



ДЕВЯНИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ
ВПРЫСКИВАНИЯ И РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА**

05.04.02 - тепловые двигатели

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of a large loop followed by several sharp, sweeping strokes.

Москва - 2005

Работа выполнена в НПП "Агролизель" и Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор В.А.Марков

Официальные оппоненты: академик Академий инженерных наук и
транспорта России, доктор технических
наук, профессор В.В. Эфрос

доктор технических наук,
профессор Л.В. Грехов

доктор технических наук,
профессор В.И. Ерохов

Ведущее предприятие: ОАО "Владимирский тракторный завод"

Защита диссертации состоится "22" сентября 2005 г. в 14 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 в Московском госу-
дарственном 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, заверенный печатью
учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская
ул., д.5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационног
Д 212.141.09.

Автореферат разослан "22" 07 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



Тумашев Р.З.



Актуальность проблемы. Эффективность использования транспортных средств и сельскохозяйственных машин определяется, в первую очередь, экономическими и экологическими показателями установленных на них двигателей внутреннего сгорания. В дизельных двигателях эти показатели в значительной степени зависят от конструкции системы топливоподачи. Важнейшим элементом этой системы является форсунка, формирующая требуемые характеристики впрыскивания и распыливания топлива. От конструкции форсунки, в первую очередь - ее распылителя, зависят геометрические характеристики струй распыливаемого топлива, структура топливного факела, мелкость распыливания топлива, ряд других параметров процесса топливоподачи.

При создании топливоподающей аппаратуры для автотракторных дизелей необходима оптимизация названных параметров и характеристик на каждом эксплуатационном режиме работы двигателя. Это вызвано тем, что на режимах с пониженной частотой вращения и неполной подачей топлива показатели впрыскивания и распыливания топлива как правило ухудшаются. В частности, отмечается уменьшение длины и ширины топливного факела, ухудшение качества распыливания топлива, увеличение неравномерности распределения капель топлива по объему камеры сгорания. Это приводит к снижению эффективности процесса сгорания топлива и ухудшению экономических и экологических показателей работы дизеля. Для достижения требуемых показателей дизелей характеристики и параметры процесса топливоподачи целесообразно корректировать в соответствии с режимом работы двигателя и условиями его эксплуатации, что позволяет осуществлять целенаправленное изменение указанных характеристик и параметров, обеспечивая тем самым требуемый характер протекания процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания на каждом эксплуатационном режиме работы дизеля.

Таким образом, тематика данной работы, посвященной совершенствованию систем топливоподачи путем оптимизации конструкции распылителей форсунок с учетом режима работы системы топливоподачи, возможности улучшения пусковых качеств дизеля, использования топлив с различными свойствами, представляется весьма актуальной.

Цель работы: Улучшение эксплуатационно-технических показателей быстроходного дизеля совершенствованием процессов впрыскивания и распыливания топлива.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи исследований:**

1. Оценить влияние режима работы топливной аппаратуры на характеристики топливоподачи, а также на экономические и экологические показатели автомобильных и тракторных дизелей.

2. Провести экспериментальные исследования отечественных и зарубежных систем топливоподачи и оценить влияние конструктивных особенностей распылителя форсунки – расположения, эффективного проходного сечения, числа и длины распыливающих отверстий на характеристики впрыскивания и распыливания топлива, экономические и экологические показатели автомобильных и тракторных дизелей.

3. Дать анализ характеристик впрыскивания и распыливания топлива на пусковых режимах дизеля и влияния на них автоколебаний иглы форсунки и температуры окружающей среды, а также при работе дизеля на нетрадиционных топливах – облегченных нефтяных и спиртовых топливах.

4. Разработать математические модели процессов впрыскивания и распыливания топлива и провести расчетных исследования этих процессов с целью определения характеристик и давлений впрыскивания, характеристик распыливания и динамики развития топливных струй.

Научная новизна. В результате проведенных исследований были получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту диссертации:

1. Методика оценки качества процессов впрыскивания и распыливания топлива по результатам безмоторных исследований топливной аппаратуры, основанная на частотном анализе осциллограмм силового воздействия струи впрыскиваемого топлива.

2. Математическая модель процесса развития топливной струи, построенная на основе закона передачи количества движения отдельных порций топлива фронту струи и от него окружающему воздуху.

3. Методика оптимизации числа распыливающих отверстий распылителя для каждой зоны рабочих режимов двигателя.

4. Методы оценки дробящих свойств форсунки на режимах пуска, совокупности приоритетность основных эксплуатационных факторов, влияющих на эти свойства.

5. Количественная оценка влияния возмущенности струи распыливаемого топлива на качество процесса смесеобразования и, в конечном итоге, на экономические и экологические показатели дизеля.

Достоверность и обоснованность научных положений диссертационной работы определяются:

1. Использованием общих уравнений гидродинамики, теплофизики, методов многокритериальной оптимизации параметров топливоподдачи и теории автоматического управления, современных методик расчета.

2. Сочетанием теоретических и экспериментальных методов исследования рабочих процессов дизеля.

3. Применением современных высокоточных автоматизированных средств измерения параметров процессов впрыскивания и распыливания топлива, экономических и экологических показателей дизелей.

4. Согласованием результатов проведенных исследований с опубликованными данными.

Практическую ценность работы представляют следующие результаты исследований:

1. Материалы экспериментальных и расчетных исследований, доказывающие необходимость оптимизации работы топливной аппаратуры во всей области рабочих режимов двигателя с целью улучшения его экономических и экологических характеристик.

2. Экспериментально проверенная методика оптимизации показателей дизеля на примере изменения числа распыливающих отверстий распылителя для каждой зоны рабочих режимов двигателя.

3. Рабочая программа расчета развития топливной струи на ЭВМ, позволяющая на стадии разработки топливной аппаратуры исследовать влияние режима работы, условий впрыскивания, конструктивных параметров распылителя, физических свойств топлива и других факторов на характеристики впрыскивания и распыливания топлива, снижающая трудоемкость и время доводочных работ.

4. Методика оценки качества процессов впрыскивания и распыливания топлива по результатам безмоторных исследований топливной аппаратуры, основанная на частотном анализе осциллограмм силового воздействия струи впрыскиваемого топлива, позволяющая основную долю доводочных работ по топливной аппаратуре выполнять на безмоторных установках.

5. Метод оценки работы форсунок на режимах пуска по результатам безмоторных исследований.

6. Практические рекомендации по выбору конструкции распылителя, числу и расположению распыливающих отверстий, их размерам.

Реализация результатов работы. Основные положения и результаты работы использовались при разработке перспективных форсунок для дизеля Д-

245.12 автомобиля ЗИЛ-5301 (“Бычок”), Результаты исследований внедрены на ГНЦ РФ ФГУП “НАМИ”, ОАО “НЗТА” и НТЦ ОАО “ЯЗТА”.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на заседаниях научно-методической и научно-исследовательской конференции в МАДИ в 1980-1984 г.г., на заседаниях Международного научно-практического семинара “Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС” в г.Владимир в 1997, 1999, 2001 г.г., на Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика В.П. Горячкина в 1998 г., на научно-технической конференции “Актуальные вопросы создания топливopодpодyющих систем транспортных дизелей на современном этапе”, посвященной 30-летию ОАО “ЯЗДА” в 2002 г., на заседаниях всероссийского научно-технического семинара по автоматическому регулированию и управлению теплоэнергетических установок в МГТУ им.Н.Э.Баумана в 2003, 2004 г.г., на Международном симпозиуме в МГТУ им.Н.Э.Баумана в 2005 г., на заседании кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им.Н.Э.Баумана в 2004 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 51 работа, в том числе 26 статей, 9 материалов конференций, 2 учебных пособия, 14 авторских свидетельств и патентов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 372 страницы, включая 349 страниц основного текста, содержащего 162 рисунка, 33 таблицы. Список литературы включает 244 наименования на 23 страницах. Приложение на 18 страницах включает листинг программы расчета процесса впрыскивания и распыливания топлива и документы о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования проблемы совершенствования процессов впрыскивания и распыливания топлива и дана общая характеристика работы.

В первой главе проведен анализ требований, предъявляемых к дизелям в современных условиях. Показано, что эффективным средством достижения современных экономических и экологических показателей является совершенствование рабочих процессов дизелей. В работах Астахова И.В., Голубкова Л.Н., Грехова Л.В., Ерохова В.И., Кутового В.А., Лышевского А.С., Мазинга М.В., Патрахальцева Н.Н., Свиридова Ю.Б., Толшина В.И., Трусова В.И. Эфроса В.В. и других ученых показано, что улучшение качества рабочего процесса дизеля в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов обеспечивается при оптимизации основных характеристик топливоподачи, впрыскивания и распыливания топлива. Рассмотрены особенности организации процесса смесеобразования в дизелях и типы используемых в них камер сгорания. Показана зависимость экономических и экологических показателей дизелей от типа камеры сгорания. Рассмотрены конструктивные особенности современных систем топливоподачи дизелей. Проведен аналитический обзор литературных данных по исследованию характеристик впрыскивания и распыливания топлива. Сформулированы цель работы и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены режимы работы дизелей автотракторного назначения, состав их отработавших газов, особенности образования токсичных компонентов и нормы на эмиссию токсичных компонентов с отработавшими газами. Показано, что оценка топливной экономичности и токсичности автотракторных дизелей по экономическим и экологическим характеристикам на режимах номинальной мощности и максимального крутящего момента не является исчерпывающей. Такую оценку целесообразно проводить по показателям, учитывающим работу дизелей во всей зоне рабочих режимов, с учетом

среднеэксплуатационных нагрузок двигателя транспортного средства и вида его работы.

Проведенное исследование распределения режимов работы дизелей в условиях реальной эксплуатации мобильных средств позволило выявить наиболее характерные распределения режимов работы дизеля и сформулировать требования к процессу топливоподачи на этих режимах. Оптимизировать работу топливной аппаратуры дизеля с целью улучшения его экономических и экологических характеристик также необходимо во всей области рабочих режимов двигателя. Рассмотрены факторы, влияющие на экономические и экологические показатели дизелей. Среди таких факторов выделены давление впрыскивания топлива и конструкция проточной части распылителя.

Проведена оценка влияния режима работы дизеля на максимальное давление впрыскивания, характеристики впрыскивания и распыливания топлива. Снижение выбросов оксидов азота NO_x и твердых частиц без существенного ухудшения топливной экономичности обеспечивается при улучшении процесса смесеобразования за счет повышения давления впрыскивания. Однако, эффективность такого воздействия давления впрыскивания по мере его роста снижается. Сделан вывод о том, что дальнейшее повышение давлений впрыскивания более 80 МПа уже не приводит к существенному снижению мелкости распыливания топлива, а нагруженность деталей топливной аппаратуры существенно возрастает. Это приводит к снижению ресурса работы топливной аппаратуры.

Кроме того, на режимах малых частот вращения и нагрузок топливная аппаратура разделенного типа зачастую не обеспечивает необходимый уровень давлений впрыскивания и не позволяет достичь требуемых экономических и экологических показателей работы дизеля, что объясняется недостаточно полным использованием воздушного заряда, ухудшением мелкости распыливания топлива, снижением эффективности его сгорания, поэтому желательно использовать другие способы улучшения качества процесса смесеобразования. Пока-

зана возможность улучшения качества процесса смесеобразования путем оптимизации конструкции проточной части распылителей форсунок.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям систем топливоподдачи и показателей дизеля при использовании распылителей различных конструкций.

Результаты безмоторных исследований процесса топливоподдачи топливных систем разделенного типа дизелей ЗиЛ-645 (8Ч11/11,5), Д-245.12 (4ЧН11/12,5), КамАЗ-740 (8Ч12/12), ЗД6 (6Ч15/18) и др. показывают на необходимость учета конструкции форсунок на характеристики впрыскивания и распыливания топлива, что, несомненно, оказывает влияние и на характеристики дизеля. Анализ экспериментальных данных по топливной аппаратуре и характеристикам дизелей, оснащенных этой аппаратурой, позволил выявить конструктивные факторы, определяющие качество процессов впрыскивания и распыливания топлива и, как следствие, экономические и экологические показатели дизелей. К этим факторам относятся расположение распыливающих отверстий форсунки, их длина, число и проходное сечение.

Безмоторные исследования проведенные с топливной аппаратурой дизелей ЗиЛ-645 и Д-245.12 показали существенное влияние расположения сопловых отверстий в распылителе и отношения длины отверстия к его диаметру на мелкость распыливания топлива и характеристики развития топливных струй. Проведенный комплекс экспериментальных исследований на безмоторных и моторных установках позволил оценить влияние этих факторов на характеристики впрыскивания и распыливания, экономические и экологические показатели на различных режимах работы дизелей.

При моторных испытаниях на дизеле Д-245.12 исследованы распылители по варианту I (рис. 1,а) - распылители типа 145 Ногинского завода топливной аппаратуры (НЗТА), у которых входные кромки распыливающих отверстий расположены в объеме полости под иглой форсунки, и по варианту II (рис 1,б) -

распылители типа DOP 119 S 534 фирмы Motorgal (Чехия) и распылители типа 171 Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ), у которых входные кромки распыливающих отверстий расположены на запирающем конусе седла иглы. Особенности выполнения распылителей сказываются на характере протекания их гидравлических характеристик особенно при малых подъемах иглы (h_u до 0,2 мм), как видно из рисунка 1, в.

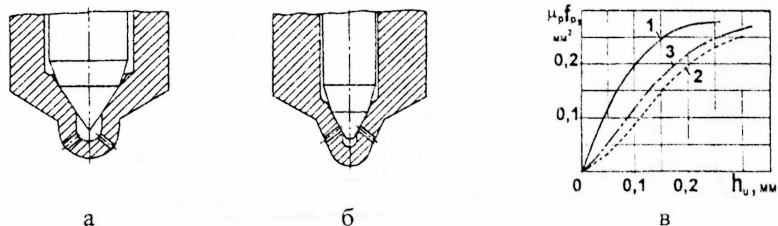


Рис. 1. Варианты выполнения распылителей:

а – вариант I; б – вариант II; в – гидравлические характеристики распылителей (1 – 145 (АЗПИ); 2 – 171 (АЗПИ); 3 – 534 (Motorgal))

Исследования с распылителями по варианту I проведены с тремя значениями длин распыливающих отверстий l_p при примерно равных их диаметрах d_p , обеспечивающих отношение $l_p/d_p = 1,4; 2,2$ и $2,8$. Проведенный комплекс безмоторных испытаний топливной аппаратуры с вариантами I и II распылителей в широком диапазоне изменения частоты вращения и цикловых подач топлива и анализ традиционных параметров осциллографирования процесса топливоподачи не позволили выявить существенной разницы между ними. Более существенное различие получено по результатам обработки регистрации гидродинамического давления струи на специальный датчик. Для этой цели предложена методика оценки качества впрыскивания по результатам безмоторных исследований топливной аппаратуры, основанная на частотном анализе осциллограмм гидродинамического давления струи впрыскиваемого топлива.

Осциллограммы гидродинамического давления снимались при положениях датчика на расстояниях $L_2=5$ и 50 мм от отверстия распылителя. Схема измерения гидродинамического давления и пример получаемой ос-

циллограммы представлен на рис.2. Осциллограмма гидродинамического давления представляет собой сложный высокочастотный сигнал, характеризующий энергетические характеристики топливной струи, выходящей из распылителя. По результатам частотного анализа этого сигнала методом Фурье (по полученным амплитудам A и частотам f для каждой гармоники) строился частотный спектр, пример которого для двух положений датчика на номинальном режиме с распылителем по варианту I представлен на рис.3.

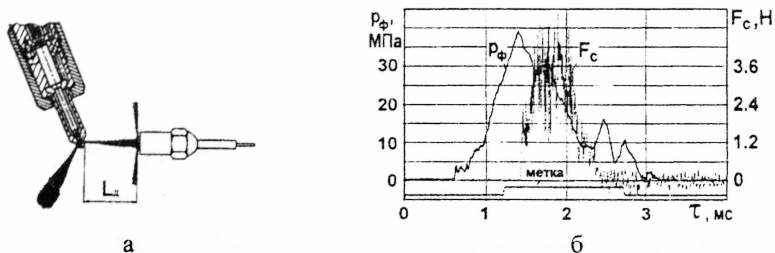


Рис. 2. Регистрация силового воздействия струи на датчик:

а – схема измерения силового воздействия; б – осциллограмма гидродинамического давления F_c и давления у форсунки p_ϕ при $L_d=5\text{ мм}$

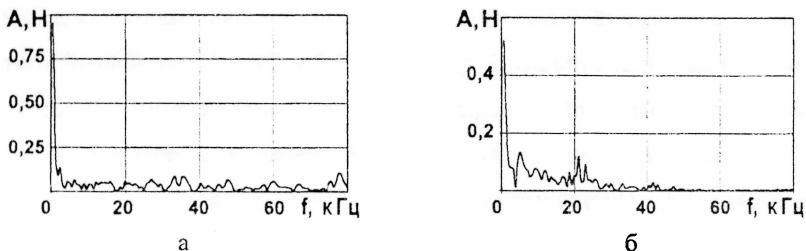


Рис. 3. Частотные спектры колебаний силы F_c гидродинамического давления струи на поверхность датчика на расстоянии $L_d=5\text{ мм}$ (а) и $L_d=50\text{ мм}$ (б) на режимах с $n_{\text{тн}}=1200\text{ мин}^{-1}$ и подачей топлива $q_u=90\text{ мм}^3$

Оценка параметров топливоподачи для различных вариантов распылителей проводилась по интегральной характеристике частотного спектра $S = \int_0^\infty A \cdot df$, представляющей собой площадь под кривой частотного спектра силы гидродинамического давления. Сравнение интегральных характеристик

для вариантов I и II распылителей при различных режимах работы представлено на рис.4.

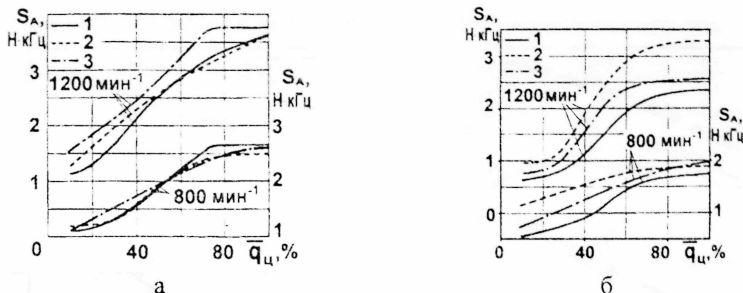


Рис. 4. Зависимость интегральной характеристики частотного спектра S_a от нагрузочного и скоростного режимов при $L_d=5$ мм (а) и $L_d=50$ мм (б) и использовании распылителей: 1 - 145; 2 - 534; 3 - 171

Анализ данных рис.4 показывает, что распылители по варианту II (534 и 171) имеют большие значения интегральной характеристики S_a практически во всем исследованном рабочем диапазоне. Таким образом, возмущенность топливных струй у этих распылителей выше, смесеобразование будет протекать более интенсивно и процесс сгорания должен быть более эффективным, чем у распылителя по варианту I. Исследование струй на удалении 50 мм от отверстия распылителя показало, что большей возмущенностью обладают струи из распылителя 534 (Motorpal).

Проведенные моторные испытания подтвердили гипотезу о влиянии возмущенности струи распыливаемого топлива на качество процесса смесеобразования и, в конечном итоге, на экономические и экологические показатели дизеля.

Оценка влияния конструкции проточной части распылителя форсунки на экономические и экологические показатели проведена с использованием результатов экспериментальных исследований дизеля Д-245.12. Результаты испытаний по внешней скоростной характеристике с вариантами I и II распылителей представлены на рис. 5, а и с распылителями, имеющими различную дли-

ну отверстий – на рис. 5,б. Данные рис.5,а показывают преимущества распылителей варианта II как по экономичности на 5-6 %, так и по дымности в 1,5-2 раза.

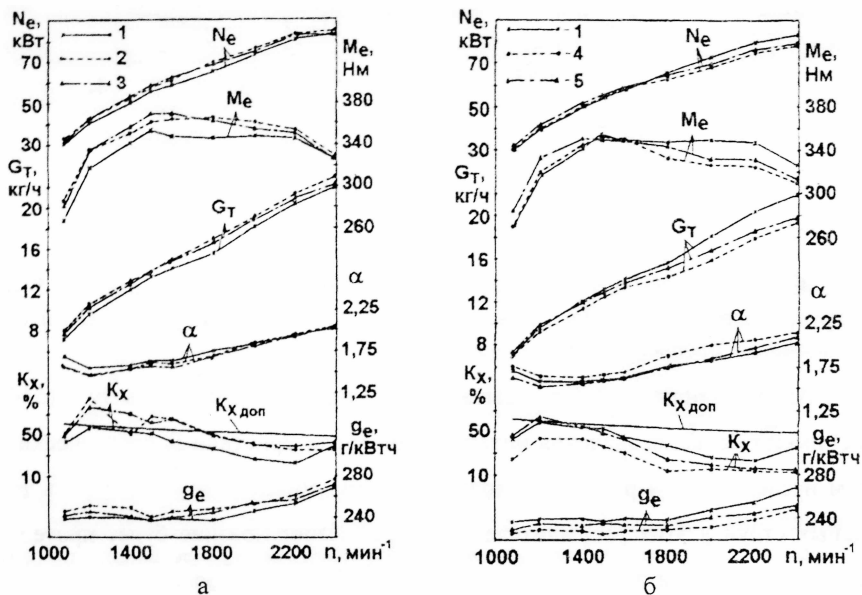


Рис.5. Внешние скоростные характеристики дизеля Д-245.12 с различными вариантами распылителей (табл. 1): а – распылители с различной длиной отверстий; б – распылители по вариантам I и II

При анализе интегральных показателей токсичности ОГ на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла (табл. 1) можно заключить, что оснащение исследуемого дизеля распылителями с уменьшенной длиной распыливающих отверстий (комплектации № 2 и № 3) позволяет уменьшить расход топлива (на 2,1-2,6%) и значительно сократить выбросы легких углеводородов CH_x с ОГ (в 1,7-2,5 раза). При этом выбросы оксидов азота NO_x с ОГ у всех трех исследуемых комплектаций оказываются примерно одинаковыми. Но при использовании распылителей с уменьшенной длиной распыливающих отверстий имеет место некоторое увеличение эмиссии монооксида углерода CO (на 10,2-19,5%).

Лучшие показатели дизеля достигаются при использовании распылителей по варианту II. Дизель имеет показатели, удовлетворяющие требованиям норм EURO-2 к токсичности ОГ при оснащении его распылителями модели 534 (по газовым составляющим). Использование распылителей модели 171 не позволяет достичь требуемых показателей норм EURO-2 по выбросам легких углеводородов CH_x , что можно отчасти объяснить несколько большей суммарной эффективной площадью μ_f распыливающих отверстий этого распылителя по сравнению с распылителями 534. Установка распылителей типа 145 (вариант I) не обеспечивает получение требуемых показателей токсичности ОГ по выбросам монооксида углерода CO и легких углеводородов CH_x , несмотря на их существенное снижение при укороченных отверстиях (комплектации № 2 и 3).

Таблица 1

Показатели дизеля Д-245.12 с различными вариантами распылителей

Вариант распылителя	Условный средний расход топлива на режимах 13-ступенчатого цикла, $g_{\text{е усл}}, \text{ г}/(\text{кВт ч})$	Удельные массовые выбросы токсичных компонентов при работе по 13-ступенчатому циклу, $\text{г}/(\text{кВт ч})$		
		e_{NO_x}	e_{CO}	e_{CH_x}
№ 1 145 ($l_c/d_c=2,8$)	268,3	6,439	4,464	2,958
№ 2 145 ($l_c/d_c=2,2$)	262,7	5,775 (6,252)*	5,730 (5,336)*	1,767 (1,736)*
№ 3 145 ($l_c/d_c=1,4$)	261,2	5,995 (6,451)*	5,565 (4,919)*	1,213 (1,185)*
№ 4 534 (Motorpal)	252,4	6,741	3,067	0,945
№ 5 171 (АЗПИ)	257,8	6,459	3,891	1,133
требования норм EURO-2	-	7,0	4,0	1,1

*- В скобках даны интегральные выбросы токсичных компонентов, подсчитанные по нагрузке для режимов 13-ступенчатого цикла, на которых исследовался дизель по варианту № 1

Исследование взаимосвязи удельных показателей дизеля проводилось по приведенному значению интегральной характеристики s_{50} топливной струи, рассчитанной по выражению:

$$s_{50} = \sum_{i=1}^k (S_{50i} \cdot K_i), \quad (1)$$

где значения весовых коэффициентов K_i принимались аналогично Правилам ЕЭК ООН №49. Полученные в результате обработки экспериментальных данных результаты представлены на рис.6. Осредненные значения данных рис.6 показывают, что увеличение приведенного значения интегральной характеристики топливной струи на 1 Н·кгц приводит к уменьшению удельного эффективного расхода топлива на 13 г/кВтч, удельных выбросов оксида углерода на 2,6 г/кВтч, удельных выбросов углеводородов на 0,9 г/кВтч и к увеличению удельных выбросов оксидов азота на 0,4 г/кВтч.

Особенности протекания процессов в топливной аппаратуре дизелей приводит к ухудшению процессов распыливания топлива при снижении частоты вращения и цикловой подачи, что оказывает влияние на смесеобразование и показатели дизеля. Процесс распыливания может быть улучшен за счет уменьшения проходного сечения распылителя на этих режимах, например за счет снижения количества распыливающих отверстий.

Результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12 в области рабочих режимов с распылителями типа 145 с различным числом распыливающих отверстий ($i_p=5, 4$ и 3) одинакового диаметра ($d_p=0,32$ мм), обработанные с использованием предложенной методики оптимизации, обеспечивающей компромисс между экономическими и экологическими показателями, показали существование для каждой зоны рабочих режимов двигателя оптимального числа отверстий i_p форсунки (рис.7).

Реализация оптимизированной характеристики числа распыливающих отверстий позволяет снизить рассчитанные по 13-ступенчатому циклу удельные выбросы оксидов азота e_{NOx} на 4 %, легких углеводородов e_{CHx} – на 18 % при снижении условного среднего расхода топлива g_e усл до 265,7 с 268,3

г/кВт.ч. Одновременно наблюдается увеличение выбросов монооксида углерода e_{CO} на 4%.

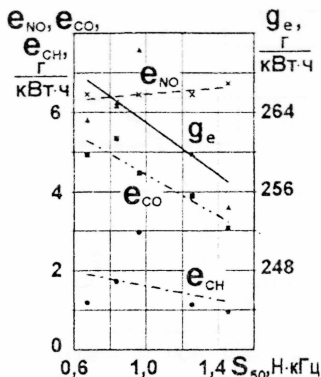


Рис. 6. Зависимость удельных показателей дизеля от приведенной интегральной характеристики топливных струй

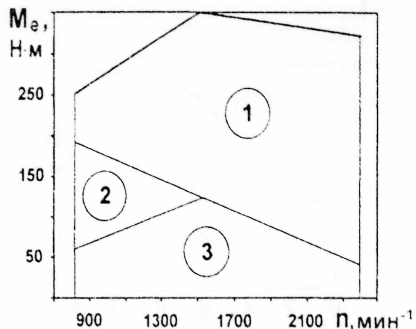


Рис. 7. Зоны предпочтительного использования форсунок дизеля Д-245.12 с числом отверстий распылителя i_p : 1 – $i_p=5$; 2 – $i_p=4$; 3 – $i_p=3$

В четвертой главе рассмотрены особенности работы систем топливоподачи на пусковых режимах. Проведены безмоторные экспериментальные исследования характеристик впрыскивания и распыливания системами топливоподачи дизелей ЗиЛ-645 и КамАЗ-740, оснащенные распылителями различных типов. Показано, что на режимах пуска имеет место режим дробящей работы форсунки, при котором игла совершает колебания с частотой более 200 Гц и поднимается на высоту до 0,1 мм (рис. 8).

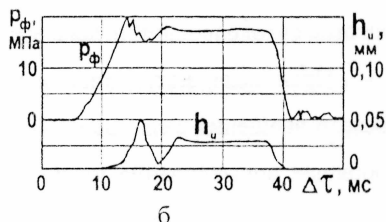
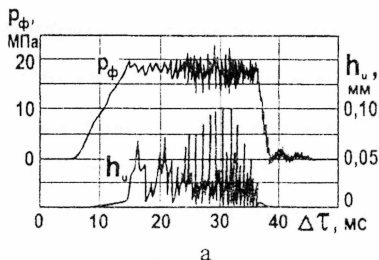


Рис. 8 Осциллограммы изменения давления топлива на входе в форсунку p_f и подъема иглы h_u на режиме пуска для форсунок с различными дробящими свойствами: а – хорошие; б – плохие

Срыв высокочастотных колебаний приводит к ухудшению динамики топливных струй и увеличению диаметра капель распыливаемого топлива более чем в 2,5 раза (рис. 9).

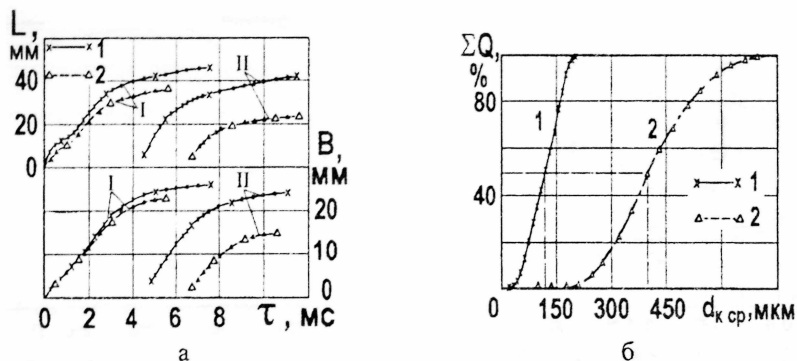


Рис. 9. Зависимость параметров струи распыливаемого топлива на режиме пуска для форсунок с различными дробящими свойствами (1- хорошие; 2 - плохие): а - длины L и ширины B струи (I - первая струя; II - вторая и следующие струи); б - мелкости распыливания

Анализ полученных характеристик топливоподачи на пусковых режимах дизеля показал их зависимость от конструктивных особенностей распылителей, их технического состояния и температуры окружающей среды. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на частоту и амплитуду автоколебаний иглы форсунки и характеризующие режим дробящего впрыскивания. Сформулированы требования к показателям впрыскивания и распыливания топлива на режимах пуска. Рассмотрена работа топливоподающей аппаратуры дизеля на нефтяных топливах утяжеленного состава при пуске и показано благоприятное влияние автоколебаний иглы форсунки на характеристики подачи этих топлив.

Предложен метод оценки дробящих свойств форсунки по минимальной частоте вращения вала насоса (критической частоте $n_{кр}$), еще обеспечивающей дробящее впрыскивание на пусковой подаче топлива. Испытание топливной аппаратуры на топливах с различной вязкостью показало снижение дробящих свойств форсунок с ростом вязкости (рис. 10).

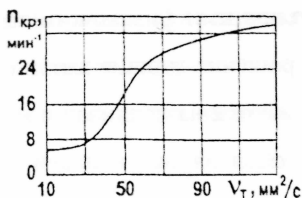


Рис. 10. Зависимость критической частоты вращения $n_{кр}$ кулачкового вала топливного насоса от вязкости ν применяемого топлива для топливной аппаратуры дизеля ЗДб при пусковой подаче топлива

Пятая глава посвящена исследованию характеристик впрыскивания и распыливания при работе системы топливоподачи на различных видах топлив. Эти исследования показывают, что для более рационального использования фракций, содержащихся в сырой нефти, желательно использовать в дизелях не только фракции дизельных топлив, но и легкие фракций (бензиновых, лигроиновых, керосиновых), обычно не используемые при производстве стандартных дизельных топлив. Желательно также применять в дизелях ряда нетрадиционных (альтернативных) топлив - спиртов, растительных масел, эфиров. Вместе с тем, необходимо учитывать различия физико-химических свойств перечисленных нетрадиционных и стандартных дизельных топлив, которые оказывают влияние на характер протекания процессов топливоподачи, впрыскивания и распыливания топлив штатной аппаратурой дизеля.

Проведены безмоторные испытания топливной аппаратуры дизеля типа ЗиЛ-645 с распылителями различных типов. Исследовалась работа системы топливоподачи на облегченных смесевых нефтяных топливах и на спиртовом топливе - метаноле. Проведенный анализ характеристик струй распыливаемого топлива при работе на нетрадиционных топливах показывает их различие как по мелкости распыливания, так и по динамике развития топливных струй (рис. 11). Так уменьшение плотности топлива при работе с метанолом снижает динамику развития топливных струй на величину до 7 % по сравнению с работой на дизельном топливе.

Показана зависимость экономических и экологических показателей ряда дизелей от физико-химических свойств топлива. На различных эксплуатационных режимах наилучшие экономические показатели дизеля могут

быть достигнуты при работе на топливах с различными физико-химическими свойствами. При снижении нагрузок и частот вращения лучшие характеристики дизеля с разделенной аппаратурой обеспечиваются на топливах с меньшей плотностью и большим цетановым числом, что объясняется меньшей динамикой развития струй и большей долей топлива, участвующего в объемном смешении.

Целесообразно вводить регулирование свойств применяемого топлива и корректирование характеристик топливоподачи в дизелях, работающих в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов. Реализация такого согласования в двигателях, работающих на различных товарных топливах, может быть достигнута применением соответствующих систем регулирования и управления процессом впрыскивания и распыливания подаваемого в цилиндры топлива.

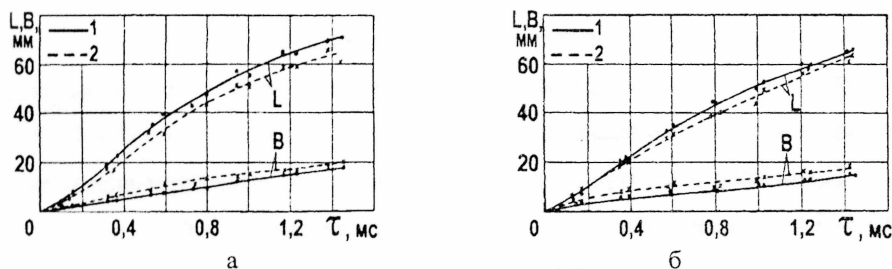


Рис. 11. Характеристики струй топлива L и B образованных распылителем с различными отверстиями (1 - $l_p/d_p=3,3$; 2- $l_p/d_p=1,4$) на режиме $n_{тн}=1400 \text{ мин}^{-1}$, $q_u=58 \text{ мм}^3$ при работе на топливах: а –дизельное топливо; б – метанол

В шестой главе представлены математические модели процессов впрыскивания и распыливания топлива. Математическая модель процесса впрыскивания построена на основе системы уравнений динамического равновесия подвижных элементов топливной аппаратуры, баланса расходов в узловых полосках и известных уравнений гидродинамики, позволяющих учитывать волновые процессы в топливопроводе высокого давления. Эти уравнения решаются совместно с уравнениями граничных условий у насоса и форсунки. Значения

плотности топлива ρ_f и его коэффициента сжимаемости α_f , используемые при расчете процесса впрыскивания топлива, определяются в модели с использованием функциональных зависимостей этих физических свойств от давления и температуры топлива, учитывающих современный уровень давлений впрыскивания и возможность использования в дизеле нефтяных топлив с различными физическими свойствами (включая реактивные топлива и бензины).

Проведенный анализ известных методов расчета процессов развития топливных струй и распыливания топлива выявил их недостатки, большие расхождения в получаемых по ним результатов и подтвердил необходимость создания модели развития струи, учитывающей действительный закон подачи топлива и обеспечивающей адекватное описание дальнобойности струи с учетом физических явлений, происходящих в струе.

Такая методика расчета разработана на основе закона сохранения импульса. Для упрощения решения задачи приняты следующие допущения, не искажающие сути процессов:

- 1) структура топливной струи рассматривается в виде двух зон - фронта струи и тела струи, отличающихся между собой характером взаимодействия как внутри струи, так и с окружающим воздухом;
- 2) рассматривается не отдельная капля, а группа капель и паров топлива, образованных в результате распыливания порции топлива (порция топлива представляет собой малую часть топлива, подаваемого через распыливающее отверстие за время расчетного шага);
- 3) порция поданного топлива движется в области струи по своему закону, взаимодействуя с окружающей средой и не взаимодействуя с ранее поданными порциями топлива;
- 4) при достижении порцией топлива фронта струи происходит обмен энергиями между порцией и фронтом струи на основе закона сохранения количества движения;

5) фронт струи взаимодействует с окружающим воздухом, в результате чего происходит обмен энергиями на основе закона сохранения количества движения;

6) рассматривается обмен количеством движения только в прямолинейном направлении движения струи топлива.

Принятые допущения позволяют принять расчетную схему показанную на рис. 12. Полученные на основании принятых допущений основные уравнения, описывающие продвижение фронта струи, выглядят следующим образом:

♦ Масса топлива dm_i плотностью ρ_r при объемном расходе Q_i через отверстие распылителя при ее истечении за времени $\Delta t_i = t_2 - t_1$ составит:

$$dm_i = \int_{t_1}^{t_2} \rho_r \cdot Q_i \cdot dt \quad (2)$$

♦ В процессе движения поданной массы топлива ее энергия рассеивается и скорость снижается. Снижение начальной скорости пропорционально времени и скорости движения. При таком условии скорость C_i поданной массы может быть описана уравнением:

$$C_i = C_0 / (1 + k_i \cdot t \cdot C_0) \quad (3)$$

где: C_0 – начальная скоростью истечения; k_i - коэффициент рассеивания энергии поданной порции; t - время движения порции.

♦ Интегрируя скорость движения массы, получим закон ее перемещения L_i от начала вылета из отверстия до момента времени t :

$$L_i = \int_0^t C_i \, dt = (1/k_i) \cdot \ln(1 + k_i \cdot t \cdot C_0). \quad (4)$$

♦ Порция движется по описанному выражением (4) закону до тех пор, пока она не достигнет фронта струи. При достижении фронта струи происходит обмен энергией между порцией и фронтом. Обмен энергией между фронтом струи, порцией топлива и окружающим воздухом описывается законом сохранения

количества движения в направлении распространения струи. Исходя из сказанного изменение скорости фронта струи примет следующий вид:

$$dC_{\Phi} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot (dm_i/m_{\Phi}) - C_{\Phi} \cdot (dm_{\Phi}/m_{\Phi}) + C_b \cdot (dm_b/m_{\Phi}), \quad (5)$$

где: $dm_{\Phi} = \sum_{i=1}^n dm_i + dm_b$ - изменение массы фронта струи за счет масс топлива $\sum dm_i$, заторможенных во фронте струи и вовлеченной в струю массы воздуха dm_b ;

n – количество порций достигших фронта струи за расчетное время.

♦ Принимая, что в процессе взаимодействия порций топлива с фронтом в течение периода времени dt фронт струи движется с постоянным ускорением, получим выражение для расчета продвижения фронта за это время:

$$dL = C_{\Phi} \cdot dt + 0,5 \cdot dC_{\Phi} \cdot dt. \quad (6)$$

♦ Масса воздуха, вовлеченного топливной струей в движение, зависит от его плотности ρ_b и объема орошенного струей dV_b и составит:

$$dm_b = \rho_b \cdot dV_b, \quad (7)$$

где: $dV_b = (\pi/12) \cdot dL \cdot (4 \cdot r_s^2 + d_p^2 + 2 \cdot r_s \cdot d_p)$,

$r_s = L \cdot \operatorname{tg}(\beta_s/2) + d_p/2$ - эффективный радиус фронта струи;

β_s - эффективный угол раскрытия струи, получаемый из условия равнозначности импульса струи при одинаковой плотности орошения и расхода топлива импульсу при реальной плотности орошения.

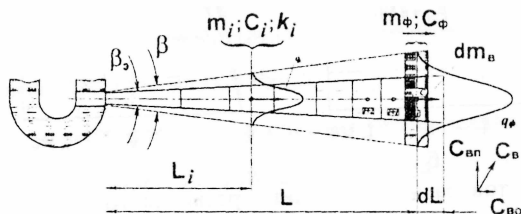


Рис. 12. Расчетная схема топливной струи

Значения коэффициента рассеивания энергии поданной порции k_i и эффективного угла раскрытия струи β_s могут быть найдены по результатам экспе-

риментов или для топливных струи из традиционных распыливающих отверстий определены по полученным эмпирическим зависимостям, обеспечивающим коэффициент корреляции более 0,94:

$$k_i = 5,5 \cdot \rho^{0,1} \cdot (1 + 20 \cdot \rho) \cdot (1 - 0,51 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Re} \cdot \eta^{1,16}), \quad [1/\text{м}]. \quad (8)$$

$$\beta_3 = 3,12 + 172,8 \cdot \rho - 17 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Re} \cdot \eta^{1,16}, \quad [\text{град}], \quad (9)$$

где: ρ , η – отношение плотностей и динамических вязкостей воздушной среды и топлива, соответственно; Re – число Рейнольдса для потока топлива в отверстии.

Текст программы расчета параметров топливной струи написан на алгоритмическом языке Basic. С использованием изложенной методики проведены расчеты динамики развития струй для различных топливных систем и режимов работы. Полученные результаты показывают достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных при всех исследованных частотах вращения кулачкового вала.

Результаты расчетов динамики развития топливной струи при стационарном истечении топлива (рис. 13) показали хорошее совпадение с экспериментальными данными (расхождения в дальности не превышают 4%).

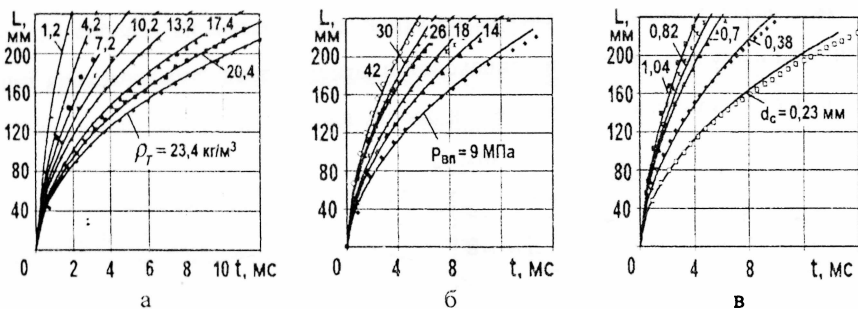


Рис. 13 Сопоставление результатов расчета динамики развития топливных струй при постоянном расходе топлива и различных условиях (линии – расчет, значки – эксперимент): а – изменение плотности среды от 1,2 до 13,2 кг/м³, б – изменение давления впрыскивания от 26 до 42 МПа; в – изменение диаметра отверстия распылителя от 0,23 до 1 мм

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для топливных струй при нестационарных условиях истечения топлива (при импульсной подаче топлива от ТНВД) также показали достаточно хорошее совпадение (расхождение не более 5%) при всех исследованных цикловых подачах и частотах вращения кулачкового вала (рис. 14).

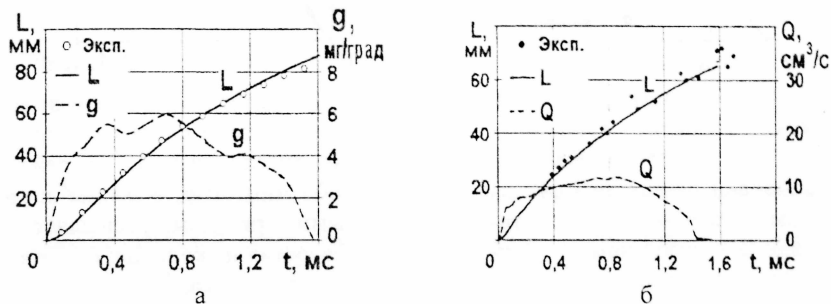


Рис. 14 Сопоставление результатов расчета динамики развития струй L по заданному закону подачи g или Q (линии – расчет, точки – эксперимент): а – дизеля ЗиЛ-645 на режиме с $n_{\text{тн}}=1400 \text{ мин}^{-1}$; б – опытной системы топливopодачи с ТНВД 4ТН10/10

Результаты расчетов динамики развития топливных струй на различных топливах (рис. 15) показали, что подача метанола уменьшает дальность струи на 3%, а подача бензина – на 6% в сравнении с подачей дизельного топлива.

Расчеты по влиянию выполнения распыливающих отверстий показали (рис. 16), что их выполнение под конусом иглы приводит к снижению дальности на 7% в сравнении с отверстиями выходящими из подыгольного объема распылителя (колодца).

Проведенные расчетные исследования характеристик впрыскивания и распыливания топлива дизелей Д-245.12, ЗиЛ-645 и их сравнение с экспериментально полученными характеристиками подтвердили адекватность разработанных математических моделей и возможность их использования для расчетов процессов впрыскивания и распыливания топлива в дизелях.

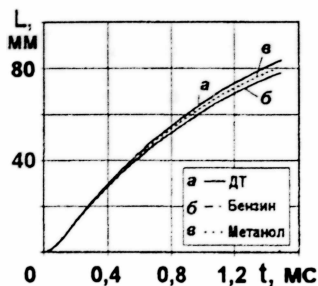


Рис. 15 Результаты расчета динамики развития топливных струй при работе системы топливоподачи дизеля ЗиЛ-645 на режиме с $n_{\text{тн}}=1400 \text{ мин}^{-1}$ на топливах: а – дизельном; б – бензине; в – метаноле

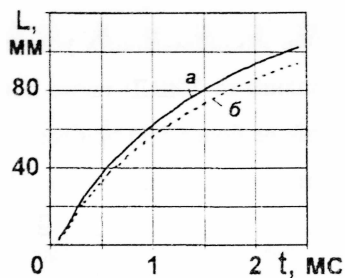


Рис. 16. Расчет динамики развития топливных струй системы топливоподачи дизеля ЗиЛ-645 на режиме $n_{\text{тн}}=1000 \text{ мин}^{-1}$ и $q_u = 60 \text{ мм}^3$ с различными вариантами распылителей: а – отверстия из колодца; б – отверстия из под конуса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных экспериментальных исследований по ряду дизелей автотракторного назначения, результатов проведенных безмоторных и моторных испытаний, математического моделирования процессов впрыскивания и распыливания топлива осуществлено теоретическое обобщение ^и решение научной проблемы, имеющей важное практическое значение - разработана методология совершенствования процессов впрыскивания и распыливания топлива с целью улучшения экономических и экологических показателей дизелей. Полученные результаты сводятся к следующим основным выводам и рекомендациям:

1. Проведенное исследование распределения режимов работы автотракторных дизелей в условиях реальной эксплуатации транспортных средств позволило выявить наиболее характерные распределения режимов работы дизеля и сформулировать требования к процессу топливоподачи на этих режимах.

2. В результате проведенного анализа конструкций топливной аппаратуры и характеристик дизелей, оснащенных этой аппаратурой, выявлены основные конструктивные факторы, определяющие качество процессов впрыски-

вания и распыливания топлива и, как следствие, экономические и экологические показатели дизелей. К этим факторам относятся: расположение распыливающих отверстий в носке распылителя, их длина, число и проходное сечение.

3. Распылители форсунок с распыливающими отверстиями, выходящими из области запирающего конуса распылителя, имеют преимущества в отношении экологических показателей дизелей, по сравнению с распылителями, имеющими отверстия с выходом из колодца.

4. Выявлено значительное влияние длины распыливающих отверстий на характеристики процессов впрыскивания и распыливания топлива и показатели дизеля. Показана возможность обеспечения требуемых экономических и экологических показателей дизеля путем оптимизации отношения длины распыливающих отверстий к их диаметру.

5. Целесообразно изменение проходного сечения и числа распыливающих отверстий в соответствии с нагрузочными и скоростными режимами работы дизеля. Предложена методика оптимизации числа распыливающих отверстий форсунки, базирующаяся на обеспечении компромисса между экономическими и экологическими показателями дизеля с использованием обобщенного критерия оптимизации по удельному расходу топлива и выбросам нормируемых токсичных компонентов.

6. Разработан ряд технических решений для форсунок дизелей, защищенных авторскими свидетельствами и патентами и обеспечивающих управление процессом впрыскивания и распыливания топлива в дизеле.

7. Разработана методика оценки качества процессов впрыскивания и распыливания топлива при безмоторных исследованиях топливной аппаратуры, базирующаяся на частотном анализе осциллограмм силы гидродинамического воздействия струи впрыскиваемого топлива и позволяющая оценить возмущенность струи, определяющей ее последующий распад в камере сгорания дизеля.

8. В целом, результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность уменьшения выбросов с отработавшими газами углеводородов CH_x в 2,5-3 раза; монооксида углерода CO – в 1,5 раза; расхода топлива – на 5-6 % при достигнутом уровне выбросов оксидов азота NO_x путем оптимизации геометрии проточной части распылителя. Использование распылителей с выходом распыливающих отверстий из под конуса иглы распылителя обеспечило выполнение норм EURO-2 по газовым составляющим в дизеле Д-245.12 автомобиля Зил-5301 "Бычок".

9. Анализ особенностей работы форсунок дизелей на пусковых режимах выявил существенное влияние возникающих автоколебаний иглы форсунки на характеристики впрыскивания и распыливания. Проведенные экспериментальные исследования показали зависимость дальнобойности и ширины струи и мелкости распыливания от амплитуды и частоты автоколебаний иглы, которые определяются конструктивными особенностями форсунки, ее техническим состоянием, физико-химическими свойствами топлива и температурными условиями работы аппаратуры. Показано, что необходимо повышать дробящие свойства форсунок, стремиться к обеспечению высокочастотных и больших амплитуд колебаний иглы распылителя при работе на режимах пуска.

10. На основании проведенных исследований процессов топливоподачи различных нефтяных и альтернативных топлив (спиртов) показана целесообразность управления процессом топливоподачи в соответствии с особенностями свойств применяемых топлив и режимом работы дизеля. При снижении нагрузок и частот вращения лучшие характеристики дизеля с разделенной аппаратурой обеспечиваются на топливах с меньшей плотностью и большим цетановым числом, что объясняется меньшей динамикой развития струй этих топлив и большей долей топлива, участвующего в объемном смесеобразовании.

11. Разработаны математические модели и программа для расчетных исследований процессов впрыскивания и распыливания топлива, позволяющие проводить расчет систем топливоподачи и развития топливных струй с повышенными давлениями впрыскивания и с топливами различных физико-химических свойств, учитывающие характеристики распылителя и закон подачи топлива.

12. Результаты расчетов динамики развития топливной струи при стационарном истечении топлива показали хорошее совпадение с экспериментальными данными (расхождение в дальнобойности не превышают 4%). Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для струй при нестационарных условиях истечения топлива (при импульсной подаче топлива от ТНВД) также показали достаточно хорошее совпадение (расхождение не более 5%) при всех исследованных цикловых подачах и частотах вращения кулачкового вала.

13. Проведенные расчетные исследования характеристик впрыскивания и распыливания топлива дизелей Д-245.12, ЗиЛ-645 и их сравнение с экспериментально полученными характеристиками подтвердили адекватность разработанных математических моделей и возможность их использования для расчетов процессов впрыскивания и распыливания топлива в автотракторных дизелях.

14. Результаты расчетов динамики развития струй различных топлив показали, что подача метанола уменьшает дальнобойность на 3%, а подача бензина – на 6% в сравнении с подачей дизельного топлива. Выполнение распыляющих отверстий под конусом иглы приводит к снижению дальнобойности на 7% в сравнении с отверстиями выходящими из подыгольного объема распылителя.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Толшин В.И., Трусов В.И., Девянин С.Н. Отражение волны давления от объема при колебаниях в системе объем-топливопровод-форсунка // Труды МАДИ. - 1979. - Вып.178. - С.53-58.
2. Девянин С.Н. Метод определения сил трения иглы форсунки // Труды МАДИ. - 1980. - С.45-51.
3. Толшин В.И., Девянин С.Н. Моделирование колебаний иглы форсунки при наличии сил сухого трения // Труды МАДИ. - 1981. - С.67-74.
4. Ольхов А.Ф., Девянин С.Н. Установка для исследования процесса удара иглы форсунки о седло корпуса распылителя // Труды МАДИ.-1982.-С.54-60.
5. Толшин В.И., Трусов В.И., Девянин С.Н. Работа форсунок транспортных дизелей на режиме пуска // Двигателестроение.- 1984.- № 10.- С.50-52.
6. Горбач Р.Н., Девянин С.Н. Улучшение работы топливной аппаратуры дизеля на топливе повышенной вязкости при пуске // Труды МИИВТ. - 1985. - С.43-46.
7. Толшин В.И., Мокеров Л.Ф., Девянин С.Н. Расчеты систем и узлов двигателей внутреннего сгорания с помощью ЭВМ: учебное пособие. - М.: МИИВТ, 1986. - 84 с.
8. Девянин С.Н., Басистый Л.Н., Ваулин А.И., Пономарев Е.Г. Распылитель форсунки для впрыскивания топлива в двигатель внутреннего сгорания / А.с. 1573230 (СССР), МКИ⁵ F 02 М 61/10 // Бюллетень изобретений. - 1990. - № 23.
9. Патрахальцев Н.Н., Девянин С.Н., Басистый Л.Н., Пономарев Е.Г. Форсунка для подачи топлива в дизельный двигатель / А.с. 1768791 (СССР), МКИ⁵ F 02 М 61/10 // Бюллетень изобретений. - 1992. - № 38.
10. Ваулин А.И., Девянин С.Н. Влияние режима работы и параметров топливной аппаратуры на производительность топливного насоса высокого давления и неравномерность топливоподачи по секциям // Вестник РУДН. Тепловые двигатели. - 1996. - № 1. - С.95-98.

11. Басистый Л.Н., Десянин С.Н., Пономарев Е.Г. Система подачи топлива для двигателя внутреннего сгорания / Патент 2084682 (РФ), МКИ⁵ F 02 М 59/00 // Бюллетень изобретений. - 1997. - № 20.

12. Десянин С.Н., Лодня В.А. Применение непосредственного впрыскивания на двухтактном двигателе ДК-8 / Актуальные проблемы теории и практики инженерных исследований: Сб.науч.тр. - М.: Машиностроение, 1999. - С.127-129.

13. Гусаков С.В., Десянин С.Н., Пабло Вальехо Влияние раздельной топливоподачи на динамику теплоиспользования в малоразмерном дизеле 1 Ч 8/7,5 // Актуальные проблемы теории и практики инженерных исследований: Сб.науч.тр. - М.: Машиностроение, 1999. - С.61-62.

14. Десянин С.Н., Савастенко А.А., Эммиль М.В. Определение характеристик ТНВД по базовым параметрам дизеля // Автомобильная промышленность. - 2000. - № 4. - С.24-26.

15. Десянин С.Н. Развитие малогабаритных дизелей // Наука и технологии в промышленности. - 2001. - № 1. - С.30-32.

16. Десянин С.Н., Пономарев Е.Г. Способ работы дизельного двигателя/ Патент 2175395 (РФ), МКИ⁵ F 02 В 1/00, М 45/02. // Бюллетень изобретений. - 2001. - № 30.

17. Топливоподача в дизелях, работающих на облегченных нефтяных топливах / В.А.Марков, С.Н.Десянин, В.И.Мальчук и др. // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2003. - № 4. - С.33-51.

18. Десянин С.Н., Марков В.А. Топливо утяжеленного состава и пуск дизеля // Автомобильная промышленность. - 2003. - № 5. - С.10-13.

19. Десянин С.Н., Пономарев Е.Г., Марков В.А. Смесеобразование в дизеле - процесс, определяющий эффективность его работы: Тез.докл. всеросс. науч.-тех.сем. // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2003. - № 4. - С.117-118.

20. Повышение эффективности подачи и распыливания топлива в дизелях / В.А.Марков, В.И.Мальчук, С.Н.Девянин и др. // Грузовик &. - 2003. - № 6. - С.30-32; № 7. - С.23-27. - № 8; С.50-51.

21. Особенности топливоподачи в дизелях, работающих на облегченных топливах / В.А.Марков, С.Н.Девянин, В.И.Мальчук и др. // Автомобильная промышленность. - 2003. - № 10. - С.12-15; № 12. - С.13-14.

22. Девянин С.Н., Марков В.А., Сиротин Е.А. Совершенствование процессов топливоподачи и смесеобразования дизелей // Грузовик &. - 2003. - № 11. - С.21-26.

23. Марков В.А., Девянин С.Н., Тихонов А.В. Влияние конструкции распылителя форсунки на показатели транспортного дизеля // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2004. - № 1. - С.60-81.

24. Марков В.А., Девянин С.Н. Распылитель форсунки как резерв совершенствования дизеля // Автомобильная промышленность. - 2004. - № 3. - С.11-14.

25. Влияние геометрических соотношений сопловых отверстий распылителя форсунки на экономические и экологические показатели быстроходного дизеля / С.Н.Девянин, В.А.Марков, В.А. Павлов и др. // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2004. - № 3. - С. 119-120. (Тез. докл. всеросс. научн.-тех. сем.)

26. Девянин С.Н., Марков В.А. Результаты безмоторных исследований распылителей форсунок дизелей // Автомобильная промышленность. - 2004. - № 9. - С. 9-11.

27. Девянин С.Н., Марков В.А., Тихонов А.В. Исследование работы топливной аппаратуры дизеля при пуске // Грузовик &. - 2004. - № 8. - С.32-34; № 9. - С.24-28; № 10. - С.6-9.

28. Исследование процессов впрыска и распыливания при работе дизеля на спиртовых топливах / В.А.Марков, В.И.Мальчук, С.Н.Девянин и др. // Грузовик &. - 2004. - № 10. - С.16-20.

29. Влияние характеристик впрыскивания топлива на экономические и экологические показатели дизеля: Тез. Докл. Межд. Симпоз. «Образование через науку»/ Марков В.А., Деянин С.Н., Мальчук В.И. и др.//Отдельный выпуск. – М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2005. С. 98-99.

Подписано в печать 24.06.2005 г. Заказ 174
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии ООО УМЦ «ТРИАДА»
127550, Москва, ул. Лиственничная ал., д.7, корп. 2