

На правах рукописи



КОПЧИКОВ Виктор Николаевич

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ
2Ч 10,5/12,0 ПРИ РАБОТЕ НА МЕТАНОЛЕ И МЕТИЛОВОМ ЭФИРЕ
РАПСОВОГО МАСЛА С ДВОЙНОЙ СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ
ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА
В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ**

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: **Корабельников Сергей Кимович**
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Автотранспортный и электромеханический колледж», директор
Ложкин Владимир Николаевич
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится «03» октября 2017 года в 18:00 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 ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из экологических проблем в настоящее время является загрязнение воздуха вредными выбросами автомобильного транспорта. Применение альтернативных топлив позволит улучшить экологическую обстановку и снизить токсичность отработавших газов автотракторной техники. Поскольку большинство грузовых автомобилей, промышленной тяжелой техники, а также техники сельскохозяйственного назначения оснащаются дизелями, необходимо совершенствовать их с целью улучшения экологических, экономических и эффективных показателей. В соответствии с указом Президента РФ от 07.07.2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологии и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации», приоритетными являются исследования, направленные на применение альтернативных видов топлива. Вместе с тем важным фактором в развитии двигателестроения является исследование возможности использования новых видов моторного топлива не нефтяного происхождения, получать которые можно из возобновляемых источников.

Поэтому исследование, направленное на использование альтернативных видов топлива (метанола и метилового эфира рапсового масла) в автотракторном дизеле, полностью позволяющее заменить нефтяное моторное топливо и существенно снизить уровень содержания оксидов азота и дымность отработавших газов, является актуальной научной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Объект диссертационного исследования – тракторный дизель 2Ч 10,5/12,0 воздушного охлаждения с полусферической камерой сгорания в поршне, работающий на метаноле 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, объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота в цилиндре и отработавших газах дизеля на при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла, а также мощностные, экономические и экологические показатели.

Цель. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания в поршне при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием двойной системы топливоподачи, изучение их влияния на процессы образования и разложения оксидов азота, мощностные, экологические и экономические показатели, экономию нефтяного топлива.

Научную новизну работы представляют:

– результаты лабораторно-стендовых и теоретических исследований влияния применения метанола и метилового эфира рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой топливоподачи на процессы образования и разложения оксидов азота, токсические,

мощностные и экономические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания и впрыскивании запального топлива через штифтовую форсунку;

– результаты определения регулировочных параметров топливоподающей аппаратуры, обеспечивающие получение оптимальных параметров рабочего процесса дизеля, экологические и экономические показатели при работе на метаноле метиловом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой топливоподачи;

– уточненная математическая модель расчета содержания оксидов азота в цилиндре и отработавших газах 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 двойной системой топливоподачи;

– результаты расчета показателей объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре и отработавших газах 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 двойной системой топливоподачи;

– рекомендации по снижению содержания оксидов азота в отработавших газах 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 двойной системой топливоподачи.

Практическая ценность работы и реализация результатов исследований в том, что применение метанола и метилового эфира рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой топливоподачи позволяет значительно уменьшить выбросы оксидов азота в отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0, полностью заместить дизельное топливо и сохранить мощностные показатели на уровне серийного дизеля. Уточненная математическая модель расчета содержания оксидов азота дизеля 2Ч 10,5/12,0 показала высокую сходимость полученных теоретических расчетов объемного содержания оксидов азота с данными экспериментальных исследований и последующими на их основе расчетами.

Материалы диссертации используются в учебном процессе Вятской, Нижегородской и 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. Экономический эффект от применения метанола и МЭРМ в дизеле 2Ч 10,5/12,0 за счет снижения ущерба, наносимого выбросами ОГ составил 6885 рублей на один двигатель в год. Экономия средств за счет применения более дешевого топлива составляет 33980 руб./год на один двигатель при годовой наработке в 500 мото-часов (в ценах на январь 2017 г.).

Положения выносимые на защиту:

– результаты лабораторно-стендовых и теоретических исследований влияния

применения метанола и метилового эфира рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой топливоподачи на процессы образования и разложения оксидов азота, токсические, мощностные и экономические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания и впрыскивании запального топлива через штифтовую форсунку;

– результаты определения регулировочных параметров топливоподающей аппаратуры, обеспечивающие получение оптимальных параметров рабочего процесса дизеля, экологические и экономические показатели при работе на метаноле метилом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой топливоподачи;

– уточненная математическая модель расчета содержания оксидов азота в цилиндре и отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой топливоподачи;

– результаты расчета показателей объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре и отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой топливоподачи;

– рекомендации по снижению содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с двойной системой 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 метилом 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 литературных источников по теме диссертационного исследования. Автор принял участие в разработке уточненной модели образования оксидов азота в дизеле 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла. Автором был выполнен полный цикл стендовых испытаний дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую

форсунку с двойной системой топливоподачи 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 и 18-ой, 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 технологий в АПК», 2015 г. (ГБОУ ВО НГИЭУ, г. Княгинино); 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 9,06 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 объёмом 0,75 п.л.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций и списка литературы. Работа изложена на 175 страницах, в том числе 142 стр. текста, содержит 42 рисунка и 14 таблиц. Список литературы изложен на 28 стр. включает 213 наименований, в том числе 19 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Проведен анализ теоретических работ и экспериментальных исследований по использованию в дизелях альтернативных видов топлива не нефтяного

происхождения, в том числе метанола и метилового эфира рапсового мала, которые призваны улучшить экологические показатели двигателей внутреннего сгорания.

Исследования в этом направлении проводили такие авторы как: Алексеев Д.К., Анфилатов А.А., Бубнов Д.Б., Быковская Л.И., Гвоздев А.М., Гиринович М.П., Гусаков С.В., Девянин С.Н., Зенин А.А., Зинченко А.А., Иванов В.А., Иващенко Н.А., Илатовский Ю.В., Киреева Н.С., Козлов А.В., Корнилов Г.С., Марков В.А., Марченко А.П., Матиевский Д.Д., Савельев Г.С., Семенов В.Г., Уханов А.П. и другие.

Анализ работ по применению альтернативных топлив выявил недостаточность информации по исследованию выбросов оксидов азота в отработавших газах дизелей при проведении исследований по улучшению их экологических показателей, особенно при работе на спиртах и биотопливах растительного происхождения.

В первой главе представленный анализ результатов научных исследований показывает, что отечественными и зарубежными исследователями проведен ряд экспериментальных работ с использованием высокоточной измерительной техники по изучению процессов образования оксидов азота в дизельных двигателях. Имеются работы по исследованию возможности применения в дизелях в качестве моторного топлива метанола и метилового эфира рапсового масла (МЭРМ).

Необходимо отметить, что исследования по применению метанола и метилового эфира рапсового масла в качестве топлива проводились без должного учета взаимосвязи на экологические и эффективные показатели дизеля. Недостаточно работ по применению метанола и МЭРМ с ДСТ и исследованию процессов образования оксидов азота в дизельных двигателях малой размерности с воздушным охлаждением.

Вследствие этого имеются основания полагать, что снижение содержания оксидов азота в двигателе 2Ч 10,5/12,0 при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ является **актуальной научной задачей**, имеющей важное значение и практическую значимость.

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

– провести лабораторно – стендовые и теоретические исследования влияния применения метанола и МЭРМ с ДСТ на процессы образования и разложения оксидов азота, мощностные, экономические и токсические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания в поршне и впрыскивании МЭРМ (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку;

– определить регулировочные параметры топливоподающей аппаратуры, обеспечивающие получение оптимальных параметров рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0, экологические и экономические показатели при работе на метаноле и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием ДСТ;

– разработать уточненную математическую модель образования оксидов азота в цилиндре и отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием ДСТ;

– провести расчет показателей объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре и отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания в поршне при работе на метаноле и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием ДСТ;

– разработать рекомендации по улучшению экологических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах при работе на метаноле и МЭРМ при впрыскивании (в качестве запального топлива) через штифтовую форсунку с использованием ДСТ;

Во второй главе предложены теоретические предпосылки по снижению содержания оксидов азота в двигателе 2Ч 10,5/12,0 при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ.

На основании проведенного обзора существующих теорий образования оксидов азота в цилиндре дизеля, разработана уточненная математическая модель расчета содержания оксидов азота в цилиндре и отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ.

Разработанная уточненная математическая модель образования оксидов азота основывается на двухзонной модели. Она позволяет производить расчет: равновесных концентраций компонентов в цилиндре дизеля, температуры продуктов сгорания, температуры свежей смеси, текущей концентрации оксидов азота по объему в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в. на различных нагрузочных режимах.

В данной модели объем цилиндра условно разделен на две зоны: зону продуктов сгорания и зону свежей смеси.

Кинетическое уравнение образования оксидов азота примет вид

$$\frac{dr_{NO}}{d\tau} = K_{V_1}^r \cdot r_N \cdot r_{O_2} - K_{R_1}^r \cdot r_{NO} \cdot r_O + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_O - K_{R_2}^r \cdot r_{NO} \cdot r_N + K_{V_3}^r \cdot r_N \cdot r_{OH} - K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H + K_{V_4}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_O - K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2, \quad (1)$$

где $r_{NO}, r_O, r_N, r_{O_2}, r_{OH}, r_H$, – концентрации NO, O, N₂, N, O₂, OH, H;

$K_{V_1}^r, K_{R_1}^r, K_{V_2}^r, K_{R_2}^r, K_{V_3}^r, K_{R_3}^r, K_{V_4}^r, K_{R_4}^r$ – константы скоростей реакций, (%·с)⁻¹.

Скорость образования компонентов N₂O и OH запишется как

$$\frac{dr_{N_2O}}{d\tau} = K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} - K_{R_5}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_O + K_{V_6}^r \cdot r_{NO}^2 - K_{R_6}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_O, \quad (2)$$

$$\frac{dr_{OH}}{d\tau} = K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H - K_{V_3}^r \cdot r_N \cdot r_{OH} + K_{V_6}^r \cdot r_H \cdot r_{H_2O} - K_{R_6}^r \cdot r_{H_2} \cdot r_{OH}. \quad (3)$$

Применяем принцип стационарных концентраций для компонентов N₂O и OH,

тогда скорость образования этих компонентов равна нулю $\left(\frac{dr_{N_2O}}{d\tau} = 0; \frac{dr_{OH}}{d\tau} = 0 \right)$.

Получаем, что объемная концентрация компонентов N₂O и OH из уравнений (2 и 3) найдется как

$$r_{N_2O} = \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2}{r_{O_2} \cdot (K_{R_5}^r + K_{V_4}^r)}, \quad (4)$$

$$r_{OH} = \frac{K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H + K_{V_6}^r \cdot r_H \cdot r_{H_2O}}{K_{V_3}^r \cdot r_N + K_{R_6}^r \cdot r_{H_2}}. \quad (5)$$

Подставляя уравнения (4) и (5) в уравнение (1) получим

$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\tau} = & K_{V_1}^r \cdot r_N \cdot r_{O_2} - K_{R_1}^r \cdot r_{NO} \cdot r_{O_2} + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} - K_{R_2}^r \cdot r_{NO} \cdot r_N + \\ & + K_{V_3}^r \cdot r_N \cdot \frac{K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H + K_{V_6}^r \cdot r_H \cdot r_{H_2O}}{K_{V_3}^r \cdot r_N + K_{R_6}^r \cdot r_{H_2}} - K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H + \\ & + K_{V_4}^r \cdot r_{O_2} \cdot \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2}{r_{O_2} \cdot (K_{R_5}^r + K_{V_4}^r)} - K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая что $\tau = \frac{\varphi}{6n}$, дифференциальное уравнение запишется как

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = A + r_{NO} \cdot B + r_{NO}^2 \cdot C, \quad (7)$$

$$A = \frac{p}{49,884 \cdot T \cdot n} \cdot \left(\frac{K_{V_1}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{V_3}^r \cdot K_{V_6}^r \cdot r_N \cdot r_H \cdot r_{H_2O}}{K_{V_3}^r \cdot r_N + K_{R_6}^r \cdot r_{H_2}} + \frac{K_{V_4}^r \cdot K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2}}{K_{R_5}^r + K_{V_4}^r} \right), \quad (8)$$

$$B = -\frac{p}{49,884 \cdot T \cdot n} \cdot \left(\frac{K_{R_3}^r \cdot K_{R_6}^r \cdot r_H \cdot r_{H_2}}{K_{V_3}^r \cdot r_N + K_{R_6}^r \cdot r_{H_2}} + K_{R_1}^r \cdot r_{O_2} + K_{R_2}^r \cdot r_N \right), \quad (9)$$

$$C = -\frac{p}{49,884 \cdot T \cdot n} \cdot \left(\frac{K_{R_4}^r \cdot K_{R_5}^r}{K_{R_5}^r + K_{V_4}^r} \right), \quad (10)$$

где A, B, C, – постоянные для данного шага расчета величины;

$\Delta\varphi$ – шаг интервала расчета, ° п.к.в.

Интегрируя выражение (7) получаем

$$\left| \frac{r_{NO} + \frac{B}{2 \cdot C} - \sqrt{\frac{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}{4 \cdot C^2}}}{r_{NO} + \frac{B}{2 \cdot C} + \sqrt{\frac{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}{4 \cdot C^2}}} \right| = \exp \left(2 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}{4 \cdot C^2}} (\varphi + \text{const}) \right), \quad (11)$$

Поскольку величины констант A, B, C принимают всегда следующие значения

$A \geq 0$, $B \leq 0$, $C \leq 0$, то выражение $\frac{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}{4 \cdot C^2}$ всегда принимает положительные

значения. Обозначим $\sqrt{\frac{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}{4 \cdot C^2}} = \Omega$.

С учетом начальных условий $r_{NO} = r_{NO_0}$ объемная концентрация в конце

каждого интервала расчета определится по следующему выражению

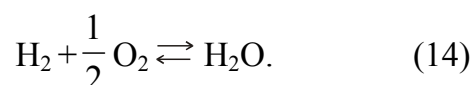
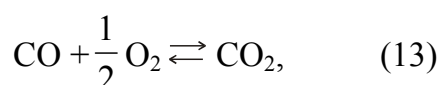
$$r_{NO} = \frac{\pm \left(\frac{B}{2 \cdot C} + \Omega \right) \cdot \left| \frac{r_{NO_0} + \frac{B}{2 \cdot C} - \Omega}{r_{NO_0} + \frac{B}{2 \cdot C} + \Omega} \right| \cdot \exp(2 \cdot C \cdot \Omega \cdot \Delta\varphi) - \frac{B}{2 \cdot C} + \Omega}{1 \mp \left| \frac{r_{NO_0} + \frac{B}{2 \cdot C} - \Omega}{r_{NO_0} + \frac{B}{2 \cdot C} + \Omega} \right| \cdot \exp(2 \cdot C \cdot \Omega \cdot \Delta\varphi)}, \quad (12)$$

где в уравнении 12 знак « + » или « - » принимается в первом случае, когда $r_{NO} > \Omega - \frac{B}{2 \cdot C}$, в обратном случае при $r_{NO} < \Omega - \frac{B}{2 \cdot C}$. При определении объемной концентрации оксидов азота на каждом шаге расчета проводилась проверка по данному условию.

Уравнения (8, 9, 10, 12) кроме концентрации NO содержит концентрации ещё семи химических промежуточных компонентов: O, O₂, N, N₂, H, H₂, H₂O, приводящих к образованию оксидов азота.

Предполагая, что химическое равновесие может осуществляться для каждого момента времени, можно рассчитать концентрации этих веществ, пользуясь законом действующих масс.

В основе расчета лежат две химические реакции окисления



И три реакции диссоциации



Также, необходимо учитывать концентрации еще двух реагентов, которые включают в себя диоксид углерода (CO₂), и оксид углерода (CO), помимо представленных выше семи промежуточных компонентов, т.е. девяти компонентов H₂O, CO₂, CO, O, O₂, N, N₂, H, H₂.

Таким образом, константы равновесия для пяти реакций окисления (13, 14) и диссоциации (15...17) соответственно равны

$$K_{P_1} = \frac{r_{CO_2}}{r_{CO} \cdot (r_{O_2})^{\frac{1}{2}}}, \quad (18)$$

$$K_{P_2} = \frac{r_{H_2O}}{r_{H_2} \cdot (r_{O_2})^{\frac{1}{2}}}, \quad (19)$$

$$K_{P_3} = \frac{r_H^2}{r_{H_2}}, \quad (20)$$

$$K_{P_4} = \frac{r_O^2}{r_{O_2}}, \quad (21)$$

$$K_{P_5} = \frac{r_N^2}{r_{N_2}}. \quad (22)$$

Отношения объемных концентраций можно определить по следующим формулам

$$\frac{r_{\text{O}}}{r_{\text{N}}} = \frac{2 \cdot r_{\text{CO}_2} + 2 \cdot r_{\text{O}_2} + r_{\text{CO}} + r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{O}} + r_{\text{NO}}}{2 \cdot r_{\text{N}_2} + r_{\text{N}} + r_{\text{NO}}}, \quad (23)$$

$$\frac{r_{\text{H}}}{r_{\text{C}}} = \frac{2 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}} + 2 \cdot r_{\text{H}_2} + r_{\text{H}}}{r_{\text{CO}_2} + r_{\text{CO}}}, \quad (24)$$

$$\frac{r_{\text{O}}}{r_{\text{C}}} = \frac{2 \cdot r_{\text{CO}_2} + 2 \cdot r_{\text{O}_2} + r_{\text{CO}} + r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{O}} + r_{\text{NO}}}{r_{\text{CO}_2} + r_{\text{CO}}}. \quad (25)$$

Для определения концентрации десяти компонентов отработавших газов необходимо решить систему нелинейных уравнений (12, 18 – 26). Десятым уравнением системы запишем уравнение Дальтона, устанавливающее связь между объемными концентрациями отдельных компонентов смеси

$$r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{O}_2} + r_{\text{H}_2} + r_{\text{CO}} + r_{\text{CO}_2} + r_{\text{N}_2} + r_{\text{O}} + r_{\text{H}} + r_{\text{N}} + r_{\text{NO}} = 100 \%. \quad (26)$$

Зная постоянный состав воздуха по массе (23,15% – O₂ и 75,5% – N₂) и состав топлива, можем определить количество поступившего в цилиндр атомов углерода, азота, кислорода для определения отношений объемных концентраций.

Расчет образования оксидов азота ведем с использованием температуры в зоне продуктов сгорания, которую определяем из условия

$$m_{\Sigma} \cdot C \cdot T = m_{\text{см}} \cdot C_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}} + m_{\text{пс}} \cdot C_{\text{пс}} \cdot T_{\text{пс}}, \quad (27)$$

где m_{Σ} – масса рабочего тела в цилиндре, г;

$T_{\text{см}}$ – температура смеси;

$C_{\text{пс}}$ – теплоемкость продуктов сгорания.

Так как NO рассчитывается в зоне продуктов сгорания, то для определения концентрации NO в объеме цилиндра

$$r_{\text{NOц}} = r_{\text{NOпс}} \cdot r_{\text{пс}}, \quad (28)$$

где $r_{\text{NOпс}}$ – количество оксидов азота в зоне продуктов сгорания

Объемная концентрация продуктов сгорания определится как

$$r_{\text{пс}} = \frac{\chi \cdot v_{\text{пс ог}}}{\chi \cdot v_{\text{пс ог}} + (1 - \chi) \cdot \left(\frac{\omega_{T_{\Sigma}}}{M_{T_{\text{ср}}}} + \frac{\omega_{\text{B}}}{M_{\text{B}}} \right)},$$

где χ – закон тепловыделения;

$v_{\text{пс ог}}$ – количество продуктов сгорания из условия полного сгорания топлива;

$M_{T_{\text{ср}}}$ – приведенная молярная масса топлива;

$\omega_{T_{\Sigma}}$ – суммарная массовая концентрация топлива.

Из рисунка 1 видно, что температура продуктов сгорания ($T_{\text{пс}}$) значительно выше, чем осредненная температура (T). Поэтому было принято решение рассчитывать образование оксидов азота в цилиндре и ОГ дизеля с использованием температуры продуктов сгорания.

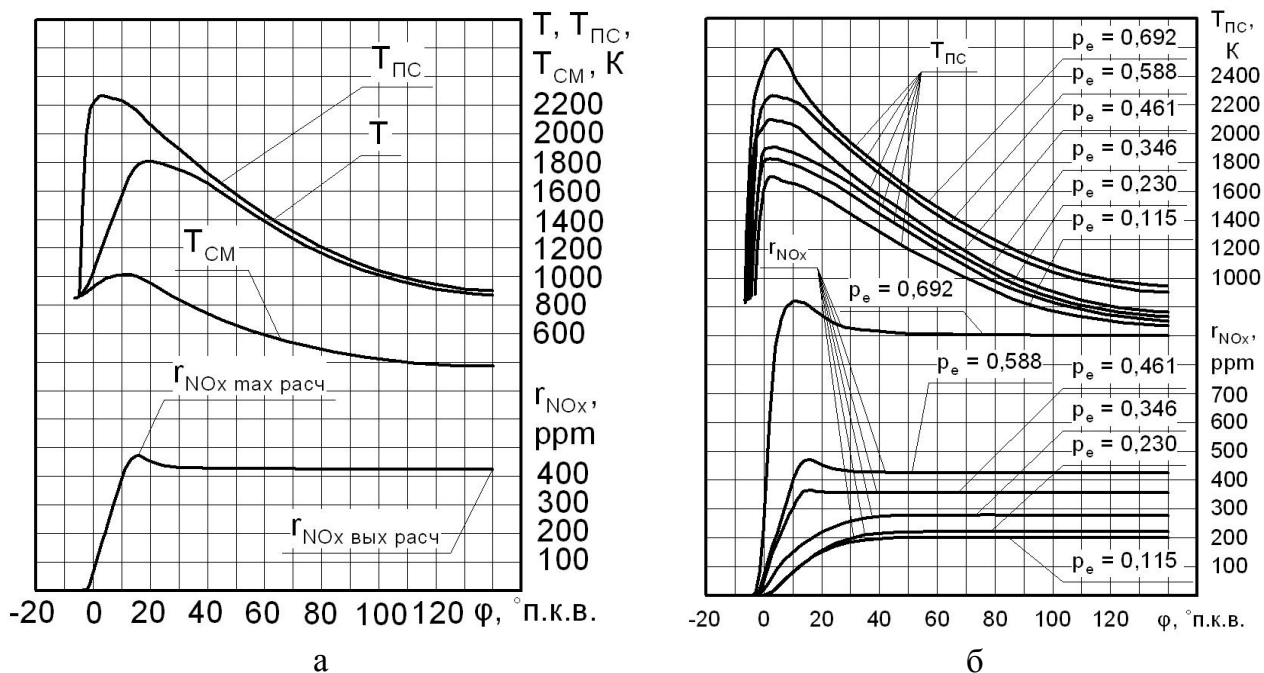


Рисунок 1 – Теоретические исследования образования оксидов азота в цилиндре и ОГ двигателя 2Ч 10,5/12,0 при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ в зависимости от угла п.к.в. при:
 а) $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,588 \text{ МПа}$, б) на различных нагрузочных режимах

В третьей главе представлена методика, на основании которой проводились опытные испытания, а также созданная экспериментальная установка, использованные приборы и оборудование. Экспериментальная установка состоит из: дизельного двигателя 2Ч 10,5/12,0 (рисунок 2), измерительной аппаратуры и электродвигательного стенда САК - N 670 с балансирной маятниковой машиной.



Рисунок 2 – Вид на дизель 2Ч 10,5/12,0

Для проведения индицирования применялся пьезометрический датчик давления PS01, который устанавливался в головку первого цилиндра, в сочетании с усилителем заряда AQ05–А.1.001 и аналого-цифровым преобразователем ЛА–2 USB, которые передают сигнал на компьютер. Запись и обработка диаграмм при расчете параметров тепловыделения производилась с учетом требований программы

Во время проведения стендовых испытаний, отбор проб ОГ, монтаж оборудования и приборов осуществлялся с учетом следующих ГОСТов: ГОСТ 18509-88; ГОСТ Р 41.96–2011; ГОСТ Р 17.2.2.07–2000; ГОСТ 17.2.2.02–98; ГОСТ 10578–95; ГОСТ 17.2.2.01–84; ГОСТ Р ИСО 8178–7–99; ГОСТ 10579–88.

ЦНИДИ-ЦНИИМ. Датчик отметки в.м.т. 11.3845 был установлен на кожухе маховика согласно инструкции. На автоматической системе газоанализа АСГА–Т осуществлялся анализ проб ОГ. Дымность ОГ определялась с использованием дымомера Bosch EFAW–68А. При проведении стендовых испытаний использовались летнее ДТ (ГОСТ 305-82), моторное масло М-10 Г2 (ГОСТ 17479.1-85), метанол (ГОСТ 2222-95) и МЭРМ (ГОСТ Р 53605-2009).

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований и расчетов применения в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ на процессы образования и разложения оксидов азота, токсические, мощностные и экономические показатели двигателя 2Ч 10,5/12,0 воздушного охлаждения с полусферической КС в поршне при впрыскивании в качестве запального топлива МЭРМ. Установлена возможность улучшения его экологических показателей, в частности снижения содержания оксидов азота в отработавших газах, полного замещения дизельного топлива и рост эффективных показателей на высоких нагрузках, определены значения оптимальных установочных углов опережения впрыскивания топлив: для метанола – 34° п.к.в., для метилового эфира рапсового масла – 34° п.к.в. для сохранения мощностных показателей на уровне серийного дизеля при подачах метанола – 88 % и запальной порции метилового эфира рапсового масла – 12 % на номинальном режиме.

На рисунке 3, а представлены графики оксидов азота ($\Gamma_{\text{NOx}}_{\text{опыт}}$), полученные опытным путем в результате анализа токсичности отработавших газов (ОГ) двигателя 2Ч 10,5/12,0 при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ, при изменении установочных УОВТ от 26 до 38° для обоих видов топлив и $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$. На оптимальных установочных УОВТ оксиды азота ($\Gamma_{\text{NOx}}_{\text{опыт}}$) в двигателе, полученные опытным путем в результате анализа токсичности (ОГ) составляют 401 ppm.

Из графиков на рисунке 3, б, видно, что на дизельном процессе максимальное давление цикла составляет $p_{z \text{ max}} = 6,77 \text{ МПа}$, а при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ - $p_{z \text{ max}} = 6,05 \text{ МПа}$. Наблюдается снижение максимального содержания оксидов азота (объемного содержания Γ_{NOx} и массовой концентрации C_{NOx}) в цилиндре двигателя до 460 ppm и 0,64 г/м³ при использовании альтернативных топлив, в то время как на дизельном процессе их значения составляют 884 ppm и 1,23 г/м³. Выходные значения ($\varphi = 140^\circ$ п.к.в.) Γ_{NOx} и C_{NOx} в ОГ двигателя при использовании метилового спирта и МЭРМ с ДСТ снижаются до 425 ppm и 0,61 г/м³, когда на дизельном процессе их значения равны 719 ppm и 1,04 г/м³.

Заметно снижается содержания оксидов азота ($\Gamma_{\text{NOx}}_{\text{расч}}$, $C_{\text{NOx}}_{\text{расч}}$) в ОГ двигателя (рисунок 4, а), при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ, практически во всем интервале изменения нагрузки и при $p_e = 0,588 \text{ МПа}$ происходит снижение содержания оксидов азота $\Gamma_{\text{NOx}}_{\text{расч}}$ и $C_{\text{NOx}}_{\text{расч}}$ в ОГ двигателя на 40,9 % и 41,3 %, соответственно.

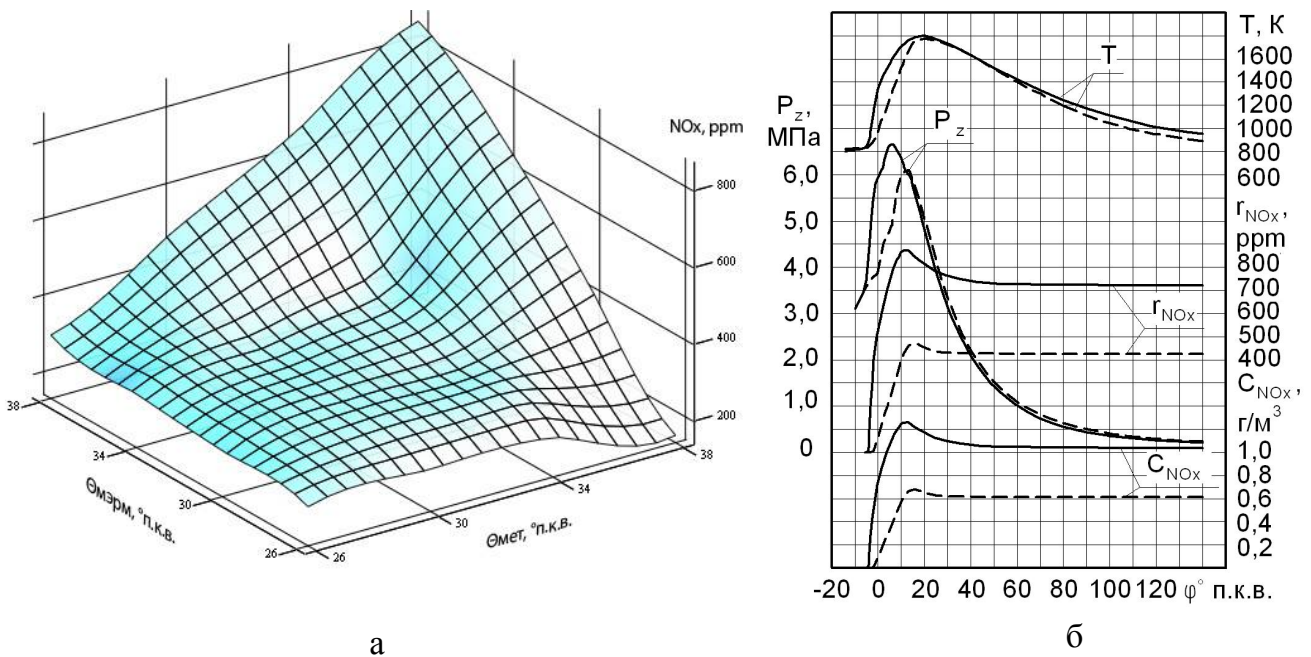


Рисунок 3 – Влияние применения в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ в двигателе 2Ч 10,5/12,0 на: а) выбросы оксидов азота в ОГ от различных установочных УОВТ; б) индикаторное давление, осредненную температуру и образование оксидов азота в цилиндре и ОГ в зависимости от изменения угла п.к.в. на номинальном режиме при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{мет}} = 34^\circ$ и $\Theta_{\text{МЭРМ}} = 34^\circ$:
 — — дизельный процесс; - - - - метанол с запальным МЭРМ

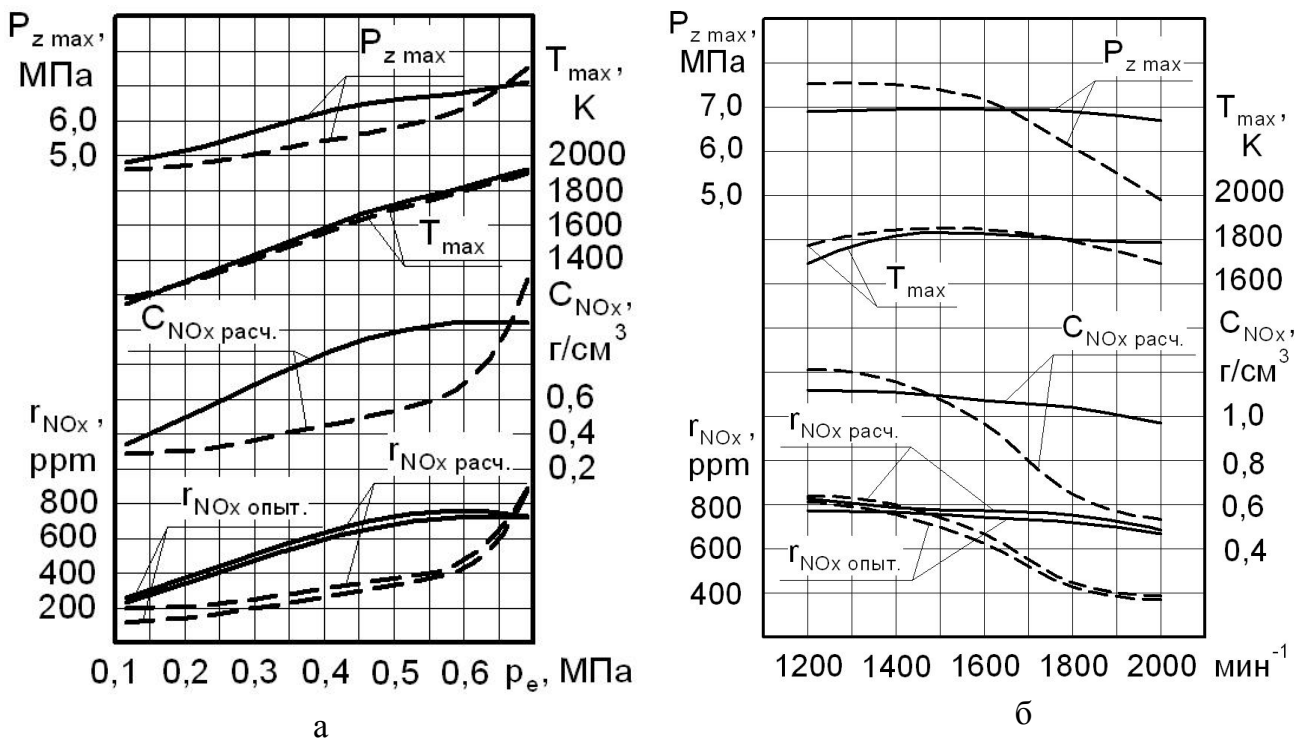


Рисунок 4 – Объемное содержание и массовая концентрация оксидов азота в ОГ и показатели процесса сгорания в цилиндре двигателя 2Ч 10,5/12,0 при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ в зависимости от изменения: а) нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; б) частоты вращения;
 — — дизельный процесс; - - - - метанол с запальным МЭРМ

При этом если на дизельном процессе (рисунок 4, б) и минимальном скоростном режиме ($n = 1200 \text{ мин}^{-1}$) содержание оксидов азота полученных опытным путем ($\Gamma_{\text{NO}_x \text{ опыт}}$) соответствует значению 826 ppm, а при использовании альтернативных топлив оно составляет 815 ppm, то с ростом частоты вращения до максимальной ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$) эти значения равны 686 ppm и 370 ppm, соответственно. Наблюдается снижение на 46,1 % по сравнению с дизельным процессом. Рост оксидов азота сопровождается ростом $P_{z \text{ max}}$ и T_{max} в цилиндре дизеля.

Из рисунка 5, а видно, что применение в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ не приводит к снижению мощностных показателей дизеля. Если на дизельном процессе при $p_e = 0,588 \text{ МПа}$ часовой расход топлива равен 4,87 кг/ч, то при этой же нагрузке, но при использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ расход равен 9,07 кг/ч, увеличение составляет 86,2 %.

При использовании в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ (рисунок 5, б) происходит снижение содержания NO_x на 47,4 %. Значительно снижается содержания сажи в 10,42 раза и снижаются выбросы CO на 44,8 %. Также наблюдается незначительное увеличение содержания CO_2 на 5,8 %.

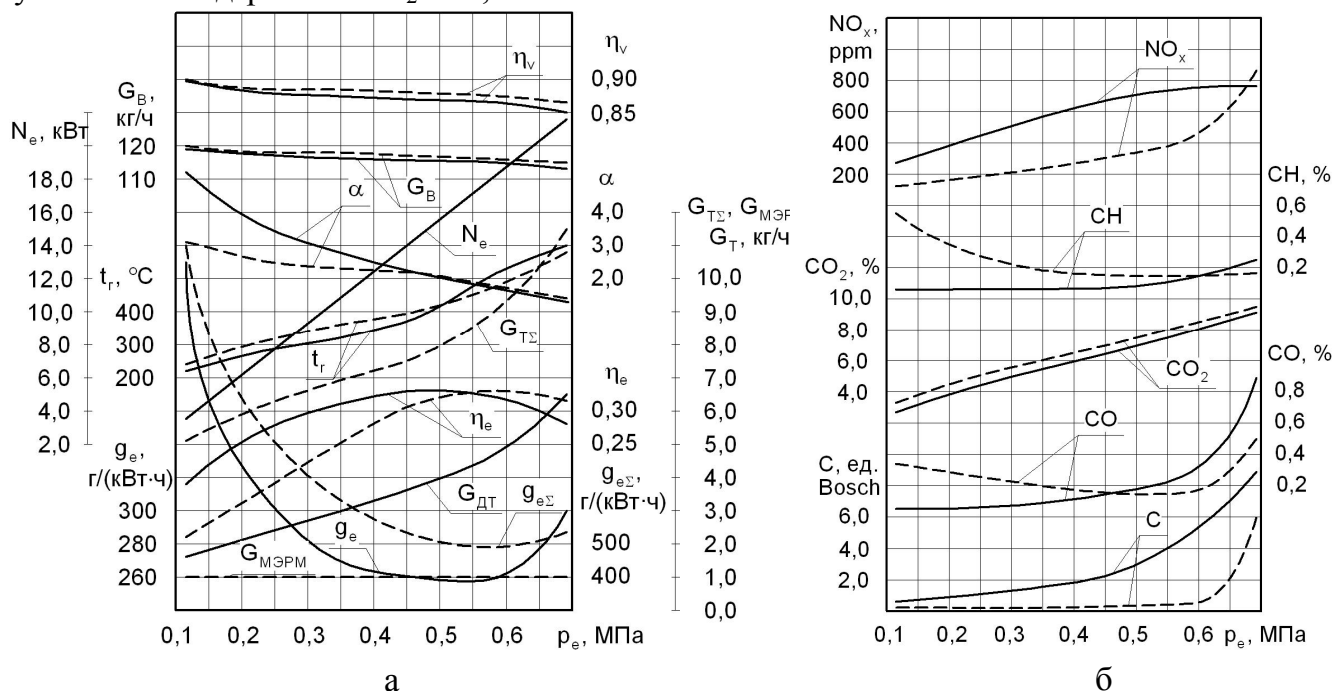


Рисунок 5 – Влияние применения в качестве топлива метанола и МЭРМ с ДСТ на: а) эффективные показатели; б) на экологические показатели двигателя 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; — — — — дизельный процесс; - - - - - метанол с запальным МЭРМ

В пятой главе представлен экономический эффект от применения метанола и МЭРМ в дизеле 2Ч 10,5/12,0 полученный за счет снижения ущерба, наносимого выбросами ОГ, который составил 6885 рублей на один двигатель в год. Также наблюдается экономия средств в результате 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

1. На основе расчетно-теоретических и экспериментальных исследований установлена возможность улучшения экологических показателей двигателя 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле с подачей запальной порции метилового эфира рапсового масла. При этом применение данных топлив приводит к значительному снижению содержания оксидов азота в ОГ, а также позволяет полностью исключить необходимость применения нефтяного дизельного топлива, при обеспечении подачи метанола в количестве 88 % и метилового эфира рапсового масла в количестве 12 % на номинальном режиме и значениях оптимальных установочных УОВТ 34° п.к.в. для метилового эфира рапсового масла и 34° п.к.в. для метанола.

2. На основании теоретических исследований предложена уточнённая математическая модель расчета образования оксидов азота в двигателе 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метилом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи. Результаты теоретических расчетов показывают, что на номинальном режиме максимум объемного содержания оксидов азота наблюдается при $\varphi = 17^\circ$ п.к.в. и достигает 460 ppm, а количество оксидов азота на выходе при $\varphi = 140^\circ$ п.к.в. составляет 425 ppm. На режиме максимального крутящего момента максимум объемного содержания оксидов азота наблюдается при $\varphi = 6,7^\circ$ п.к.в. и достигает 625 ppm, а количество оксидов азота на выходе при $\varphi = 140^\circ$ п.к.в. составляет 611 ppm.

3. На основании проведенных экспериментальных исследований были определены значения содержания массовой концентрации оксидов азота в ОГ. Наблюдается снижение ($C_{NOx \text{ расч}}$) в результате применения метанола и метилового эфира рапсового масла на номинальном режиме на 41,3 % и составляет 0,61 г/м³ (на дизельном процессе - 1,04 г/м³). На режиме максимального крутящего момента на 34,3 % и составляет 0,88 г/м³ (на дизельном процессе - 1,34 г/м³).

4. Анализ влияния частоты вращения на значения объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в ОГ двигателя 2Ч 10,5/12,0 работающего на метаноле с запальным метиловым эфиром рапсового масла в сравнении с дизельным процессом показывает снижение объемного содержания оксидов азота на всех скоростных режимах работы дизеля. При этом происходит незначительное снижение $\Gamma_{NOx \text{ расч}}$ на частоте $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$, но с ростом частоты до $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ напротив, снижается на 44,3 %. Рост $C_{NOx \text{ расч}}$ на низких скоростных режимах и снижение при высокой частоте вращения дизеля. На частоте $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ $C_{NOx \text{ расч}}$ увеличивается на 7 %, а с ростом частоты до $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ напротив, снижается на 44,3 %.

5. Анализ отработавших газов двигателя 2Ч 10,5/12,0 показывает, что в результате применения метанола и метилового эфира рапсового масла, в качестве топлива, на номинальном режиме происходит снижение выбросов оксидов азота на 47,4 %, сажи в 10,42 раза и угарного газа на 44,8 %.

6. 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 рублей на один двигатель в год (в ценах на январь 2017 года). 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).

7. В качестве рекомендаций для использования метанола и метилового эфира рапсового масла с двойной системой топливоподачи в двигателе 2Ч 10,5/12,0 необходимо учесть следующее: для предотвращения преждевременного износа деталей топливоподающей аппаратуры в метанол необходимо добавлять 1-2 %

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

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Монография:

1. Копчиков, В.Н. Улучшение экологических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах [Текст]: монография / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков. - Киров: Вятская ГСХА, 2016. - 143 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. Копчиков, В.Н. 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. Копчиков, В.Н. 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. Копчиков, В.Н. 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] / В.Н. Копчиков [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] / В.Н. Копчиков [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 6. - С. 3 - 5.

7. Копчиков, В.Н. 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. Копчиков, В.Н. Методика проведения стендовых испытаний дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на рапсовом масле и метаноле с использованием ДСТ [Текст] / В.Н. Копчиков // 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. 276 - 279.

9. Копчиков, В.Н. Перспективы применения метилового эфира рапсового масла в дизелях ДСТ [Текст] / В.Н. Копчиков // 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. 191 - 193.

10. Копчиков, В.Н. Влияние применения метанола и МЭРМ на массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе с ДСТ в режиме максимального крутящего момента [Текст] / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых // 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. 195 - 198.

11. Копчиков, В.Н. Влияние применения метанола и МЭРМ на массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе с ДСТ при различных установочных УОВТ при номинальной частоте вращения [Текст] / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых // 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. 198 - 201.

12. Копчиков, В.Н. Влияние установочного УОВТ на образование токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ на номинальном режиме [Текст] / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых // 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. 212 - 217.

13. Влияние установочного УОВТ на содержание оксидов азота в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ на номинальном режиме [Текст] / В.Н. Копчиков [и др.] // 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, 2016. - Вып. XVIII. - С. 282 - 288.

14. Влияние установочных УОВТ на токсичность дизеля 2Ч 10,5/12,0 при использовании метанола и МЭРМ с ДСТ [Текст] / В.Н. Копчиков [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. 210 - 214.

15. Исследование процесса сгорания и расчет содержания оксидов азота в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и МЭРМ с ДСТ [Текст] / В.Н. Копчиков [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. 457 - 464.