На правах рукописи

ФОМИНЫХ Александр Валерьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ 2Ч 10,5/12,0 ПРИ РАБОТЕ НА МЕТАНОЛЕ И МЕТИЛОВОМ ЭФИРЕ РАПСОВОГО МАСЛА С ДВОЙНОЙ СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург –2017

Работа выполнена на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА).

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Лиханов Виталий Анатольевич**
Официальные оппоненты:	**Сайкин Андрей Михайлович** доктор технических наук, старший научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», г. Москва, начальник управления специальных программ **Зайцев Алексей Борисович** кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцент кафедры «Инжиниринг силовых установок и транспортных средств» Института энергетики и транспортных систем
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится «03» октября 2017 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенного по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главный учебный корпус, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на официальном сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (http://www.spbstu.ru/)

Автореферат разослан «__» _____2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор Хрусталев Борис Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКАРАБОТЫ

Актуальность темы. Практически в любой области промышленности и сельского хозяйства при использовании автотракторного парка двигатели внутреннего сгорания (ДВС) играют важнейшую роль как энергетическая основа транспортных и другого вида установок. Однако постоянно истощающиеся запасы нефтяного топлива, а также ухудшающаяся с каждым днём экологическая обстановка во всём мире, и в нашей стране, приводят к необходимости отыскания альтернативных топлив ненефтяного происхождения.

Интерес, в первую очередь, представляют топлива для производства которых, в промышленных масштабах, в России имеются большие запасы сырьевых ресурсов (природный газ, уголь), в том числе возобновляемые (растительные остатки, бытовые отходы). К таким топливам можно отнести спирты, в особенности метиловый, а также топлива, получаемые из растительного сырья.

Наиболее эффективным способом применения метанола в ДВС на сегодняшний день является подача его непосредственно в цилиндры дизеля с использованием двойной системы топливоподачи (ДСТ) и воспламенением запальной порцией высокоцетанового топлива. В качестве запальной порции возможно применение метилового эфира рапсового масла (МЭРМ), поскольку он является возобновляемым топливом растительного происхождения.

Таким образом, изучение рабочих процессов дизелей, переоборудованных для работы на альтернативных возобновляемых топливах (метиловый спирт и метиловый эфир рапсового масла), является актуальной научной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение, поскольку это позволяет полностью заменить нефтяное моторное топливо, существенно улучшить экологические показатели, путем снижения токсичности и дымности отработавших газов.

Объект диссертационного исследования – тракторный дизель 2Ч 10,5/12,0 воздушного охлаждения с полусферической камерой сгорания, работающий на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи.

Предмет диссертационного исследования – показатели процесса сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля, а также мощностные, экономические и экологические показатели.

Цель. Исследование рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания в поршне при работе на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи, изучение их влияния на процесс сгорания в цилиндре, мощностные, экономические и экологические показатели работы, экономию нефтяного топлива.

Научную новизну работы представляют:

– результаты лабораторно-стендовых и теоретических исследований влияния применения метилового спирта и метилового эфира рапсового масла при впрыскива-

нии (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи на показатели процесса сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0, а также экономические, мощностные и экологические показатели;

– уточненная математическая модель расчета процесса тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи;

– результаты расчета показателей процесса тепловыделения и построение расчётной индикаторной диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи;

– рекомендации по улучшению экономических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 путем оптимизации регулировок по установочному углу опережения впрыскивания топлива и величине запальной порции при работе дизеля на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи.

Практическая ценность работы и реализация результатов исследований в том, что исследован рабочий процесс дизеля с полусферической камерой сгорания в поршне при работе на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием ДСТ, их влияние на процесс сгорания в цилиндре, мощностные, экономические и экологические показатели работы, экономию нефтяного топлива. Уточненная математическая модель расчета процесса, дальнейшие расчеты и построения позволяют значительно уменьшить затраты времени и средств при дальнейших исследованиях. Предложенные рекомендации позволяют производить модернизацию уже существующих дизелей для работы на альтернативных топливах.

Материалы диссертации используются в учебном процессе Вятской, Нижегородской, Чувашской государственных сельскохозяйственных академий, при чтении лекций, выполнении курсовых работ и дипломном проектировании для студентов, обучающихся по образовательным программам 35.03.06, 23.03.03, 35.04.06, 23.04.03.

Экономическая эффективность. Экономическая эффективность применения метанола и МЭРМ составляет 6885 руб./год за счет снижения ущерба, наносимого токсичными компонентами, выбрасываемыми с ОГ и 33980 руб./год за счет применения более дешевого топлива на один двигатель при годовой наработке в 500 моточасов (в ценах на январь 2017 года).

Положения выносимые на защиту:

– результаты лабораторно-стендовых и теоретических исследований влияния применения метилового спирта и метилового эфира рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи на показатели процесса сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0, а также экономические, мощностные и экологические

показатели;

– уточненная математическая модель расчета процесса тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи;

– результаты расчета показателей процесса тепловыделения и построение расчетной индикаторной диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи;

– рекомендации по улучшению экономических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 путем оптимизации регулировок по установочному углу опережения впрыскивания топлива и величине запальной порции при работе дизеля на метиловом спирте и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи.

Методология и методы исследования: применялись современные методы экспериментальных и теоретических исследований, заключающиеся в проведении стендовых испытаний дизеля 2Ч 10,5/12,0 на современном научном оборудовании при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи, с дальнейшей обработкой данных по передовым методикам ведущих НИИ и ВУЗов, основанных на применении современных теорий рабочих процессов ДВС.

Достоверность научных положений, результатов и выводов, содержащихся в диссертационной работе, основываются на применении:

- апробированных методов и средств исследования при проведении стендовых испытаний дизеля.

- известных приемов обработки экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях.

Личный вклад автора. Автором выполнен анализ публикаций по теме диссертационного исследования и намечен план работы. Автор принял участие в разработке уточнённой математической модели процесса сгорания топлива при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла. Автором был выполнен полный цикл стендовых испытаний дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с ДСТ с последующей обработкой результатов, их анализом, представлением материалов в публикациях и выступлениях на конференциях. Материалы диссертации основаны на исследованиях автора в период с 2012 г. по 2017 г.

Апробация работы. Основные результаты и материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 6-ой, 7-ой, 8-ой, 9-ой, 10-ой Международных научно-практических конференциях «Наука – Технология – Ресурсосбережение», 2013-2017 гг. (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, г. Киров); 15-ой, 17-ой, 18-ой и 19-ой Международных научно-практических конференциях «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства»,

2013, 2015, 2016, 2017 гг. (ФГБОУ ВО Марийский ГУ, Йошкар-Ола); Международной научно-практической конференции аспирантов и молодых учёных «Знания молодых: наука, практика и инновации», 2013…2016 гг. (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, г. Киров); Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации», 2013, 2014 гг. (ФГБОУ ВПО Вятский ГУ, г. Киров); XI Всероссийской научно – практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Молодёжь и инновации», 2015 г. (ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, г. Чебоксары), VII Всероссийской научно-практической конференции «Основные направления развития техники и технологии в АПК», 2015 г. (ГБОУ ВО НГИЭУ, г. Княгинино); 2-м этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений МСХ РФ, 2016 г. (ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа); 3-м этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений МСХ РФ, 2016 г. (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва), Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние прикладной науки в области механики и энергетики», 2016 г. (ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, г. Чебоксары).

Публикации результатов исследований. Основные результаты и положения диссертационной работы опубликованы в 37 печатных работах, включая монографию объёмом 8,6 п.л., 6 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, объёмом 1,5 п.л. и 30 статей, входящих в материалы Международных и Всероссийских конференций с общим объёмом 6 п.л. Без соавторов опубликовано 4 статьи общим объемом 0,75 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 168 страницах, в том числе 134 стр. текста, содержит 52 рисунка и 12 таблиц. Список литературы изложен на 24 стр., включает 186 наименований, в том числе 12 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложена научная новизна и практическая значимость работы, основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ работ, выполненных по тематике рассматриваемой задачи. Возможность использования в дизелях альтернативных видов топлива ненефтяного происхождения, в том числе метанола и метилового эфира рапсового масла рассматривались в работах таких авторов как: Анфилатов А.А., Вилькавичюс Г.П., Гущин С.Н., Звонов В.А., Кострюков Н.В., Лиханов В.А., Лопатин О.П., Лоптев С.М., Луканин С.М., Малов Р.В., Махов В.З., Мосесов А.Ш., Попов В.М., Разовский А.Я., Романов С.А., Салимзянов А.А., Смирнов А.Ю., Торопов А.Е., Хачиян А.С., Чувашев А.Н., Гусаков С.В., Девянин С.Н., Жосан А.А., Иващенко Н.А., Корпач А.А.,

Коршунов Д.Д., Кулманаков С.П., Кухарёнок Г.М., Лебедев С.В., Левковский А.А., Марков В.А., Марченко А.П., Матиевский Д.Д., Пономарёв В.Е., Савельев Г.С., Семёнов В.А., Смайлис В., Уханов А.П., Шашев А.В.и др.

Проведенный анализ результатов научных исследований показывает, что отечественными и зарубежными учеными исследованы возможности использования в дизелях в качестве моторного топлива метанола и применения МЭРМ.

Вместе с тем необходимо отметить, что исследования по применению метанола и МЭРМ в качестве моторного топлива проводились без изучения комплексного влияния на экологические, эффективные показатели и показатели рабочего процесса в цилиндре дизеля. Нет работ, посвященных изучению рабочего процесса при одновременной подаче метанола и МЭРМ в цилиндр дизеля и их совместного влияния на экологические и эффективные показатели работы двигателя. Вследствие этого имеются основания полагать, что исследование рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ является **актуальной научной задачей**, имеющей важное народнохозяйственное значение и практическую значимость.

На основании поставленной цели сформулированы **задачи исследований:**

– определить регулировочные параметры топливоподающей аппаратуры по установочному углу опережения впрыскивания топлива (УОВТ) и величине запальной порции, обеспечивающие получение оптимальных параметров рабочего процесса дизеля и наилучшие экономические показатели при работе на метаноле и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с ДСТ;

– провести лабораторно-стендовые и теоретические исследования влияния применения метанола и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием ДСТ на мощностные, экономические и экологические показатели, а также показатели процесса сгорания и тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания в поршне;

– разработать уточнённую математическую модель расчета процесса тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с ДСТ;

– рассчитать показатели процесса сгорания и тепловыделения с использованием предложенной математической модели;

– разработать рекомендации для оптимизации рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием ДСТ.

Во второй главе представлены теоретические исследования процессов топливоподачи и сгорания при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ. При этом расчет процесса топливоподачи основывался на экспериментальных данных, полученных в результате измерения давления топлива p_i. Данные использовались для расчёта давления впрыска в зависимости от угла поворота коленчатого вала, а далее для построения законов топливоподачи с использованием следующих уравнений.

Уравнение равновесия сил действующих на иглу распылителя. Для многодырчатой форсунки оно запишется как

$$M \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = \left(f_и - f_и^{'}\right) \cdot \left(p_ф - p_{ф0}\right) + f_и^{'} \cdot p_ф^{'} - \delta \cdot y, \qquad (1)$$

где M – масса иглы форсунки; $f_и$ – площадь поперечного сечения иглы на которую действуют $p_ф$ и $p'_ф$; $f'_и$ – площадь поперечного сечения под посадочным диаметром конуса иглы; $p_ф$ – текущее давление топлива в форсунке, полученное из осциллограммы; $p_{ф0}$ –давление начала топливоподачи; $p'_ф$–давление топлива между запорным конусом иглы и отверстиями распылителя; δ – коэффициент жёсткости пружины.

Текущая величина давления в центральном канале распылителя $p'_ф$

$$p_ф^{'} = \frac{k^2}{1+k^2} \cdot \left(p_ф - p_ц\right) + p_ц, \qquad (2) \qquad k = \frac{\mu_н \cdot f_н}{\mu_c \cdot f_c}, \qquad (3)$$

где $p_ц$–давление в цилиндре; $\mu_н$–коэффициент расхода через сечение под иглой распылителя; μ_c–коэффициент расхода через сопла распылителя; $f_н$–площадь проходного сечения под иглой распылителя; f_c–суммарная площадь отверстий распылителя.

Для расчёта площади проходного сечения под конусом иглы многодырчатой форсунки $f_н$ по геометрическим размерам можно использовать выражение

$$f_н = \pi \cdot \sin\frac{\tau}{2} \cdot \left(d_{рк} - \frac{1}{2} y \cdot \sin\tau\right) \cdot y. \qquad (4)$$

При расчёте процесса топливоподачи ускорение иглы для каждого интервала расчёта Δt принимается постоянным. Тогда при сделанном допущении уравнение перемещения иглы распылителя на каждом интервале расчёта запишется как

$$y = \frac{1}{1+B \cdot \delta} \cdot \left[y_0 + C \cdot \frac{\Delta\varphi}{6 \cdot n} + B \cdot \left(f_и - f_и^{'}\right) \cdot \left(p_ф - p_{ф0}\right) + B \cdot f_и^{'} \cdot p_ф^{'}\right], \quad (5) \qquad B = \frac{\Delta\varphi^2}{72 \cdot M \cdot n^2}, \quad (6)$$

где n – частота вращения коленчатого вала двигателя; C – начальная скорость иглы.

Уравнение равновесия действующих сил на иглу распылителя для штифтовой форсунки запишется

$$M \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = \left(f_и - f_и^{'}\right) \cdot \left(p_ф - p_{ф0}\right) + (f_и^{'} - f_ш) \cdot p_ф^{'} + f_ш \cdot p_ц - \delta \cdot y. \qquad (7)$$

Тогда уравнение перемещения иглы для штифтовой форсунки запишется

$$y = \frac{1}{1-B \cdot \delta}\left[y_0 + C_0 \cdot \Delta t + B \cdot \left(f_и - f_и^{'}\right) \cdot \left(p_ф - p_{ф0}\right) + B \cdot \left(f_и^{'} - f_ш\right) \cdot p_ф^{'} + B \cdot f_ш \cdot p_ц\right]. \qquad (8)$$

При этом площадь соплового отверстия зависит от подъёма иглы и определится из выражения

$$f_c = \pi \cdot \left[d_ш + 0{,}5 \cdot \sin\tau \cdot \left(y - y_н\right)\right] \cdot \sin\frac{\tau}{2} \cdot \left(y - y_н\right). \qquad (9)$$

Закон топливоподачи в дифференциальной форме (рисунок 1) запишется

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = \frac{\mu_c \cdot f_c}{6 \cdot n} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_ф^{'} - p_ц)}. \qquad (10)$$

Интегральный закон топливоподачи

$$\sigma = \int (d\sigma / d\varphi) d\varphi \approx \sum_{i=1}^{m} \frac{d\sigma}{d\varphi} i \cdot \Delta\varphi. \qquad (11)$$

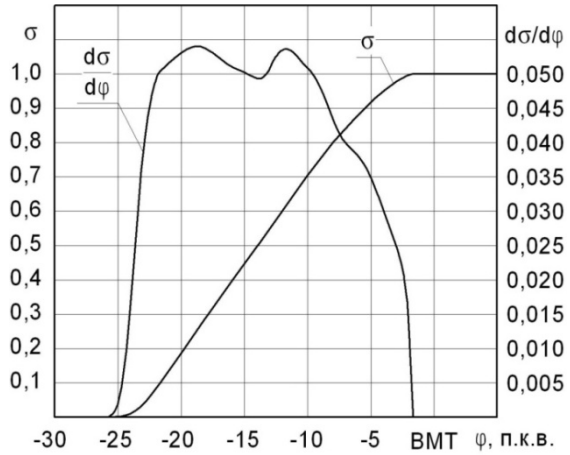


Рисунок 1 – Интегральный и дифференциальный законы подачи метанола

В связи с особенностями процесса тепловыделения при горении метанола и МЭРМ с ДСТ нами было предложено дифференциальную характеристику тепловыделения описывать двумя кривыми, соответствующим начальному периоду горения и периоду догорания (рисунок 2). При этом за основу взята модель, предложенная А. Филипковским. Тогда в функции угла поворота коленчатого вала уравнения скорости тепловыделения для каждого из характерных периодов сгорания запишутся как

$$\left(\frac{d\chi}{d\varphi}\right)_I = -E\cdot C\cdot\left(m_1+1\right)\cdot\varphi_I^{m_1}\cdot\exp\left(C\cdot\varphi_I^{m_1+1}\right)\cdot\left(1-\frac{10\cdot\overline{\tau}_{m_1}^2\cdot\varphi_I^{\overline{\tau}_{m_1}}\cdot\ln\varphi_I}{m_1+1}\right)/\varphi_{z1}, \qquad (12)$$

$$\left(\frac{d\chi}{d\varphi}\right)_{II} = -D\cdot C\cdot\left(m_2+1\right)\cdot\varphi_{II}^{m_2}\cdot\exp\left(C\cdot\varphi_{II}^{m_2+1}\right)\cdot\left(1-\frac{10\cdot\overline{\tau}_{m_2}^2\cdot\varphi_{II}^{\overline{\tau}_{m_2}}\cdot\ln\varphi_{II}}{m_2+1}\right)/\varphi_{z2}, \qquad (13)$$

где E, D – множители, связывающие оба периода тепловыделения и определяемые в зависимости от количества теплоты выделившегося при сгорании.

Полагаем, что процесс сгорания топлива в двигателе при работе на метаноле и запальном МЭРМ является суммой двух процессов горения развивающихся по различным механизмам. Одновременно происходит кинетическое горение паров метанола поступивших в цилиндр дизеля и испарившихся к моменту начала воспламенения, описываемое кривой $(d\chi/d\varphi)_I$ и диффузионное горение запального топлива с догорающими каплями метанола не успевшими испариться до начала воспламенения (кривая $(d\chi/d\varphi)_{II}$). В этом случае площадь фигуры ограниченной между двумя дифференциальными кривыми тепловыделения (σ_u) будет численно равна доле теплоты, которую несёт в себе топливо, испарившееся к началу горения. Для расчёта доли топлива, испарившегося к началу воспламенения, используем уравнение испарения в цилиндре дизеля в процессе топливоподачи. В дифференциальной форме оно выглядит как

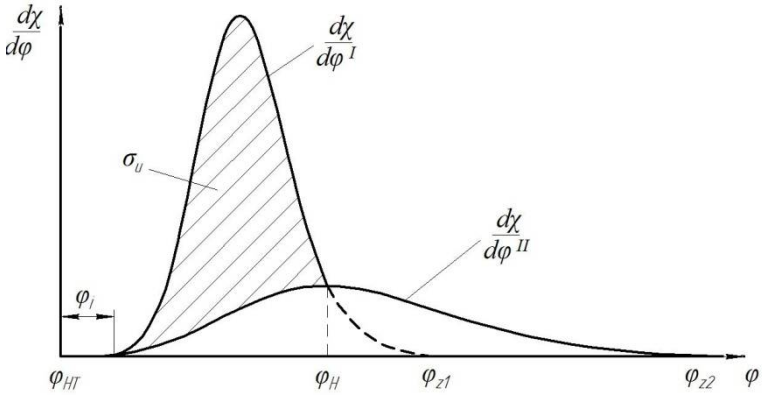


Рисунок 2 – Схема расчета скорости тепловыделения

$$\frac{d\sigma_u^{'}}{d\varphi} = \frac{\sigma}{\varphi}\cdot\left[1-\left(1-\frac{b_u\cdot\varphi}{6\cdot n}\right)^{\frac{3}{2}}\right]. \qquad (14)$$

Тогда при известном законе топливоподачи σ количество топлива испарившееся к моменту начала воспламенения φ_B можно получить как

$$\sigma_u^{'} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_B}\frac{\sigma}{\varphi}\cdot\left[1-\left(1-\frac{b_u\cdot\varphi}{6\cdot n}\right)^{\frac{3}{2}}\right]d\varphi. \qquad (15)$$

Поскольку на завершающей стадии тепловыделения сгорание носит диффузионный характер, то полагаем, что общая продолжительность тепловыделения φ_{z2} будет определяться длительностью догорания крупных капель запального МЭРМ

$$\varphi_{выг} = \varphi_u \cdot \left[1 + A \cdot K_{ИТ} / (\alpha - 1)\right], \qquad (16)$$

где φ_u – длительность испарения крупных капель; α – воздушно-топливное отношение в цилиндре; $K_{ИТ}$ – константа испарения теоретическая; A – коэффициент влияния.

С учётом коэффициента недогорания топлива величина D определится из выражения $D = 1 - \gamma - \sigma_u$.

Тогда при известной продолжительности сгорания топлива φ_{z2} и длительности начального периода сгорания φ_H параметр E, условная продолжительность первого периода сгорания φ_{z1} и параметр $\overline{\tau}_{m1}$ определятся из решения системы уравнений

$$\begin{cases} \chi_I(\varphi_H) = \chi_{II}(\varphi_H) \\ \dfrac{d\chi_I}{d\varphi}(\varphi_H) = \dfrac{d\chi_{II}}{d\varphi}(\varphi_H) \\ \overline{\tau}_{m1} = 2{,}7 \cdot \varphi_i / \varphi_{z1} + 0{,}2 \end{cases} . \quad (17)$$

Результаты расчета тепловыделения представлены на рисунке 3.

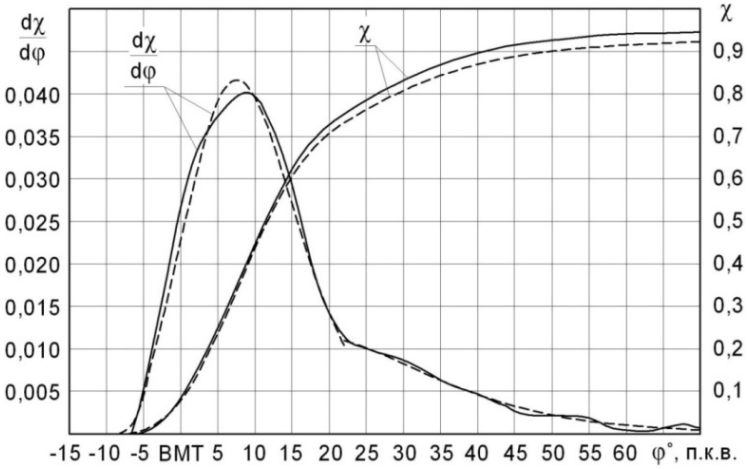


Рисунок 3 – Характеристики тепловыделения дизеля при n = 1800 мин$^{-1}$, p_e = 0,588 МПа; ——— экспериментальная; — — — — расчетная

Расчётную индикаторную диаграмму (рисунок 4) строим по методике ЦНИДИ. Тогда функция скорости нарастания давления для i-го интервала расчёта определится как

$$\left(\frac{dp}{d\varphi}\right)_i = \frac{\left(\dfrac{d\chi}{d\varphi}\right)_i \cdot (Q_{Нэк} + (C_i - 0{,}7) \cdot T_i + 182) \cdot q_{сум} - (C_i \cdot a_5 + a_4) \cdot p_{i-1} \cdot b + \left(\dfrac{dQ}{d\varphi}\right)_i}{C_i \cdot a_1 \cdot \varepsilon}, \qquad (18)$$

где $dQ/d\varphi$ – скорость отвода теплоты; $d\chi/d\varphi$ – скорость тепловыделения; $Q_{Нэк}$ – эквивалентная низшая теплота сгорания топлив; C – теплоёмкость рабочего тела; $q_{сум}$ – суммарная цикловая подача топлива; a_1, a_4, a_5, b, ε – конструктивные параметры двигателя; T – осреднённая температура в цилиндре

$$T_i = \frac{p_{i-1} \cdot \varepsilon \cdot a_1}{G_a}. \qquad (19)$$

Тогда индикаторное давление в цилиндре

$$p_i = \frac{dp / d\varphi_i + dp / d\varphi_{i-1}}{2} \cdot \Delta\varphi \ . (20)$$

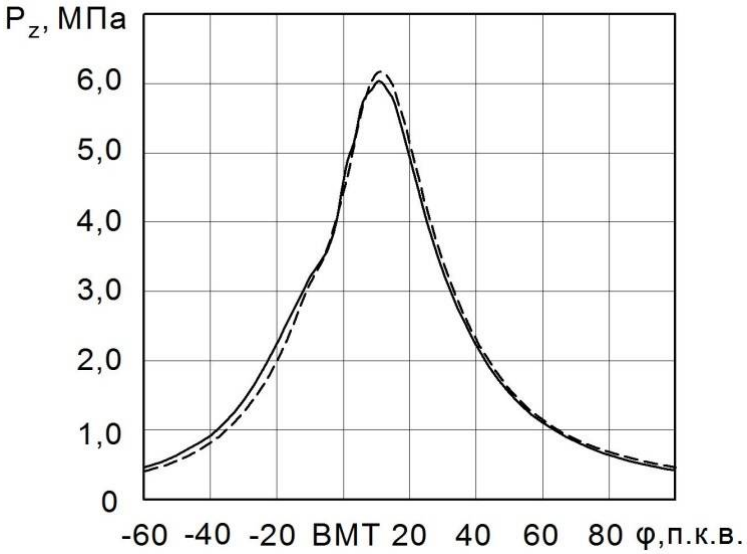


Рисунок 4 – Индикаторная диаграмма при n = 1800 мин$^{-1}$, p_e = 0,588 МПа; ——— экспериментальная; — — — — расчетная

В третьей главе представлена методика, по которой проводились экспериментальные исследования, а также созданная экспериментальная установка, использованные приборы и оборудование. Экспериментальная установка состоит из электротормозного стенда SAK-N 670, дизеля 2Ч 10,5/12,0, оборудованного ДСТ (рисунок 5). Испытания проводились на различных нагрузочных и скоростных режимах работы. При проведении стендовых испытаний использовались летнее ДТ (ГОСТ 305-82), моторное масло М-10 $Г_2$ (ГОСТ 17479.1-85), метанол (ГОСТ 2222-95) и МЭРМ (ГОСТ Р 53605-2009). Индицирование процесса сгорания проводилось при помощи пьезокварцевого датчика давления PS-01, установленного в головку первого цилиндра.

Рисунок 5 – Дизель 2Ч 10,5/12,0 оборудованный ДСТ

Сигнал с датчика усиливался при помощи дифференциального усилителя заряда AQ05-A1.001, который передает сигнал на компьютер через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) La-2USB12. Обработка диаграмм при расчете параметров тепловыделения производилась с учётом требований ЦНИДИ-ЦНИИМ. На кожухе маховика дизеля установлен датчик в.м.т. модели 11.3845. Отбор и анализ проб ОГ производился при помощи системы газового анализа АСГА-Т. Дымность ОГ определялась с использованием дымомера «BOSCH» EFAW-68A. При этом во время стендовых испытаний, при анализе ОГ, а также при эксплуатации измерительных приборов и оборудования учитывались требования ГОСТ Р ИСО 8178-7-99; ГОСТ 10578-95; ГОСТ 15888-90; ГОСТ 10579-88; ГОСТ 17.2.1.03-84; ГОСТ 17.2.1.02-76; ГОСТ 17.2.2.02-98; ГОСТ 17.2.2.01-84; ГОСТ 18509 – 88; ГОСТ Р 17.2.2.07-2000; ГОСТ Р 41.96-2011.

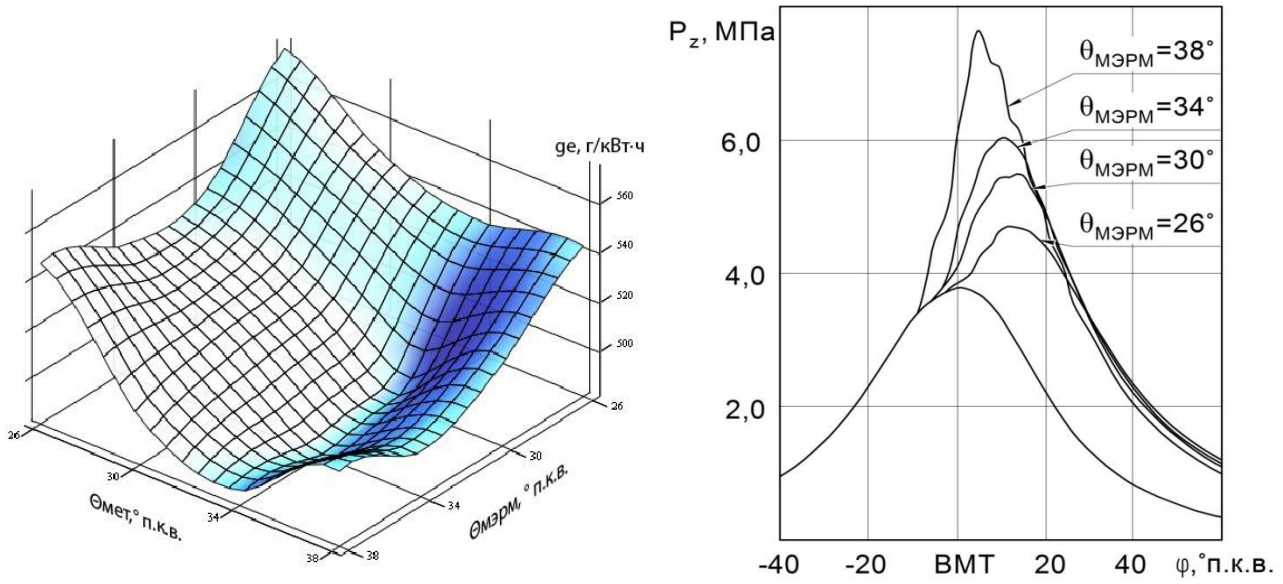
В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований и расчетов влиянии применения метанола и МЭРМ в дизеле 2Ч 10,5/12,0 с ДСТ на регулировочные параметры, экономические и экологические показатели, показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения на различных режимах работы дизеля.

В результате проведения регулировочных испытаний дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ (рисунок 6, а) можно сделать вывод, что оптимальными с точки зрения экономичности являются углы начала подачи $\Theta_{мет} = 34°$ и $\Theta_{МЭРМ} = 34°$. При этих углах на номинальном режиме (n=1800 мин$^{-1}$, p_e=0,588 МПа) достигается минимальный суммарный удельный эффективный расход топлива.

На рисунке 6, б представлены для сравнения индикаторные диаграммы, полученные при оптимальном (с точки зрения экономичности) угле подачи метанола $\Theta_{мет} = 34°$ и различных $\Theta_{МЭРМ}$. Как видно из диаграмм поздняя подача запального МЭРМ приводит к смещению точки начала воспламенения вправо, вследствие чего весь процесс сгорания сдвигается на линию расширения, что приводит к снижению

максимального давления газов в цилиндре.

На рисунке 7, а представлены индикаторные диаграммы дизеля 2Ч 10,5/12,0, полученные при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ в сравнении с дизельным процессом на номинальном режиме. Результаты индицирования показывают некоторое уменьшение максимального давления газов в цилиндре, а весь процесс сгорания при этом несколько сдвигается за линию в.м.т. Это приводит к снижению «жёсткости» процесса сгорания в сравнении с ДТ.



а) б)

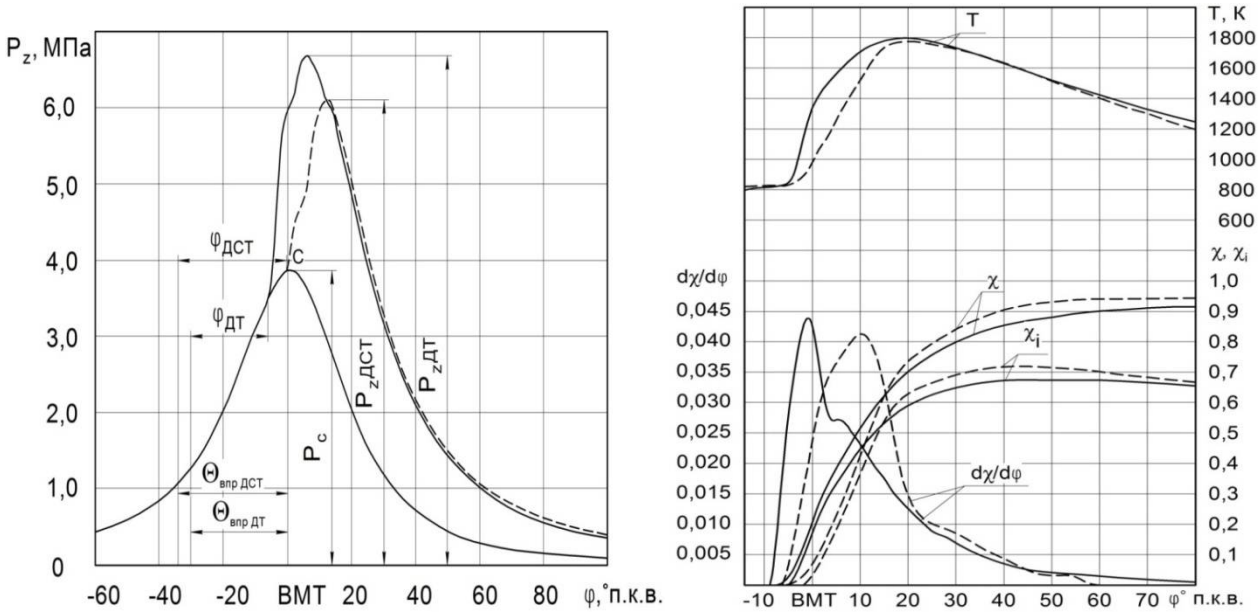
Рисунок 6 - Изменение удельного эффективного расхода топлива дизеля 2Ч 10,5/12,0 (а) и совмещенные индикаторные диаграммы при $\Theta_{мет}$ = 34° и различных установочных углах опережения впрыскивания МЭРМ (б) при n = 1800 мин$^{-1}$, p_e = 0,588 МПа и $q_{цМЭРМ}$ = 9,7 мг/цикл

Анализ характеристик тепловыделения, представленных на рисунке 7, б, показывает, что при работе дизеля на метаноле и МЭРМ происходит смещение максимума скорости тепловыделения вправо от в.м.т. Одновременно с этим происходит снижение $(d\chi/d\varphi)_{max}$ от 0,044 при работе на ДТ до 0,041 при переходе на метанол и МЭРМ. Кроме того как видно из графика при работе дизеля на альтернативном топливе кривая χ лежит выше чем при работе на ДТ, что свидетельствует о более полном сгорании топлива в цилиндре дизеля.

Из рассмотрения показателей процесса сгорания, представленных на рисунке 8, а, видно, что при работе дизеля на метаноле и МЭРМ наблюдается снижение максимального давления в цилиндре, что приводит к снижению «жесткости» процесса сгорания почти на всех нагрузочных режимах работы. Кроме того происходит незначительное снижение максимальной осредненной температуры газов.

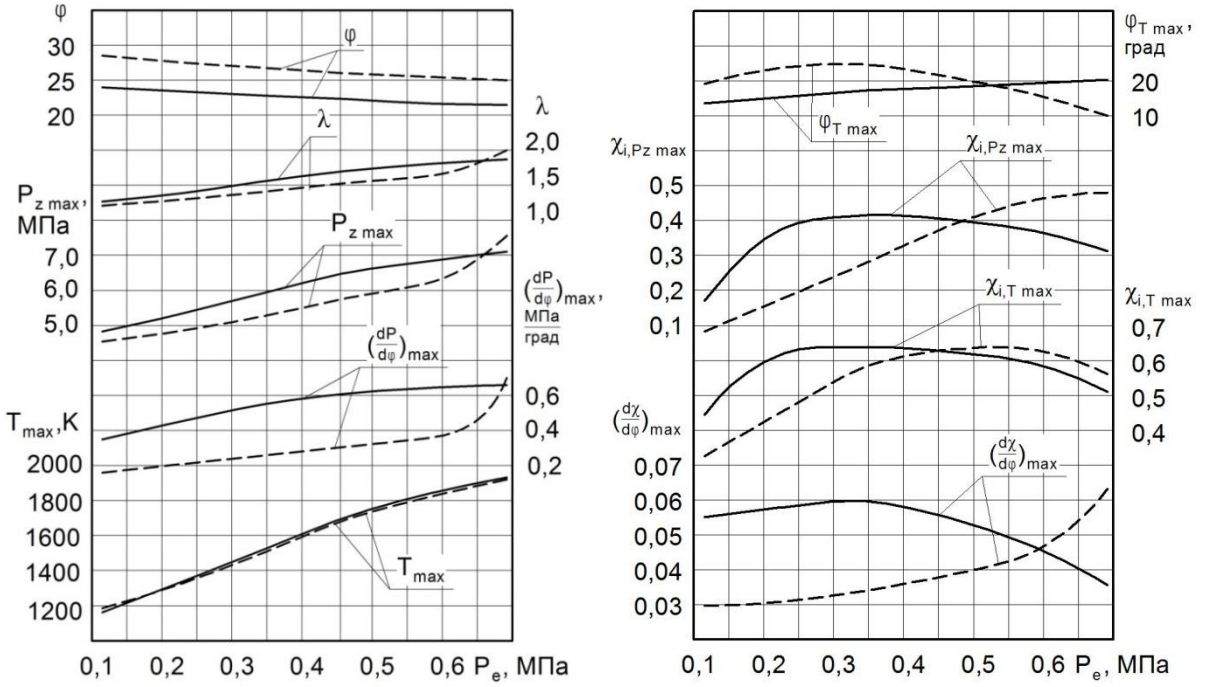
На рисунке 8, б представлены характеристики тепловыделения при различной степени нагружения дизеля, полученные на номинальной частоте вращения. При этом, как можно видеть из рисунка, на средней и малой нагрузке максимальная скорость тепловыделения при работе двигателе на метаноле и МЭРМ с ДСТ существенно ниже, чем на ДТ. С ростом нагрузки скорость тепловыделения при работе на метано-

ле и МЭРМ возрастает значительно и превышает дизельный процесс. Похожая закономерность наблюдается и для значений активного выделения теплоты χ_i при $p_{z\,max}$ и T_{max}. Все это свидетельствует о росте интенсивности выгорания топлива с увеличением нагрузки дизеля.



а) б)

Рисунок 7 – Сравнительные индикаторные диаграммы (а) и характеристики тепловыделения (б) при n = 1800 мин$^{-1}$, p_e = 0,588 МПа:
—— - дизельный процесс; - - - - метанол с запальным МЭРМ



а) б)

Рисунок 8 - Изменение показателей процессасгорания (а) и характеристик тепловыделения (б) дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения нагрузки при n = 1800 мин$^{-1}$, p_e = 0,588 МПа:
—— - дизельный процесс; - - - - метанол с запальным МЭРМ

На рисунке 9 представлены эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения частоты вращения. Можно отметить, что существенно возрастает суммарный расход топлива при работе на метаноле и МЭРМ по отношению к ДТ. Однако данное увеличение расхода топлива обусловлено лишь меньшей энергонасыщенностью метанола и эфира по отношению к ДТ. Эффективность рабочего процесса можно оценить по эффективному к.п.д. (η_e), который при работе на метаноле и МЭРМ всюду выше, чем при работе на ДТ. Так, при частоте вращения n=1200 мин$^{-1}$ рост к.п.д. составил 7,1 %, а при n=2000 мин$^{-1}$ – 3,2 %. Влияние применения метанола и МЭРМ с ДСТ на экологические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 представлено на рисунке 10. Анализ графиков показывает, что применение метанола и МЭРМ позволяет снизить выбросы основных токсичных компонентов таких как оксиды азота и сажа на всех скоростных режимах работы дизеля. При этом на номинальном режиме работы снижение выбросов NO_x достигает 47,4 %. Сажа снижается от 7,3 до 12,1 раза в зависимости от изменения частоты вращения.

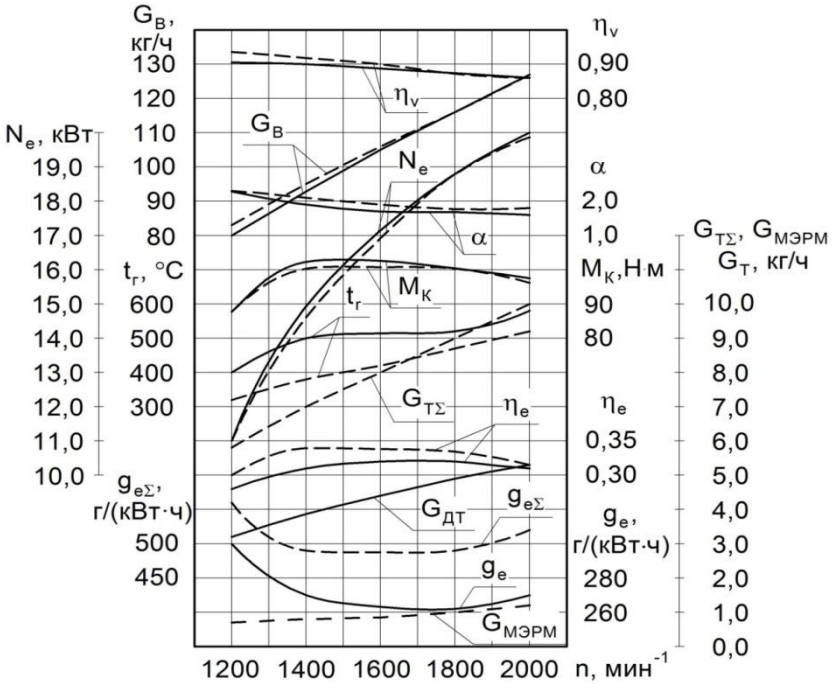


Рисунок 9 - Влияние частоты вращения на эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0:
— - дизельный процесс; - - - - метанол и МЭРМ

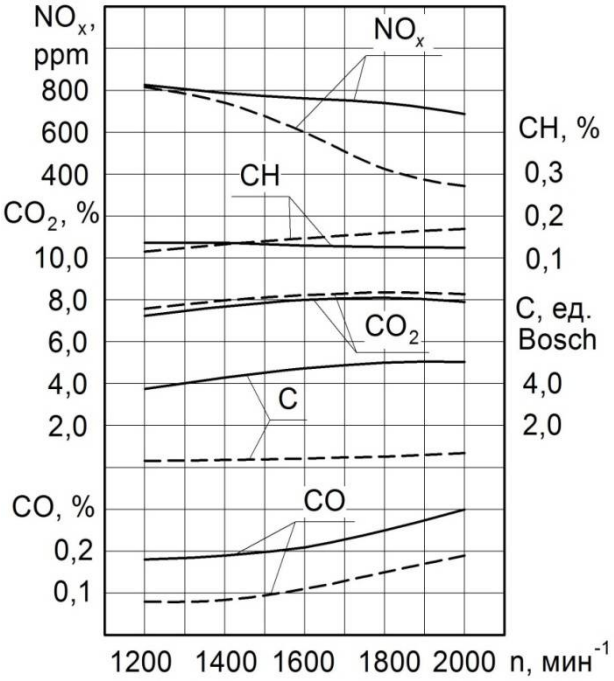
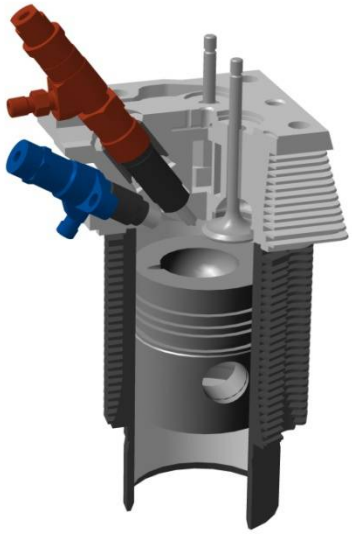


Рисунок 10 - Влияние частоты вращения на экологические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0: — - дизельный процесс; - - - - метанол с запальным МЭРМ

В пятой главе представлен разработанный на базе кафедры ТД, А и Т макетный образец трактора Т – 30 А 80, оборудованный двойной системой топливоподачи для работы на метаноле и МЭРМ (рисунок 11). Экспериментальный трактор обладает улучшенными экологическими характеристиками и может применяться как в городском коммунальном хозяйстве, так и в помещениях с ограниченным воздухообменом (теплицах, складах, животноводческих комплексах).



а) б)

Рисунок 11 – Общий вид трактора Т - 30 работающего на метаноле и МЭРМ (а) и модель головки цилиндра оборудованной ДСТ (б)

В **шестой главе** рассчитана экономическая эффективность использования метанолаи МЭРМ в качестве моторного топлива в дизеле 2Ч 10,5/12,0. Экономический эффект за счет снижения ущерба, наносимого токсичными компонентами ОГ дизеля составил 6885 рублей на один двигатель в год. А также достигается экономия средств за счет применения более дешевого топлива, которая составляет 33980 руб./год на один двигатель при годовой наработке в 500 мото-часов (в ценах на январь 2017 г.).

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании расчетно-теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты.

1. Определены оптимальные установочные УОВТ равные для метанола $\Theta_{мет}$ = 34°, для метилового эфира рапсового масла $\Theta_{МЭРМ}$ = 34°. При данных углах достигается минимальный суммарный удельный эффективный расход топлива, который составляет $g_{e\Sigma}$ = 490 г/(кВт·ч) при работе на номинальном режиме.

2. На основании проведенных экспериментальных исследований было установлено, что при работе на метаноле и МЭРМ не происходит снижение мощностных показателей дизеля, но применение данных топлив позволяет полностью исключить необходимость применения нефтяного дизельного топлива. В результате проведенных стендовых испытаний были определены мощностные и экономические показатели работы, а также показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения двигателя 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла в сравнении с дизельным процессом. При этом было установлено, что с применением данных топлив происходит смещение максимума эффективного к.п.д. в сторону высоких нагрузочных режимов работы. На номинальном режиме наблюдается рост к.п.д. на 3,1 % и составляет 0,33 (при работе дизеля на ДТ – 0,32).

3. Анализ отработавших газов двигателя 2Ч 10,5/12,0 показывает, что в результате применения метанола и метилового эфира рапсового масла происходит снижение вы-

бросов оксидов азота и сажи практически на всех нагрузочных и скоростных режимах работы двигателя. При этом на номинальном режиме выбросы NO_x снижаются на 47,4 %, содержание сажи снижается в 10,4 раза.

4. На основании теоретических исследований предложена уточнённая математическая модель расчета процесса тепловыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи. С применением данной математической модели рассчитан процесс сгорания в цилиндре дизеля.

5. В результате экономической оценки эффективности применения метанола и метилового эфира рапсового масла наблюдается экономия средств за счет снижения ущерба, наносимого токсичными компонентами в размере 6885 рубля на один двигатель в год (в ценах на январь 2017 года). А также достигается экономический эффект за счет применения более дешевого топлива, который составляет 33980 руб./год на один двигатель при годовой наработке в 500 мото-часов (в ценах на январь 2017 года).

6. Для использования метанола и метилового эфира рапсового масла в двигателе 2Ч 10,5/12,0 с двойной системой топливоподачи были предложены следующие рекомендации:

- для обеспечения устойчивой работы дизеля величина запальной порции должна составлять не менее 9,7 мг/цикл на номинальном режиме работы;

- для предотвращения преждевременного износа деталей топливоподающей аппаратуры в метанол необходимо добавлять 1-2 % касторового масла.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты диссертации отражены в 37 публикациях, основные из которых следующие.

Монография:

1. Лиханов, В.А. Исследование рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых. - Киров: Вятская ГСХА, 2016. - 138 с.

Статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

2. Фоминых, А.В. Влияние применения метанола и метилового эфира рапсового масла на содержание оксидов азота в отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения установочных углов [Текст] / В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых // Научно-технический вестник Поволжья. - 2015. - №1. - С. 107 - 110.

3. Фоминых, А.В. Определение оптимальных установочных углов опережения впрыска метанола и метилового эфира рапсового масла дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе с двойной системой топливоподачи [Текст] / А.В. Фоминых, В.Н. Копчиков, М.Д. Николаевский // Аграрный научный журнал. - 2015. - №1. - С. 51 - 53.

4. Фоминых, А.В. Работа дизеля на метаноле и рапсовом масле [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых, В.Н. Копчиков // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - №1. - С. 3 - 5.

5. Образование оксидов азота в дизеле при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла [Текст] / А.В. Фоминых [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 5. - С. 3 - 5.

6. Влияние применения метанола и метилового эфира рапсового масла на процесс сгорания и эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / А.В. Фоминых [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2015.- № 6. - С. 3 - 5.

7. Фоминых, А.В. Влияние углов подачи метанола и метилового эфира рапсового масла на образование оксидов азота в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых // Транспорт на альтернативном топливе. - 2015. - № 3 (45). - С. 51 - 54.

В материалах Международных и Всероссийских научных конференций:

8. Фоминых, А.В. Особенности применения рапсового масла в качестве топлива для дизелей [Текст] / А.В. Фоминых // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Материалы Международной науч.-практ. конфер., Мосоловские чтения: сб. науч. тр. - Йошкар-Ола: Мар. Гос. ун-т. - 2013. - Вып. XV. - С. 230 - 233.

9. Фоминых, А.В. Влияние применения метилового эфира рапсового масла на индикаторные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Материалы Международной науч.-практ. конф., Мосоловские чтения: сб. науч. тр. - Йошкар-Ола: Мар. Гос. ун-т, 2014. - Вып. XVI. - С. 188 - 190.

10. Фоминых, А.В. Влияние величины запальной порции на индикаторные параметры дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ [Текст] / А.В. Фоминых // Общество, наука, инновации (НПК - 2014). Материалы Всероссийской ежегодной науч.-практ. конфер.: сб. науч. тр. - Киров: Вятский государственный университет, 2014. - С. 2009 - 2011.

11. Фоминых, А.В. Применение метанола и метилового эфира рапсового масла в дизелях с использованием ДСТ [Текст] / А.В. Фоминых // Знание молодых: наука, практика и инновации. Материалы Международной науч.-практ. конфер. аспирантов и молодых ученых: сб. науч. тр. - Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2014. - С. 73 - 74.

12. Влияние установочных УОВТ на процесс сгорания в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ [Текст] / А.В. Фоминых [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Материалы Международной науч.-практ. конф., Мосоловские чтения: сб. науч. тр. - Йошкар-Ола: Мар. Гос. ун-т, 2016. - Вып. XVIII. - С. 302 - 305.

13. Фоминых, А.В. Влияние применения метанола и МЭРМ в качестве топлива на показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых, В.Н. Копчиков // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной науч.-практ. конфер. «Наука - Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. - Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2016. - Вып. 12. - С. 217 - 221.

14. Фоминых, А.В. Влияние применения метанола и МЭРМ в качестве топлива на характеристики тепловыделения дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых, В.Н. Копчиков // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной науч.-практ. конфер.

«Наука - Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. - Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2016. - Вып. 12. - С. 226 - 230.

15. Фоминых, А.В. Влияние углов подачи метанола и МЭРМ на индикаторное давление в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых, В.Н. Копчиков // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной науч.-практ. конфер. «Наука - Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. - Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2016. - Вып. 12. - С. 230 - 235.

16. Фоминых, А.В. Влияние частоты вращения на процесс сгорания в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых, В.Н. Копчиков // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной науч.-практ. конфер. «Наука - Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. - Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2016. - Вып. 12. - С. 235 - 240.

17. Разработка макетного образца трактора Т - 30 А - 80 для работы на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с использованием ДСТ [Текст] / А.В. Фоминых [и др.] // Современное состояние прикладной науки в области механики и энергетики. Материалы Всероссийской науч.-практ. конфер.: сб. науч. тр. – Чебоксары: ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, 2016. - С. 470 - 477.

18. Влияние применения метанола и МЭРМ с ДСТ на индикаторные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / А.В. Фоминых [и др.] // Основные направления развития техники и технологии в АПК. Материалы и доклады VII Всероссийской науч.-практ. конфер.: сб. науч. тр. - Княгинино: НГИЭУ, 2016. - С. 206 - 210.