

На правах рукописи



КОЗЛОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ
ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ
ПРИ РАБОТЕ НА ЭТАНОЛЕ И РАПСОВОМ МАСЛЕ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 2019

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:

Лиханов Виталий Анатольевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятской ГСХА, г. Киров

Официальные оппоненты:

Ложкин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», г. Санкт-Петербург

Сайкин Андрей Михайлович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник управления специальных программ центра «Спецавтомобили» Государственного научного центра Российской Федерации ФГУП «НАМИ», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа

Защита состоится 25 сентября 2019 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», расположенного по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, аудитория 1001. Тел/факс: (351) 267-91-23, e-mail: D212.98.09@mail.ru.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на его официальном сайте (<https://www.susu.ru/>)

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Лазарев Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Неуклонный рост потребления исчерпаемых энергоресурсов вынуждает человечество искать альтернативные возобновляемые источники энергии. Их использование должно также снижать экологический ущерб, наносимый окружающей среде, связанный с применением традиционных топлив. Снижение доли транспорта в загрязнении окружающей среды является одним из главных государственных приоритетов, определенных Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ N 1734-р от 22.11.2008 г. Для снижения негативного воздействия транспорта на окружающую среду предполагается выработка и ввод в действие механизмов государственного регулирования, обеспечивающих мотивацию перевода транспортных средств на экологически чистые виды топлива.

В отработавших газах (ОГ) дизелей, работающих на нефтяном топливе, присутствует более 280 токсичных компонентов. Одним из наиболее вредных являются твердые частицы, состоящие преимущественно из сажи. Из всего многообразия существующих методов снижения дымности ОГ наибольшего эффекта позволяет достигать применение альтернативных топлив, менее склонных к образованию сажи при горении из-за особенностей химического состава и физических свойств. К таким топливам, в первую очередь, можно отнести спирты и растительные масла. В соответствии с энергетической стратегией России на период до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009 г., отдельное внимание уделяется перспективе обеспечения рационального, экономически обоснованного роста использования различных видов возобновляемых источников энергии, а также расширения использования альтернативных видов топлива для транспорта.

В связи с этим, необходимо изучать все аспекты применения возобновляемых топлив в том числе на стадии производства, хранения, распределения и т.д. Крайне важной в сегодня становится задача адаптации существующих двигателей к альтернативным топливам и выработка рекомендаций по применению возобновляемых топлив в энергетических установках с учетом современных стандартов. Поэтому исследования, посвященные влиянию альтернативных топлив на экологические и эффективные показатели работы дизелей, являются важной научной задачей, обуславливающей возможность широкого применения нетрадиционных топлив в будущем.

Степень разработанности. На сегодняшний день проведено множество исследований по применению альтернативных топлив в дизелях. Важное место в исследованиях использования спиртовых топлив занимают работы С.А. Абрамова, В.С. Азева, Д.Г. Алексеева, Ю.П. Алейникова, А.А. Анфилатова, Е.Е. Арсенова, В.И. Балакина, А.Б. Виппера, В.А. Гладких, А.А. Глухова, С.Н. Гущина, В.А. Звонова, А.В. Зонова, Г.М. Камфера, И.В. Ксенофонтова, В.Н. Копчикова, С.Р. Лебедева, М.О. Лернера, В.А. Лиханова, В.М. Луканина, В.В. Луневоy, В.А. Лукшо, В. Лотько, Р.В. Малова, В.З. Махова, Н.В. Носенко, А.М. Обельницкого, Н.Н. Патрахальцева, С.А. Плотникова, А.С. Полевщикова, В.М. Попова, В.П. Попова, М.Ю. Ратьковой, С.А. Романова, В.М. Смаля, А.Е. Торопова, А.В. Фоминых, А.С. Хачияна, А.Н. Чувашева, А.И. Чуп-

ракова и других.

Вопросы применения топлив растительного происхождения совместно с дизельным топливом или в чистом виде были рассмотрены в трудах С.В. Гусакова, С.Н. Девянина, А.А. Ефанова, А.А. Жосана, Б.П. Загородских, А.Н. Зазули, В.А. Иванова, Н.А. Иващенко, Н.С. Киреевой, Д.Д. Коршунова, С.П. Кулманакова, В.А. Маркова, А.П. Марченко, Д.Д. Матиевского, С.Г. Митина, В.Е. Пономарева, Г.С. Савельева, В.Г. Семенова, А.П. Уханова, А.В. Шашева, Е.П. Шиловой, и др. Однако лишь немногие авторы в полной мере занимались исследованием влияния альтернативных топлив на сажеобразование и дымность ОГ дизелей.

Исследования процессов образования и выгорания частиц сажи в том числе в цилиндре дизеля представлены в работах Ф.Г. Бакирова, Н.А. Баранова, С.А. Батурина, А.Г. Блоха, П.Н. Вылегжанина, У. Гардинера, А.Г. Гейдона, А.А. Глухова, Н.Х. Дьяченко, В.А. Звонова, Я.Б. Зельдовича, В.Г. Кнорре, А.Д. Кокурина, В.А. Кузьмина, А.В. Крестинина, В.А. Лиханова, В.Н. Ложкина, А.С. Лоскутова, В.В. Макарова, В.М. Мальцева, Г.В. Манелиса, З.А. Мансурова, В.З. Махова, Ф.Ф. Мачульского, А.Л. Новоселова, Р.М. Петриченко, В.В. Померанцева, В.П. Пушнина, Н.Ф. Разлейцева, А.В. Россохина, Б.И. Руднева, В.И. Смайлиса, О.И. Смита, М.В. Страдомского, В.Ф. Суровикина, Т. Танзавы, П.А. Теснера, А.Е. Торопова, Д.А. Франк-Каменецкого, В. Хайнеса, Л.Н. Хитрина, И.М. Шаронова, Н. Vockhorn, M. Frenklach, J. Nagle, H.Gg. Wagner и других.

В результате анализа проведенных экспериментальных исследований применения альтернативных топлив в дизелях установлено, что минимальная дымность ОГ может быть достигнута при работе дизеля на спиртовом топливе с использованием отдельной топливоподдачи. В качестве запального топлива может быть использовано рапсовое масло (РМ), способное к самовоспламенению в цилиндре дизеля.

Цель исследования. Улучшение экологических показателей дизеля путем снижения дымности отработавших газов при работе на этаноле и рапсовом масле в качестве запального топлива при их отдельной подаче в камеру сгорания.

Объект исследования: дизель 2Ч 10,5/12,0 с полусферической камерой сгорания в поршне, оборудованный отдельной системой подачи этанола (основного топлива) и РМ (запального топлива).

Задачи исследования:

- провести лабораторно-стендовые и теоретические исследования влияния применения этанола и РМ на дымность ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0;
- уточнить химизм процесса образования сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ;
- усовершенствовать математическую модель образования и газификации сажи в цилиндре при работе дизеля 2Ч 10,5/12,0 на этаноле и РМ с учетом особенностей химизма сажеобразования;
- произвести расчет показателей сажесодержания при работе дизеля 2Ч 10,5/12,0 на этаноле и РМ и проверить адекватность выполненных расчетов.

Научную новизну работы представляют:

- уточненный химизм процесса образования сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ;
- усовершенствованная математическая модель образования и газификации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ;
- результаты экспериментальных исследований влияния применения этанола и РМ при различных режимах работы на дымность ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0;
- результаты численного моделирования динамики показателей сажесодержания в цилиндре и отработавших газах дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключены в следующем:

- предложен усовершенствованный общий алгоритм определения показателей сажесодержания, который может быть использован для численного моделирования уровня дымности ОГ дизелей различной размерности при работе на этаноле и РМ и других альтернативных топливах, в том числе для многозонных моделей;

- выработаны рекомендации снижения уровня дымности ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ, определены оптимальные регулировочные параметры работы дизеля. Представленные эффективные и экологические показатели работы дизеля, оснащенного отдельной системой топливоподачи, могут быть применены для совершенствования регулирования (в том числе автоматизированного) величины запальной порции пилотного топлива и установочных углов опережения впрыска топлив на различных нагрузочных и скоростных режимах для повышения устойчивости и эффективности работы дизеля на альтернативных топливах;

- материалы диссертации используются в учебном процессе при изучении дисциплин аспирантуры по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника» (направленность программы 05.04.02 «Тепловые двигатели»); бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 23.03.03, 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.01 «Технология транспортных процессов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» в Вятской, Нижегородской, Костромской и Чувашской государственных сельскохозяйственных академиях, Казанском ГАУ;

- по результатам проведенных исследований на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятской ГСХА был создан макетный образец трактора Т-30А80, переоборудованный для работы на этаноле и РМ, который в период с апреля по сентябрь 2018 года прошел эксплуатационные испытания в ЗАО племзавод «Октябрьский» Кировской области;

- результаты исследований рассмотрены Министерством сельского хозяйства и продовольствия Кировской области и рекомендованы к использованию в сельскохозяйственных предприятиях Кировской области, занимающихся производством и переработкой рапса.

Методология и методы исследования. При экспериментальных исследованиях работы дизеля на альтернативных топливах применялся сравнительный метод. Приведенные к нормальным условиям показатели работы дизеля на альтернативных

топливах сопоставлялись с показателями работы на традиционном топливе на соответствующих установившихся режимах. При этом применялись стандартные методики проведения стендовых испытаний дизелей. Обработка экспериментальных данных производилась с использованием современных компьютерных программ со встроенными аппаратами математического анализа и алгоритмами работы с массивами данных. При определении основных показателей работы дизеля по экспериментальным измерениям использовались общеизвестные аналитические зависимости. В теоретических исследованиях использовались фундаментальные законы химической кинетики, термодинамики и теплотехники.

Положения выносимые на защиту:

- уточненный химизм процесса образования сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ;
- усовершенствованная математическая модель образования и газификации сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ;
- результаты экспериментальных исследований влияния установочных углов опережения впрыскивания этанола и РМ на дымность ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0;
- результаты экспериментальных исследований влияния применения этанола и РМ при различных режимах работы на дымность ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0;
- результаты численного моделирования динамики показателей содержания сажи в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ на различных режимах работы.

Степень достоверности полученных научных результатов обуславливается:

- использованием поверенных и аттестованных современных средств измерения и действующих стандартов проведения испытаний дизелей;
- использованием общепризнанных зависимостей при определении эффективных, экологических показателей работы дизеля и показателей процесса сгорания;
- использованием современных методов научного анализа и обработки экспериментальных данных;
- согласованием полученных результатов с известными данными.

Апробация работы. Основные результаты и материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V-XII Международных научно-практических конференциях «Наука-Технология-Ресурсосбережение», 2012-2019 гг. (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, г. Киров); 14-ой, 15-ой, 16-ой и 18-ой Международной научно-практической конференции «Мосоловские чтения» (ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», Йошкар-Ола) 2012-2014, 2016 г.; Международной научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей» (СПбГАУ, г. Санкт-Петербург) 2013 г.; Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей «Знания молодых: наука, практика и инновации» (ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, г. Киров) 2013 и 2014 г.; Международной научной конференции «Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение», посвященной 150-летию академика А.Н. Крылова (МГОУ г. Чебоксары) 2013 г.; Международной молодежной научной конференции

« XIX Туполевские чтения » (КНИТУ-КАИ, г. Казань) 2011 и 2013 г.; VII Всероссийской научно-практической конференции «Основные направления развития техники и технологий в АПК» (ГБОУ ВО НГИЭУ, г. Княгинино) 2015 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь и инновации» (ФГБОУ ВПО Чувашская ГСХА, г. Чебоксары) 2015 г.; Международной научно-практической конференции «Мобильная энергетика в сельском хозяйстве: состояние и перспективы развития» (ФГБОУ ВО ЧГСХА, г. Чебоксары) 2018 г.; Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации» (ФГБОУ ВПО ВятГУ, г. Киров) 2014 и 2015 г., Международной научно-практической конференции «Prospects of development of agrarian sciences» (ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, г. Чебоксары) 2019 г.

Публикации результатов исследований. Основные результаты и положения диссертационной работы опубликованы в 59 печатных работах объемом 26,3 п.л., включая две монографии объемом 19,1 п.л., 11 статей общим объемом 3,2 п.л. в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ. Без соавторов опубликовано 5 статей общим объемом 1,8 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 207 страниц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы на 175 страницах машинописного текста, включающего 73 рисунка, 13 таблиц и библиографический список из 205 наименований и 5 приложений на 32 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

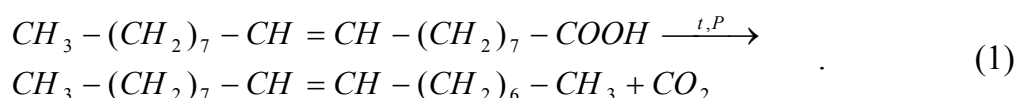
Во введении представлена актуальность темы диссертации, степень разработанности, цель и задачи работы. Изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения выносимые на защиту, степень достоверности и сведения об апробации результатов работы.

В первой главе представлен экологический аспект снижения дымности дизелей. Подробно рассмотрена структура и свойства частиц сажи, особенности процесса сажеобразования в условиях дизеля с учетом влияния различных факторов и режимов работы двигателя. Выявлена сложная взаимосвязь факторов сажеобразования в дизеле, что не позволяет точно прогнозировать дымность ОГ при изменении параметров работы или свойств топлива без использования специальных расчетов. Известно, что одним из самых эффективных методов снижения дымности дизелей является применение оксигенатных топлив. Тем не менее, экспериментальные исследования использования РМ в дизелях показали противоречивые результаты, что позволяет сделать вывод о существенном влиянии на дымности ОГ совокупности факторов, связанных с конструктивными особенностями дизеля, законом топливоподачи, типом и формой камеры сгорания (КС) конкретного дизеля.

Анализ работ по применению спиртовых топлив в дизелях показывает пропорциональное снижение сажевыделения дизеля с увеличением доли оксигенатного топлива. Максимальная подача спиртового топлива в КС дизеля достигается при непо-

средственном впрыске спирта в КС отдельной форсункой, поэтому максимального снижения дымности при работе дизеля на спиртовом топливе следует ожидать при прямом впрыске этанола в цилиндр с воспламенением от факела запального топлива.

Во второй главе подробно рассмотрены современные научные теории механизма образования и газификации сажи, эволюции зародышей и частиц сажи при сгорании углеводородного топлива. Рассмотрены стадии термического распада исходных углеводородов альтернативных топлив в различных зонах КС дизеля. Основным компонентом РМ являются предельные и непредельные карбоновые кислоты. По своей химической структуре кислоты отличаются друг от друга количеством атомов углерода, наличием и положением двойных связей в молекуле. Декарбоксилирование является начальной стадией термического крекинга карбоновых кислот РМ. Уравнение реакции декарбоксилирования олеиновой кислоты имеет вид:



В результате отделения карбоксильной группы образуются алканы и олефины с числом атомов углерода от 15 до 21, подвергающиеся дальнейшему термическому распаду. С ростом температуры устойчивыми остаются молекулы с всё более короткими цепями, а также циклические молекулы и радикалы бензольного ряда. Процесс термического разложения олефина, образовавшегося в результате декарбоксилирования молекулы олеиновой кислоты, с учетом индуктивного и мезомерного эффектов, представлен на рисунке 1. Аппроксимируя процесс декарбоксилирования и пиролиза

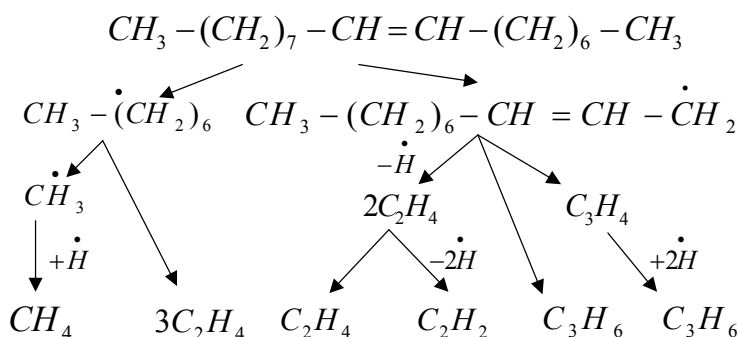
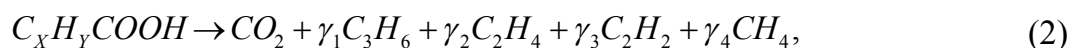


Рисунок 1 – Схема термического разложения олефина олеиновой кислоты

одной мономолекулярной реакцией разложения карбоновой кислоты РМ с произвольно ограниченным числом стабильных компонентов, получаем уравнение 2. Учитывая известное процентное содержание атомов кислорода, водорода и углерода по массе, состав РМ, используя данные высокотем-

пературного крекинга сложных олефинов и учитывая условия материального баланса, можно определить стехиометрические коэффициенты уравнения (2).



где $C_x H_y COOH$ – условная молекула карбоновой кислоты РМ; γ_i – стехиометрический коэффициент.

В зонах с недостаточной концентрацией углеводородного топлива и на границах слияния факелов этанола и РМ, процесс крекинга замедляется. В этих зонах возможно развитие холоднопламенных реакций, ведущих к образованию и осаждению на стенках цилиндра кислородсодержащих молекул, в частности пероксидов и альде-

гидов. В условиях КС при температуре свыше 800 К молекула этанола подвергается термическому распаду. Вода и этилен являются основными продуктами термического разложения этанола. Однако при определенных условиях в продуктах распада этанола обнаруживаются радикалы H , CH_3 , CH_2OH , и молекулы метана, водорода, монооксида и диоксида углерода. Их концентрация в большой степени зависит от состава топливовоздушной смеси в зоне разложения. Эндотермический эффект реакций окисления ускоряет процесс разложения, насыщая зону реакции диоксидом и монооксидом углерода. Это снижает концентрацию зародышей сажи и препятствует их росту. Этилен и метан в зоне образования сажи в результате дегидрирования образуют ацетилен. Заключительным этапом пиролиза РМ и этанола является взрывное разложение ацетилена с образованием химических зародышей частиц сажи, что составляет базис ацетиленовой модели.

Упрощенно процесс образования сажи в зоне термического разложения этанола и РМ представлен на рисунке 2.

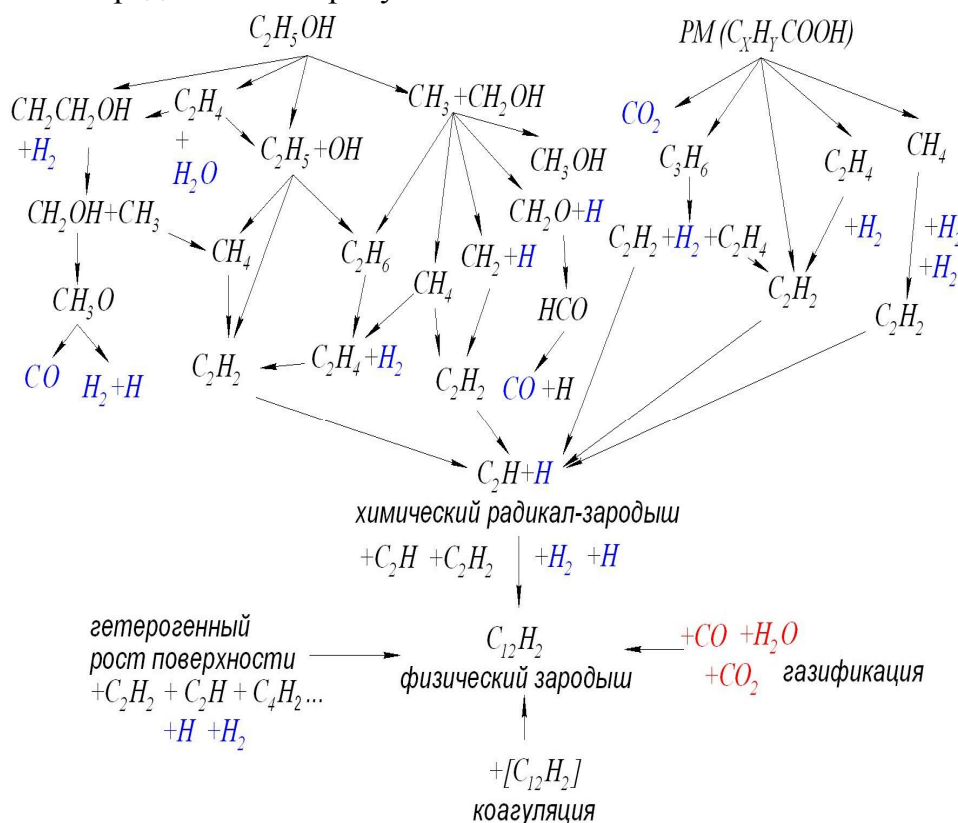


Рисунок 2 – Упрощенная схема процесса сажеобразования при работе дизеля на этаноле и РМ

Для математического описания процесса сажевыделения КС дизеля условно разделили на 3 зоны:

- зона термического разложения топлива, в которой протекают реакции образования, роста и газификации частиц сажи, поделенная на два расчетных участка: отдельно для факела этанола и для РМ;

- зона продуктов сгорания, в которой происходит газификация частиц сажи;

- зона чистого воздуха, не участвующего в процессе сгорания.

Для связывания процессов образования и горения компонентов газовой смеси в условиях дизеля в зоне образования сажи использовано уравнение (3), учитывающее подвод компонентов с испаренным топливом, пиролиз углеводородов и выгорание в процессе основного горения в КС.

$$\frac{dM_i}{d\varphi} = \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_\sigma + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_k + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_\chi, \quad (3)$$

где $dM_i/d\varphi$ – суммарная скорость изменения концентрации i -го компонента газовой смеси; $(dM_i/d\varphi)_\sigma$ – скорость изменения концентрации i -го компонента, связанного с подводом испаренного топлива; $(dM_i/d\varphi)_k$ – скорость изменения концентрации i -го компонента вследствие предпламенных химических превращений топлива; $(dM_i/d\varphi)_\chi$ – скорость изменения концентрации i -го компонента в процессе основного горения.

Допускаем, что частицы сажи проходят через реакционную зону пламени без газификации и окисляются в зоне продуктов сгорания, тогда результирующее сажевыделение можно представить в виде алгебраической суммы скоростей образования и выгорания сажи.

$$\left(\frac{dN}{d\tau}\right)_\Sigma = \left(\frac{dN}{d\tau}\right)_O - \left(\frac{dN}{d\tau}\right)_B, \quad (4)$$

где $(dN/d\tau)_\Sigma$ – суммарная скорость изменения сажесодержания в цилиндре дизеля; $(dN/d\tau)_O$ – скорость образования сажи; $(dN/d\tau)_B$ – скорость выгорания сажи, N – текущее значение сажесодержания в цилиндре, кг.

Скорости изменения концентраций реагентов газовой смеси определялись по уравнению 5, по аналогии с методом решения прямой задачи химической кинетики с использованием кинетических данных, представленных в доступных автору источниках.

$$\left(\frac{dM_i}{d\varphi}\right)_k = V_p \cdot \sum_j W_j, \quad (5)$$

где V_p – объем реакционной зоны; W_j – скорость j -той химической реакции кинетического механизма.

Объем реакционной зоны определяется из расчета суммарного числа молей газа в зоне. Объем реакционной зоны изменялся в процессе испарения и пиролиза топлива, изменения температуры и давления в КС, по мере распространения пламени.

Количество молей i -го вещества dM_i , выводимого из зоны пиролиза, зависит от его объемной концентрации и пропорционально доле выгорающего топлива, моль/град п.к.в.:

$$\frac{dM_i}{d\varphi} = M_i \frac{dx/d\varphi}{\sigma_u - x}, \quad (6)$$

где x – интегральная функция тепловыделения; σ_u – интегральный закон испарения топлива в камере сгорания.

Учитывая скорость разложения углеводородов и окисления молекул ацетилена, а также отвод компонентов из зоны реакции, которая принимается пропорциональной скорости тепловыделения, можно определить количество молей C_2 , которые перешли в твердую фазу по гетерогенным реакциям роста частиц сажи. Пренебрегая незначительным содержанием атомов водорода и других элементов в частице сажи, принимая

постоянную плотность частицы $1,9 \text{ г/см}^3$, можно вывести уравнение, связывающее количество молей $C_2 z_c$ в частице диаметром D_c :

$$D_c = 0,342 \cdot \sqrt[3]{N_A \cdot z_c}, \quad (7)$$

где z_c – моль C_2 в частице сажи; N_A – число Авогадро.

Для того, чтобы установить средний диаметр частицы сажи нужно общее количество молей $C_2 z_l$ поделить на количество частиц в реакционной зоне N_l . Тогда дифференциальное уравнение изменения среднего диаметра частицы сажи в зоне образования с учетом уравнения 7 определится по выражению:

$$\frac{dD_l}{d\varphi} = 0,342 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{z_l}{N_l} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\left[\frac{dz_l}{d\varphi} \cdot N_l - \frac{dN_l}{d\varphi} z_l \right]}{N_l^2}, \quad (8)$$

где φ – угол поворота коленчатого вала дизеля, град; D_l – среднемассовый диаметр частиц сажи в зоне образования.

Принимая ввод частиц сажи начальным диаметром D_n в количестве N_n пропорционально скорости испарения топлива, дифференциальное уравнение количества частиц в зоне образования можно записать:

$$\frac{dN_1}{d\varphi} = d\sigma \cdot N_H + \frac{dN_o}{d\varphi} - N_1 \cdot \frac{dx/d\varphi}{\sigma_u - x}, \quad (9)$$

где $dN_o/d\varphi$ – скорость образования зародышей частиц сажи, определяется согласно уравнениям химической кинетики

По аналогии количество молей C_2 для зоны образования и выгорания можно определить, проинтегрировав уравнения:

$$\frac{dz_1}{d\varphi} = d\sigma \cdot z_{HO} + \frac{dz_K}{d\varphi} - z_1 \cdot \frac{dx/d\varphi}{\sigma_u - x}, \quad (10)$$

$$\frac{dz_2}{d\varphi} = -\frac{dz_{CF}}{d\varphi} + z_1 \cdot \frac{dx/d\varphi}{\sigma_u - x}, \quad (11)$$

где z_{HO} – начальное количество молей C_2 подведенное в реакционную зону; z_K – моль C_2 , сконденсированных в реакционной зоне; z_{CF} – моль C_2 , потерянных с поверхности частицы в результате газификации в зоне выгорания.

Скорость газификации твердого углерода с поверхности частицы пропорциональна удельной поверхности частицы и потоку углерода, определяется по уравнению:

$$\frac{dz_{CF}}{d\varphi} = -\frac{z_2 \cdot F_y \cdot J_C}{4 \cdot 6 \cdot n}, \quad (12)$$

где J_C – суммарный поток углерода, $\text{г/м}^2 \text{ с}$; F_y – удельная поверхность частиц сажи, г/м^2 , n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин^{-1} .

Изменение диаметра частиц в зоне выгорания определяется совокупностью трех процессов: выгорания, массоподвода из зоны образования и процессом коагуляции. Для зоны выгорания скорость изменения среднемассового диаметра частицы сажи определяется по аналогии с зоной образования (уравнение 8).

Для расчета сажевыделения в цилиндре дизеля по представленной математической модели была разработана и оформлена в среде Matlab компьютерная программа. Отладка модели производилась по экспериментальным измерениям дымности ОГ дизеля при работе на дизельном топливе (ДТ) при различных нагрузочных и скоростных режимах работы. Исходными данными для расчета являлись индикаторное давление в цилиндре, осредненная температура газов, скорость тепловыделения в зависимости от угла поворота коленчатого вала (п.к.в.) (рисунок 3).

Применение этанола и РМ вызывает ряд характерных изменений в процессе сгорания в цилиндре дизеля. Растет период задержки воспламенения вследствие пониженного цетанового числа, снижения скорости испарения запального топлива в КС, ухудшения процесса смесеобразования, локального снижения температуры газов в цилиндре при испарении спирта. Этот негативный эффект компенсируется высокой скоростью сгорания этанола и активным подводом тепла к рабочему телу после ВМТ.

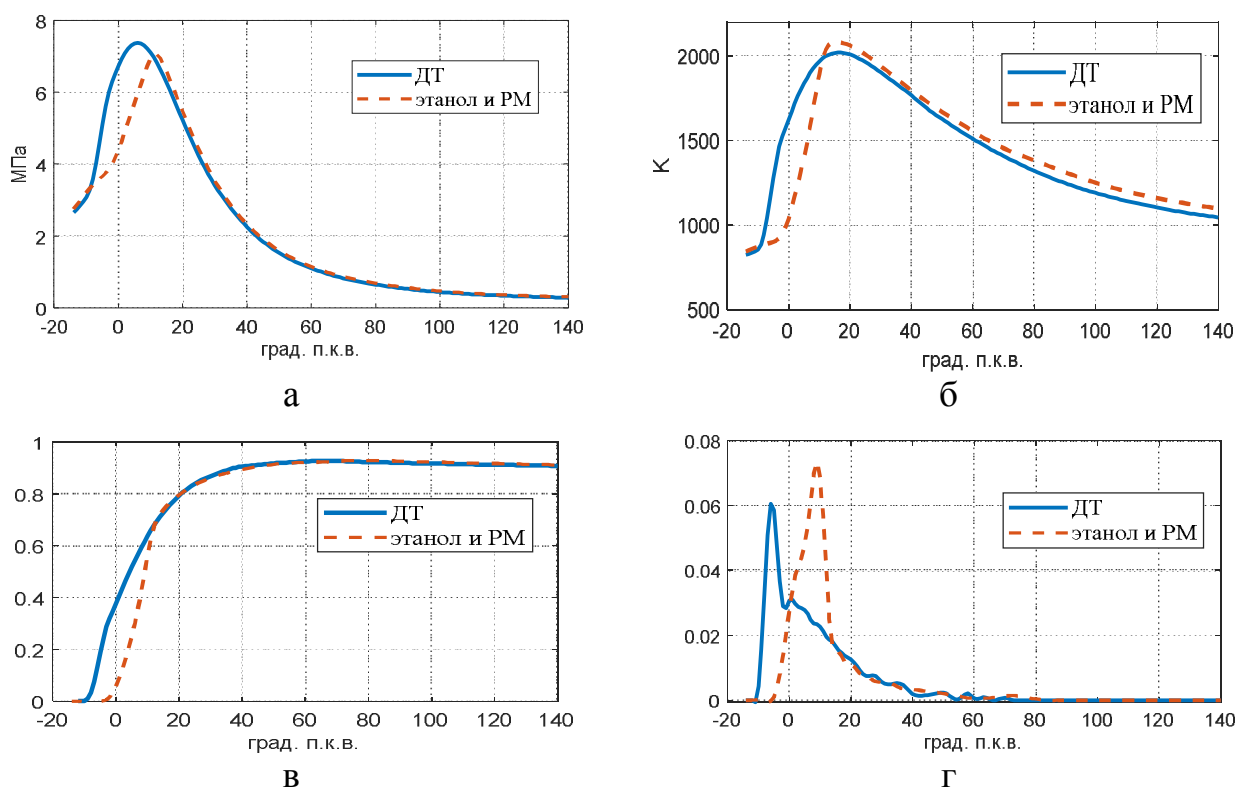


Рисунок 3 - Показатели процесса сгорания топлив в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на ДТ и этаноле и РМ на номинальном режиме работы: а – индикаторное давление; б – осредненная температура газов в цилиндре; в – активное тепловыделение; г – скорость тепловыделения

Трансформация сгорания отражается на процессе сажевыделения и результатах моделирования содержания сажи в цилиндре дизеля (рисунок 4). Максимальное количество частиц при работе дизеля на альтернативных топливах в 2,5 раза выше, чем при работе на ДТ. Это вызвано ростом периода задержки воспламенения и накопле-

нием большого количества углеводородов в реакционной зоне, а также низкой скоростью коагуляции частиц в реакционной зоне разложения этанола. Следует отметить снижение скорости роста частиц сажи в факеле этанола, что отражается в уменьшении среднемассового диаметра частиц сажи в цилиндре по сравнению с работой дизеля на ДТ. Перемещение экстремумов функций количества частиц и среднемассового диаметра на поздние углы п.к.в. вызвано смещением процесса сгорания. Более раннее сгорание топлива сопровождается интенсивной газификацией сажи и одновременно высокой скорости коагуляции частиц. Это вызывает значительные перепады содержания сажи в цилиндре дизеля при работе на ДТ. К моменту открытия выпускного клапана при $\varphi = 140^\circ$ п.к.в. массовое содержание сажи в цилиндре дизеля стабилизируется, а скорость газификации сажи постепенно снижается до минимальных значений.

По результатам расчета процесса сажеобразования концентрация сажи в цилиндре при работе дизеля на этаноле и РМ снижается на всех углах п.к.в. (рисунок 4, в). При работе на номинальном режиме максимальная расчетная концентрация сажи в цилиндре составляет $1,93 \text{ г/м}^3$ при $\varphi = 15,6^\circ$ п.к.в. При $\varphi = 140^\circ$ п.к.в. концентрация сажи в цилиндре падает до $0,092 \text{ г/м}^3$. Массовое содержание сажи достигает максимального значения при $26,1$ град п.к.в. и составляет $0,216 \text{ мг}$. В момент открытия выпускного клапана масса сажи падает до $0,093 \text{ мг}$. При работе на ДТ расчетное максимальное содержание сажи составляет $0,826 \text{ мг}$ при $\varphi = 19,2^\circ$ п.к.в. Масса сажи при открытии выпускного клапана составляет $0,279 \text{ мг}$, что в три раза больше, чем при работе на альтернативных топливах.

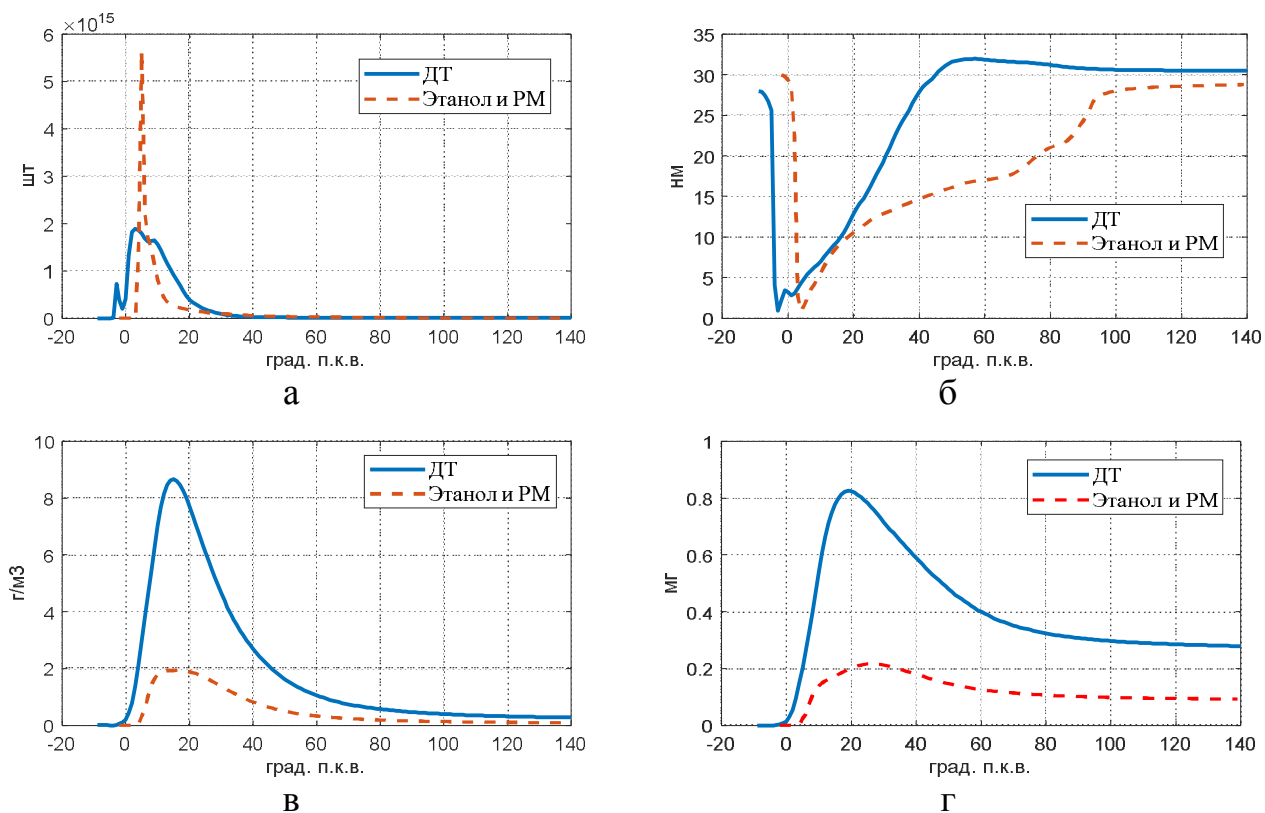


Рисунок 4 - Расчетные показатели сажесодержания в цилиндре дизеля при работе: а – количество частиц сажи, шт; б – текущий среднемассовый диаметр частиц сажи в цилиндре, нм; в – массовая концентрация сажи в цилиндре, г/м^3 ; г – массовое содержание сажи в цилиндре, мг

В третьей главе представлена методика экспериментальных исследований, описана экспериментальная установка, которая состоит из дизельного двигателя 2Ч 10,5/12,0 с полусферической КС в поршне, оборудованного отдельной топливоподачей (рисунок 5), электротормозного стенда SAK - N 670 с балансирной маятниковой машиной и весовым механизмом «Рапидо», соединенных с дизелем карданным валом, и другой измерительной аппаратуры. Индицирование проводилось при помощи пьезокварцевого датчика давления PS01, установленного в головку первого цилиндра. Сигнал от датчика поступал на ПК через усилитель AQ05 и АЦП La-2USB12.

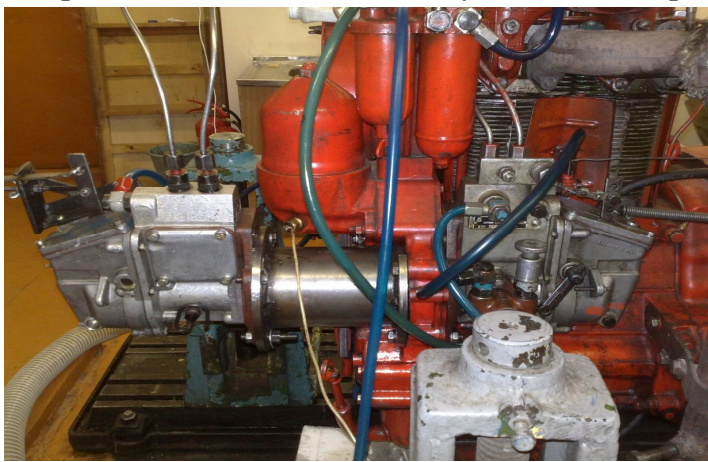


Рисунок 5 – Дизель 2Ч 10,5/12,0, оборудованный отдельной топливоподачей

Обработка индикаторных диаграмм проводилась при помощи специального алгоритма наложения массивов данных. По осредненной индикаторной диаграмме по методике ЦНИДИ определялись показатели процесса сгорания. Отбор и анализ проб ОГ производился при помощи системы газового анализа АСГА-Т. При определении дымности был применен фильтрационный метод измерения. Почернение фильтра

оценивалось по степени его оптического отражения в сравнении с чистым фильтром и измерялось с помощью оптико-электрического рефлектометра «BOSCH» EFAW-68A. Отбор пробы для определения дымности ОГ проводился с учетом требований ГОСТ 24028-2013 и ГОСТ 17.2.2.02-98, ГОСТ 51250-99, ГОСТ Р 41.24-2003. При проведении стендовых испытаний использовались летнее ДТ (ГОСТ 305-82, ГОСТ 305-2013), моторное масло М-10 Г2 (ГОСТ 8581-78), этиловый спирт (ГОСТ Р 55878-2013) и РМ (ГОСТ 31759-2012). Во время проведения стендовых испытаний отбор проб ОГ, монтаж оборудования и приборов, определение погрешности измерений осуществлялись с учетом следующих ГОСТов: ГОСТ 18509-88; ГОСТ Р 41.96–2011; ГОСТ Р 17.2.2.07–2000; ГОСТ 17.2.2.01–84 и др.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований и моделирования влияния применения этанола и РМ в дизеле 2Ч 10,5/12,0 на эффективные и экологические показатели и показатели сажесодержания и процесса сгорания.

На начальном этапе проводились испытания для определения оптимальной запальной порции РМ, а также влияние соотношения цикловых подач этанола и РМ на процесс сгорания и дымность ОГ дизеля. С увеличением цикловой подачи РМ растет концентрация сажи в цилиндре (рисунок 6) и дымность ОГ. На номинальном режиме работы дизеля по эффективным и экономическим показателям целесообразно установить подачу РМ $q_z = 13$ мг/цикл. С увеличением запальной порции возрастает дальность факела и ухудшается процесс смесеобразования, с уменьшением – растет период задержки воспламенения, снижается эффективность процесса сгорания.

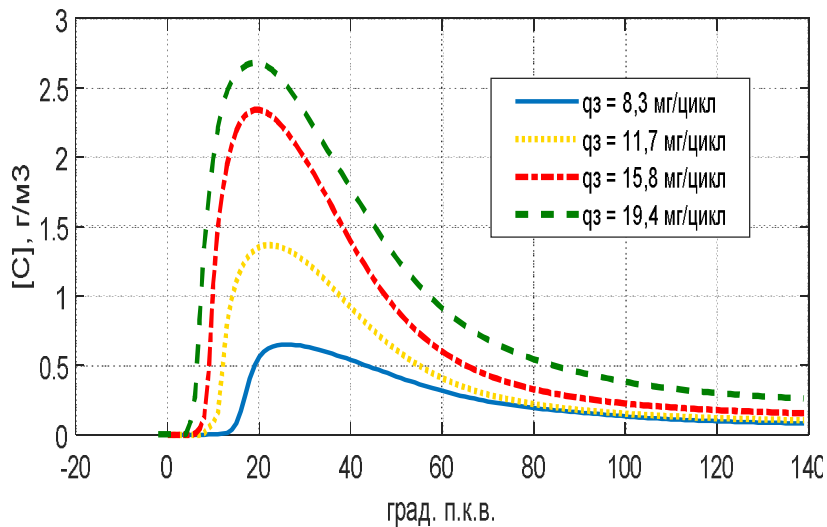


Рисунок 6 – Влияние величины запальной порции РМ при работе дизеля на этаноле на концентрацию сажи в цилиндре на номинальном режиме

На следующем этапе исследований определялось влияние установочных углов опережения впрыска (УУОВ) РМ (Θ_{PM}) и этанола ($\Theta_{Э}$) на показатели работы дизеля и дымность ОГ. Снижение дымности ОГ при увеличении УУОВ топлив (рисунок 7, а) связано с увеличением доли топлива, сгорающего в гомогенной смеси.

Одновременно с этим снижается максимальная осредненная температура T_{max} в цилиндре (рисунок 7, б), ухудшаются условия выгорания частиц сажи. Ранняя инициация процесса сгорания и сажеобразования увеличивает суммарное время газификации твердого углерода в КС. Кроме того, работа дизеля на неоптимальных углах вызывает повышение цикловой подачи этанола и уменьшение коэффициента избытка воздуха, что создает дополнительные условия для повышения дымности ОГ.

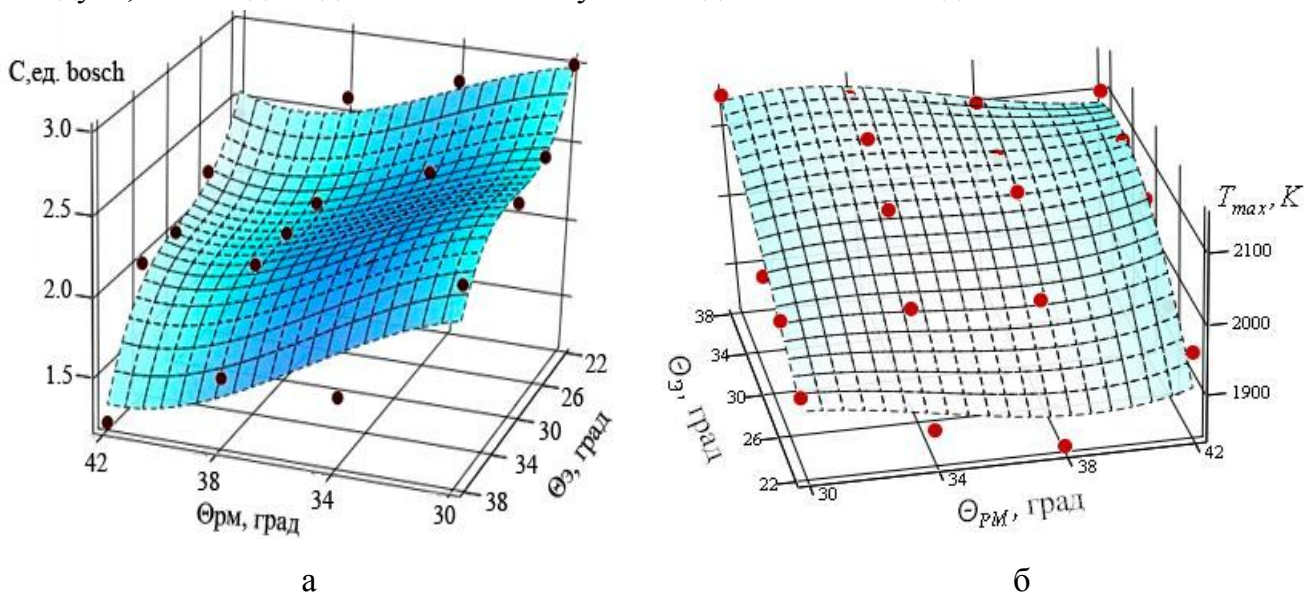


Рисунок 7 – Влияние УУОВ этанола и РМ на номинальном режиме работы дизеля на дымность ОГ C , ед. Bosch и максимальную осредненную температуру газов T_{max}

На оптимальных УУОВ топлива и постоянной цикловой подаче запального топлива снимались нагрузочные и скоростная характеристики работы дизеля.

Суммарный удельный эффективный расход топлива $g_{e\Sigma}$ при работе на этаноле и РМ определялся алгебраическим сложением. Минимальное значение $g_{e\Sigma}$ в зависимости от нагрузки, достигается при $p_e = 0,635$ МПа и составляет 367 г/(кВт·ч) (рисунок 8, а). На малых нагрузках значение эффективного КПД при работе на РМ и этаноле

ниже, чем при работе на ДТ. Графики пересекаются при нагрузках, близких к номинальному режиму работы. При дальнейшем росте нагрузки эффективный КПД при работе на альтернативных топливах выше, чем на ДТ.

На скоростных режимах в диапазоне от $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$ до номинальной частоты вращения (1800 мин^{-1}) происходит увеличение крутящего момента M_k и эффективной мощности N_e (рисунок 8, б). Эффективность работы дизеля при цикловой подаче этанола, соответствующей номинальному режиму, сохраняется на всем диапазоне частот вращения коленчатого вала дизеля выше, чем при работе на ДТ.

Процесс сгорания в цилиндре дизеля при различных нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля оказывает существенное влияние на сажеобразование в цилиндре (рисунок 9).

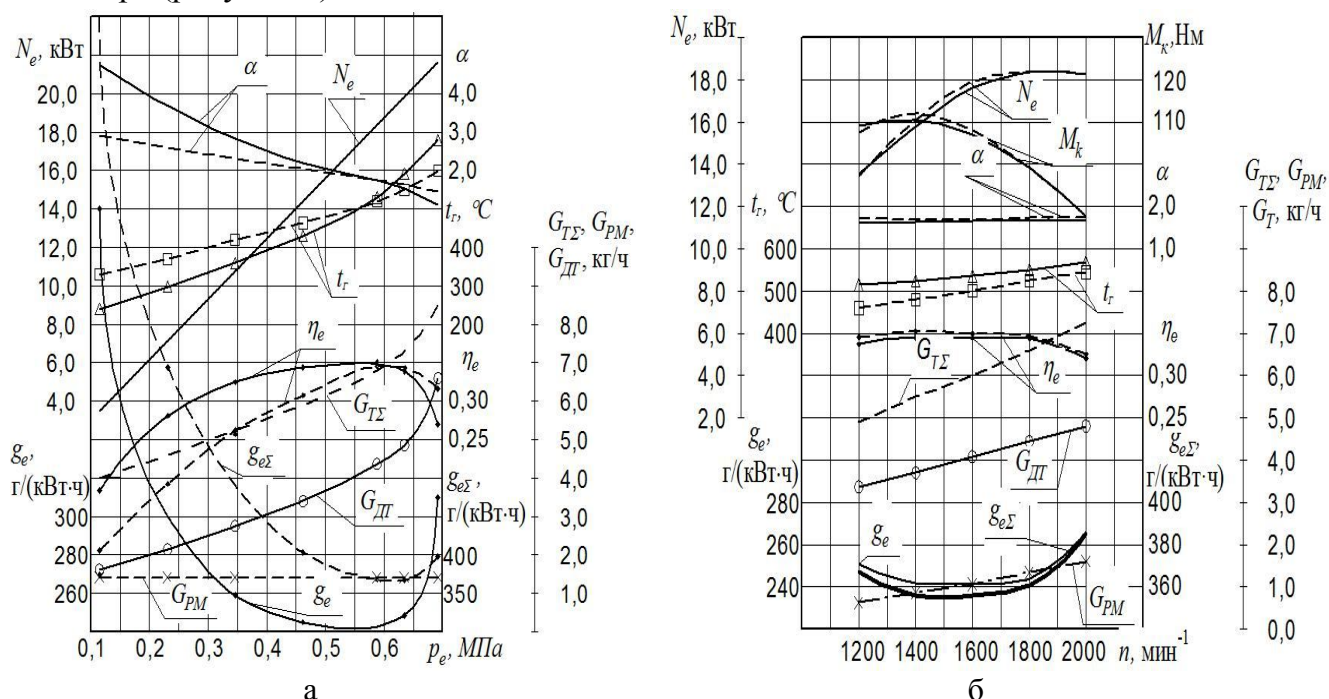


Рисунок 8 – Влияние применения этанола и РМ на эффективные показатели дизеля: а - в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; б - в зависимости от частоты вращения коленчатого вала дизеля

— ДТ; — — — этанол и РМ

Рост нагрузки сопровождается увеличением подачи этанола и падением коэффициента избытка воздуха, что в свою очередь вызывает рост сажеобразования. Кроме увеличения объема участков богатой топливо-воздушной смеси (ТВС), растет осредненная температура газов в цилиндре. Это в совокупности увеличивает скорость разложения топлива и сажеобразования (рисунок 9, а). Рост частоты вращения коленчатого вала двигателя вызывает смещение функции испарения топлива в цилиндре на более поздние углы п.к.в., и, несмотря на увеличение периода задержки воспламенения, снижается масса топлива, сгорающего в гомогенной ТВС, что влечет рост суммарного сажевыделения (рисунок 9, б).

Результаты расчета концентрации сажи в цилиндре при открытии выпускного клапана (140 град. п.к.в.) удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных измерений дымности ОГ на всех установившихся режимах работы дизеля.

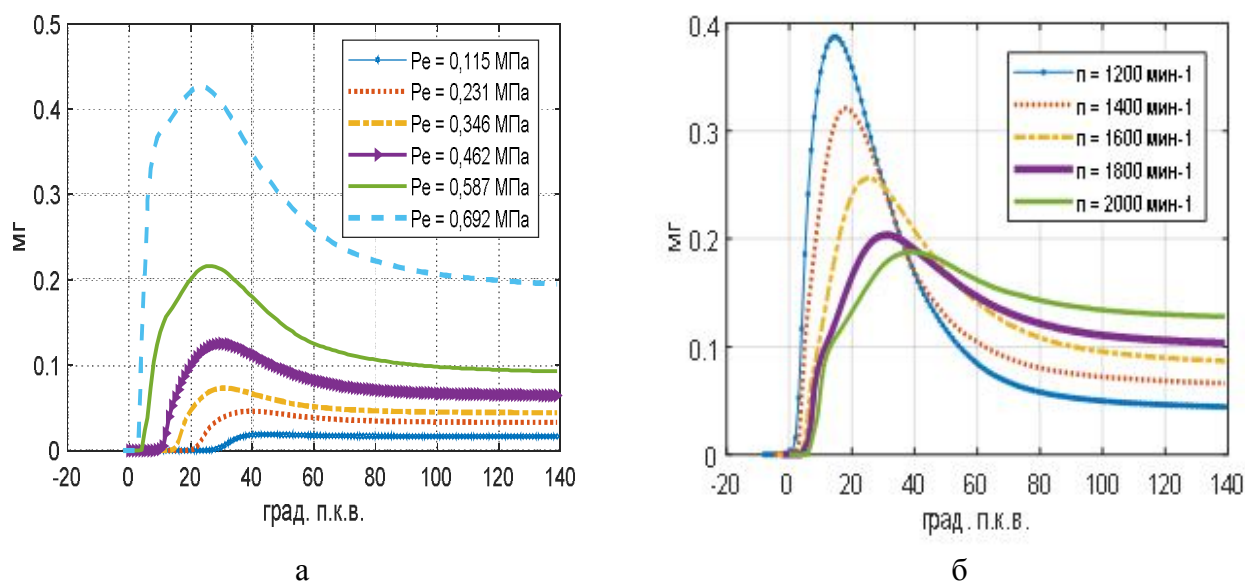


Рисунок 9 – Массовое содержание сажи в цилиндре дизеля: а – при изменении нагрузки; б – при изменении скоростного режима работы дизеля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных лабораторно-стендовых и теоретических исследований влияния применения этанола с воспламенением от запального РМ на процессы образования и выгорания сажи, эффективные и экологические показатели работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 установлено снижение вредных выбросов сажи, содержания оксидов азота в ОГ при сохранении мощностных показателей на уровне серийного дизеля. При этом использование альтернативных топлив позволяет полностью заместить ДТ без внесения существенных изменений в конструкцию дизеля.

2. На основании теоретических исследований кинетического механизма образования твердых частиц при горении углеводородов уточнен химизм процесса образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ.

3. На основе предложенного химизма была доработана и оформлена в среде Matlab математическая модель расчета массовой концентрации сажи $[C]$ и массового содержания сажи N в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле с запальным РМ.

4. В результате расчетов по предложенной математической модели процесса сажеобразования в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле с запальным РМ определены текущие значения содержания сажи в цилиндре, массовой концентрации сажи, количество частиц сажи и среднемассовый диаметр частиц в зависимости от угла поворота коленчатого вала дизеля при работе на различных нагрузочных и скоростных режимах работы. Представленные расчетные теоретические массивы показателей сажесодержания в цилиндре дизеля согласуются с современными представлениями о динамике внутрицилиндровых процессов и подтверждаются экспериментальными измерениями дымности ОГ дизеля.

5. По экспериментальным исследованиям установлено снижение дымности ОГ дизеля при работе на этаноле и РМ при оптимальных регулировочных параметрах:

- на номинальном режиме работы при частоте вращения коленчатого вала дизеля $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и среднем эффективном давлении $p_e = 0,588 \text{ МПа}$ дымность ОГ при работе на ДТ составляет 5,3 ед. по шкале Bosch, при работе на этаноле и РМ 2,2 ед. по шкале Bosch;

- на режиме максимального крутящего момента при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,592 \text{ МПа}$ дымность ОГ дизеля при работе на ДТ составляет 3,8 ед. по шкале Bosch, при работе на этаноле и РМ - 1,6 ед. по шкале Bosch.

При этом массовая концентрация сажи в ОГ при применении альтернативных топлив падает на соответствующих режимах работы дизеля в 3,8 раза и 3,4 раза.

6. Экспериментальными исследованиями определены значения массовой концентрации сажи в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от изменения частоты вращения. Установлено, что при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ концентрация сажи при работе на ДТ составляет $0,222 \text{ г/м}^3$. При работе на этаноле и РМ $[C] = 0,069 \text{ г/м}^3$, т.е. снижение в 3,2 раза. При $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ концентрация сажи в ОГ уменьшилась в 3,8 раза с $0,445 \text{ г/м}^3$ при работе на ДТ до $0,119 \text{ г/м}^3$ при работе на этаноле и РМ.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- представленная методика расчета сажевыделения в цилиндре дизеля может быть использована при многозонном моделировании и исследовании внутрицилиндровых процессов - тепловыделения, теплообмена и др. Повышение точности вычислений по предложенной модели может быть достигнуто совершенствованием математических алгоритмов, входящих в программный комплекс, описывающих скорость испарения топлива, развития топливного факела, определения локальных температур, скорости распространения пламени, локальный состав газов в цилиндре и др.;

- подпрограмма вычисления скорости образования, роста и газификации сажи в цилиндре дизеля оформлена отдельным блоком с набором входных выходных параметров, и может быть использована и модернизирована для моделирования процессов в КС других типов дизелей, работающих на традиционном и других альтернативных топливах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты диссертации отражены в 59 публикациях, основные из которых следующие:

Монографии:

1. Козлов, А.Н. Снижение дымности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на рапсовом масле и этаноле с двойной системой топливоподачи: монография [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов. - Киров: Вятская ГСХА, 2017. – 134 с.

2. Козлов, А.Н. Работа дизеля на этаноле и рапсовом масле: монография [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов. - Киров: Вятская ГСХА, 2018. – 172 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:

3. Козлов, А.Н. Влияние применения рапсового масла и этанола в дизеле 2Ч 10,5/12,0 с ДСТ на индикаторные показатели, показатели процесса сгорания и характеристики тепловыделения [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. - Вып. 16. - Т. 4. – С. 162 – 166.

4. Улучшение эффективных показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле с двойной системой топливоподачи [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов [и др.] // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. - Вып. 16. - Т.4. – С. 166 – 170.

5. Козлов, А.Н. Определение оптимальных установочных углов опережения впрыскивания топлива дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. - 2014. - № 6. – С. 47-50.

6. Козлов, А.Н. Эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле с двойной системой топливоподачи [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Тракторы и сельхозмашины. - 2014. - № 7. - С. 5-7.

7. Влияние этанола и рапсового масла на показатели процесса сгорания дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, М.И. Арасланов, А.Н. Козлов [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2016. - №11. – С.50-52.

8. Козлов, А.Н. Влияние этанола и рапсового масла на дымность отработавших газов дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2016. - №12 (117). – С. 24-26.

9. Математическое моделирование испарения рапсового масла и этанола в камере сгорания дизельного двигателя [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, С.А. Романов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2016.- № 4. - С. 3-6.

10. Моделирование процессов испарения и пиролиза топлив в камере сгорания дизеля 2Ч10,5/12,0 при работе на рапсовом масле и этаноле [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2017. - №4. – С.42-47.

11. Козлов, А.Н. Математическое моделирование образования и выгорания сажи в цилиндре 2Ч 10,5/12,0 дизеля при работе на рапсовом масле и этаноле [Электронный ресурс] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. - №8 (68). – С. 14.

12. Козлов, А.Н. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.Н. Козлов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2019. - Т. 25. № 1. - С.47-59.

В материалах Международных и Всероссийских научных конференций:

13. Козлов, А.Н. Обзор работ по применению метанола и этанола в качестве топлива для дизелей с использованием двойной системы топливоподачи [Текст] / А.Н. Козлов // Науке нового века - знания молодых: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Киров: Вятская ГСХА, 2012. – С. 20-24.

14. Козлов, А.Н. Применение рапсового масла в качестве моторного топлива для дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Международный. молодежная науч. конф. «XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых)»: материалы конф. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2013. – С. 228 – 230.

15. Козлов, А.Н. Пиролиз рапсового масла в условиях камеры сгорания дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. - Йошкар-Ола, 2014. - Вып. 16. - С. 189-191.

16. Козлов, А.Н. Феноменологическая модель образования и выгорания частиц сажи в цилиндре дизеля [Электронный ресурс] / В.А. Лиханов, М.И. Арасланов, А.Н. Козлов // Общество, наука, инновации (НПК-2014): Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. материалов, 15-16 апреля 2014 г. – Киров, 2014. - С. 1972-1974.

17. Козлов, А.Н. Сажеобразование в камере сгорания дизеля [Текст] / А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. - Киров: Вятская ГСХА, 2016. - Вып. 13. - С. 175-182.

18. Козлов, А.Н. Влияние применения рапсового масла на дымность отработавших газов дизелей [Текст] / А.Н. Козлов, А.С. Юрлов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. – Киров: Вятская ГСХА, 2017. – Вып. 14. - С. 53-61.

19. Козлов, А.Н. Определение концентрации окислительных компонентов, омывающих частицу сажи в газовом потоке, при работе дизеля на рапсовом масле и этаноле [Текст] / А.Н. Козлов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. – Киров: Вятская ГСХА, 2017. – Вып. 14. - С. 70-75.

20. Козлов, А.Н. Термическое разложение этанола в камере сгорания дизеля [Текст] / А.Н. Козлов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. – Киров: Вятская ГСХА, 2018. - С. 109-116.

Заказ № 247. Подписано к печати 25.07.2019 г.
Формат 60x84 1/16. Объем усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Бумага офсетная. Цена договорная.

Отпечатано с оригинал-макета.
610017, г. Киров, Вятская ГСХА, Октябрьский проспект, 133.
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО Вятская ГСХА.