведенные (относительные безразмерные) значения этих параметров, определяемые в виде

$$\eta_{e \text{ пр}} = \eta_{ei} / \eta_{e0}; \quad e_{\text{NOx пр}} = e_{\text{NOxi}} / e_{\text{NOxo}}.$$

где η_{ei} , e_{NOxi} – эффективный КПД двигателя и массовый выброс с ОГ оксидов азота при рассматриваемом составе смесового биотоплива (содержании МЭРМ в смесовом биотопливе $C_{\text{МЭРМ}}$); η_{e0} и e_{NOxo} – соответствующие параметры дизеля при работе дизеля на чистом ДТ (при $C_{\text{МЭРМ}}=0$). С учетом принятых частных критериев оптимизации обобщенная целевая функция имеет вид:

$$\Phi_0 = \eta_{e \text{ пр}} \cdot e_{\text{NOx пр}}.$$

Результаты оптимизации состава смесового биотоплива для дизеля типа Д-245.12С приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Оптимизация параметра $C_{\text{МЭРМ}}$ дизеля Д-245.12, работающего на смесовых биотопливах

| Содержание МЭРМ в топливе $C_{\text{МЭРМ}}$, % | Показатели дизеля | | | | |
|---|------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------|----------|
| | $\eta_{e \text{ усл}}$ | $\eta_{e \text{ усл пр}}$ | e_{NOx} , г/(кВт·ч) | $e_{\text{NOx пр}}$ | Φ_0 |
| 0 | 0,345 | 1,0000 | 7,286 | 1,0000 | 1,0000 |
| 5 | 0,342 | 1,0088 | 6,894 | 0,9462 | 0,9545 |
| 10 | 0,338 | 1,0207 | 6,718 | 0,9220 | 0,9411 |
| 20 | 0,338 | 1,0207 | 6,542 | 0,8978 | 0,9164 |
| 40 | 0,339 | 1,0177 | 7,441 | 1,0213 | 1,0394 |
| 60 | 0,342 | 1,0088 | 7,759 | 1,0649 | 1,0743 |

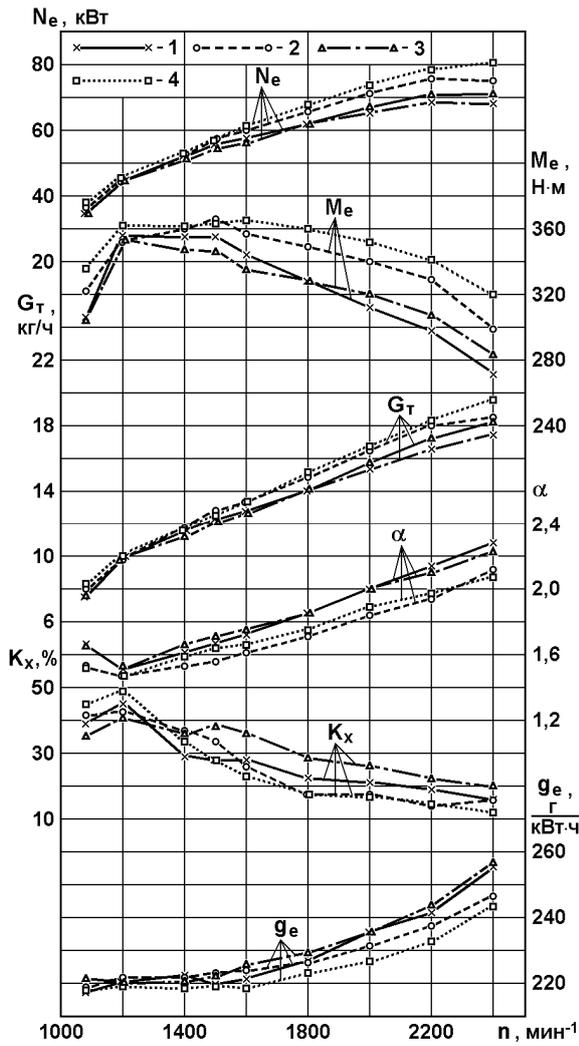
Полученные результаты оптимизации свидетельствуют о том, что в дизеле типа Д-245.12С, работающем на смесовом биотопливе, оптимальное содержание МЭРМ в смеси с ДТ равно $C_{\text{МЭРМ}}=20$ %. При таком составе

ве биотоплива достигается минимум обобщенной целевой функции $\Phi_0=0,9164$ (см. табл. 1). Следует также отметить, что при значениях $S_{MЭРМ}$ от 0 до 35-40% целевая функция не превышает своего значения, полученного при работе дизеля на нефтяном ДТ ($\Phi_0=1,0$). Это свидетельствует о благоприятном сочетании показателей топливной экономичности и токсичности ОГ при небольшом содержании МЭРМ в смеси с ДТ.

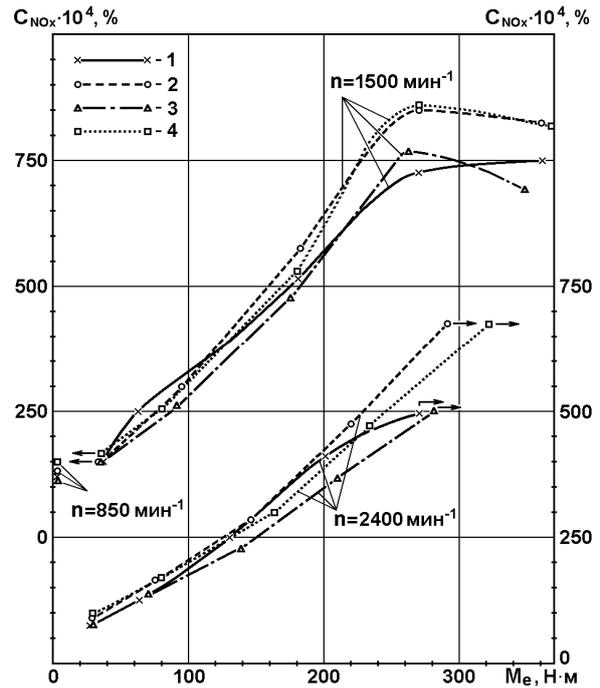
В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), оснащенного распылителями форсунок с различной геометрией проточной части. Дизель исследовался на моторном стенде АМО «ЗиЛ» на режимах внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН с установочным углом опережения впрыскивания топлива $\theta=13^\circ$ поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки и неизменным положением упора дозирующей рейки. В процессе испытаний дизель поочередно оснащался серийными и опытными распылителями по вариантам № 1, 2 и 3.

При испытаниях дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики выявлена возможность заметного снижения удельного эффективного расхода топлива и дымности ОГ при использовании опытных распылителей по варианту № 3 (рис. 4.3,а). В частности на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ замена серийных распылителей опытными распылителями по варианту № 3 обеспечивала уменьшение удельного эффективного расхода топлива g_e с 255,5 до 243,4 г/(кВт·ч) и дымности ОГ K_x с 16 до 12% по шкале Хартриджа.

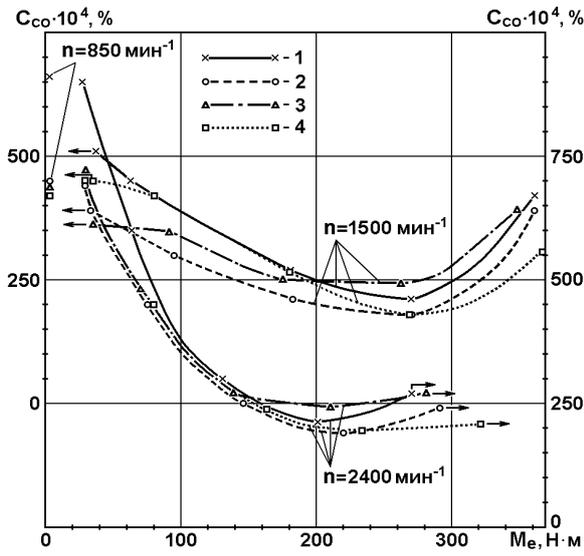
Испытания дизеля Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла подтвердили возможность улучшения показателей токсичности ОГ при использовании опытных распылителей по варианту № 3. По приведенным на рис. 4 характеристикам содержания в ОГ токсичных компонентов рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы на режимах 13-ступенчатого цикла (табл. 2). Наибольший эффект получен при использовании опытных распылителей по варианту № 3. При замене серийных на опытные распылители удельный массовый выброс монооксида углерода e_{CO} уменьшился с 3,612 до 2,602 г/(кВт·ч), т.е. на 28,0%, удельный массовый выброс углеводородов e_{CH_x} снизился с 1,638 до 1,234 г/(кВт·ч), т.е. на 24,7%, интегральный (условный) удельный эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ сократился с 248,12 до 238,80 г/(кВт·ч), т.е. на 3,8%, интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$ возрос с 0,341 до 0,355. И лишь удельный массовый выброс оксидов азота e_{NO_x} возрос с 6,610 до 7,125 г/(кВт·ч), т.е. на 7,8%. Рост эмиссии оксидов азота может быть в значительной мере компенсирован уменьшением угла опережения впрыскивания топлива.



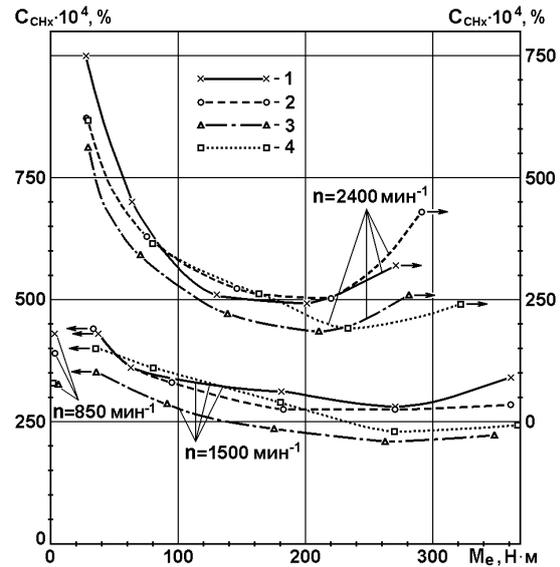
A



б



B



Г

Рис. 4. Показатели дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики (а), концентрация в ОГ оксидов азота (б) монооксида углерода (в) и углеводородов (г) на режимах 13-ступенчатого цикла: 1 – серийный распылитель; 2 – опытный распылитель № 1; 3 – опытный распылитель № 2; 4 – опытный распылитель № 3

Таблица 2.

Показатели дизеля Д-245.12С с различными распылителями на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла

| Показатели дизеля | Номер комплектации | | | |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 1 (серий- ный) | 2 (вариант № 1) | 3 (вариант № 2) | 4 (вариант № 3) |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла эффективный расход топлива, $g_{e \text{ усл}}$, г/(кВт·ч) | 248,12 | 245,82 | 244,61 | 238,80 |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла эффективный КПД, $\eta_{e \text{ усл}}$ | 0,341 | 0,345 | 0,346 | 0,355 |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный выброс оксидов азота, e_{NOx} , г/(кВт·ч) | 6,610 | 7,871 | 6,321 | 7,125 |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный выброс монооксида углерода, e_{CO} , г/(кВт·ч) | 3,612 | 2,723 | 3,071 | 2,602 |
| Интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный выброс углеводородов, e_{CHx} , г/(кВт·ч) | 1,638 | 1,506 | 1,220 | 1,234 |

Для оценки показателей дизеля Д-245.12С, оснащенного различными распылителями, работающего на смесевых биотопливах, проведены его исследования на ДТ и на смеси 93% ДТ и 7% МЭРМ. Дизель исследован на моторном стенде АМО «ЗиЛ» по методике, использованной при описанных выше экспериментальных исследованиях дизеля.

При испытаниях на режимах внешней скоростной характеристики отмечена возможность значительного снижения дымности ОГ при оснащении дизеля опытными распылителями №3 и его перевод на смесь 93% ДТ и 7% МЭРМ – в этом случае на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ дымность ОГ K_x снизилась с 16 до 10% по шкале Хартриджа, а на режиме максимального крутящего момента – с 28 до 24,5% по шкале Хартриджа. Оснащение дизеля, работающего на смеси 93% ДТ и 7% МЭРМ, опытными распылителями по варианту № 3 приводило к заметному увеличению часового расхода топлива G_T , особенно на режимах с высокой частотой вращения (при $n>1600 \text{ мин}^{-1}$). Видимо, это вызвано увеличенной суммарной эффективной площадью распылителя в сборе $\mu_p f_p$ у

опытных распылителей по варианту № 3, полученных путем описанной выше дообработки серийных распылителей, исходно имеющих $\mu_p f_p = 0,278$ мм². В результате указанного увеличения часового расхода топлива G_T использование опытных распылителей по варианту № 3 сопровождалось увеличением крутящего момента M_e и эффективной мощности N_e и снижением коэффициента избытка воздуха α . Но, несмотря на пониженные значения коэффициента избытка воздуха α , на режимах с высокой частотой вращения (при $n > 1600$ мин⁻¹) опытные распылители по варианту № 3 обеспечивали меньший удельный эффективный расход топлива g_e и дымность ОГ дизеля K_x . Так, при работе исследуемого дизеля на смеси 93% ДТ и 7% МЭРМ на номинальном режиме при $n = 2400$ мин⁻¹ замена серийных распылителей опытными распылителями по варианту № 3 приводила к снижению удельного эффективного расхода топлива g_e от 257,2 до 248,5 г/(кВт·ч), т.е. на 3,4%, и дымности ОГ K_x – от 15 до 10% по шкале Хартриджа, т.е. на 33,3% (табл. 3).

Результаты экспериментальных исследований на режимах 13-ступенчатого цикла на смеси 93% ДТ и 7% МЭРМ подтвердили эффективность использования опытных распылителей по варианту № 3 в дизеле, работающем на смесевом биотопливе. Одновременная установка опытных распылителей по варианту № 3 и использование смесевого биотоплива позволяет значительно улучшить показатели токсичности ОГ. Так, удельный массовый выброс монооксида углерода e_{CO} снизился с 3,612 г/(кВт·ч) в базовом двигателе до 2,522 г/(кВт·ч) в дизеле с опытными распылителями № 3, работающем на смесевом биотопливе, т.е. на 30,2%. При этом удельный массовый выброс несгоревших углеводородов e_{CH_x} уменьшился от 1,638 до 1,083 г/(кВт·ч), т.е. на 33,9%. Условный средний на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла эффективный КПД дизеля увеличился $\eta_{усл}$ с 0,341 до 0,352 (на 3,2%). И лишь выброс оксидов азота e_{NO_x} возрос с 6,610 до 7,121 г/(кВт·ч), т.е. на 7,7%. Однако, как отмечено выше, такое увеличение эмиссии оксидов азота может быть компенсировано оптимизацией (уменьшением) угла опережения впрыскивания топлива.

В целом, испытания подтвердили возможность заметного улучшения показателей токсичности ОГ дизеля Д-245.12С, работающего на смесевом биотопливе (смеси 93% ДТ и 7% МЭРМ), при использовании опытных распылителей по варианту № 3. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований показал эффективность использования опытных распылителей в отечественных транспортных дизелях.

Таблица 3.

Значения параметров работы дизеля Д-245.12С на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла при установке различных распылителей и использовании ДТ и смесевого биотоплива

| Тип распылителя, вид топлива | Условный эффективный расход топлива $g_{еусл}$, г/(кВт·ч) | Условный удельный эффективный КПД $\eta_{еусл}$ | Удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ, г/(кВт·ч) | | |
|---|--|---|---|----------------------|-----------------------|
| | | | e_{NOx} , г/(кВт·ч) | e_{CO} , г/(кВт·ч) | e_{CHx} , г/(кВт·ч) |
| Серийный распылитель, ДТ | 248,12 | 0,341 | 6,610 | 3,612 | 1,638 |
| Серийный распылитель, смесь 93% ДТ + 7% МЭРМ | 241,98 | 0,353 | 6,470 | 3,027 | 1,409 |
| Опытный распылитель № 1, смесь 93% ДТ + 7% МЭРМ | 246,45 | 0,346 | 6,961 | 2,775 | 1,110 |
| Опытный распылитель № 2, смесь 93% ДТ + 7% МЭРМ | 246,71 | 0,346 | 6,310 | 2,853 | 1,181 |
| Опытный распылитель № 3, смесь 93% ДТ + 7% МЭРМ | 242,70 | 0,352 | 7,121 | 2,522 | 1,083 |

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Проведенный комплекс исследований показал, что совершенствование конструкции распылителей форсунок можно обеспечить заметное улучшение показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля, работающего на ДТ и биотопливах. Полученные при исследованиях результаты сводятся к следующим основным выводам и рекомендациям:

1. Для улучшения качества процесса распыливания топлива предложено несколько вариантов распылителей форсунок с выполненными на хвостовике иглы дополнительными гидравлическими сопротивлениями.

2. Проведенные предварительные экспериментальные исследования опытных распылителей показали, что наилучшее качество распыливания топлива обеспечил опытный распылитель по варианту № 3, в котором произведена подрезка части хвостовика иглы серийного распылителя, расположенной ниже посадочного диаметра $d_n=2,8$ мм, под углом конуса 90° , а конусная часть хвостовика иглы с углом конуса 45° , расположенная вы-

ше 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.

3. Разработана методика определения показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок, основанная на использовании программного комплекса Ansys CFX v12.1.

4. Расчетные исследования, проведенные с использованием разработанной методики, показали, что при изменениях геометрических размеров проточной части распылителя форсунки параметры, характеризующие скорость течения топлива и его расход, изменяются сравнительно слабо. Однако при этом параметры, характеризующие интенсивность турбулентных вихрей, изменяются в достаточно широком диапазоне. В частности, при переходе от серийной форсунки к опытной форсунке №3 среднее значение энергии диссипации турбулентных вихрей на выходе из распыливающего отверстия уменьшается на 31,54%.

5. При большом диаметре распыливающего отверстия $d_p=0,72$ мм (при $l_p/d_p=1,25$) влияние геометрии проточной части распылителя форсунки на турбулизацию потока топлива в выходном сечении распыливающего отверстия становится очень заметным. Так, при переходе от серийного распылителя к опытному распылителю №3 среднее по площади выходного сечения распыливающего отверстия значение энергии турбулентных вихрей увеличивается в 2 раза – от 160,19 до 330,36 Дж/кг.

6. Расчетные исследования рабочего процесса дизеля типа Д-245.12С, проведенные с исследованием программного комплекса ДИ-ЗЕЛЬ-РК, подтвердили необходимость оптимизации состава смесового биотоплива для транспортного дизеля.

7. Разработана методика оптимизации состава смесового биотоплива с учетом показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля, базирующаяся на составлении обобщенного критерия оптимальности в виде произведения частных критериев по эффективному КПД двигателя и выбросу с ОГ оксидов азота.

8. Расчеты, проведенные с использованием разработанной методики оптимизации, показали, что при оснащении дизеля типа Д-245.12С при его работе на смесях ДТ и МЭРМ различного состава оптимальная концентрация МЭРМ в смесовом биотопливе составила 20%. Расчеты также показали, что благоприятное сочетание показателей топливной экономичности и токсичности ОГ может быть получено при небольшом содержании МЭРМ в смеси с ДТ ($C_{МЭРМ}$ от 0 до 35-40%).

9. Проведенные экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С подтвердили наибольшую эффективность использования опытных распылителей по варианту № 3. При работе этого дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла на чистом ДТ и замене серийных распылителей на опытные по варианту № 3 удельный массовый выброс монооксида углерода уменьшился с 3,612 до 2,602 г/(кВт·ч), т.е. на 28,0%, удельный массо-

вый выброс 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%, интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла эффективный КПД $\eta_{e\text{ усл}}$ возрос с 0,341 до 0,355. 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%. И лишь удельный массовый выброс оксидов азота e_{NOx} возрос с 6,610 до 7,125 г/(кВт·ч), т.е. на 7,8%.

10. При установке опытных распылителей по варианту № 3 и использовании смесового биотоплива, содержащего 93% ДТ и 7% МЭРМ, позволяет значительно улучшить показатели токсичности ОГ. Так, удельный массовый выброс монооксида углерода e_{CO} снижается с 3,612 г/(кВт·ч) в базовом двигателе до 2,522 г/(кВт·ч) в дизеле с опытными распылителями № 3, работающем на смесовом биотопливе, т.е. на 30,2%. При этом удельный массовый выброс углеводородов e_{CHx} уменьшается от 1,638 до 1,083 г/(кВт·ч), т.е. на 33,9%. Дымность ОГ на режиме максимальной мощности при $n=2400$ мин⁻¹ снижается с 16 до 10% по шкале Хартриджа (на 37,5%), а на режиме максимального крутящего момента при $n=1500$ мин⁻¹ – с 28 до 24,5% по шкале Хартриджа (на 12,5%). Условный средний на режимах 13-ступенчатого цикла эффективный КПД дизеля увеличивается $\eta_{e\text{ усл}}$ с 0,341 до 0,352 (на 3,2%). И лишь выброс оксидов азота e_{NOx} возрастает с 6,610 до 7,121 г/(кВт·ч), т.е. на 7,7%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Марков В.А., Стремяков А.В., Девянин С.Н. Работа дизелей на смесях дизельного топлива и рапсового масла // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. № 5. С. 22-28.

2. Марков В.А., Стремяков А.В., Девянин С.Н. Работа транспортного дизеля на смесях дизельного топлива и рапсового масла // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2010. № 1. С. 87-100.

3. Марков В.А., Стремяков А.В., Поздняков Е.Ф. Усовершенствование распылителя форсунки дизеля // Автомобильная промышленность. 2010. № 5. С. 11-15.

4. Совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на биотопливе на основе рапсового масла / В.А. Марков [и др.] // Грузовик. 2010. № 10. С. 2-11.

5. Метод улучшения качества распыливания топлива в дизеле, работающем на смесовом биотопливе / В.А. Марков [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 2. С. 24-29.

6. Расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, оснащенного распылителями форсунок с различной геометрией проточной части / В.А. Марков [и др.] // Грузовик. 2011. № 3. С. 13-17.