

На правах рукописи



Яковлев Сергей Валентинович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ
ВЫБРОСОВ УЛУЧШЕНИЕМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ДИЗЕЛЕ
С СИСТЕМОЙ COMMON RAIL**

05.04.02 – тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2012

Работа выполнена в **ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ)**

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кулманакوف Сергей Павлович

Официальные оппоненты:

Леонов Геннадий Никитович доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», заведующий кафедрой

Лебедев Борис Олегович доктор технических наук, профессор, ФБОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», заведующий кафедрой

Ведущая организация: ОАО ХК «Барнаултрансмаш» г. Барнаул

Защита состоится «25» мая 2012 года в 10⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.004.03, при ФГБОУ ВПО «Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина 46 (тел/факс (3852) 260-516; E-mail: D21200403@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова».

Отзывы на автореферат, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «19» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Свистула А.Е.

ОБЩИЕ ПО ТЕКСТУ СОКРАЩЕНИЯ

ВМТ – верхняя мертвая точка;
ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
КПД – коэффициент полезного действия;
ОГ – отработавшие газы;
ЛО – локальный объем;
ТАНД – топливная аппаратура непосредственного действия;
ЭГФ – электрогидравлическая форсунка;
CR – система топливоподачи Common Rail.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. ДВС - один из основных источников энергии для человечества. В данный момент ДВС является основным преобразователем энергии химических связей углеводородного топлива в механическую работу и, следовательно, основным потребителем нефтепродуктов. Постоянная модернизация существующих и выпускаемых дизелей представляется важнейшей составляющей комплексной программы научно-технического прогресса в энергетике страны. Современная модернизация дизелей – это задачи, направленные на повышение мощностных, экономических показателей двигателей, а также на снижение токсичности ОГ. Показатели дизеля во многом зависят от работы топливоподающей аппаратуры. Одним из эффективных способов решения проблем модернизаций - это применение топливоподающих систем с электронным управлением типа CR, обеспечивающие высокое качество смесеобразования за счет повышенного давления впрыска и гибкое управление законом топливоподачи. Указанной проблеме посвящены работы Н.А. Иващенко, В.А. Вагнера, Л.В. Грехова В.С. Мурзина, А.Л. Маслова, Е.А. Лазарева, М.В. Мазинга, О.В. Олисевича, В.В. Курманова, Г.В. Мельника, В. М. Славущкого, Ю. В. Белозубова, З. В. Каныгина и др. Анализ современного состояния российского дизелестроения показывает, что отрасль несколько лет находится в кризисе. Отечественные системы CR только начинают разрабатываться и нуждаются в научных исследованиях и опытно-конструкторских работах, которые позволяют выбрать конструктивные параметры. Применяемые методы доводки дизелей ориентированы на ТАНД, так как динамика распыленной топливной струи системы CR отличается от ТАНД, то необходимо уточнение этих методик.

Цели исследования – повышение экономичности и снижение токсичности дизеля с топливоподающей системой CR.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **основные задачи:**

- разработка опытной установки с топливоподающей аппаратурой повышенного давления типа CR;
- исследование на безмоторном стенде динамики и структуры

распыленной топливной струи для системы CR;

- проведение моторных испытаний и сравнительного анализа рабочего процесса дизеля при его работе с топливоподающей аппаратурой повышенного давления типа CR и с ТАНД;

- уточнение блока математической модели рабочего процесса дизеля и проведение численных исследований рабочего процесса дизеля с системой топливоподачи CR.

Объект исследования: рабочий процесс дизеля размерностью 13/14 с системой топливоподачи CR.

Предмет исследования: процессы, формирующие экономические и экологические характеристики дизеля с системой топливоподачи типа CR.

Методика исследования. Исследования проведены на основе использования методов теории двигателей и математического моделирования. Методика исследования предусматривала сочетание натурных испытаний с численным экспериментом.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивалась:

- использованием современных поверенных измерительно-регистрирующих приборов;
- применением апробированных методик и стендовых испытаний дизеля, соответствующих государственным стандартам;
- удовлетворительным совпадением расчётных результатов с данными, полученными экспериментально.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях, выносимых на защиту:

- получены экспериментальные характеристики топливной струи системы CR;
- получены экспериментальные характеристики рабочего процесс дизеля с системой CR на базе одноцилиндровой установки УК-2 с объёмно-плёночным смесеобразованием;
- предложен инженерный метод расчёта задержки воспламенения с более полным учётом физико-химических процессов.

Практическая ценность исследования и реализация результатов работы. Данные исследования использованы:

- при выполнении работ по государственному контракту № 02.740.11.0075 «Обеспечение высокоэффективных процессов смесеобразования и сгорания в дизелях, работающих на традиционных и биотопливах, с использованием системы Common Rail повышенного давления»;

- ОАО ХК «Барнаултрансмаш» (г. Барнаул) – при разработке модификаций дизелей;

- ЗАО «АЗПИ» (г. Барнаул) - при разработки модификаций ЭГФ;

- студентами и аспирантами при выполнении дипломных проектов и в диссертационных работах.

Апробация работы. Основные результаты данной работы были представлены на: Международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2010г.); научно-технической

конференции «5-е Луканинские чтения. Решения энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе» (г.Москва, 2011г.); 16 Международном конгрессе двигателестроителей (Харьков – Рыбачье – Украина, 2011г.); научно-технической конференции «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин» (г. Челябинск, 2011г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано десять печатных работ, в том числе три – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и содержание работы. Диссертация содержит 116 с. текста, 29 рисунков, 3 таблицы и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертации, её научной новизне и области практического использования полученных результатов. Дается краткое описание выполненных исследований, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу горения распыленного топлива, зависимости структуры, формы распыленной топливной струи на качество смесеобразования, а так же рассмотрены проблемы и перспективы улучшения энергоэкологических характеристик дизелей с системой CR. Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию разработанной экспериментальной установки для исследований, описанию методики проведения эксперимента и точности измерений.

Экспериментальные исследования проводились на безмоторном и моторном стендах. В основу исследований был положен сравнительный метод. На безмоторном стенде проводилось сравнительное исследование параметров распыленной топливной струи с ТАНД и с системой CR при впрыске в атмосферу. Топливоподача и скоростной режим соответствовали номинальному режиму работы двигателя. В результате обработки экспериментальных снимков были получены геометрические параметры топливной струи, и её структура, характеризующаяся яркостными зонами, а также скорость фронта топливной струи. Границы топливной струи, её яркостные зоны обрабатывались по методу пороговой сегментации – разделения изображения на передний план и фон. Определяя положение сопла распылителя в координатах изображения и вершины по перпендикуляру к оси струи, определялись корневой угол и длина струи. По частоте съёмки и координатам фронта струи, определялась её скорость. В ходе моторных исследований необходимо было установить особенности в протекании рабочего процесса дизеля при его работе с ТАНД и с системой CR. На экспериментальной установке в качестве нагрузочного устройства использовался балансирный электродвигатель. Анализ отработавших газов проводился с помощью лабораторного газоанализатора QUINTOX – 9106, а замер дымности с помощью дымомера Bosch. В ходе экспериментов сбор данных быстродействующих

процессов, происходящих в цилиндре дизеля, и их последующая обработка проводилась с помощью компьютерного комплекса Н-2000 в комплекте с усилителями заряда Kistler, LE-41 и датчиками. Проводились сравнительные испытания с ТАНД и с системой CR на номинальном режиме работы двигателя. Снимались регулировочные и нагрузочные характеристики. Обработка индикаторных диаграмм производилась по методике ЦНИДИ с анализом индикаторного КПД и составляющих неиспользования теплоты в цикле по методике доктора технических наук, профессора Д.Д. Матиевского. Лабораторное оборудование, оценка погрешности и методика обработки результатов исследований позволяют решать задачи данной диссертационной работы.

В третьей главе выполнено сравнительное исследование и получены результаты по динамике распыленной топливной струи, по её структуре для ТАНД (максимальное давление впрыска 60 МПа) и для системы CR (давление впрыска до 180 МПа). Далее были проведены моторные испытания, выполнена сравнительная оценка работы дизеля с системой CR и с ТАНД по показателям экономичности, токсичности ОГ и тепловыделения.

На рисунке 1 приведен пример оптической регистрации впрыска топлива в атмосферу.

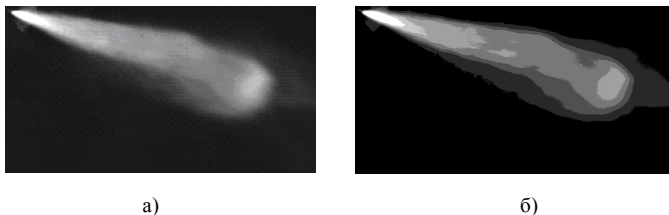


Рисунок 1 - Пример изображения процесса распыливания топлива
 а) исходное изображение (для момента времени 35,5 мкс);
 б) яркостные зоны, выделенные программой ЭВМ на изображении методом пороговой сегментации

По обработанным для сравнительного анализа снимкам распыленных топливных струй с ТАНД и CR установлено, что распыленная топливная струя с CR имеет увеличенный угол (корневой) раскрытия, соответственно большую площадь поперечного сечения струи (разница может достигать до двух раз).

На рисунках 2 и 3 приведены графики изменения длины и площади струи распыленного топлива от различных давлений впрыска. Из рисунка 2 видно, что при увеличении давления топлива в рампе (аккумуляторе), происходит возрастание дальности струи. При сопоставлении площади струи по осевому направлению (рисунок 3) вытекает вывод о том, что при увеличении давления в рампе происходит возрастание площади струи за счет увеличения корневого угла и длины струи при одинаковой продолжительности.

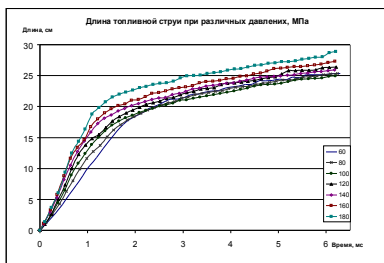


Рисунок 3 - Экспериментальные значения изменения длины топливных струй при различных давлениях впрыска

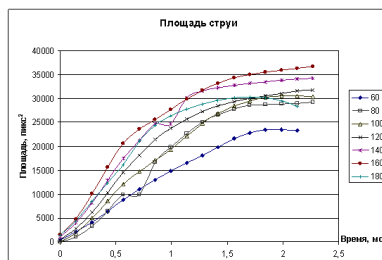


Рисунок 3 - Изменения площади струи распыленного дизельного топлива при различных давлениях впрыска

Для исследования однородности структуры распыленной топливной струи был применен метод пороговой сегментации. Данный метод заключается в разбиении струи по яркости на несколько зон. Яркостные зоны характеризуют интенсивность проходящего излучения, которое определяется концентрацией капель в зонах топливной струи. При этом делается допущение, что диаметр капель принимается постоянным и равным диаметру по Заутеру. При прохождении излучения через распыленную струю, в зонах с высокой концентрацией топлива происходит больше поглощение света, что будет соответствовать меньшей яркости на изображении. Площади на всех графиках приводятся относительно общей площади струи. На рисунке 4 показано сопоставление для 6 зон градаций яркости АЦП: 60, 80, 100, 120, 140 и 160 единиц яркости, для топливных струй ТАНД и для системы CR с различным давлением впрыска. Зона, соответствующая градации 60 единиц яркости АЦП соответствует более плотному участку, как правило, в середине струи и в начале впрыска, на начальных кадрах, пока топливная струя не начала активно распадаться. Сравнение полученных данных позволяют сделать выводы: при росте давления в аккумуляторе в начальный момент времени (при $t = 0,035$ мс) наблюдается увеличение площади темного участка; уменьшение площади более ярких зон струи, для значений 140 и 160 единиц градаций АЦП. Таким образом, струя топлива с системой CR в начальный момент времени более равномерна по структуре, чем струя ТАНД. С развитием струи площадь ярких зон 140 и 160 градаций АЦП увеличивается (рисунок 5).

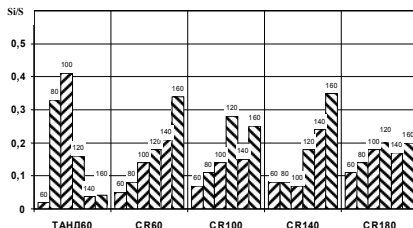


Рисунок 4 – Гистограмма яркостных зон распыленной струи дизельного топлива для ТАНД и CR с различным давлением к моменту времени 0,035 мс

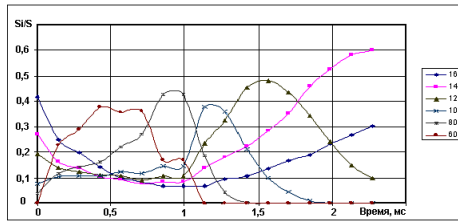


Рисунок 5 – Изменение относительных площадей ярких зон распыленной струи дизельного топлива при давлении впрыска 140 МПа

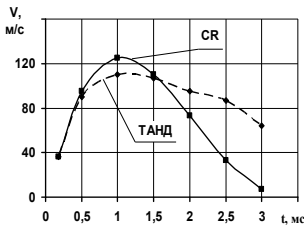


Рисунок 6 – Изменение скорости фронтальной части струи

На рисунке 6 приведены графики изменения скорости фронтальной части струи с системой CR (давление впрыска 140 МПа) и с ТАНД (максимальное давление впрыска 60 МПа) по времени. При анализе данного графика установлено следующее: распыленная струя с CR имеет более высокую скорость, чем с ТАНД в начальные этапы времени. В прошествии времени с удалением от сопла фронт струи дизтоплива с системой CR быстрее теряет скорость, чем фронт струи

с ТАНД. Причины этого в следующем: при росте давления впрыска размер капель топлива уменьшается. Соответственно имеющие меньшую инерцию, они тормозятся встречным потоком воздуха быстрее, чем частицы с меньшим давлением впрыска, которые, имея больший размер, располагают и большей кинетической энергией. В связи с этим, в двигателе оснащенного системой CR следует ожидать перераспределение объемного и пленочного смесеобразования. При этом уменьшится доля топлива, попавшая на стенку, и увеличится доля топлива, распределенная в объеме камеры сгорания, что приведет к изменению характера процесса тепловыделения.

Исследования структуры распыленной топливной струи позволяют оценить качественные характеристики струи и ожидаемые показатели рабочего процесса дизеля. Количественная оценка возможна только при проведении моторных испытаний с использованием комплексной оценки: регистрации мощностных, экономических и экологических показателей и при проведении индицирования – регистрации изменения давления в цилиндре, продолжительности и места топливоподачи.

Для анализа первоначально снимались регулировочные характеристики по углу опережения впрыска и по давлению при различных нагрузках и частотах вращения. После выбора оптимальных значений были проведены исследования на различных режимах на серии нагрузочных характеристиках.

В качестве базового режима был принят номинальный режим при частоте вращения 1750 мин^{-1} , давление топлива в топливной рампе было выбрано равным 140 МПа, угол опережения был выбран 16° п.к.в. до ВМТ. Данный угол является

оптимальным с точки зрения экономичности, токсичности ОГ и пиковых значений температуры и давления цикла.

После определения угла опережения впрыска было исследовано влияние давления впрыска топлива на показатели цикла. С этой целью была получена регулировочная характеристика по давлению в топливной рампе. Давление впрыска менялось в диапазоне от 60 до 160 МПа.

Полученные данные приведены на рисунках 7-9. Анализ регулировочной характеристики (рисунок 7) показывает, что в диапазоне от 60 до 140 МПа индикаторный КПД возрастает, но дальнейшее увеличение давления топлива до 160 МПа обеспечивает весьма незначительный прирост индикаторного КПД. Однако при этом происходит весьма значительное увеличение выбросов окислов азота с 750 до 885 ppm (примерно на 20%), при небольшом уменьшении выбросов окиси углерода с 86 до 72 ppm (рисунок 8). Это увеличение происходит за счет увеличения максимальных давлений и температуры цикла (рисунок 9). Таким образом, для данной комплектации двигателя и топливной системы, не целесообразно стремиться к дальнейшему увеличению давления впрыска свыше 140 МПа. Дальнейшее увеличение давления впрыска приводит к увеличению токсичности отработавших газов и снижает ресурс двигателя, вследствие увеличения термической и механической нагруженности деталей.

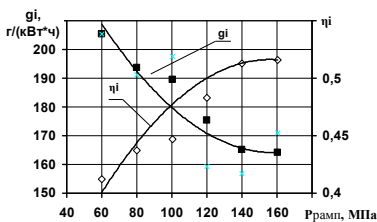


Рисунок 7 – Регулировочная характеристика по давлению впрыска.
Индикаторный КПД и удельный индикаторный расход топлива

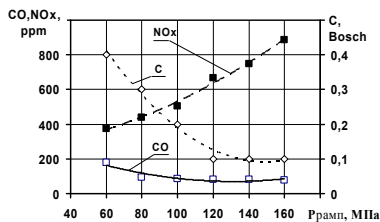


Рисунок 8 – Регулировочная характеристика по давлению впрыска.
Содержание окиси углерода, сажи и окислов азота в отработавших газах

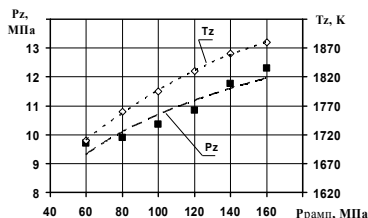


Рисунок 9 - Регулировочная характеристика по давлению впрыска. Максимальное давление и температура цикла

На рисунке 10 приведены индикаторные диаграммы и диаграммы продолжительности топливоподачи. Видно, что с увеличением давления

происходит уменьшение продолжительности топливоподачи, максимальное давление цикла возрастает, точка достижения максимального давления приближается к ВМТ. При этом на линии сгорания наблюдаются скачки давления, тем большие, чем выше давление впрыска.

На рисунке 11 в сравнении приведены диаграммы скорости тепловыделения для системы топливоподачи CR при давлениях 60 и 140 МПа, а так же для ТАНД. Сравнение данных диаграмм показывает:

- максимальная скорость тепловыделения для CR при $p_{\text{рамп}}=140$ МПа составляет 0,057 (9° п.к.в. после ВМТ), а при 60 МПа - 0,038 (18° п.к.в. после ВМТ), для ТАНД – 0,04 (13° п.к.в. после ВМТ);

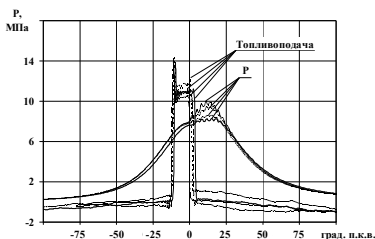


Рисунок 10 – Диаграммы топливоподачи и внутрицилиндрового давления

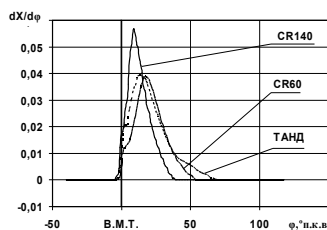


Рисунок 11 –Диаграммы скорости тепловыделения

- общая продолжительность тепловыделения для CR составляет при 140 МПа – 42° п.к.в. (с 4° до ВМТ до 38° после ВМТ), при давлении 60 МПа - 55° п.к.в. (с -3° до 52° после ВМТ), а для ТАНД - 70° п.к.в. (с -2° до 68° после ВМТ).

- различие между кинетической и диффузионной фазой сгорания при давлении впрыска 60 МПа более ярко выражено, при давлении 140 МПа эти две фазы сгорания практически сливаются в одну. Процесс тепловыделения для ТАНД отличается от системы CR тем, что первая и вторая фазы достаточно четко отделяются друг от друга.

Таким образом, характер тепловыделения подтверждает данные оптического исследования развития распыленной топливной струи: уменьшения размера капель топлива, увеличения длины, площади струи, увеличение её однородности с увеличением давления в системе CR.

Характер сгорания при давлении впрыска 140 МПа приближается к характеру сгорания в бензиновом двигателе, что характерно для однородной смеси. Однако при чрезмерном давлении впрыска, обеспечивающем большую однородность смеси и большой объем топливной струи, интенсификация сгорания не приводит к увеличению индикаторного КПД, а ведет к возрастанию максимальной температуры цикла, что обуславливает рост максимального давления цикла p_z и окислов азота.

Индикаторный КПД при увеличении давления в системе CR с 60 МПа до 140 МПа увеличивается с 0,412 до 0,513 (с ТАНД соответственно для максимального давления впрыска индикаторный КПД равен 0,44). Данное

увеличение происходит за счет изменения закона тепловыделения. Основную роль при этом играет увеличение скорости тепловыделения, приближения максимума скорости к ВМТ и сокращение продолжительности ввода теплоты.

Анализ статей неиспользование теплоты и величина индикаторного КПД при увеличении давления впрыска с 60 до 140 МПа показал следующее:

- коэффициент неиспользование теплоты вследствие несвоевременности уменьшился с 0,072 до 0,033 за счет уменьшения продолжительности ввода теплоты, увеличения максимума скорости тепловыделения и приближения его к ВМТ;

- коэффициент неиспользования теплоты на теплообмен уменьшился с 0,049 до 0,045 из-за сокращения продолжительности ввода теплоты и снижения температуры рабочего тела.

В четвёртой главе рассмотрены математические модели рабочего процесса и модели образования токсичных веществ в дизеле. Дан обзор и сделан критический анализ существующих методов. Выбрана и уточнена математическая модель рабочего процесса и образования вредных веществ в камере сгорания дизелей при использовании системы CR, проведено численное исследование по уменьшению окислов азота с применением многостадийного цикла топливоподачи. В работе использована программа "ДИЗЕЛЬ РК", разработанная в МГТУ им. Баумана. По результатам исследования динамики топливной струи с учетом противодействия были получены коэффициенты дальнбойности топливной струи CR для эмпирического выражения А.С. Лышевского, которое используется в данной программе. Численные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1- Значения коэффициентов дальнбойности

$P_{\text{впрыск}}, \text{ МПа}$	100	120	140	160	180
$D_{\text{ф}}$	2,7	2,94	3,17	3,29	3,17

В результате численного исследования окислы азота снижены с применением 4-х стадийного цикла топливоподачи (рисунки 12 и 13) при ухудшении экономичности и увеличения продуктов неполного сгорания в ОГ в сравнение с 1-о стадийным и 2-х стадийным циклов топливоподачи, однако в сравнение с ТАНД экономичность и экологические показатели «выше». В работах академика Я.Б. Зельдовича доказано, что окислы азота, при тепловом взрыве, образуются в результате термического соединения свободного кислорода с молекулами азота. Предварительная топливоподача уменьшает максимальную температуру сгорания, что способствует уменьшению окислов азота.

По такому параметру как задержка воспламенения τ_i программа даёт существенные расхождения с обработанными экспериментальными данными. Так для исследуемого режима с давлением впрыска 60 и 140 МПа "ДИЗЕЛЬ РК" выдает значения τ_i 5,4 и 5,3° п.к.в. тогда, как по обработанным экспериментальным данным получаем τ_i соответственно 11,5 и 8,9° п.к.в. Таким образом, расхождение составляет 53% и 40% соответственно.

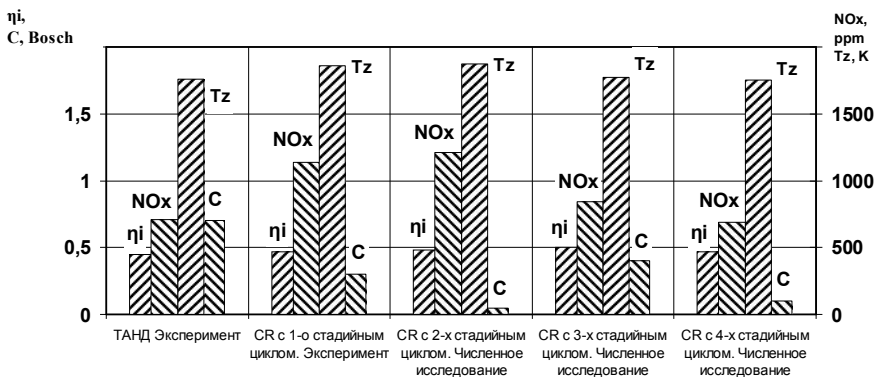


Рисунок 12 – Сравнение индикаторного КПД, углерода, окислов азота и максимальной температуры цикла с различными законами топливоподачи при $p_i=1,3$ МПа, $\theta=16^\circ$ п.к.в. до ВМТ, $n=1750$ мин⁻¹

В связи с этим разработан инженерный метод расчета задержки воспламенения топлива, основанный на работах профессора П.К. Сеначина. Данный метод расчета позволяет учесть параметры рабочего тела в момент впрыска топлива, температуру и размер топливной частиц (капли), время её испарения. В данном расчете предполагается ряд допущений: в качестве очага воспламенения выделяется ЛО; в ЛО предполагается одна капля топлива; её испарение происходит от внутренней энергии ЛО; ЛО не обменивается энергией с окружающим газом и с другими каплями топлива до момента самовоспламенения. Полное время задержки воспламенения представляется как сумма физических и химических задержек:

$$\tau_i = \tau_{\text{физ}} + \tau_{\text{хим}}.$$

Параметры рабочего тела в момент топливоподачи определяются по термодинамическому расчёту.

Под физической задержкой воспламенения топлива понимается время, затраченное на испарение топлива. Определяется по формуле Д.Б. Сполдинга:

$$t_{\text{физ}} = \frac{d_k^2 \rho_{\text{ж}}}{8(\lambda / c_{\text{нар}}) \cdot \ln \left[1 + \frac{c_{\text{нар}}(T_1 - T_f)}{L} \right]}$$

Расчёт диаметра капли производится по уравнению предложенным В.А. Кутовым:

$$d_k = d_0 \cdot \left[\left(1 + \frac{d_c}{d_2} \right) + 2 \left(1 - \frac{p_{\text{ср}}}{2p_1} \right) \cdot \frac{p_1}{p_{\text{ср}} + \frac{p_1}{\pi} \cdot \frac{d_2}{d_c}} \cdot \left(\frac{l_c}{d_c} \right)^{0.125} \right] \cdot \left(\frac{v}{v_0} \right)^{0.15}$$

Температура ЛО, с учетом процессов прогрева каплей от температуры подачи топлива из сопла T_f до температуры кипения T_s и их полного испарения, определяется из уравнения баланса энтальпии в ЛО (при $p=\text{const}$, $\alpha_{\text{ЛО}}=1$) на 1 моль смеси:

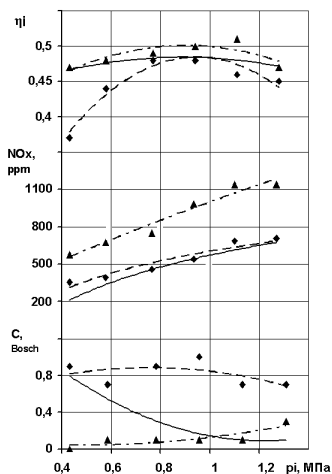


Рисунок 13 – Нагрузочная характеристика при $\theta = 16^\circ$ п.к.в. до ВМТ, $n = 1750 \text{ мин}^{-1}$ (эксперимент: — — — ТАНДИ, — · — — — CR с 1-о стадийным циклом топливоподачи; численное исследование: — — — — — CR с 4-х стадийным циклом топливоподачи)

$$\theta_i = \frac{T_1 \sum_{j=1}^2 a_{ji} C_{pj} + a_{6i} [C_f (T_f - T_s) - L]}{\sum_{j=1}^2 a_{ji} C_{pj} + a_{6i} C_{p6}}$$

За основу оценки химической задержки воспламенения топлива принимается формула О.М. Тодеса для адиабатического теплового взрыва:

$$\tau_{хим} = B p^n \exp(E / RT).$$

С учётом формулы для скорости химической реакции

$$W = k(a_1 a_6)^{s/2} \left(\frac{p}{R\theta} \right)^s \exp\left(-\frac{E}{R\theta}\right),$$

получаем расчётное уравнение для химической составляющей задержки воспламенения:

$$\tau_{хим} = \frac{B_0}{k(a_1 a_6)^{s/2}} \left(\frac{p_1}{R\theta_1} \right)^{1-s} \exp\left(\frac{E}{R\theta_1}\right).$$

По результатам расчета на рисунке 14 представлены графики изменения τ_i от давления впрыска.

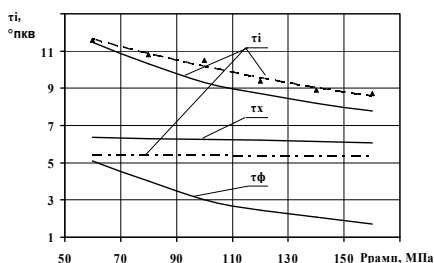


Рисунок 14 – График изменения задержки воспламенения от давления впрыска $\theta = 16^\circ$ п.к.в. до ВМТ, $n = 1750 \text{ мин}^{-1}$ (— — — эксперимент, — · — — — по Дизель-РК, — — — — — по авторской методике)

Закключение

В работе проведена оценка влияния распыленной топливной струи дизельного двигателя с системой топливоподачи CR на его экономические и экологические характеристики. Выявлены особенности работы дизеля с данной системой топливоподачи. Обоснован выбор математической модели рабочего процесса поршневого ДВС, которая отражает основные особенности его функционирования с системой топливоподачи типа CR с точки зрения экономии топлива и токсичности ОГ. Предложено

использовать данную модель рабочего цикла на основе термодинамического подхода, которая реализованная в программе "ДИЗЕЛЬ РК". Предложено уточнение к данной модели: по коэффициентам дальнобойности топливной струи

для CR, по расчёту задержки воспламенения.

В результате настоящего исследования достигнута цель по улучшению экономических и экологических характеристик дизеля интенсификацией процесса смесеобразования и сгорания за счёт повышенного давления впрыска, и выявлено следующее:

1. На основании оптического метода исследования процесса топливоподачи установлено, что при переходе с ТАНД на систему топливоподачи CR её распыленная струя дизельного топлива имеет увеличенный угол раскрытия, длину, площадь, обладает более равномерной структурой. В результате, чего такая распыленная топливная струя охватывает больший объем камеры сгорания.

2. По данным стендовых испытаний установлено, что рабочий процесс с системой CR обладает лучшими экономическими показателями (на номинальном режиме улучшение составляет 13,7%, для системы CR при $p_f=140$ МПа) по причине сокращения периода задержки самовоспламенения; увеличения максимальной скорости тепловыделения; приближения максимума скорости к ВМТ, а так же установлено, что в ОГ уменьшается содержание продуктов неполного сгорания (C на 64%, CO на 48%) и увеличивается концентрация окислов азота на 59%.

3. По результатам численного исследования относительно ТАНД установлено, что с применением 4-х стадийного цикла топливоподачи для системы CR окислы азота снижаются на 3%, экономичность выше на 6,4%, количество сажи в ОГ снижается на 85%.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:
статьи в изданиях, рекомендованных ВАК -

1. Яковлев, С.В. Методика расчёта и анализ времени задержки воспламенения распыленного топлива в цилиндре дизеля / С.П.Кулманаков, С.В.Яковлев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. - №2. – С. 188-194.

2. Яковлев, С.В. Сравнение параметров топливного факела и показателей рабочего процесса дизельного двигателя 1ЧН 13/14 с системой топливоподачи «Common Rail» / С.П.Кулманаков, Д.Д.Матиевский, А.В.Шашев, С.В.Яковлев, С.С.Кулманаков // Вестник академии военных наук. – М., 2011. – №2 (35).– С. 201-204.

3. Яковлев, С.В. Результаты исследования рабочего процесса дизельного двигателя с аккумуляторной и штатной системами топливоподачи /, Д.Д.Матиевский, А.В.Шашев, С.В.Яковлев, С.С.Кулманаков // Вестник академии военных наук. – М., 2011. – №2 (35).– С. 232-239.

публикации в других изданиях -

1. Яковлев, С.В. Экспериментальный комплекс с системой топливоподачи «Common Rail» / С.П.Кулманаков, А.В.Шашев, С.В.Яковлев, В.А.Казанцев // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сб. статей. Часть 2 / Под ред. А.Л. Новоселова / Российская академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. - С. 55-67.
2. Яковлев, С.В. Экспериментальный моторный комплекс с системой топливоподачи типа «Common Rail» для дизельных двигателей размерностью D/S=13/14 / Кулманаков С.П., Шашев А.В., Яковлев С.В. // Сборник научных трудов Международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана //Под ред. Н.А. Иващенко, В.А. Вагнера, Л.В. Грехова. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.-С.334-338.
3. Яковлев, С.В. Сравнительный анализ параметров рабочего процесса дизеля 1С 13/14 с системой топливоподачи типа «Common Rail» и со штатной топливоподающей аппаратурой. / С.П.Кулманаков, А.В.Шашев, С.В.Яковлев, О.В.Дробышев // Сборник научных трудов Международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана //Под ред. Н.А. Иващенко, В.А. Вагнера, Л.В. Грехова. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.-С.338-341.
4. Яковлев, С.В. Исследование параметров топливной струи и показателей рабочего процесса дизеля 1СН 13/14 с системой топливоподачи Common Rail / Д.Д.Матиевский, С.П.Кулманаков, А.Е.Свистула, А.В.Шашев, С.В.Яковлев, С.С.Кулманаков // 5-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тезисы докладов научн.-практ. конф. – М: МАДИ, 2011. – 221 с. С.120-122.
5. Яковлев, С.В. Регистрация и изменение длины топливных струй для различных давлений / А.В.Еськов, С.И.Гибельгауз, С.В.Яковлев // 5-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тезисы докладов научн.-практ. конф. – М: МАДИ, 2011. – 221 с. С.120-122.
6. Яковлев, С.В. Влияние повышенного давления впрыска на предпламенные процессы и индикаторные показатели двигателя 1СН 13/14 с топливоподающей аппаратурой «Common Rail» / С.П.Кулманаков, С.В.Яковлев // Двигатели внутреннего сгорания (Двигуни внутрішнього згорання). – 2011. – №2. – С.34-36.
7. Яковлев, С.В. Анализ результатов моторных исследований рабочего процесса дизеля при использовании системы топливоподачи типа «Common Rail» / С.П.Кулманаков, С.В.Яковлев // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин / Межвуз. сб. выпуск №10 / Под ред. А.В. Вагнера, А.А. Баранова / Алт. Гос. Тех. ун-т им И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – 64с.

Подписано в печать 18.04.2012. Формат 60х84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л.0,93.

Тираж 120 экз. Заказ 2012 - 247

Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8–3852) 29–09–48

Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.