

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Вятская государственная сельскохозяйственная академия»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор В.А. Лиханов

Киров - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1.1 Экологические и энергетические аспекты применения биотоплив в России и мире	12
1.2 Требования к дымности ОГ дизелей	15
1.3 Сажеобразование в дизелях	19
1.3.1 Физические свойства, состав и структура частиц сажи.....	19
1.3.2 Особенности сажеобразования в КС дизеля	23
1.4 Влияние применения альтернативных топлив на дымность ОГ дизеля	35
1.4.1 Влияние применения этанола на дымность ОГ дизеля	35
1.4.2 Влияние применения РМ на дымность ОГ дизелей.....	38
1.5 Задачи исследования	47
2 Теория образования сажи в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ ...	48
2.1 Механизмы образования частиц сажи.....	48
2.2 Газификация частиц сажи	59
2.3 Химизм сажеобразования в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ.....	63
2.4 Математическое моделирование процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ	75
2.5 Результаты математического моделирования сажевыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0	89
3 Методика исследования рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ.....	97
3.1 Объект и методика исследований.....	97
3.2 Приборы и оборудование для исследования рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ.....	102
3.3 Оценка погрешности измерений	109
4 Результаты исследований влияния применения этанола и РМ на показатели работы дизеля.....	113

4.1 Влияние величины запальной порции РМ на показатели работы дизеля на этаноле и РМ.....	113
4.2 Показатели работы дизеля на этаноле и РМ в зависимости от УУОВ.....	118
4.2.1 Показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ при различных УУОВ.....	118
4.2.2 Показатели сажесодержания в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ при различных УУОВ.....	123
4.3 Влияние применения этанола и РМ на эффективные и экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения нагрузки.....	130
4.4 Влияние применения этанола и РМ на показатели процесса сгорания и сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от изменения нагрузки.....	133
4.5 Влияние применения этанола и РМ на эффективные и экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала.....	140
4.6 Влияние применения этанола и РМ на показатели процесса сгорания и сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала дизеля.....	142
Заключение.....	149
Список сокращений и условных обозначений.....	151
Список литературы.....	153
Приложения	
Приложение А Перечень реакций, рассматриваемых для определения концентрации компонентов газовой смеси в зоне термического разложения этанола в КС дизеля	
Приложение Б Программный код вычисления показателей сажесодержания в зоне термического разложения этанола	
Приложение В Результаты численного моделирования	
Приложение Г Макетный образец трактора Т-30А80	
Приложение Д Акты внедрения результатов исследования в учебный процесс и в производство	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Неизбежность энергетического кризиса, вызванного неуклонным ростом потребления исчерпаемых энергоресурсов, вынуждает человечество искать альтернативные возобновляемые источники энергии. Их активное использование также должно снижать экологический ущерб, наносимый окружающей среде, связанный с применением традиционных топлив.

В отработавших газах (ОГ) дизелей, работающих на нефтяном топливе, присутствует более 280 токсичных компонентов. Горение дизельного топлива в камере сгорания (КС) двигателя сопровождается интенсивным сажевыделением и образованием полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), оказывающих негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека. Сажа, попадающая в окружающую среду с ОГ дизелей, оседает на окружающей поверхности, откладывается в почве, через дыхательные пути попадает в ткани человека, что может стать причиной различных заболеваний. На поверхности частиц сажи адсорбируются опасные для человека углеводороды. В их числе продукты пиролиза молекул топлива, формальдегиды и ПАУ, включая бенз(а)пирен. Законодательные власти во всем мире планомерно ужесточают нормы содержания вредных веществ в ОГ двигателей, заставляя большинство производителей искать пути улучшения экологических характеристик современной автотранспортной техники.

Среди токсичных компонентов ОГ дизелей одним из наиболее вредных являются твердые частицы, состоящие преимущественно из сажи. Для сажи условный коэффициент агрессивности при работе на дизельном топливе составляет 200 единиц. Для сравнения для оксидов азота этот показатель равен 41 [87]. Такой высокий коэффициент обусловлен наличием канцерогенов на поверхности частицы.

Из всего многообразия существующих методов снижения дымности ОГ одним из самых эффективных способов является применение альтернативных

топлив, менее склонных к образованию сажи в условиях КС из-за особенностей химического состава и физических свойств. К таким топливам можно отнести спирты и растительные масла. Необходимо изучать все аспекты применения этих топлив и на стадии производства, хранения, особенности работы двигателей на этих топливах. 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.

В соответствии с энергетической стратегией России на период до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р, отдельное внимание уделяется перспективе обеспечения рационального, экономически обоснованного роста использования различных видов возобновляемых источников энергии, а также расширения использования альтернативных видов топлива для транспорта [117]. Потенциальные энергетические возможности России в области альтернативных источников энергии, как и в случае ископаемых углеводородов, превосходят таковые любой страны мира [135]. В ближайшие десятилетия наша страна способна освоить объемы производства альтернативных источников энергии из биомассы, сопоставимые по объемам добычи нефти, природного газа или угля.

Снижение доли транспорта в загрязнении окружающей среды является одним из главных государственных приоритетов, выделенных в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 22.11.2008 N 1734-р [116]. 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. Новые топлива должны отвечать не только требованиям безопасности, но и быть продуктом переработки доступного дешевого возобновляемого сырья.

Степень разработанности темы исследований. 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. Луневой, 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. Чупракова и других.

Вопросы применения топлив растительного происхождения совместно с дизельным топливом (ДТ) 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 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. Шаромова, Н. Vockhorn, M. Frenklach, J. Nagle, H.Gg.

Wagner и др. [5, 6, 15, 46, 47, 54, 55, 60, 72, 73, 74, 75, 78, 81, 82, 84, 100, 110, 118, 120, 138, 152, 157, 176, 205].

В результате анализа 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).

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.

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 сажесо-

держания в цилиндре и ОГ 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 исследований. 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 общепринятые методики проведения стендовых испытаний дизелей. Обработка экспериментальных данных производилась с использованием современных компьютерных программ со встроенными аппаратами математического анализа и алгоритмами работы с массивами. При определении основных показателей работы дизеля по экспериментальным измерениям использовались общеизвестные математические 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 раз-

личных 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, экономических 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Экологические и энергетические аспекты применения биотоплив в России и мире

В последние годы все большие усилия ученых во всем мире направлены на решение проблемы истощения невозобновляемых энергетических ресурсов планеты. Несмотря на повсеместное внедрение энергосберегающих технологий, суммарное мировое потребление энергии человечеством растет. К 2040 году основным энергетическим источником на планете останутся исчерпаемые углеводороды (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Прогноз международного энергетического агентства (МЭА) на общемировое энергопотребление к 2040 году [182]

С целью обеспечения энергетической безопасности мировое сообщество ищет пути снижения энергозависимости от исчерпаемых топлив. Перспективным направлением развития современной энергетики является использование биотопливных технологий, доля которых в мировой структуре потребления топлив неуклонно растет. Одним из основных потребителей энергии традиционно является транспортная отрасль, на которую приходится более четверти от общего потребления. При этом доля нефти и нефтепродуктов в структуре потребления топлива автомобильным транспортом в развитых странах составляет до 95% [192].

В 2001 году Европейской комиссией была одобрена стратегия постепенного замещения моторного топлива тремя основными видами альтернативных

топлив: природный газ, биотопливо и водород. В 2009 году была издана директива Европейского союза Renewable Energy Directive 2009/28/ЕС, в которой поставлена цель достижения 10%-ной доли используемого биотоплива в транспортной сфере к 2020 году [173].

В 2003 году Европейская комиссия приняла директиву 2003/30ЕС, в которой поставила задачу увеличения доли биотоплива в общем балансе топлив для транспорта с 2% в 2005 году до 5,75% в 2010 году. К 2030 году планируется заменить 25% традиционных топлив биотопливом. По оценкам МЭА доля биотоплив к 2050 году в транспортной сфере может возрасти до 750 млн т.н.э. и составить 27% всего топлива, используемого транспортом [109].

Россия обладает значительным потенциалом в области развития производства возобновляемых источников энергии, в том числе крупнейшей в мире площадью пахотных земель. В энергетической стратегии России на период до 2030 года отмечается необходимость обеспечить рациональный, экономически обоснованный рост использования альтернативных видов топлива для транспорта и энергетики [117]. В долгосрочном прогнозе социально-экономического развития России на период до 2030 года, утвержденного Правительством, выделены ключевые области научно технического прогресса, в число которых входит транспортная система, в которой планируется развитие технологий альтернативной энергетики, в том числе рост производства и применения биотоплива на транспорте. На сегодняшний день в России на долю биотоплива из общего предложения первичной энергии приходится не более 1%, при этом около трети биотоплива используется для производства электроэнергии. Всего транспортом потребляется около 20% всей первичной энергии, и эта доля постепенно растет. Это составляет более 75% всего производимого моторного топлива. В начале 2014 года был представлен проект федерального закона «О развитии производства и потреблении биологических видов топлива», который направлен на стимулирование переработки биологических отходов, в том числе с целью производства биотоплив.

Эксплуатация автомобилей и тракторов сопровождается значительным

загрязнением окружающей среды. Основное воздействие на здоровье человека оказывает загрязнение атмосферного воздуха токсичными компонентами ОГ, загрязнение водной среды, почв и сельхозпродукции.

Снижение доли транспорта в загрязнении окружающей среды является одним из главных государственных приоритетов, выделенных в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года [116]. 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. Одним из индикаторов достижения этой цели является доля альтернативных видов топлива в общем топливопотреблении автотранспортных средств, а также доля парка мобильных средств, работающих на альтернативных топливах (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Значения индикаторов реализации Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года

Индикаторы	Годы				
	2015	2018	2020	2024	2030
1	2	3	4	5	6
Базовый сценарий					
Объем выбросов загрязняющих атмосферу веществ автотранспортом на один приведенный т-км (по отношению к уровню 2011 года), %	92	84	76	68	60
Доля альтернативных видов топлива в общем топливопотреблении автотранспортных средств, %	6	12	17	23	27
Доля парка транспортных средств с гибридными, электрическими двигателями и двигателями на альтернативных видах топлива в общей численности парка транспортных средств, %	13	21	26	35	49

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
Инновационный сценарий					
Объем выбросов загрязняющих атмосферу веществ автотранспортом на один приведенный т-км по видам транспорта (по отношению к уровню 2011 года), %	91	82	73	64	55
Доля альтернативных видов топлива в общем топливопотреблении автотранспортных средств	9	14	20	26	30
Доля парка транспортных средств с гибридными, электрическими двигателями и двигателями на альтернативных видах топлива в общей численности парка транспортных средств	16	24	29	39	54

Решение этих задач предусматривает мотивирование перехода к использованию экологически чистых видов топлива, возобновляемых источников энергии, материалов и технологий, минимизирующих негативное воздействие транспорта, а также меры экономического стимулирования экологичных транспортных технологий, оптимизацию тарифной политики на основе критериев энергоэффективности и экологического воздействия на окружающую среду.

Указом Президента РФ от 07.07.2011 N 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» отмечены технологии на базе альтернативных источников энергии в качестве приоритетных для развития.

1.2 Требования к дымности ОГ дизелей

Автотракторный парк является одним из основных источников загрязнения окружающей среды, особенно в крупных городах, где его доля в суммарном загрязнении воздушного бассейна может превышать 90% [36]. Контроль за

сокращением объемов вредных выбросов предусматривает переход на мировые экологические стандарты, примером которых могут служить существующие в ЕС Европейские экологические стандарты (нормы «Евро»), регламентирующие содержание в ОГ углеводородов, оксидов азота, угарного газа и твердых частиц (ТЧ). Наибольшей токсичностью в ОГ дизелей обладают частицы сажи и оксиды азота.

Требования к предельному содержанию ТЧ в ОГ постоянно ужесточались по мере введения новых стандартов (рисунок 1.2). Введение стандарта «Евро-5» предусматривает снижение на 80% выбросов ТЧ. Указанный стандарт также вводит единый норматив выбросов ТЧ для всех видов автомобильного транспорта составляет 5 мг/км (кроме большегрузных автомобилей и автобусов, для которых норматив до введения «Евро-6» составляет 2 мг/кВт·ч). Нормы стандарта «Евро-6» предусматривают существенное уменьшение выброса оксидов азота и твердых частиц большегрузными автомобилями и автобусами. По сравнению с «Евро-5» уровень выброса твердых частиц должен уменьшиться в два раза.

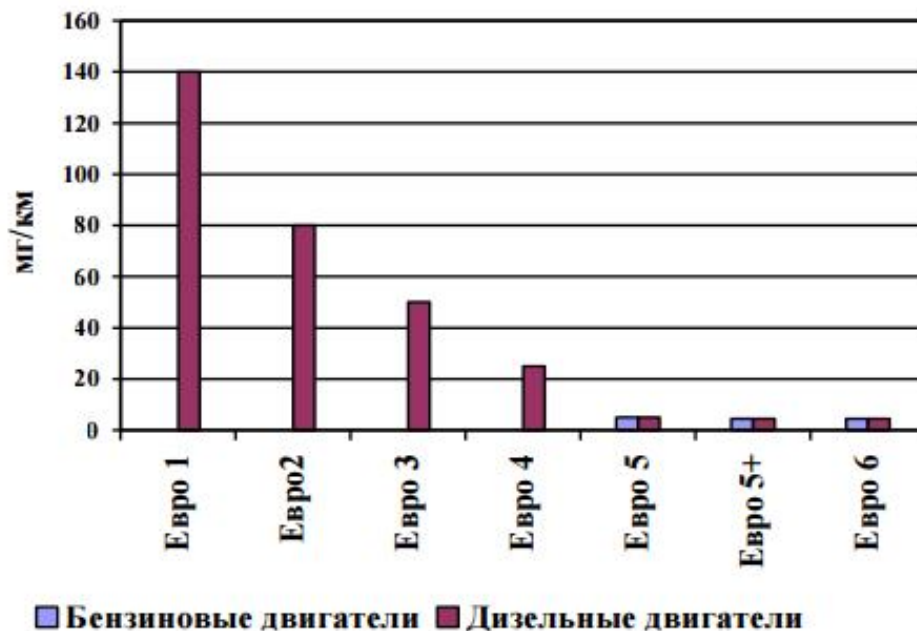


Рисунок 1.2 – Требования выбросов твердых частиц [7]

В России введение нормы «Евро-6» в ближайшее время не планируется, так как на данный момент проходит внедрение «Евро-5», который номинально

введен в нашей стране с 1 января 2014 года. Фактически переход для грузовых автомобилей и автобусов на этот стандарт осуществлен только с 1 января 2015 года, с момента официального вступления регламента Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств». С 1 января 2016 года нормы «Евро-5» стали обязательными на территории Российской Федерации для всей новой автотехники отечественного и импортного производства без исключения [57].

Нормы дымности ОГ дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин приведены в ГОСТе 17.2.2.02-98 [20]. В соответствии с требованиями стандарта значения дымности на установившихся режимах вновь изготовленных и капитально отремонтированных на ремонтных заводах дизелей, тракторов и машин не должны быть более норм, приведенных в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения норм дымности на установившихся режимах [20,104]

Условный расход воздуха, $\text{дм}^3/\text{с}$	Дымность, м^{-1} (%), не более, при воздухообмене	
	неограниченном	ограниченном
42 и менее	2,260(62,2)	1,760(53,1)
50	2,080(59,1)	1,580(49,3)
100	1,495(47,4)	0,995(34,8)
150	1,225(40,9)	0,725(26,8)
200 и более	1,065(36,7)	0,565(21,6)

Нормы дымности определяются в зависимости от условного расхода ОГ, определяемого по формуле:

$$V = \frac{i \cdot V_h \cdot n}{30 \cdot \tau}, \quad (1.1)$$

где V – расход ОГ $\text{дм}^3/\text{с}$;

i – число цилиндров дизеля;

V_h – рабочий объем цилиндра, дм^3 ;

n – частота вращения коленчатого вала дизеля;

τ – тактность дизеля.

В составе твердых частиц, выбрасываемых дизелями с отработавшими газами, содержатся частицы топливного и масляного происхождения. Их массовое соотношение зависит от параметров рабочего процесса и характеристик топлива. Частицы топливного происхождения представляют собой сульфаты воды, сажу и органически растворимые фракции [66, 144, 163]. Доля углеродной фракции в составе ТЧ может возрастать в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов работы дизеля до 90% [195]. Доля частиц сажи, имеющих масляное происхождение, зависит от многих факторов, в том числе напрямую зависит от угара масла, и может составлять до четверти массы ТЧ [163].

Всестороннее изучение процессов сажеобразования связано с негативным воздействием этого явления на промышленные мобильные и стационарные энергоустановки, сжигающие углеводородное топливо, и постоянно ужесточающимися требованиями к экологическим характеристикам таких установок. Сажа, образовавшаяся в КС дизеля, способна на своей поверхности адсорбировать другие продукты неполного сгорания топлива, в том числе имеющие канцерогенные свойства. При быстром охлаждении часть высокомолекулярных углеводородов (в том числе бенз(α)пирен) не успевает пройти все стадии процесса окисления и осажается на поверхности сажевых частиц, что и определяет канцерогенную опасность сажи [89]. Принято считать, что на каждом грамме сажи может конденсироваться более миллиграмма бенз(α)пирена, который является канцерогеном первого класса опасности [132]. Также в образцах сажи из ОГ обнаруживаются тяжелые углеводороды, сконденсированные в агломераты и превращенные в смолистые вещества [66].

Выбрасываясь с ОГ дизеля, частицы сажи, отличающиеся высокой стабильностью, способны несколько суток витать в воздухе, усугубляя тем самым опасность для человека. Попадая в легкие, вызывают раздражение, способствуют появлению злокачественных новообразований. Частицы малых размеров

не выводятся из организма. Исследования показали, что сельскохозяйственные растения способны в значительном количестве улавливать сажу [35]. Сажа существенно влияет на водный режим растений, снижая содержание воды в листьях на 10–40% и увеличивая водный дефицит растений на 5–20%.

В результате высокой излучательной способности сажи значительно возрастают потери энергии в цилиндре дизеля в виде лучистой теплоты. Часть тепла, выделяемая при сгорании сажи, отводится конвективным путем. Таким образом, появление сажи оказывает влияние на индикаторный КПД через неполноту и несвоевременность сгорания, лучистый и конвективный теплообмен [6, 92, 93]. Установлено, что снижение дымности ОГ способно в разы уменьшить долю лучистого теплообмена, что приводит к уменьшению теплонапряженности деталей двигателя и меньшему износу цилиндро-поршневой группы [10, 119, 148].

Существует множество способов снижения дымности дизелей. Один из самых эффективных методов - применение альтернативных топлив. В связи с этим существует необходимость изучения процессов сажеобразования в дизелях, в том числе при работе на альтернативных топливах.

1.3 Сажеобразование в дизелях

1.3.1 Физические свойства, состав и структура частиц сажи

Сажа представляет собой несгоревший в цилиндре дизеля углерод. Наиболее близка по условиям образования и сжигаемому продукту к дизельной саже промышленная сажа, полученная печным способом в реакторах в результате неполного сгорания распыленного форсункой углеводородного топлива при турбулентном потоке воздуха [110]. Физико-химические свойства сажи для различных топочных устройств и КС являются схожими. Однако свойства частиц могут значительно отличаться при отборе проб как на различных участках одного и того же пламени, так и при различных условиях сгорания топлива. Удельная поверхность сажи может изменяться от 15 до 120 м²/г, в зависимости

от технологических параметров получения технического углерода [110]. Плотность сажи в зависимости от содержания водорода изменяется в пределах от $1,8 \times 10^3$ до $2,1 \times 10^3$ кг/м³. Сажа на 94-99% состоит из углерода и химически связанного водорода (0,5-3,0%), некоторого количества кислорода и зольных элементов [4, 6, 100, 113]. На разных стадиях роста частицы сажи в КС атомное соотношение С/Н изменяется от 3 до 15 [100].

С помощью электронной микроскопии и рентгеноструктурных исследований стало возможным анализировать морфологию частиц сажи. Наименьшая частица представляет собой сложное гроздевидное образование связанных между собой общими углеродными слоями глобул углерода (рисунок 1.3).

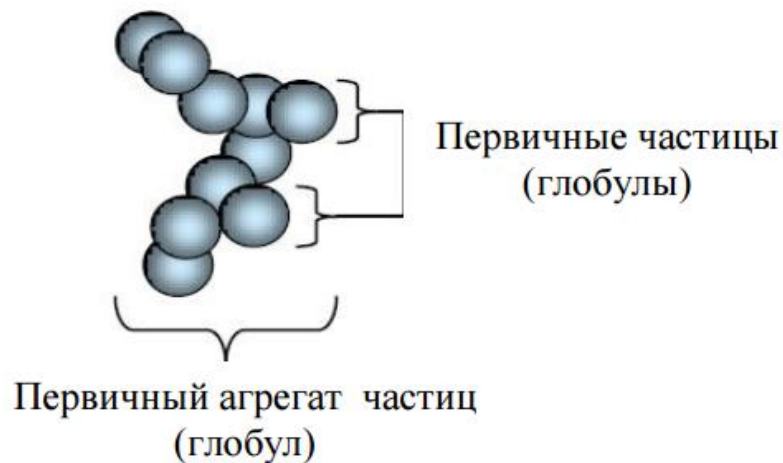


Рисунок 1.3 - Схема первичного агрегата частицы сажи [113]

Средний арифметический диаметр первичных частиц сажи (глобул) при горении в дизеле различных топлив составляет от 20 до 90 нм [111, 157]. По некоторым сведениям, размер первичных частиц сажи может варьироваться в пределах от 15 до 170 нм [94,110]. Первичная частица близка к сферической форме, в то время как агрегаты имеют сложную форму (рисунок 1.4).

Исследование частиц сажи, отобранных из выпускной системы дизелей, показывает, что их распределение по размерам очень слабо зависит от режима работы и типа используемых двигателей.

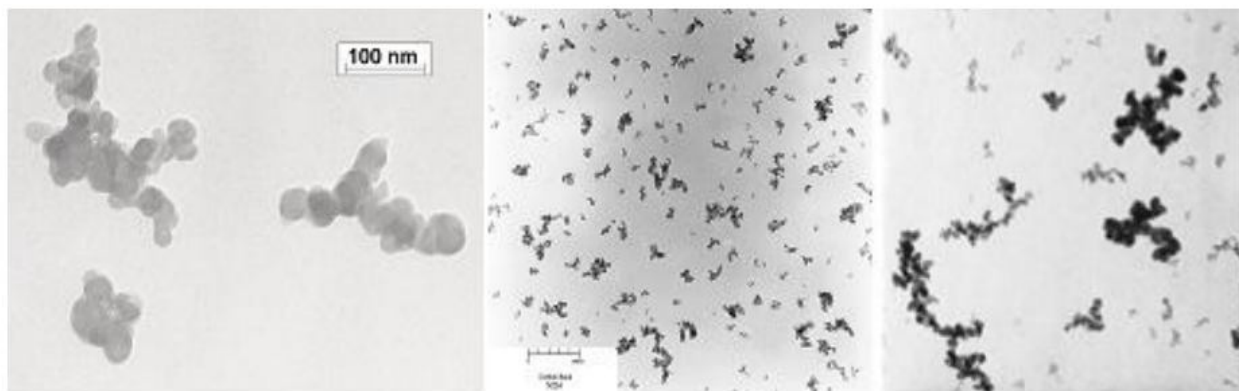


Рисунок 1.4 – Изображения первичных агрегатов частиц сажи, полученных с помощью электронного микроскопа

Установлено, что частица состоит из кристаллитов, которые представляют несколько параллельно расположенных слоев плотно упакованных гексагонов, в вершинах которых расположены атомы углерода (рисунок 1.5).

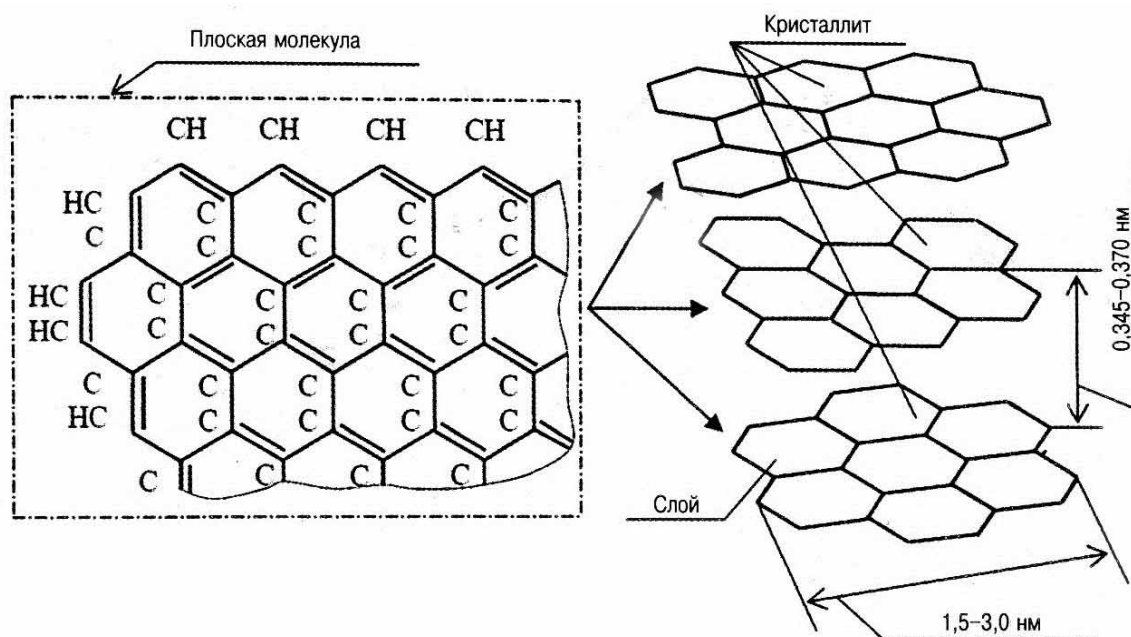


Рисунок 1.5 – Структура кристаллита сажевых частиц

Такая структура кристаллита похожа на кристаллическую решетку графита, но менее упорядоченную, с большими расстояниями между слоями. Отдельные слои могут быть произвольно повернуты относительно друг друга и относительно их общей нормали [80].

Элементарные кристаллиты содержат от 100 до 200 атомов углерода. Кристаллиты, состоящие из 2...10 пластин, имеют толщину 1,2...3,0 нм. Сфе-

рическая частица диаметром 20...30 нм содержит $10^3 \dots 10^4$ кристаллитов [100]. При термическом воздействии на сажу при температурах выше $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ элементарные кристаллиты увеличиваются по диаметру и по высоте. При температурах выше $2800 \text{ }^\circ\text{C}$ начинается процесс графитизации, который ведет к упорядочиванию кристаллической решетки [80].

В зависимости от условий сажеобразования взаимная ориентированность кристаллитов в частице может изменяться. У частицы при высоком сажесодержании ОГ сердцевина разряжена больше. В связи с этим могут быть выделены модели строения сферической наноразмерной частицы. Частица сажи с уплотненной оболочкой, состоящей из ориентированных кристаллитов 1 и менее плотной сердцевиной, представлена на рисунке 1.6, а.

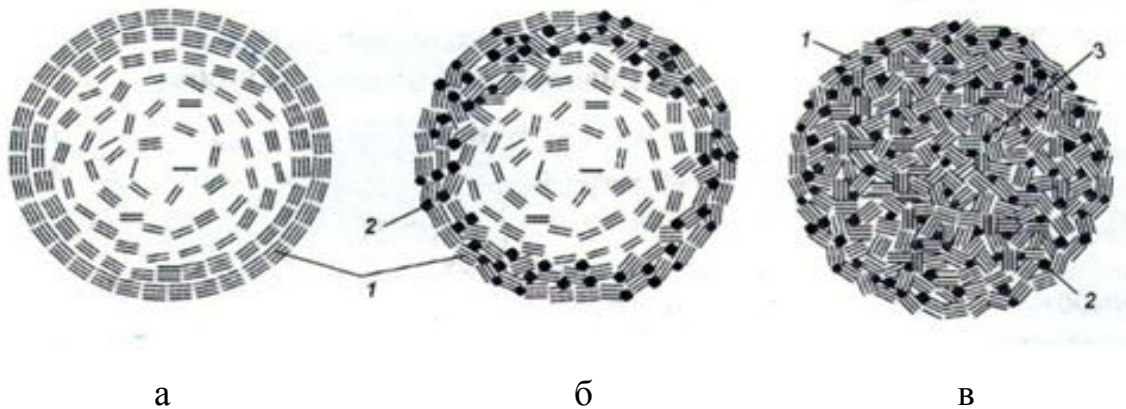


Рисунок 1.6 – Модели строения наноразмерной частицы дизельной сажи

Ориентация кристаллитов на поверхности может быть нарушена и содержать наполнители 2 из минеральных составляющих (рисунок 1.6, б). Автор статьи [111] предложил модель строения частицы сажи с хаотическим расположением кристаллитов и в сердцевине, содержащей наполнители из минеральных составляющих 3 (рисунок 1.6, в), стабилизирующих положение кристаллитов, соответствующее моменту их образования, с нарушенной ориентацией кристаллитов по поверхности.

В работе [8] предложена модель формирования сажевых частиц через дефектные кластеры – фуллерены, которые являются зародышем частицы. Ядра частиц могут образовываться в последовательности, представленной на рисунке 1.7.

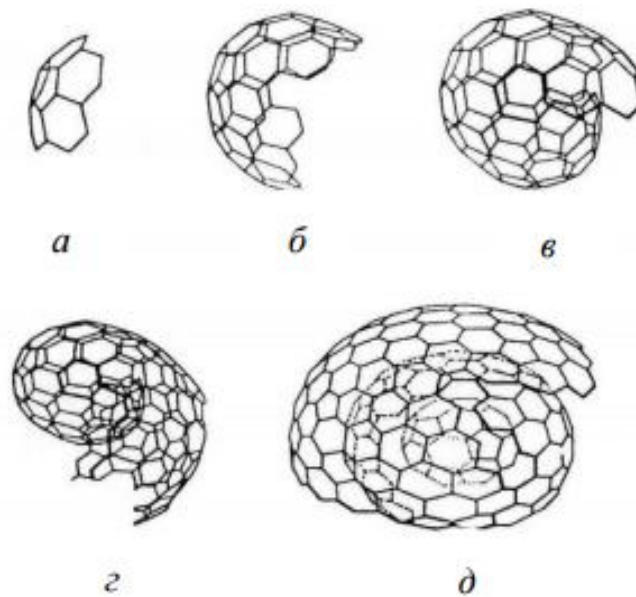


Рисунок 1.7 – Схема последовательных стадий образования сферических кластеров углерода (а-в), его нуклеации (г) и образования зародыша наноразмерной частицы (д) [113, 136, 138]

В процессе сгорания происходит коагуляция частиц сажи, приводящая к образованию вторичных и третичных структур. Исследования [187] показали, что поверхностный рост имеет место как на отдельных сфероидальных частицах, так и на агрегатах. Дизельная сажа склонна к образованию конгломератов, содержащих от нескольких сотен до нескольких тысяч сферических наноразмерных частиц. В ОГ дизеля сажа представляет собой образования неправильной формы с линейными размерами до 100 мкм.

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал по вопросам образования сажи при горении различных углеводородных топлив. Однако все ещё остается много неизученного в механизме сажеобразования. Наименее исследованной является стадия образования зародыша частицы сажи.

1.3.2 Особенности сажеобразования в КС дизеля

Образование и выгорание частиц сажи в КС дизеля — сложные физико-химические процессы, интенсивно протекающие в короткие промежутки времени в нестационарных температурных условиях, при переменных значениях

давления и концентрации компонентов газовой смеси. Несмотря на то, что сажевыделение качественно связано с предшествующими процессами смесеобразования, воспламенения, горения топлива, оно занимает вполне определенное самостоятельное место.

Исследованиями установлено, что начало выделения сажи в цилиндре дизеля совпадает с началом активного тепловыделения. Для свежей порции топлива процесс образования сажи начинается через 1,5 - 2,0 мс после момента поступления топлива в КС, что свидетельствует о наличии периода задержки процесса сажеобразования, связанного с необходимостью протекания процессов пиролиза топлива и образования зародышей частиц. Экспериментально установленное время образования и роста углеродных частиц при температуре 1300 - 1500⁰С имеет порядок 10⁻⁴ с, что приблизительно соответствует времени поворота коленчатого вала дизеля на один градус при частоте вращения 1600 - 1700 мин⁻¹. В момент открытия выпускного клапана осредненная температура газов в цилиндре дизеля падает до 800-900 К в зависимости от режима работы дизеля, что ниже температурного порога образования сажи. Экспериментальные данные показали, что процесс сажеобразования в КС дизеля может продолжаться до 40°- 80° поворота коленчатого вала (п.к.в.) после ВМТ [80]. С увеличением времени пребывания частиц в цилиндре результирующее содержание сажи снижается из-за преобладания процессов выгорания.

Условно процесс сажевыделения в цилиндре дизеля можно разделить на три периода (рисунок 1.8) [74].

1) Период максимального тепловыделения в дизеле ($dx/d\varphi$) при горении подготовленной к воспламенению рабочей смеси до достижения максимального давления сгорания (4 - 7 град. п.к.в. после ВМТ). В этот период процесс сажеобразования преобладает над процессом газификации. По современным представлениям в период кинетического горения гомогенной смеси сажа образуется в меньших объемах, чем в диффузионном пламени.

2) Период достижения максимальной температуры газов в цилиндре (T). В этот период происходит диффузионное горение топливовоздушной смеси

(ТВС). Идут процессы одновременного образования и выгорания сажи. При определенных условиях процесс образования сажи может значительно преобладать, что вызывает рост концентрации сажи в цилиндре дизеля $[C]$. В пиках осредненной температуры газов в цилиндре скорость сажеобразования достигает максимальных значений, после чего происходит постепенное её снижение до достижения равенства скоростей. Далее процесс выгорания сажи начинает превалировать.

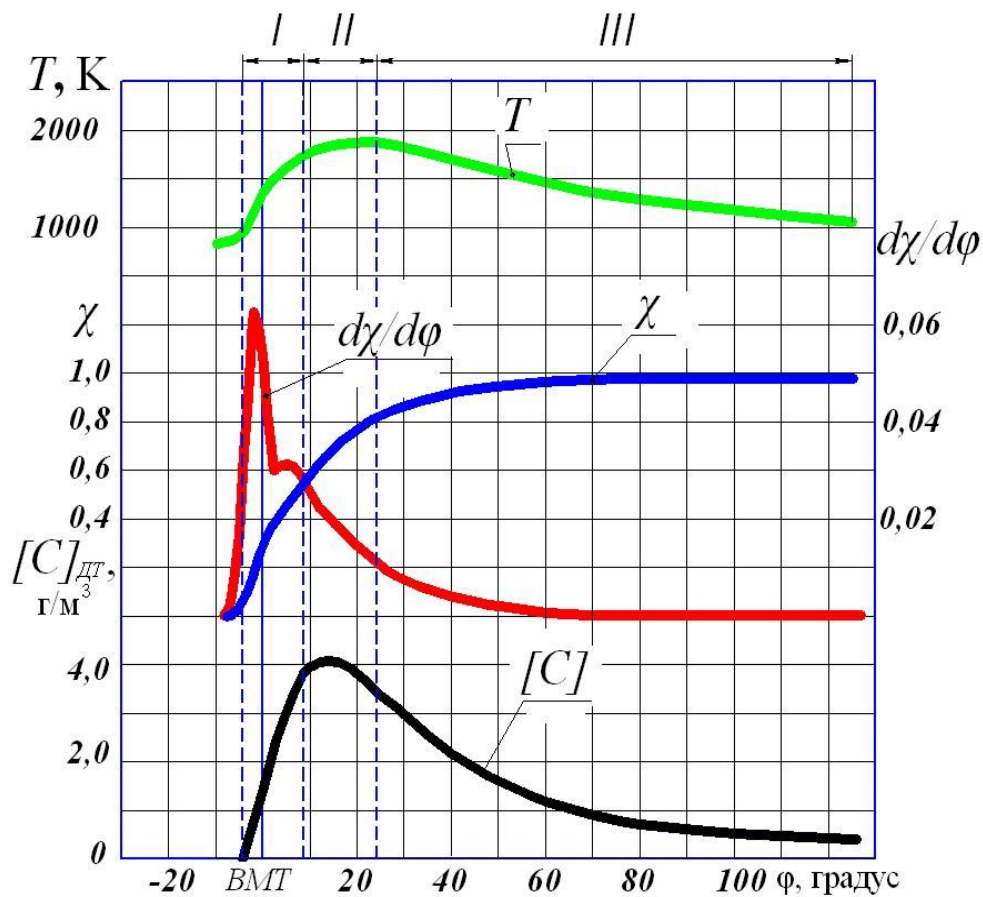
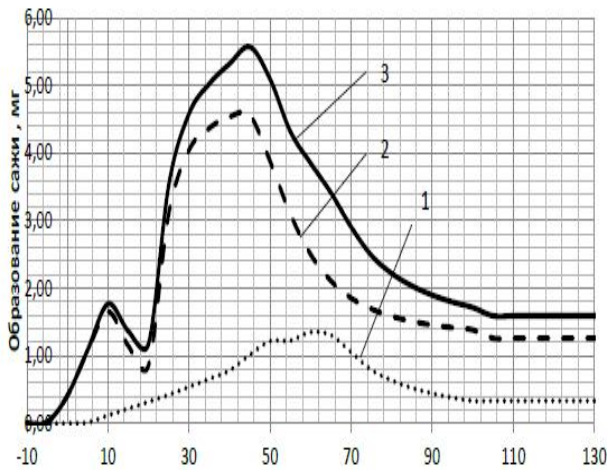


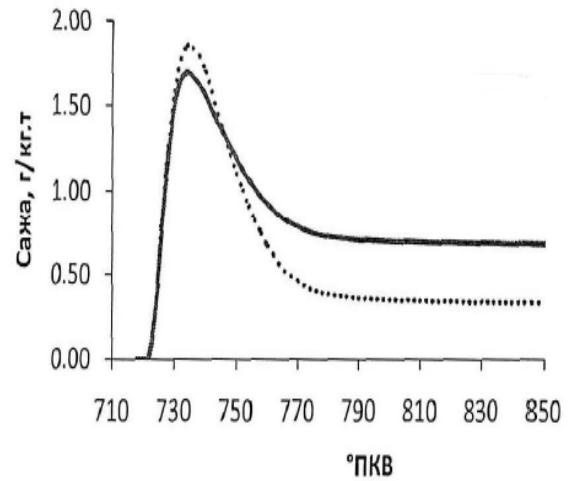
Рисунок 1.8 – Фазы сажевыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 в зависимости от угла п.к.в. [74]

3) Догорание ТВС. Происходит преимущественное выгорание дисперсного углерода с постепенно ослабевающей интенсивностью. Концентрация твердого углерода в цилиндре дизеля снижается. Процесс продолжается до открытия выпускного клапана.

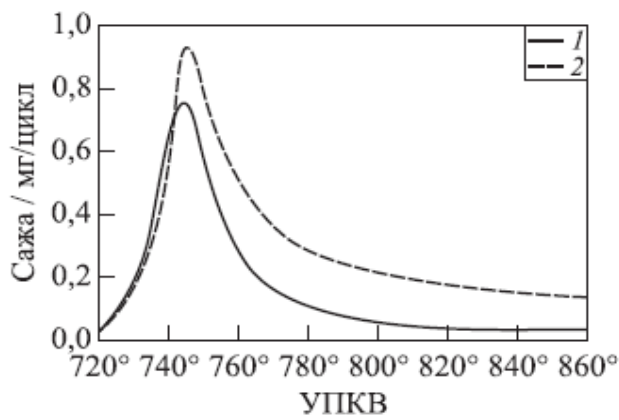
На рисунке 1.9 представлены результаты моделирования процесса сажевыделения в дизеле для дизелей различной размерности на различных режимах работы.



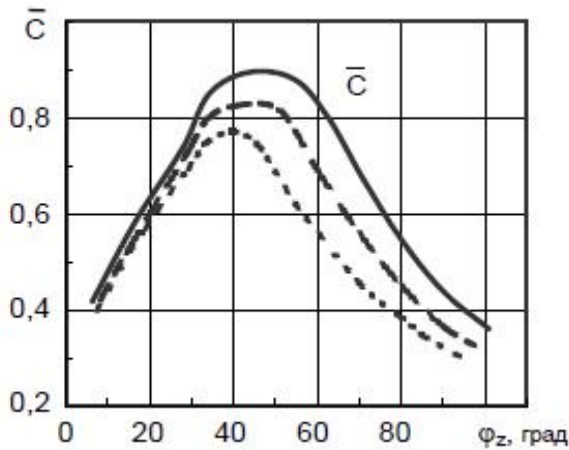
а



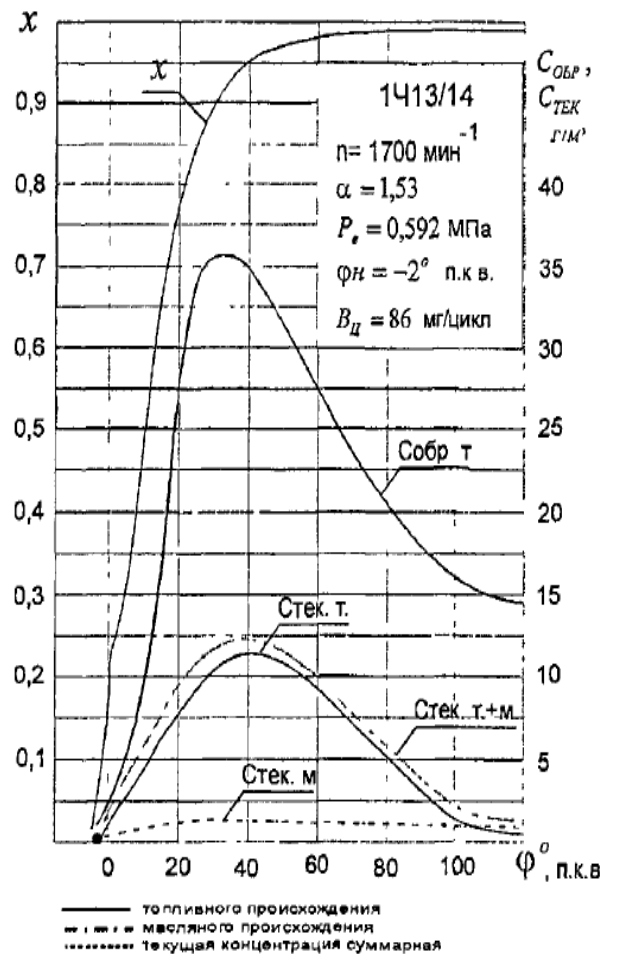
б



в



г



д

Рисунок 1.9 – Результаты моделирования сажесодержания в цилиндре дизеля:
 а – ЧН15,0/18,0 при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 1,2 \text{ МПа}$ [17]; б – ЗМЗ – 5145, $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,45 \text{ МПа}$ [127]; в – Ч48,4/9,0 $n = 1750 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,4 \text{ МПа}$ [126];
 г – Ч13,0/14,0 $n = 1750 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,68 \text{ МПа}$ [123]; д – Ч13/14 $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,592 \text{ МПа}$ [163]

Моделирование сажевыделения в дизеле является трудной научной задачей, поскольку требует наличие полной математической модели процесса сгорания или большого массива экспериментальных данных. Экспериментальное изучение процесса сажеобразования сталкивается с рядом технических трудностей. Большой объем экспериментальных исследований по определению концентрации сажи C , массы сажи N и спектральной степени черноты пламени в цилиндре E_λ провели сотрудники ЛПИ г. Ленинград Батулин С.А., Гладышев А.В., Ложкин В.Н., Лоскутов А.С., Макаров В.В. и др. (рисунок 1.10)

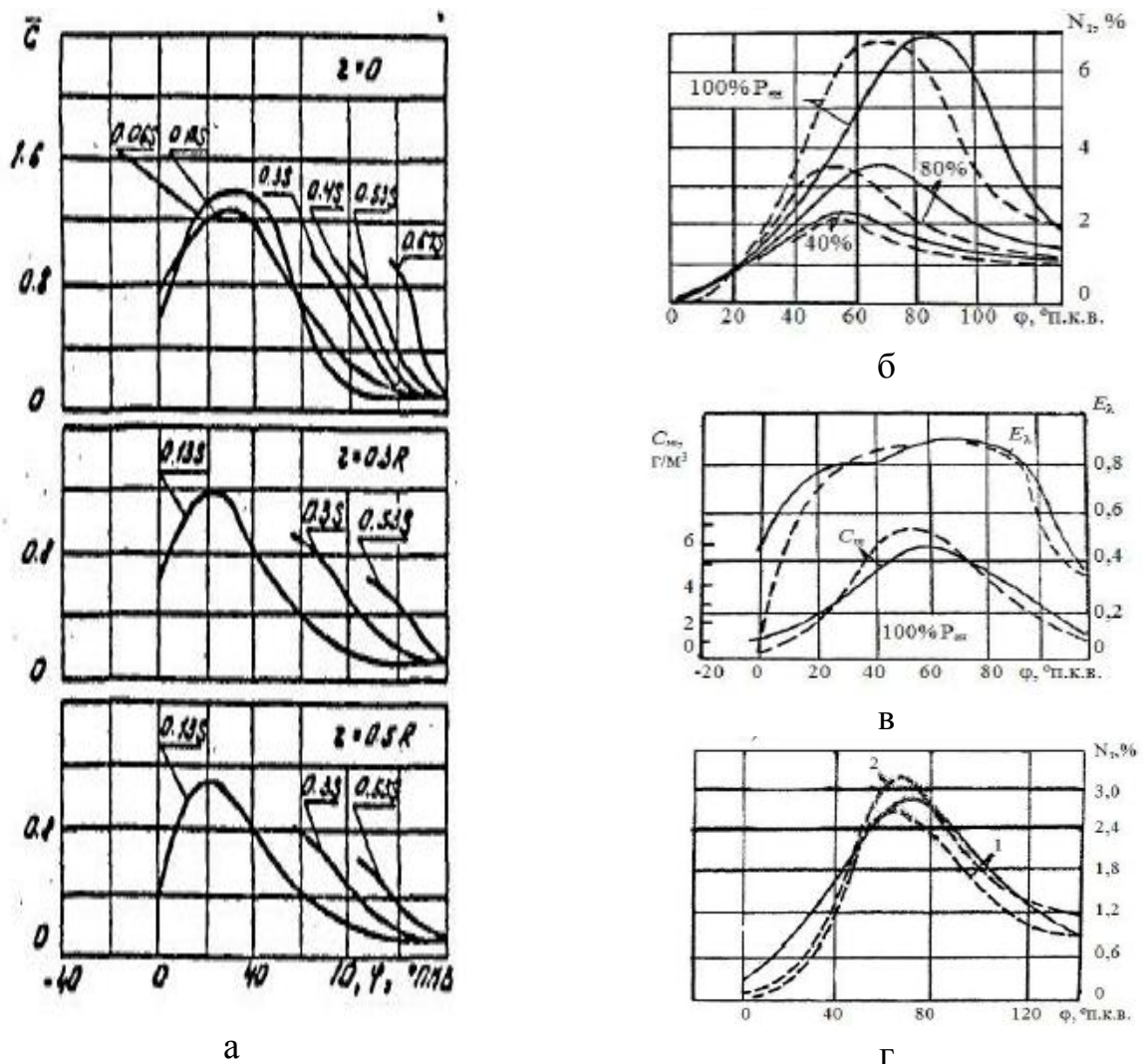


Рисунок 1.10 – Результаты экспериментального измерения массы и концентрации сажи в цилиндре дизеля: а – 4Ч 10,5/12,0 ($n = 1750 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,74 \text{ МПа}$) [18]; б, в – 8 ЧН 13/14, $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,61 \text{ МПа}$ [48], г – ЧН16/17, $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$, 1 - $p_e = 1,1 \text{ МПа}$, 2 - $p_e = 1,8 \text{ МПа}$

Анализируя рисунки 1.9 и 1.10 можно сделать вывод, что динамика сажевыделения сильно зависит от типа и формы КС, способа смесеобразования, ре-

жима работы дизеля.

Экспериментальные исследования показывают значительную неоднородность распределения сажи по зонам КС. Условно КС дизеля в каждый момент времени можно разделить на несколько зон в зависимости от интенсивности образования или выгорания в них сажи. При подаче топлива в КС дизеля образуется крайне неоднородный состав ТВС, а диффузионное сгорание неоднородной смеси создают условия для обильного сажевыделения [66, 80]. Частицы сажи образуются в области между богатой топливом стороной реакционной зоны диффузионного пламени и струей горючего. Преимущественно зоной образования сажи является центральная часть факела, в зонах с дефицитом окислителя, с достаточной температурой и концентрацией углеводородов (рисунок 1.11). В центральной части факела капли топлива, продолжающие поступать из форсунки, встречают на своем пути продукты сгорания с высокой температурой. В этой фазе замедленного диффузионного горения топлива происходит интенсивное сажеобразование.

Таким образом, структуру топливного факела можно представить как последовательное чередование отдельных зон: 1 - зона испарения топлива и смешивания с вовлекаемым воздушным зарядом, 2 - зона начального пиролиза исходного топлива, 3 - зона глубокого пиролиза продуктов второй зоны, 4 - зона горения, 5 - зона продуктов сгорания.

Во второй зоне смесь подогревается за счет теплопроводности и встречной диффузии горящих продуктов реакции из 3 и 4 зон. В этой зоне начинается процесс сажеобразования преимущественно по НТФМ [6, 73]. При достижении более высоких температур, более 1500 К, в начале зоны 3 концентрация сажи резко возрастает. Образование сажи происходит преимущественно по высокотемпературному ацетиленовому механизму.

На процесс сажеобразования сильное влияние оказывает состав ТВС, характеризующийся локальным коэффициентом избытка воздуха (КИВ). По полям КИВ топливный факел неоднороден (рисунок 1.12). Концентрация кислорода в центральной зоне факела уменьшается по мере удаления от сопла рас-

пылителя. Часть кислорода в зоне термического разложения углеводородов топлива расходуется на реакции окисления.

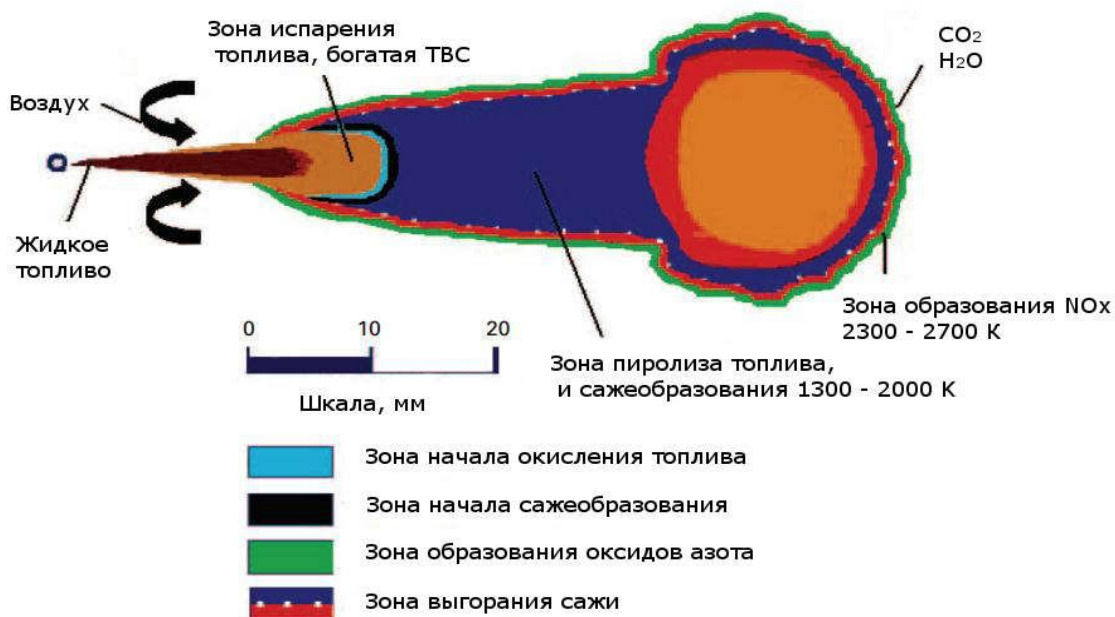


Рисунок 1.11 – Структура топливного факела по зонам образования сажи [194]

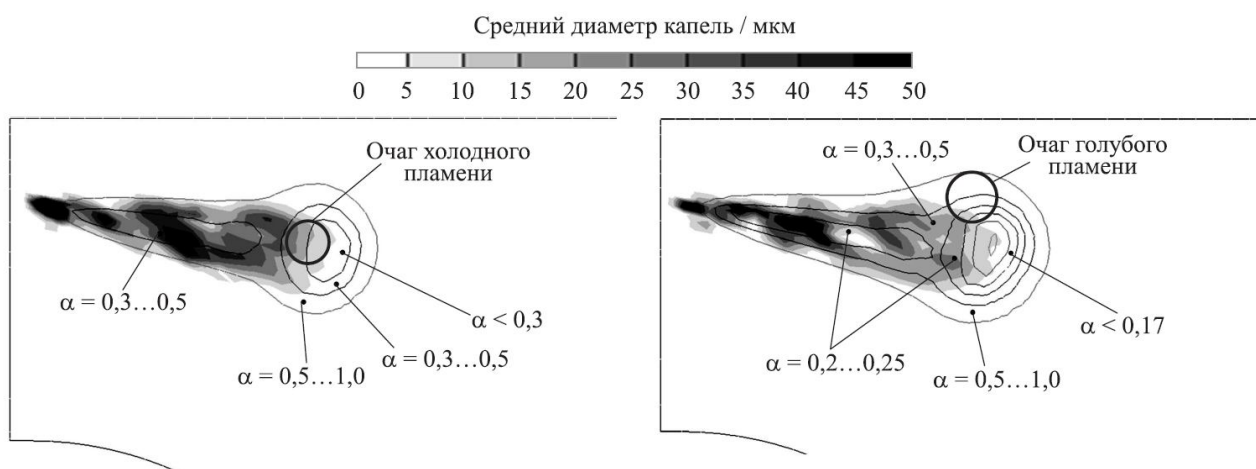


Рисунок 1.12 – Расчетные поля локального КИВ и среднего диаметра капель при впрыске н-тетрадекана в различные моменты времени [1]

Обильное сажевыделение происходит в зонах с КИВ, находящимся в диапазоне от 0,33 до 0,7 (рисунок 1.13). Максимальный локальный КИВ, при котором происходит образование дисперсного углерода, при горении ДТ в цилиндре дизеля составляет $\alpha=1,3$ и называется пределом дымления. Предельные значения КИВ, при которых регистрируется сажеобразование в цилиндре дизеля, могут изменяться в зависимости от температуры и давления в КС.

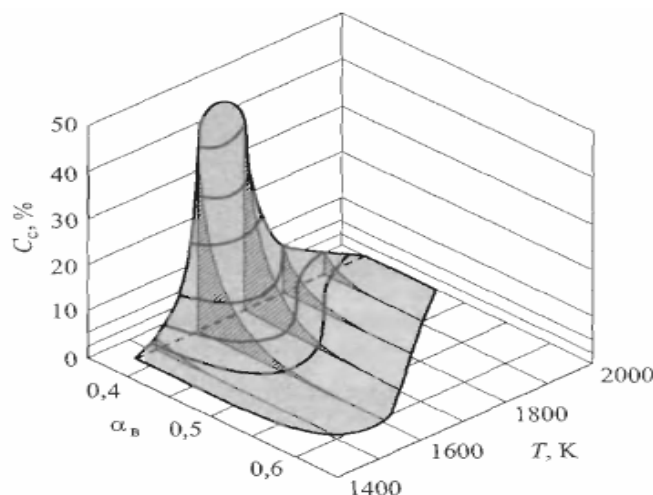


Рисунок 1.13 – Изменение концентрации сажи в зависимости от КИВ и осредненной температуры газов [98]

Учитывая связь сажевыделения с другими процессами в КС дизеля и условия образования и выгорания частиц сажи в пламени углеводородного топлива, следует выделить и рассмотреть факторы, влияющие на эмиссию сажи с ОГ дизеля. Влияние на дымность ОГ оказывает время и особенности протекания процесса сгорания, атомизация струи, способ подачи и КИВ, степень турбулентности, давление, температура газов, вид и состав топлива и другие факторы [183].

Сильное влияние на процесс сажевыделения оказывает температура пламени в КС, действие которой неоднозначно [4]. С одной стороны, с ростом температуры повышается скорость выгорания сажи, повышается концентрация радикалов ОН в зоне пламени, ускоряющих процессы окисления. С другой стороны, увеличивается концентрация радикалов-предшественников сажи, образование которых не идет при низких температурах. В условиях КС процесс сажеобразования ограничен интервалом температур от 1000 до 2200 К. Ускоренное образование сажи отмечается при температурах в КС выше 2050 К, а её максимальная концентрация – при температуре около 2200 К. Исследованиями [99] установлено, что при турбулентном диффузионном горении с увеличением температуры горения возрастает количество сажи. Пик сажевыделения смещается на более высокие температуры с ростом коэффициента избытка топлива по расчетным данным, представленным в статье [83]. Однако при температурах

выше 2200 К скорость окисления сажи начинает превышать скорость её образования, и количество сажи в ОГ уменьшается. Отмечается также, что повышение температуры воздуха на впуске сокращает задержку воспламенения и, следовательно, ускоряет сажеобразование.

В работе [179] исследовалось влияние давления на сажеобразование при горении этилена в смеси с кислородом и другими окислителями, в ходе которого установлено, что повышение давления усиливает скорость образования ПАУ и сажи. Авторы работы [84] предлагают интерпретировать влияние давления как возросшую плотность атомов углерода, что, очевидно, приводит к повышенному образованию сажи.

Угол опережения впрыска топлива является весьма существенным фактором. Ранняя инжекция позволяет подавать больше топлива, испарять его и перемешивать с воздухом до воспламенения, снизив выделение сажи в процессе диффузионного сгорания. Авторы работы [184] предположили, что при позднем впрыске интенсивность дымления уменьшается из-за снижения температуры диффузионного пламени, возникновение которого смещается на линию расширения. Однако многие экспериментальные данные свидетельствуют об обратном. Высокая скорость инжекции способствует снижению сажеобразования за счет образования более равномерной смеси качественным распылом топлива в КС. Интересными с точки зрения изучения влияния на дымность ОГ индикаторного периода задержки воспламенения (ПЗВ) являются опыты с применением системы высокотемпературного охлаждения двигателя [6]. Их результаты показали, что снижение ПЗВ, значит и доли топлива, поступившего за этот период, уменьшает не только сажевыделение в цилиндре, но и эффективный расход топлива и максимальную скорость тепловыделения. Так, можно заключить, что чрезмерное увеличение угла топливоподачи (ранний впрыск топлива) может не только повысить «жесткость» сгорания, но и увеличить скорость сажеобразования и максимальную концентрацию сажи в цилиндре дизеля.

Качество смесеобразования оказывает сильное влияние на дымность ди-

зелей. Улучшение качества распыла топлива способствует формированию более однородного топливного факела в КС, что приводит к увеличению скорости испарения и сгоранию большей части топлива по кинетическому механизму, соответственно уменьшается доля топлива, участвующая в стадии диффузионного сгорания, сокращается число участков с переобогащённой ТВС. В работе [73] отмечается закономерное влияние типов смесеобразования на дымность ОГ. Установлено, что выбросы сажи на режимах максимальной мощности у дизелей с предкамерным и вихрекамерным смесеобразованием в 2 - 2,5 раза ниже, чем у дизелей с объемным смесеобразованием. Дополнительная турбулизация заряда способствует сокращению числа переобогащенных зон и интенсифицирует процесс горения. Вместе с этим при уменьшении надпоршневого зазора и увеличении степени сжатия дымность снижается. Однако повышенная турбулизация заряда и смеси в первой фазе видимого сгорания может приводить к увеличению сажевыделения вследствие «эффекта перезавихривания», в результате которого может дробиться фронт пламени [6]. Повышение давления воздушного заряда на впуске, кроме интенсификации выгорания сажи, позволяет уменьшить фронт пламени гомогенной смеси, горящей в условиях большого избытка окислителя, тем самым уменьшить сажевыделение при сгорании поступающего в этот фронт топлива. В целом, факторы, ведущие к снижению дымности с повышением качества смесеобразования, оказывают большее воздействие, поэтому нарушение режима смесеобразования приводит к увеличению сажевыделения в цилиндре дизеля.

Отдельные исследования были посвящены оценке влияния формы КС на образование сажи в цилиндре [12]. Установлено, что с увеличением диаметра КС возрастает масса топлива, поступающая в объем КС и смещающаяся к центральной части цилиндра, где сгорание протекает в менее благоприятных условиях с меньшим КИВ.

Влияние режимов работы дизеля на сажевыделение можно рассматривать как совокупное влияние приведенных выше факторов. При увеличении нагрузки возрастает цикловая подача топлива, что влечет увеличение температуры и

давления сгорания, снижение КИВ. Все это однозначно увеличивает дымность ОГ, что подтверждено многочисленными экспериментальными данными (рисунок 1.14). С ростом скорости и времени сажеобразования в цилиндре дизеля максимальная концентрация сажи в цилиндре смещается дальше от ВМТ и достигает больших значений [6].

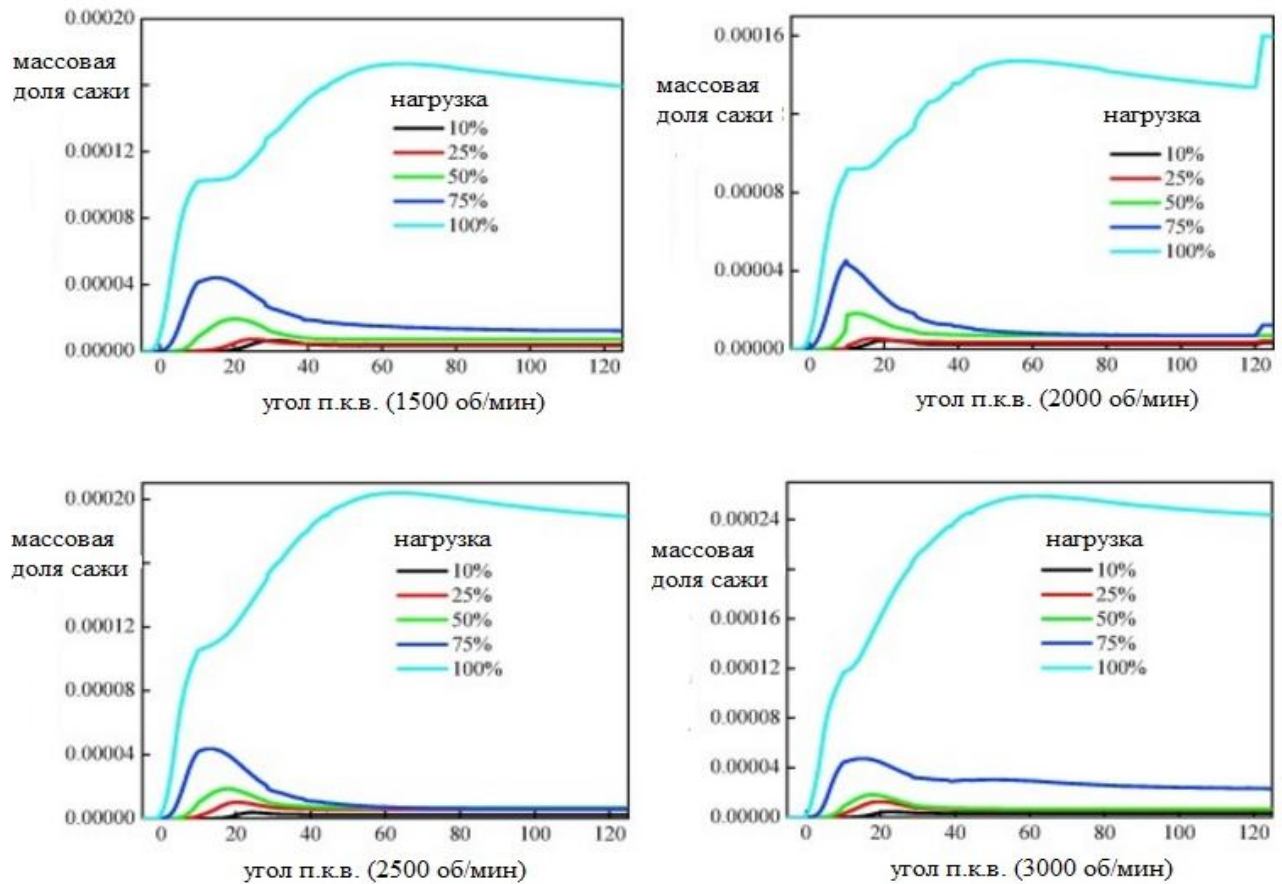


Рисунок 1.14 – Функция массовой доли сажи в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в. при работе дизеля на различных скоростных и нагрузочных режимах работы [170]

При изменении скоростного режима работы дизеля в сторону повышения частоты вращения коленчатого вала увеличивается турбулизация заряда, что снижает диффузионное сопротивление в процессе газификации твердого углерода. Однако сокращается время, отводимое на процесс газификации, что может существенно повысить дымность ОГ. Следует учитывать и изменение качества смесеобразования, величины и динамики подачи топлива в зависимости от скоростного режима работы, что, в конечном счете, оказывает неоднозначное влияние на сажевыделение в дизеле.

Большое влияние на процесс сажеобразования оказывает вид топлива, характеризующийся соотношением атомов С/О и Н/С, структурой молекулы, и свойства топлива [34]. В работе [99] исследовался процесс сажеобразования при горении 14-ти экспериментальных топлив, в которых варьировалось содержание водорода. Большое значение имеет структура молекул. Чем больше разветвление цепи, тем больше склонность к образованию сажи. При увеличении отношения Н/С склонность к сажеобразованию уменьшается, а порог сажеобразования смещается в сторону богатых ТВС. Изменение в склонности топлив к сажеобразованию можно объяснить различием в устойчивости связей С-Н и С-С для молекул различных топлив [4]. Оказывает влияние и степень ненасыщенности углеводородов. С этой точки зрения наибольшую склонность к образованию дисперсного углерода имеет ацетилен. По степени убывания склонности к образованию сажи углеводородные топлива можно расположить следующим образом: ряд нафталина – бензольный ряд – диолефины, дициклические нафтены – олефины и моноциклические нафтены – алканы [4,168]. Оказывает влияние молекулярный вес углеводородов. С повышением молекулярного веса углеводорода растет локальная концентрация углерода в зонах термической конверсии молекул топлива.

Обзор работ исследования процесса сажеобразования выявил противоречивость некоторых выводов о влиянии режимов работы дизеля и регулировочных параметров на дымность ОГ. Это связано со сложностью и скоротечностью физико-химических процессов образования и выгорания сажи в КС дизеля, совместным влиянием множества факторов на эти процессы, невозможностью исследования влияния одного из факторов без учета совместного действия других, труднодоступностью экспериментальных исследований сажевыделения непосредственно в цилиндре дизеля.

Для того чтобы углубить понимание процессов образования сажистых частиц, необходимо исследовать склонность различных топлив к сажеобразованию при сгорании в дизеле, учитывая их химический состав и обобщить результаты исследований по применению альтернативных топлив и их влиянию на дымность ОГ дизелей.

1.4 Влияние применения альтернативных топлив на дымность ОГ дизеля

1.4.1 Влияние применения этанола на дымность ОГ дизеля

Самый распространенный вид биологического топлива в мире – биоэтанол, на который приходится 82% всего производимого в мире топлива из биологического сырья. Обеспечить производство биоэтанола в России способен широкий спектр сырья пищевой и перерабатывающей промышленности. Главным образом это сахаро- и крахмалосодержащее сырьё и целлюлозосодержащая продукция (отходы переработки зерна, древесины, соломы и др.). Топливный этанол, в отличие от пищевого, может производиться методом укороченной дистилляции, поэтому содержит метанол и сивушные масла, а также бензин, что снижает стоимость его производства и делает хорошей альтернативой традиционному топливу [56].

Широкое применение этанола в качестве моторного топлива для дизелей сдерживается тем обстоятельством, что по ряду физико-химических свойств он существенно отличается от ДТ. Цетановое число этанола в 5 раз ниже, чем у ДТ, что требует специальных мер для воспламенения ТВС при использовании спирта в дизелях: использование присадок, изменение конструктивных параметров дизеля (изменение формы КС, увеличение степени сжатия, повышение температуры воздушного заряда), использование свечей накаливания или зажигания, воспламенение от запальной порции топлива и др.

Применением спиртов в дизелях можно добиться существенного снижения дымности ОГ [71, 74, 75, 76, 77, 78, 106, 128, 154, 199]. Чем больше доля используемого спирта, тем меньше содержание сажи в ОГ. Впрыск спиртов в КС в жидкой фазе одной форсункой совместно с запальным топливом или с использованием двойной системы топливоподачи позволяет снижать дымность в 2 и более раз. Подача спиртов непосредственно в КС дизеля отдельной форсункой позволяет максимально снижать дымность ОГ.

Сажеобразование при горении спиртов интенсифицируется по мере повышения их молекулярной массы. Метанол при горении не образует сажи, а в

продуктах сгорания этанола содержание сажи невелико.

Этанол обладает высокой теплотой парообразования, поэтому его испарение в КС влечет уменьшение температуры в предпламенной зоне крекинга, замедляя химические процессы образования зародышей сажистых частиц. Возникает водородное торможение радикально-цепных процессов высокотемпературного крекинга, известное как эффект Лангмюра. Водород как химический реагент способен активно воздействовать на процессы результирующего сажевыделения. В высокотемпературной фазе водород катализирует процесс ускоренного выгорания частицы сажи [144]. При распаде молекул спирта система насыщается не только водородными радикалами, но и радикалами гидроксидной группы ОН, которые замедляют процессы дегидрогенизации и способствуют обрыву цепей на стадиях образования радикалов зародышей частиц сажи. Очевидно, что наличие атома кислорода в молекуле этилового спирта сдерживает рост скорости цепной реакции образования зародышей сажи.

В работе [162] установлено, что этанол способствует подавлению образования сажи в перемешанных пламенах этилена. Добавление этанола снижает концентрацию основных предшественников ПАУ – бензола и пропаргильного радикала. Из анализа основных путей реакций, ведущих к образованию бензола, сделан вывод, что механизм подавления сажи главным образом состоит в снижении доли углерода, идущего на формирование сажевых зародышей.

Образовавшиеся при распаде и горении спирта радикалы водорода и гидроксильной группы, а также молекулы воды и водорода интенсифицируют процесс газификации углерода, что приводит к явлению «мокрой газификации» [74].

Анализируя склонность к сажеобразованию того или иного топлива в условиях КС дизеля, необходимо также оценить его физические свойства, влияющие на качество смесеобразования. Основными параметрами, оказывающими влияние на качество распыла топлива в КС, является поверхностное натяжение, вязкость топлива, температура кипения, теплота испарения, теплота сгорания, цетановое число. Из опыта применения спиртов в качестве топлива в

дизелях и анализа их физических свойств становится очевидным, что цикловая порция и ПЗВ спирта в КС увеличиваются, более легкокипящее топливо испаряется, смесь становится более однородной по объему. Уменьшается совокупная доля топлива, участвующая в диффузионном горении, при этом возрастает скорость диффузии. Все это в совокупности приводит к существенному снижению дымности дизелей.

Следует также учитывать, что этанол обладает меньшим значением нижней теплоты сгорания по сравнению с ДТ (соответственно 26800 и 42500 кДж/кг), что приводит к необходимости увеличения цикловой подачи топлива для сохранения мощностных показателей дизеля. Дальнобойность топливного факела этанола, как показывают расчеты [69], имеет сопоставимое значение, по сравнению с ДТ. Однако уменьшается средний диаметр капель, возрастает скорость истечения струи, что способствует увеличению скорости испарения спирта в КС и улучшению качества смесеобразования, в конечном счете снижается дымность ОГ.

В работе [128] представлены результаты исследования использования смесового топлива на основе этанола и эфира РМ на экологические показатели дизеля. С увеличением доли этанола в смесовом топливе на каждые 10% происходит снижение дымности ОГ от 20 до 25% на исследованном диапазоне нагрузок (рисунок 1.15).

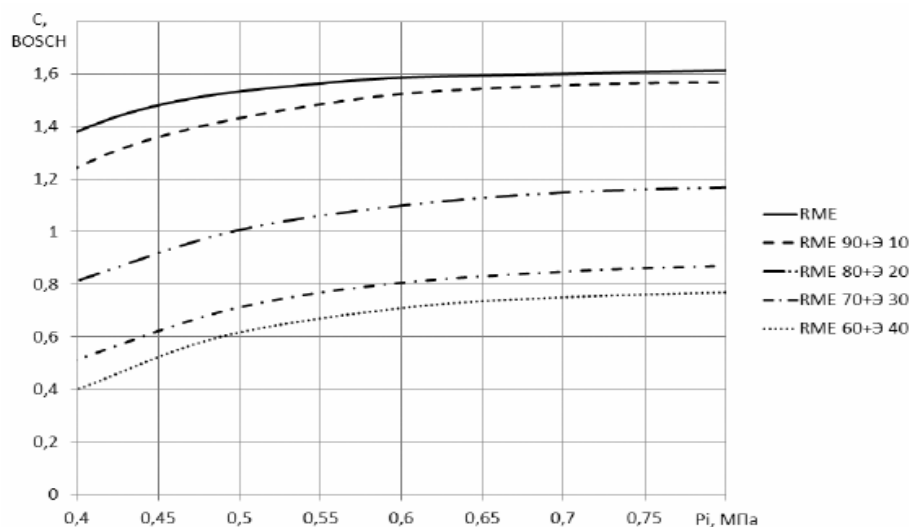


Рисунок 1.15 – Влияние состава смеси эфира РМ и этанола на дымность ОГ [128]

На кафедре комбинированных ДВС РУДН экспериментально исследована работа дизеля типа 1Ч8,0/7,5 (МД-6), в состав системы питания которого входил реактор конверсии метанола. На режиме, близком к номинальному ($p_e = 0,55$ МПа), добавление к воздушному заряду 0,4 % продуктов полной конверсии метанола способствовало снижению содержания сажи в ОГ на 44% [108].

В работе [106] на основе экспериментальных и теоретических исследований установлено, что при использовании до 35% метанола при работе дизеля 2Ч 10,5/12,0 на МТЭ позволяет снизить содержание сажи в ОГ до 72%.

В работах [69, 71, 74] представлены результаты исследования применения этанола и метанола на дымность ОГ с применением двойной системы топливоподачи с воспламенением от запального ДТ на дизеле 2Ч 10,5/12,0. Для подачи запального ДТ были разработаны специальные распылители с измененной геометрией углов распыливания, чтобы факелы спиртов и запального топлива пересекались в КС. В результате удалось снизить дымность ОГ от 5,7 до 6,5 раз при работе на метаноле и от 5 до 12 раз при работе на этиловом спирте. При этом замещение ДТ достигалось до 93% [68, 69].

В научной литературе опубликованы многочисленные экспериментальные данные, которые позволяют сделать вывод, что применение спиртов является одним из самых эффективных способов снижения дымности ОГ дизелей.

1.4.2 Влияние применения РМ на дымность ОГ дизелей

Наиболее перспективным для дизельных двигателей является топливо растительного происхождения из семян масличных культур (подсолнечник, соя, рапс, рыжик, горчица и т.д.). Выбор растительного масла в качестве сырья для получения биотоплива определяется факторами возделывания масляничных культур, прежде всего природно-климатическими условиями, высокой урожайностью, многофункциональностью использования продуктов переработки. Растительные масла имеют близкие к ДТ теплоту сгорания, цетановое и коксовое числа, зольность и содержание серы, однако заметно отличаются по вязкости и плотности. Для получения растительных масел и производства био-

топлива в Европе служит рапс, в США – соя, в Канаде – канола, в Индонезии и Филиппинах – пальмовое и кокосовое масло, в Индии ятрофа, в Африке – соя и ятрофа, в Бразилии – касторовое масло [135]. Преимущественной культурой для получения биотоплива в условиях России является подсолнечник и озимый рапс.

РМ – маслянистая жидкость бурого цвета, приобретающая после рафинирования светло желтый цвет. Оно представляет собой смесь моно-, ди- и триацилглицеринов, которые содержат в своем составе молекулы различных жирных кислот [135].

Главное преимущество РМ по сравнению с ДТ – его практически полная биоразлагаемость. Кроме того, РМ в действительности не содержит соединений серы, ПАУ, являющихся канцерогенами, но присутствуют атомы кислорода, что делает РМ потенциально более экологически безопасным топливом [43]. Наличие большого количества атомов кислорода в молекулах жирных кислот способствует более полному сгоранию РМ в цилиндре дизеля.

Исследования по применению растительных масел и топлив на их основе проводятся крупнейшими двигателестроительными фирмами: AllisChalmers, Caterpillar, Cummins, General Motors, John Deere, Harvester (США), Perkins, Ricardo (Англия), Mercedes-Benz, Daimler-Benz, Deutz, Volkswagen, MAN, Hatz Diesel, Porsche, Schönebeck, (Германия), Volvo (Швеция), Isuzu, Toyota, Komatsu (Япония), Renault (Франция). Для работы на чистом РМ фирма Fendt серийно выпускает трактор Fendt 820 Variogreentec [131].

Проводятся исследования по адаптации дизельных двигателей к работе на растительных маслах (в основном на РМ), а также на эфирах этих масел и в странах СНГ: МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ, МГАУ им. В.П. Горячкина, Российском университете дружбы народов (РУДН), ВИМе, НПП «Агродизель», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Пензенской ГСХА, Северо-Кавказской МИС, Харьковском политехническом институте, Клайпедском университете, государственном аграрном университете Молдовы, в БГСХА Республики Беларусь [38, 41, 42, 59, 65, 98, 106, 124, 141, 145, 146, 149, 156].

По теплоэнергетическим показателям РМ соизмеримо с ДТ, что обуславливает возможность его широкого использования в дизеле, позволяет минимизировать затраты на адаптацию серийных дизелей к работе на РМ [41, 143]. Тем не менее, ряд исследований показывают, что применение РМ в чистом виде затруднено по причине высокой вязкости, повышенной плотности и поверхностного натяжения. Эти различия оказывают заметное влияние на процессы смесеобразования и сгорания [9, 121].

Повышенные значения вязкости и поверхностного натяжения у РМ обуславливают трансформацию характеристик впрыска и распыливания, возрастание дальности топливной струи, что приводит к попаданию на стенки КС большего количества топлива и уменьшению доли объемного смесеобразования [142]. Вместе с тем повышается давление в насосе и форсунках, возрастает продолжительность топливоподачи. Увеличение цикловой подачи нагретого до 90°C РМ может достигать 19-22% при частоте вращения коленчатого вала до 500 мин^{-1} [121]. Наличие кислорода в молекулах снижает теплотворную способность топлива, что в совокупности с увеличением цикловой подачи, по причине повышенной плотности, вызывает необходимость дополнительной регулировки топливной аппаратуры. Следует учитывать и необходимость коррекции установочного угла опережения впрыска (УУОВ) РМ в сторону увеличения, поскольку отмечается запаздывание процесса горения РМ в цилиндре дизеля, в то время как процесс активного тепловыделения имеет большую продолжительность [121].

В ряде работ отмечается, что применение РМ в дизеле снижает индикаторный КПД, мощность, уменьшает КИВ, смещает процесс сгорания на линию расширения, о чем свидетельствует повышение температуры ОГ.

Для снижения негативного влияния применения РМ на двигатель используют его смесь с ДТ. Однако серийные и находящиеся в эксплуатации дизели не адаптированы для работы на смесевом биотопливе, а предлагаемые конструкции топливных систем не всегда учитывают необходимость изменения состава смесевоего топлива при работе на различных нагрузочно-скоростных и те-

пловых режимах работы. С этой целью необходимо модернизировать топливную систему дизеля, оснащая её смесителем с электродозаторами [141]. Опубликованные на сегодняшний день данные не позволяют однозначно определить предпочтительный состав биотоплива.

Как отмечалось выше, использование РМ в качестве топлива ухудшает условия смесеобразования - уменьшается угол раскрытия топливного факела, увеличивается средний диаметр капель. Все это вызывает рост дымности ОГ дизеля. Сравнение индикаторных диаграмм при работе дизеля на РМ и ДТ показывает снижение индикаторного давления в КС, смещение процесса сгорания на линию расширения. Вместе с этим происходит некоторое увеличение ПЗВ. Из этого можно сделать вывод о значительном изменении динамики тепловыделения во всех фазах сгорания, изменении соотношения количества топлива, сгорающего в различные периоды.

Вследствие меньшей теплоты сгорания увеличивается цикловая подача топлива, что также негативно сказывается на дымность ОГ дизеля. Однако, как известно из ряда работ, применение РМ не только не увеличивает выбросы сажи, но и снижает сажевыделение.

Молекулы жирных кислот РМ содержат около 12% кислорода. Добавление даже небольшого количества оксигенатов в топливо способно существенно снизить дымность ОГ. Использование эфира C_3 в качестве присадки в ДТ с концентрацией 0,04% снижает дымность ОГ на треть. Предполагается, что оксигенаты могут выступать как диспергаторы микрокапель и поляризаторы участков поверхности факела, ответственных за задержку воспламенения. Этим объясняется положительное влияние малых добавок оксигенатов в топливо на дымность ОГ [154].

В работе [85] были проведены исследования влияния объема растительных масел в смесевом топливе на дымность ОГ дизеля Д-245. Установлено, что с увеличением доли атомов кислорода с 0,4 до 7%, что соответствует росту содержания РМ в смеси с 5 до 60%, дымность ОГ K_X падает на частоте вращения коленчатого вала 1080 мин^{-1} с 31 до 14% по шкале Хартриджа, а при частоте

2400 мин⁻¹ с 14 до 7% соответственно (рисунок 1.16).

Авторы статьи отмечают, что снижение в 2,5 раза дымности ОГ может быть связано только с увеличением доли кислорода в смесевом топливе. Поскольку уменьшается теплотворная способность топлива и растет его вязкость, то, согласно теории сажеобразования, увеличение массовой доли альтернативного топлива должно приводить скорее к росту дымности ОГ.

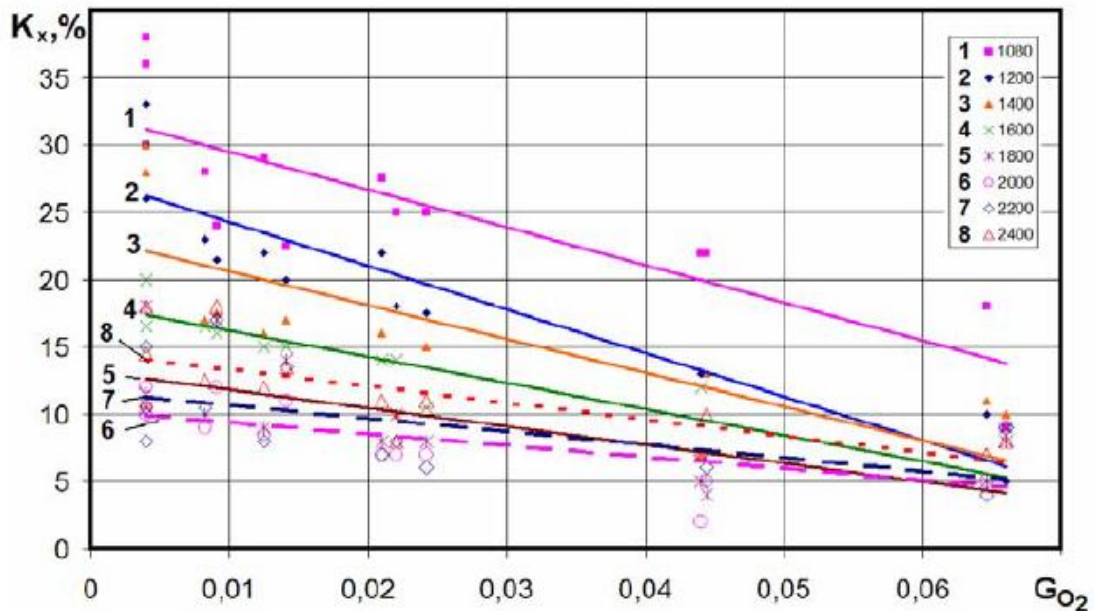


Рисунок 1.16 – Зависимость дымности ОГ дизеля Д-245.12С от массовой доли атомов кислорода в молекулах топлива на режимах с различной частотой вращения вала двигателя n от 1080 до 2400 мин⁻¹ [85]

Для работы на РМ в большей степени приспособлены дизельные двигатели с разделенными КС, а также с полуразделенными КС типа ЦНИДИ [40, 86]. В работе [142] представлены результаты стендовых исследований дизеля Д-243 при работе на смесевых топливах. С точки зрения экологических показателей наименьшее содержание вредных веществ в ОГ газах при полной подаче топлива и частоте вращения коленчатого вала $n = 2200$ мин⁻¹, отмечается при работе дизеля на биодите 75% РМ и 25% ДТ. По сравнению с работой дизеля на минеральном дизельном топливе дымность ОГ снижается на 48% (с 50 до 26%) (рисунок 1.17) [142]. Очевидно, что с увеличением содержания РМ в смесевом топливе снижается дымность ОГ.

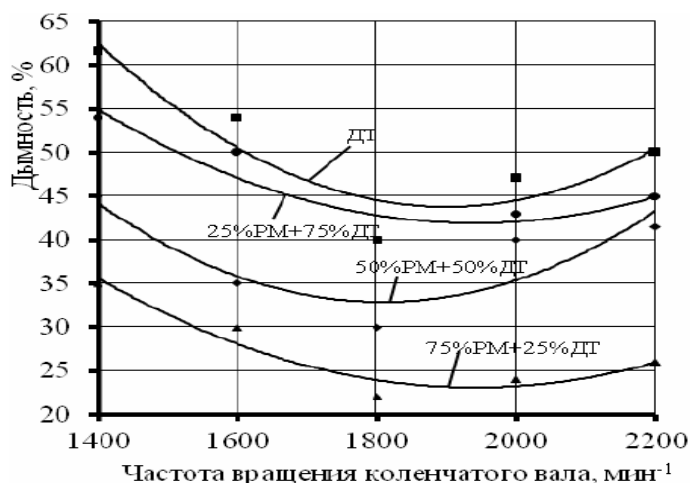


Рисунок 1.17 – Изменение дымности дизеля Д-243 (4Ч11/12,5) в условиях регуляторной характеристики при работе на топливах различного состава [142]

В работе [122] авторы отмечают снижение дымности дизеля Д-242 на всех режимах работы в 2 раза при соотношении РМ и ДТ 1:1 (рисунок 1.18).

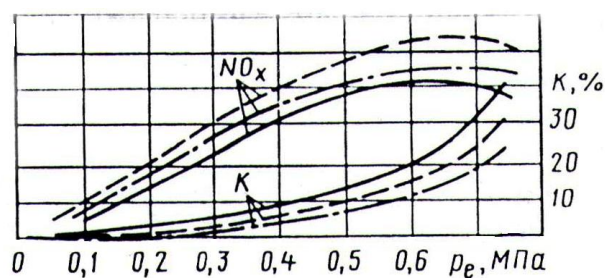


Рисунок 1.18 – Экологические характеристики дизеля
 —·—·— 50% ДТ + 50% РМ;
 - - - - - 75% ДТ + 25% РМ; ——— - ДТ

При замещении 30% ДТ РМ в дизеле Д-243 снижается дымность ОГ до 17,9% [129].

На основании анализа экспериментальных данных, представленных в работе [150] при работе дизеля СН-6Д на смесевом топливе (ДТ и РМ), сделано предположение о том, что основной причиной снижения выбросов сажи является снижение скорости образования и накопления сажи в переобогащенных зонах топливного факела за счет частичной компенсации недостающего для горения окислителя кислородом, содержащимся в смесевом топливе. При работе дизеля на смеси ДТ и 60% РМ такое снижение может достигать от 20 до 60% в зависимости от режима работы. Однако с увеличением содержания РМ в смесевом топливе отмечается существенное увеличение ПЗВ, что приводит к дефор-

мации процесса сгорания, снижению эффективного КПД и повышению выбросов сажи. Экспериментальные исследования малоразмерного высокооборотного дизеля МД-8 (1Ч8,2/7,5) при работе на РМ с использованием штатной системы топливоподачи без проведения рациональных регулировок показало, что на всех режимах работы дизеля дымность была выше в среднем на 1,2 ед. Bosch [107].

Результаты проведенных других экспериментальных исследований дизеля МД свидетельствуют о том, что перевод этого двигателя с дизельного топлива на РМ приводит также к заметному ухудшению показателей топливной экономичности и дымности ОГ (рисунок 1.19) [149].

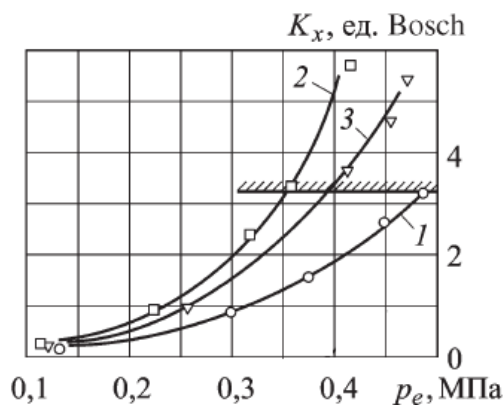


Рисунок 1.19 – Зависимость дымности ОГ дизеля МД-6 от среднего эффективного давления p_e при работе двигателя на различных топливах:
1- ДТ и 2 – РМ при $\Theta = 25^\circ$; 3 – РМ при $\Theta = 33^\circ$ [149]

Перевод двигателя МД-6 на РМ приводит к росту дымности ОГ. При этом эмиссия сажи падает с увеличением угла опережения впрыска РМ. Экспериментальные исследования дизеля МД-6 при работе на РМ с использованием штатной системы топливоподачи, приведенные в работе [10], без проведения рациональных регулировок показали, что при работе двигателя на номинальном режиме эффективный КПД снижается на 23%, а дымность ОГ увеличивается на 64% по сравнению с дизелем, работающим на стандартном ДТ. В то же время добиться существенного снижения выбросов сажи позволяет двухфазный впрыск РМ, подробно представленный в работах [10, 98].

На установке ИДТ-69, созданной в РУДН, были исследованы различные топлива, отличающиеся по склонности к сажеобразованию при работе на них

дизеля [133]. Испытанию подвергались следующие топлива: ДТ, РМ, смесь (эмульсия) 90% РМ и 10% этанола, смесь (эмульсия) 70% РМ и 30% этанола (рисунок 1.20). Исследование топлив, содержащих РМ и этанол, потребовало создания специального смесителя для получения устойчивых смесей. Использование смесителя позволяло в процессе эксперимента получать смеси (эмульсии) без добавления эмульгатора.

На втором этапе испытаний исследовалась зависимость дымности ОГ от степени сжатия. Результаты испытаний показали, что использование РМ или смеси РМ с 10 и 30% этанола приводит к снижению дымности ОГ по сравнению с работой на дизельном топливе. Причем во всем исследованном диапазоне изменения степени сжатия (ϵ от 18 до 22) работа на РМ приводит к снижению дымности от 0,6 до 1,3 ед. по шкале Bosch, добавка к РМ 10% этанола дополнительно снижает дымность еще от 0,5 до 0,7 ед., а добавка к РМ 30% этанола снижает дымность еще с 0,7 до 1,1 ед. по шкале Bosch.

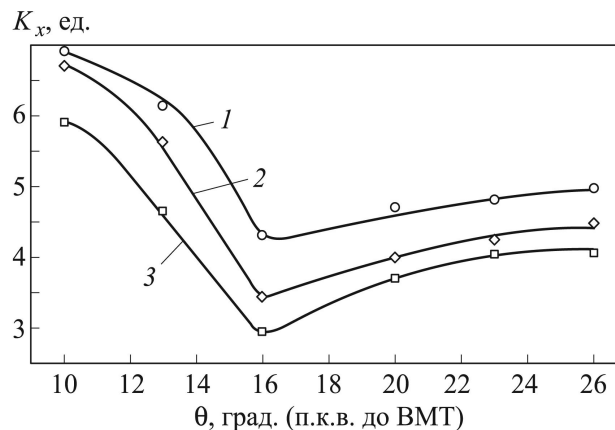


Рисунок 1.20 – Зависимость дымности ОГ K_x от УОВТ для различных топлив: 1- ДТ; 2 – РМ; 3 – 90% РМ и 10% этанола [133]

Анализ показателей токсичности ОГ дизельного двигателя, работающего на смесях нефтяного ДТ и растительных масел, проведен с использованием результатов экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5). Дизель типа Д-245.12С испытан на смесях нефтяного ДТ марки Л по ГОСТ 305–82 с РМ (объемное содержание РМ с 0 до 60%). Описание экспериментальной установки и методики проведения исследований приведено в работе [58]. Результаты экспериментальных исследований дизеля на режимах внеш-

ней скоростной характеристики свидетельствуют о том, что при использовании в качестве топлива смесей нефтяного ДТ и РМ наибольшего эффекта достигают по снижению дымности ОГ K_x (рисунок 1.21).

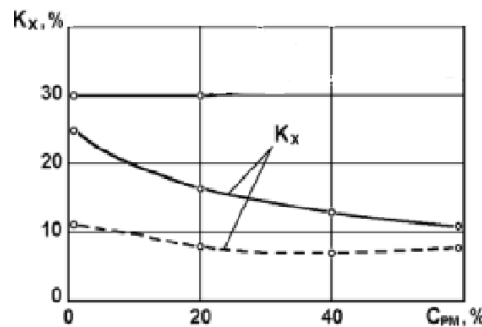


Рисунок 1.21 - Зависимость дымности ОГ K_x дизеля Д-245.12С от содержания РМ C_{PM} в смесевом биотопливе на режимах внешней скоростной характеристики:
 - - - - на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$;
 — - на режиме максимального крутящего момента при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ [58]

Аналогичные результаты дымности ОГ были получены и при испытаниях, описанных в работе [134]. При увеличении содержания РМ в смесевом биотопливе C_{PM} в исследуемом диапазоне отмечено значительное снижение дымности ОГ K_x (рисунок 1.22).

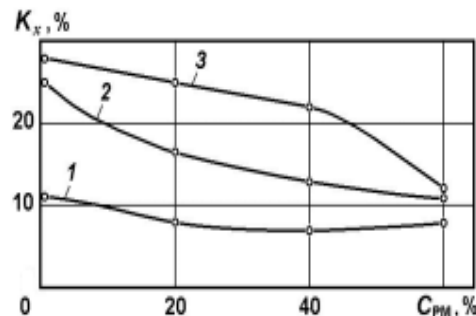


Рисунок 1.22 - Зависимость дымности ОГ K_x (проценты по шкале Хартриджа) дизеля Д-245.12С различной комплектации от объемного содержания РМ C_{PM} в смеси с ДТ на различных скоростных режимах внешней скоростной характеристики: 1 — $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$;
 2 — $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 3 — $n = 1080 \text{ мин}^{-1}$

Рост C_{PM} с 0 до 60% на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ сопровождался снижением дымности K_x с 11 до 8% по шкале Хартриджа (в 1,38 раза). На режиме максимального крутящего момента при

$n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ дымность K_X уменьшилась с 25 до 11% по шкале Хартриджа (в 2,27 раза).

Фирмой Porsche были испытаны шесть типов дизелей с разделенными и неразделенными КС. Замена ДТ на РМ вызвала снижение выбросов сажи на 30—50% в дизелях с разделенными КС (вихревыми и предкамерными) и увеличение выбросов от 90 до 140% в дизелях с неразделенной КС [196].

В работе [106] на основе экспериментальных и теоретических исследований установлено, что содержание РМ в смесевых топливах может достигать до 40% по массе. Работа дизеля 4Ч 11,0/12,5 на таких смесях позволяет снижать содержание в ОГ сажи от 4,5 до 22%.

1.5 Задачи исследования

Из представленного анализа следует, что использование этанола с воспламенением от запального РМ позволяет не только полностью отказаться от использования традиционного топлива, но и значительно улучшить экологические показатели работы дизеля, существенно снизив дымность ОГ. Возможность применения РМ в качестве топлива для дизелей в смеси с традиционным топливом, переработанном или в чистом виде, и оценка его влияния на параметры работы двигателя требуют дополнительного всестороннего изучения для более широкого использования технологий, основанных на альтернативной энергетике.

Вместе с тем представленный обзор выявил противоречивость влияния применения РМ на дымность ОГ. Следовательно, необходимо выявить ключевые факторы оказывающие влияние на процесс сажевыделения, выработать рекомендации по применению альтернативных топлив, усовершенствовать математическую модель, основанную на кинетическом механизме сажеобразования, способную прогнозировать уровень дымности дизеля при работе на альтернативных топливах при различных режимах работы двигателя.

Задачи исследования сформулированы во введении в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011.

2 ТЕОРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ САЖИ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА ЭТАНОЛЕ И РМ

2.1 Механизмы образования частиц сажи

Для моделирования сажеобразования в двигателях внутреннего сгорания необходимы простые и эффективные модели, способные удовлетворительно прогнозировать выход сажи на различных режимах работы двигателя.

При работе дизеля на нетрадиционных топливах математическая модель должна учитывать химический состав исходного сырья и описывать стадии сажеобразования в КС, начиная со стадии пиролиза углеводородов до процесса газификации углерода с поверхности частиц сажи. При отдельной подаче топлив расчет процесса сажеобразования усложняется из-за определения степени взаимного влияния топливных факелов на физико-химические процессы испарения, пиролиза и окисления углеводородов в КС. При этом изменяется температура и состав продуктов сгорания, концентрация окислительных компонентов и продуктов пиролиза углеводородов в реакционной зоне, что оказывает влияние на скорости процессов образования и газификации сажи при работе дизеля на оксигенатных топливах по сравнению с работой на ДТ. Использование биотоплива влечет изменение цикловой подачи, как это было показано в предыдущей главе, что создает предпосылки к изменению объема реакционной зоны и концентраций компонентов газовой смеси, участвующих в процессе образования и газификации сажи.

Ожидаемыми результатами построения математической модели для расчета уровня дымности ОГ при работе дизеля на этаноле и РМ являются:

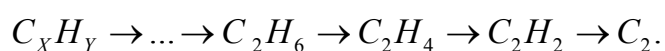
- определение продолжительности основных этапов процесса сажеобразования;
- определение закономерностей и ключевых факторов сажеобразования в цилиндре дизеля при работе дизеля на этаноле и РМ на различных нагрузочных и скоростных режимах.
- определение массового содержания и концентрации сажи в ОГ при ра-

боте дизеля при изменении скоростных и нагрузочных режимов работы.

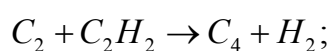
Для решения этой комплексной задачи на начальном этапе необходимо рассмотреть основные стадии химического преобразования альтернативных топлив в КС дизеля.

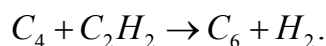
Для получения достоверных результатов прогнозирования дымности дизеля при работе на альтернативных топливах математическая модель образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля должна основываться на реальных кинетических механизмах процесса сажеобразования. Так как сажа является метастабильным продуктом процесса горения, то не исключается возможность существования нескольких механизмов образования зародышей в зависимости от конкретных условий горения. На сегодняшний день предложено несколько таких механизмов. Наибольшее признание получили два из них: капельно-конденсационный [115, 187] и путем образования зародышей и роста их поверхности, предложенный Теснером [140]. Физическая модель процесса включает следующие стадии: разветвленный цепной процесс образования радикалов-зародышей; превращение радикалов в частицу сажи; рост частицы за счет гетерогенных реакций разложения углеводородов на поверхности частицы.

Из спектроскопических данных известно, что в пламенах органических соединений присутствуют радикалы C_2 , а также радикалы C_3 и атомы углерода. По теории конденсации C_2 , молекулы углеводородов подвергаются глубокому разложению с образованием частиц C_2 и C_3 , которые затем претерпевают полимеризацию [62]. В упрощенной форме процесс образования зародыша можно описать как дегидрогенизацию продуктов конверсии топлива с появлением углерода или радикалов C_2 , которые впоследствии конденсируются с образованием нелетучего углерода. Принципиальная схема дегидрогенизации молекул углеводорода имеет вид:



Согласно механизму, предложенному Gaydon и Fairbain, нелетучий углерод может быть образован путем реакции с ацетиленом [113]:

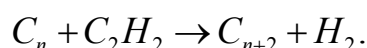




Однако теории конденсации атомов углерода по ряду причин не являются определяющими в механизме образования сажистых частиц.

В работах [31, 130, 137, 139] высказывается предположение, что процесс образования зародышей сажевых частиц имеет природу разветвленного цепного процесса. В соответствии с этими представлениями первичным зародышем сажевой частицы является углеводородный радикал-зародыш. В результате взаимодействия с молекулами исходного углеводорода из радикал-зародыша образуется зародыш частицы сажи, под которым понимается минимальная частица, имеющая физическую поверхность. Также в результате этого взаимодействия образуются новые радикал-зародыши.

Установлено, что началу образования углеродных частиц предшествует индукционный период, величина которого зависит от температуры процесса и природы углеводорода. Относительно короткие периоды индукции достигались в опытах с применением ацетилена, что говорит о более прямом пути к образованию углерода из ацетилена по сравнению с другими C_2 углеводородами [177]. Эти выводы подтверждаются и другими исследованиями горения ацетилена в ударных трубах и условиях бомбы постоянного давления. Авторы работы [101] считают, что образование углеродных частиц может одновременно идти по двум механизмам: полимеризационному и цепному. В зависимости от условий тот или иной процесс может быть доминирующим. Так, при высокой скорости нагрева зародышами частиц сажи могут быть радикалы C_2 и C_2H . Если нагрев идет медленно, возможно образование зародышей по механизму полимеризации [188]. Для ацетилена реакция образования радикал-зародыша и его роста может быть представлена следующим образом:



Теория образования зародыша сажи с участием полиацетилена была предложена исследователями Vonne, Homann, Wagner и А.В. Крестининым [60, 167]. Опыты при горении топливных смесей C_2H_2 , C_2H_4 , C_6H_6 или C_2H_5OH с кислородом установили высокую концентрацию полиацетилена в реакционной

зоне. Был предложен следующий механизм образования полиацетилена:

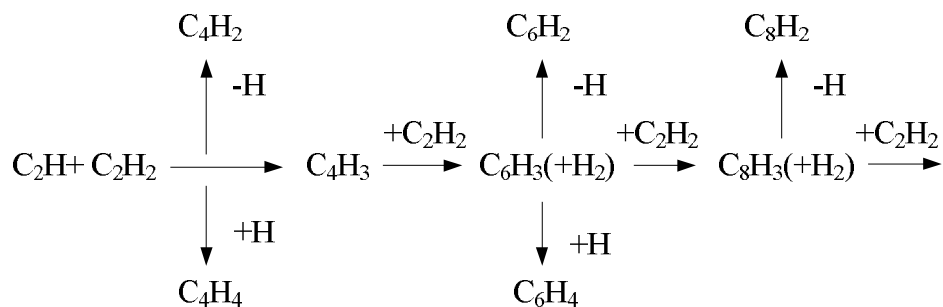


Рисунок 2.1 – Схема механизма полимеризации ацетилена [84]

В работе [44] разработана модель сажеобразования, трактующая процесс образования первичного сажевого аэрозоля как химическую конденсацию «пересыщенного полиинового пара». Полиины C_4H_2 , C_6H_2 , C_8H_2 обнаруживаются среди основных промежуточных продуктов распада исходного углеводорода в пламенах и в процессах пиролиза. Этот факт вместе с исключительно высокой химической активностью полиинов в реакциях полимеризации стал основным аргументом в пользу предположения, что именно эти молекулы представляют собой газообразные сажевые предшественники, что составляет базис полииновой модели [84]. Кинетический механизм, реализующий известную схему Портера – Хомэна образования сажи через ацетилен и продукты его полимеризации, подробно представлен в работе [48], состоит из 88 реакций.

Также важную роль в процессах образования химических зародышей частиц могут играть ионы, которые есть во всех пламенах [164]. Их концентрация намного ниже концентрации полиацетиленов и радикалов. Образовавшись за счет хемионизации во фронте пламени, ионы могут расти за счет реакций с ацетиленом и полиацетиленом, перегруппироваться в более стабильные полициклические или ароматические структуры, предшествующие образованию углеродных частиц.

В работе Т. Танзавы и У. К. Гардинера приведен кинетический механизм, описывающий образование сажи посредством 13 реакций (таблица 2.1).

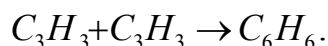
Полиацетилены являются промежуточными веществами при образовании полиароматических соединений. Все сажеобразующие пламена содержат аро-

матические углеводороды.

Таблица 2.1- Механизм образования сажи по данным Т. Танзавы и У. К. Гардинера [203]

<i>i</i>	Реакция	A	lgA	B	E, кДж/моль
1	$C_2H_2 + M \rightarrow C_2H + H + M$	$4,2 \cdot 10^{16}$	16,62	0	450,0
2	$C_2H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_4H_3 + H$	$1 \cdot 10^{13}$	13,0	0	190,0
3	$C_4H_3 + M \rightarrow C_4H_2 + H + M$	$1 \cdot 10^{16}$	16,0	0	250,0
4	$C_2H_2 + H \rightarrow C_2H + H_2$	7,8	0,892	3,2	2,0
5	$C_2H_2 + C_2H \rightarrow C_4H_2 + H$	$4 \cdot 10^{13}$	13,6	0	0
6	$C_4H_2 + M \rightarrow C_4H + H + M$	$3,5 \cdot 10^{17}$	17,54	0	335,0
7	$C_6H_2 + M \rightarrow C_6H + H + M$	$5 \cdot 10^{16}$	16,7	0	335,0
8	$C_8H_2 + M \rightarrow C_8H + H + M$	$5 \cdot 10^{16}$	16,7	0	335,0
9	$C_2H_2 + C_4H \rightarrow C_6H_2 + H$	$4 \cdot 10^{13}$	13,6	0	0
10	$C_4H_2 + C_2H \rightarrow C_6H_2 + H$	$4 \cdot 10^{13}$	13,6	0	0
11	$C_2H_2 + C_6H \rightarrow C_8H_2 + H$	$1 \cdot 10^{12}$	12,0	0	0
12	$C_6H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_8H_2 + H$	$1 \cdot 10^{12}$	12,0	0	0
13	$C_4H_2 + C_4H \rightarrow C_8H_2 + H$	$1 \cdot 10^{12}$	12,0	0	0

Исследования образования углеродных частиц при детонации ацетилена и ацетилена с добавками бензола установили, что бензол даёт большее количество зародышей сажи, чем ацетилен. Пиролиз бензола и образование углеродных частиц может проходить без разрушения бензольного кольца через реакцию конденсации [88]. Образование углерода может происходить за счет перестройки кольцевой структуры ароматических соединений. Размеры бензольного кольца почти такие же, как и расстояния между атомами в графитовой плоскости, а несколько соединенных бензольных колец представляют собой зародыш графитового кристаллита. Многие исследователи рассматривают в качестве предшественников зародышей частиц сажи ПАУ. Выяснено, что основной реакцией образования бензола в пламенах большинства углеводородных топлив является реакция рекомбинации двух пропаргильных радикалов [90, 162]:



В результате реакции может образоваться фенил и водородный радикал.

П.А. Теснер предлагает следующую схему образования зародышей отдельно для ароматических и парафиновых углеводородов (рисунок 2.2)

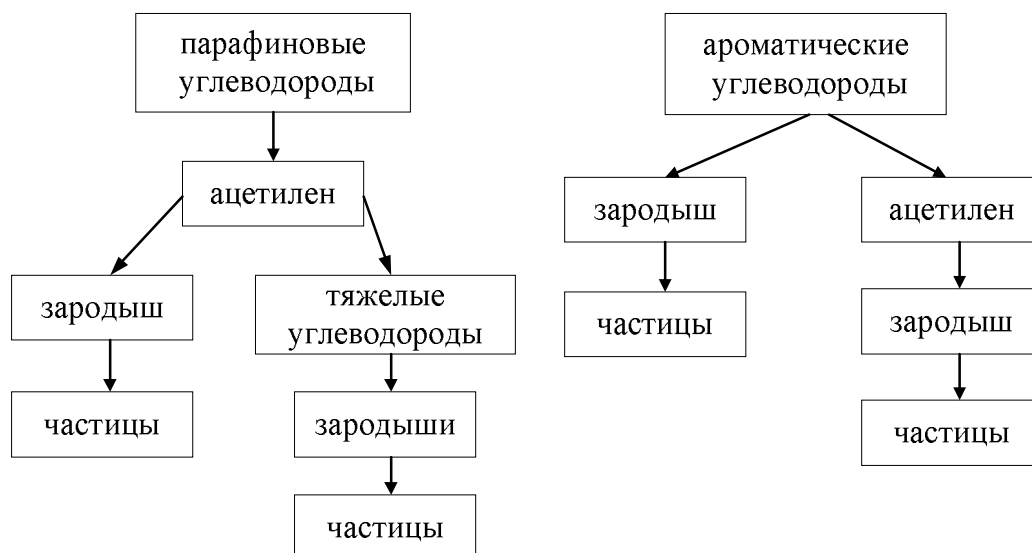


Рисунок 2.2 – Схема образования зародышей и частиц из ароматических и парафиновых углеводородов [113]

Конкретный путь образования сажи может определяться температурой и парциальным давлением углерода. Образование зародышей может происходить непосредственно из полиацетиленов или ароматических углеводородов, однако основным промежуточным звеном в процессе образования сажи является ацетилен.

Одним из путей роста ПАУ и сажи является механизм, в котором идет последовательное наращивание циклов в реакциях с участием ацетилена (механизм отщепления H и присоединения C_2H_2) (рисунок 2.3)

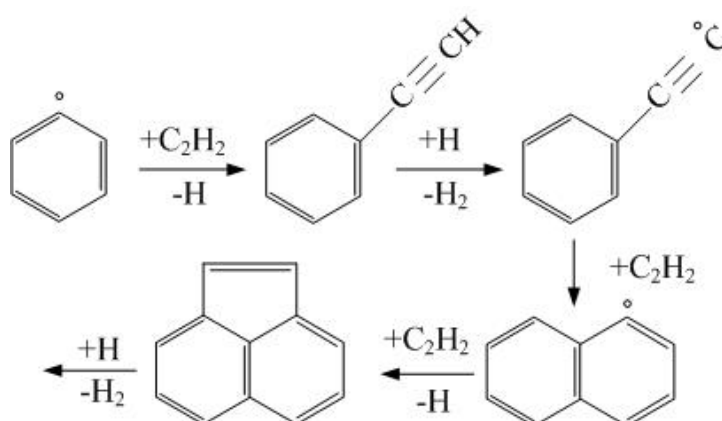


Рисунок 2.3 – Механизм роста ПАУ с участием ацетилена [176]

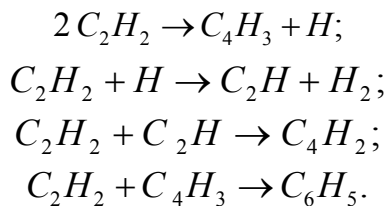
При разработке детальной кинетической модели образования и расхода ПАУ и сажи при горении богатых ТВС обнаружено, что реакции ПАУ-радикалов с ПАУ и между радикалами ПАУ были основным путем к образова-

нию зародыша сажи [84].

Образование ПАУ может начинаться с распада C_3H_4 или с реакции радикалов CH , либо CH_2 с молекулами ацетилена с образованием радикалов C_3H_3 , которые способны образовать первое ароматическое кольцо (молекулу бензола – C_6H_6).

Согласно низкотемпературному фенильному механизму (НТФМ), разработанному А.Д. Кокуриным, все ароматические углеводороды, имеющие два ароматических кольца, могут либо конденсироваться в высокомолекулярные соединения (при $T < 1000$ К), либо в результате разрушения ароматических колец образовывать ацетилен C_2H_2 и радикалы C_2 , C_2H (при $T = 1000 \dots 1500$ К) [74].

При НТФМ химическим зародышем сажевой частицы является углеродный радикал C_6H_5 – фенил, который из ацетилена получается в ряде следующих последовательно-параллельных реакций:



В результате дальнейшего уплотнения ароматической структуры полициклических соединений и отделения водорода в процессе присоединения фенильных радикалов образуется физический зародыш сажевой частицы.

На сегодняшний день наибольшее распространение получил механизм НАСА (Hydrogen Abstraction Carbon Addition). Маршрут механизма НАСА наиболее широко используется для моделирования образования сажи, однако современные методы измерения ещё не выявили полного соответствия распределения компонентов для качественной проверки этого механизма.

Поскольку именно поверхностный рост вносит решающий вклад в процесс роста массы дисперсного углерода, поэтому необходима точность в расчетах этого этапа. Процесс роста по механизму НАСА может быть описан уравнениями (таблица 2.2) [175]. Экспериментально установлено, что с ростом поверхности частицы снижается реакционная способность по механизму НАСА.

Это вызывает необходимость вносить поправку в уравнение расчета скорости поверхностного роста частиц.

Таблица 2.2 – Реакции в механизме роста поверхности сажи НАСА

№	Реакция	A (м, кг моль, с)	E кДж кг ⁻¹ моль ⁻¹
1	$C_s - H + H \rightarrow C_s + H_2$	2.5E11	50200
2	$C_s + H_2 \rightarrow C_s - H + H$	4.0 E08	29300
3	$C_s + H \rightarrow C_s - H$	2.2 E11	-
4	$C_s - H \rightarrow C_s + H$	2.0 E14	456000
5	$C_s \rightarrow C_2H_2 + \text{продукт}$	3.0 E14	259000
6	$C_s + C_2H_2 \rightarrow C_sCHCH$	2.0 E12	16700
7	$C_sCHCH \rightarrow C_s + C_2H_2$	5.0 E12	159000
8	$C_sCHCH \rightarrow C_s - H + H$	5.0 E10	-

Согласно представленной концепции весь процесс сажеобразования можно разделить на три стадии (рисунок 2.4):

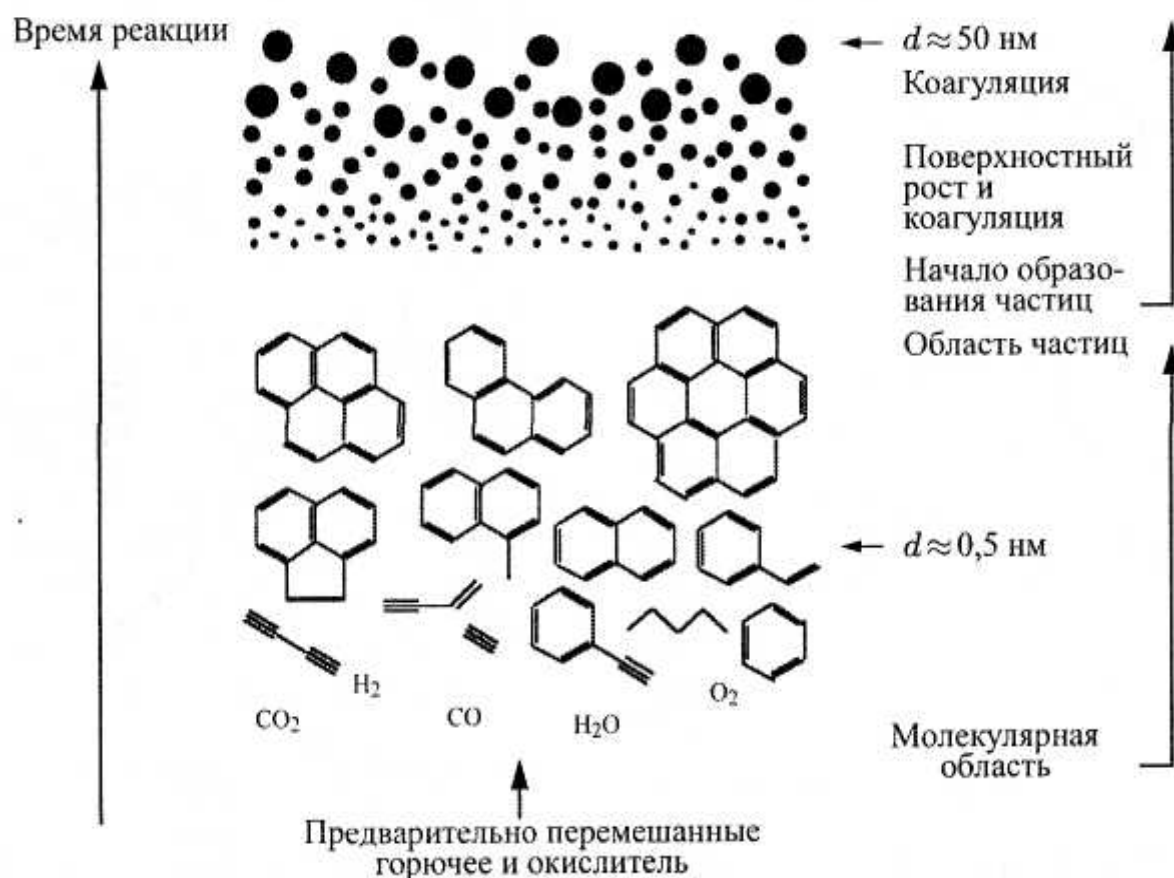


Рисунок 2.4 - Схематичное изображение процесса сажеобразования [84]

1) Зарождение частиц. В результате конгломерации молекул образуются частицы с молекулярной массой от 500 до 2000 а.е.м.

2) Рост поверхности частиц, за счет чего образуется подавляющая часть (75-95%) массы сажи. Относительный вклад ацетилена или ПАУ в процессе роста частицы зависит от условий процесса. Данный процесс конкурирует с окислением на поверхности частицы с участием O_2 , OH и O .

3) Коагуляция частиц. Далее размеры частиц увеличиваются посредством соударения растущих частиц сажи. Вначале сталкивающиеся частицы полностью коалесцируют с выходом новых сферических структур, в то время как позднее они агломерируют с образованием структур сложной формы [84].

В работе [48] представлен кинетический механизм, отражающий все основные стадии результирующего сажевыделения в КС дизеля при работе на ДТ (Таблица 2.3):

- термический и окислительный крекинг углеводородов топлива, приводящий к образованию ацетилена;
- процессы образования химических радикалов–зародышей сажевых частиц из ацетилена и продуктов пиролиза ароматических углеводородов топлива;
- процесс образования физических зародышей сажевых частиц;
- процессы их поверхностного роста и коагуляции.

В предложенной модели символ $C_{12}H_2$ обозначает частицы сажи, которые рассматриваются как «большие молекулы», участвующие в реакциях поверхностного роста и коагуляции. Предзародышевые частицы $C_{10}H_2$ и $C_{10}H$ содержат 10 атомов углерода и имеют двучленную кольцевую ароматическую структуру. Зародыши сажи образуются по реакциям 29 и 30. Скорости гетерогенного роста частиц в предложенной модели зависят от площади реакционной поверхности и в расчетах являются функцией среднего текущего диаметра частиц.

Полный механизм образования сажи, включающий стадии разложения и окисления топлива пока практически не реально воссоздать в математической модели, поскольку он включает слишком большое количество компонентов. Для упрощения модели ДТ обычно заменяют смесью компонентов с исследованными термохимическими свойствами, такие как октан, додекан, гептан и др.

Таблица 2.3 - Обобщенный кинетический механизм образования частиц сажи в дизелях [48]

№	Реакция	lgA	B	E
Термический крекинг углеводородов топлива				
1	$(C_{14}H_{30})_n \rightarrow 2C_3H_6 + 3,5C_2H_4 + CH_4$	14	0	272
2	$(C_{14}H_{30})_n \rightarrow (C_{14}H_{30})_n$	14	0	272
3	$(C_6H_4CH_3CH_3)_A \rightarrow C_6H_5CH_3 + 0,5C_2H_2 + 0,5H_2$	13,5	0	255
4	$C_3H_6 \rightarrow C_2H_4 + 0,5C_2H_2 + 0,5H_2$	13	0	304
5	$C_2H_4 \rightarrow C_2H_2 + H_2$	11,5	0	265
6	$CH_4 \rightarrow 0,5C_2H_4 + H_2$	13,5	0	398
7	$C_6H_5CH_3 \rightarrow 0,5C_2H_4 + 0,5H_2 + C_6H_5$	13,5	0	362
8	$C_6H_5 \rightarrow C_6H_3 + H_2$	13,5	0	190
Механизм начальной стадии образования сажи				
9	$C_2H_2 \rightarrow C_2H + H$	13,5	0	473
10	$C_2H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_4H_3 + H$	13	0	190
11	$C_2H_2 + H \rightarrow C_2H + H_2$	14,18	0	79,6
12	$C_2H + H + M \rightarrow C_2H_2 + M$	16,86	0,573	-81,5
13	$C_2H_2 + C_2H \rightarrow C_4H_2 + H$	13,6	0	0
14	$H + H + M \rightarrow H_2 + M$	16,99	-0,6	0
15	$C_4H_3 \rightarrow C_4H_2 + H$	11,07	0	190
16	$C_4H_2 + M \rightarrow C_4H + H + M$	17,54	0	335
17	$C_4H + C_2H_2 \rightarrow C_6H_3$	11,81	0	27,2
18	$C_6H_3 \rightarrow C_6H_2 + H$	13,5	0	190
19	$C_4H + C_2H_2 \rightarrow C_6H_2 + H$	13,6	0	0
20	$C_6H_2 + M \rightarrow C_6H + H + M$	16,7	0	335
21	$C_6H + C_2H_2 \rightarrow C_8H_3$	11,81	0	27,2
22	$C_8H_3 \rightarrow C_8H_2 + H$	13,5	0	190
23	$C_6H + C_2H_2 \rightarrow C_8H_2 + H$	12,78	0	27,2
24	$C_8H_2 + M \rightarrow C_8H + H + M$	16,7	0	335
25	$C_8H + C_2H_2 \rightarrow C_{10}H_3$	11,81	0	27,2
26	$C_{10}H_3 \rightarrow C_{10}H_2 + H$	13,5	0	190
27	$C_8H + C_2H_2 \rightarrow C_{10}H_2 + H$	12,78	0	27,2
28	$C_{10}H_2 + M \rightarrow C_{10}H + H + M$	16,7	0	335
Образование зародышей				
29	$C_{10}H_2 + C_2H \rightarrow C_{12}H_2 + H$	12	0	0
30	$C_{10}H + C_2H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H$	12,78	0	27,2
Гетерогенные реакции на поверхности частиц				
31	$C_{12}H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + C_2$	13,2	0	131
32	$C_{12}H_2 + C_2H \rightarrow C_{12}H_2 + H + C_2$	11,56	0,5	0
33	$C_{12}H_2 + C_4H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 2C_2$	11,41	0,5	0
34	$C_{12}H_2 + C_4H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 2C_2$	11,41	0,5	0
35	$C_{12}H_2 + C_6H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 3C_2$	11,33	0,5	0
36	$C_{12}H_2 + C_6H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 3C_2$	11,33	0,5	0
37	$C_{12}H_2 + C_8H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 4C_2$	11,27	0,5	0
38	$C_{12}H_2 + C_8H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 4C_2$	11,27	0,5	0
39	$C_{12}H_2 + C_{10}H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 5C_2$	11,22	0,5	0
40	$C_{12}H_2 + C_{10}H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 5C_2$	11,22	0,5	0
Гибель зародышей на частицах сажи и коагуляция				
41	$C_{12}H_2 + C_{12}H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 6C_2$	11,19	0,5	0

Подробные механизмы для окисления этих видов топлива включают сотни компонентов и тысячи реакций. Упрощение расчетов за счет исключения отдельных компонентов может снизить точность модели, однако это необходимо для получения приемлемых практических результатов работы модели в аспекте времени работы и сложности вычислений.

В работе [39] представлены детальные кинетические расчеты процесса сажеобразования при пиролизе и окислении ароматических и алифатических углеводородов. Модель содержит 3530 прямых и обратных реакций в газовой фазе с участием 300 различных компонентов. Такая модель не может быть внедрена в программное обеспечение для газодинамических расчетов в дизелях из-за длительного времени вычисления.

Ключевую роль в кинетическом механизме играет ограниченное число компонентов (H , O_2 , C_2H_2 , ПАУ). Установлено, что именно ацетиленовые и пропаргиловые соединения оказывают большее влияние на конечный выход сажи, поэтому большинство исследователей используют ацетилен в качестве основного предшественника сажи.

В работе [175] разработана модель процесса сажеобразования при горении *n*-гептана и изооктана, включающая 144 реакции и 46 компонентов. Процесс сажеобразования разбит на 5 стадий, для каждой из которых разработана своя подмодель. Отдельно рассмотрен процесс зарождения частиц из газовой фазы. Отмечено, что скорость зарождения существенно зависит от температурных условий и концентрации ацетилена.

Для снижения объема вычислений могут быть использованы макрокинетические модели расчета, которые можно применить совместно с детальным кинетическим механизмом горения топлив. Макрокинетическая модель, предложенная в работе [83], включает всего три эффективные необратимые реакции (таблица 2.4): реакцию пиролиза ацетилена (реакция 1) и две реакции окисления сажи — диоксидом углерода (реакция 2) и водяным паром (реакция 3).

Преимуществом этой модели является её универсальность. Она может быть применена для расчета сажевыделения при сгорании широкого спектра

топлив с минимальной настройкой, что упрощает процесс прогнозирования уровня дымности дизеля при работе на альтернативных топливах.

Таблица 2.4 – Макрокинетическая модель сажеобразования [83]

№	Реакция	A, л, моль, с	E/R, К
1	$C_2H_2 + C_2H_2 \rightarrow C + C + C_2H_4$	$K \cdot (2 \cdot 10^{16})$	40 000
2	$C + CO_2 \rightarrow CO + CO$	A_{fp}	40 000
3	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	A_{fp}	40 000

Большую практическую значимость имеют модели, благодаря которым становится возможным определение среднего размера частиц сажи в различных зонах КС на протяжении всего процесса сгорания, их распределение по размерам, процесс газификации и коагуляции, в том числе в выпускной системе, состав компонентов газовой смеси в реакционной зоне, состав продуктов сгорания. Однако построение такой модели, учитывающей множество факторов, является сложной научной задачей. Параллельно с ростом поверхности частиц происходит гетерогенный процесс газификации углерода за счет реакций окисления, который представляет вполне самостоятельную область исследований.

2.2 Газификация частиц сажи

На протяжении всего процесса сажеобразования параллельно с ростом и коагуляцией частиц идет процесс их выгорания. Газификация углерода – гетерогенный процесс, скорость которого определяется как кинетикой горения, так и диффузионным переносом кислорода и продуктов реакции у поверхности частицы. К настоящему моменту общепризнанным является многостадийный характер окисления углерода. Еще в середине прошлого века было установлено, что при горении углерода характерно не только большое разнообразие режимов процесса, но и разнообразие состава получающихся продуктов горения и, следовательно, возможность значительного отклонения от состава первичных продуктов горения [153].

Экспериментальные исследования процессов горения и газификации сталкиваются с рядом трудностей:

- Маленькие размеры частиц;
- Высокие нестационарные температуры процесса;
- Протекание реакций окисления внутри пористой частицы;
- Неизвестный состав продуктов реакции взаимодействия углерода с реакционными газами, так как продуктами этого взаимодействия могут быть диоксид и монооксид углерода;
- Наличие нескольких режимов горения и газификации, которые могут существенно отличаться друг от друга;
- Зависимость пористой структуры частиц от условий образования и её изменение в процессе газификации.

В связи с возникающими трудностями большинство экспериментальных исследований ограничивалось измерениями температуры поверхности частиц и скорости убывания массы частиц в процессе горения [48].

На сегодняшний день установлено, что при взаимодействии углерода с окислителем (молекулами и радикалами CO_2 , O , OH , O_2 , CO , H_2O) газификация происходит с образованием промежуточных соединений, которые позже распадаются с выделением CO и CO_2 . В работе [171] представлен механизм последовательного окисления молекулы нафталина, по которому теоретически могут проходить реакции окисления молекул ПАУ (рисунок 2.5).

По мнению авторов [171], основными реакциями окисления углерода являются реакции с участием радикалов гидроксидной группы, атомарного и молекулярного кислорода.

Для горения углерода характерно качественное многообразие одновременно протекающих химических реакций [4, 80]. Принято, что процесс газификации твердого углерода сажевых частиц может происходить за счет взаимодействия с радикалами, содержащими кислород, молекулами воды, монооксидом и диоксидом углерода, а также за счет реакции со свободным кислородом.

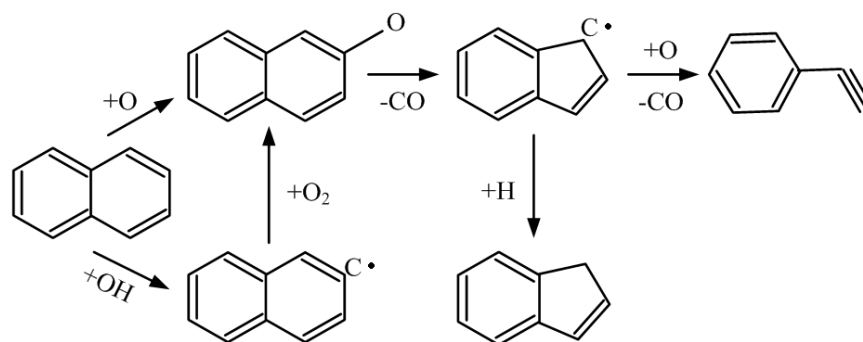
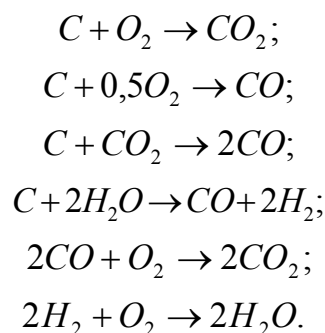


Рисунок 2.5 – Механизм окисления ПАУ на примере нафталина

Химический механизм включает в себя гетерогенные и гомогенные реакции окисления, идущие на поверхности и в пограничном объеме углеродной частицы [33,159]:



Последние две реакции гомогенные, которые могут происходить как внутри пор частицы, так и в газовой фазе над поверхностью частицы.

Поскольку в условиях дизеля сорбционные реакции протекают практически мгновенно, химический процесс горения углеродных частиц лимитируется скоростью диффузии, которая зависит от условий протекания рабочего процесса. При равной концентрации окислителя на поверхности и в потоке скорость газификации углерода может определяться скоростями химических реакций на поверхности частицы [75, 80]. На скорость газификации углерода и состав газов на поверхности влияют размер и температура твердой частицы [153]. В зависимости от температурных условий меняется скорость гетерогенных реакций и при низких температурах реакционный газ проникает в центр частицы. При высоких температурах реакции протекают на внешней поверхности частицы, их скорость определяется диффузионным потоком реакционного газа к поверхности [33].

J. Lahaye предположил неравномерное окисление всей поверхности частицы и перемещение фронта окисления к центру агрегата [187]. В центре частицы за счет выгорания части углеродных слоев образуются пустоты (рисунок 2.6).

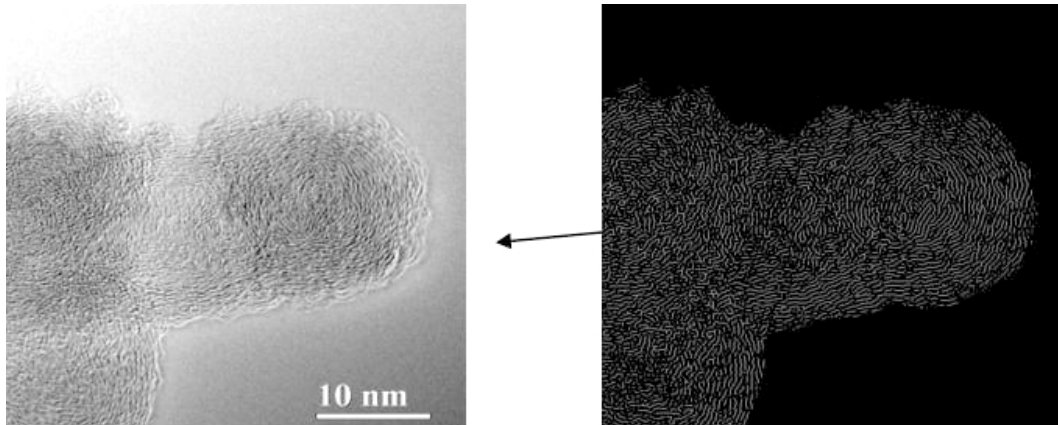


Рисунок 2.6 – Электронно-микроскопическое изображение частицы сажи при газификации 9% массы частицы [113]

Образующиеся микропоры в частице влияют на её электропроводность, таким способом получают разновидности дисперсного углерода с различными электропроводящими свойствами [113, 114].

При потере массы около 80% агрегаты частиц сажи разрушаются [113].

В зоне сажеобразования процессы образования и выгорания частиц происходят одновременно, однако в обеднённой углеводородами части пламени может протекать только окисление частиц. Выгорание частиц может продолжаться в выпускной системе дизеля при условии, что ОГ имеет достаточную температуру.

При высокой температуре и давлении скорость сажеобразования может конкурировать с процессом газификации, тем самым предотвращая чрезмерно высокую скорость протекания реакции горения в дизеле [14].

Таким образом, скорость результирующего процесса и количественный выход сажи определяются соотношением скоростей конденсации и газификации твердого углерода. При этом процессы образования и выгорания сажи могут проходить одновременно по индивидуальным физико-химическим механизмам [6].

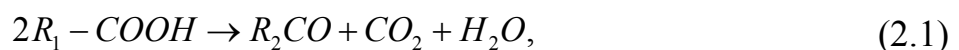
2.3 Химизм сажеобразования в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ

Теоретически и экспериментально доказано, что началу окислительного процесса в дизеле предшествуют процессы изомеризации углеводородов, т.е. их распад на другие структурные группы при неизменном количественном составе атомов. Этот процесс начинается с того момента, когда вследствие теплового колебательного движения атомов происходит внутренняя деструктивная перегруппировка, которая приводит к образованию изомера с меньшим значением свободной энергии и, следовательно, с большей термостабильностью [80].

Основным компонентом РМ являются предельные и непредельные карбоновые кислоты. По своей химической структуре кислоты отличаются друг от друга только содержанием атомов углерода и уровнем ненасыщенности (таблица 2.5).

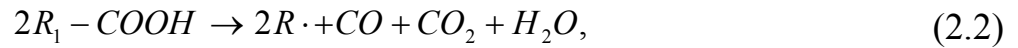
При нагревании РМ в жирных кислотах могут происходить реакции термического разложения с участием карбоксильной группы и углеводородных радикалов. Пропорционально росту температуры возрастает кинетическая энергия молекул, возрастает вероятность их разрушения при столкновении. В результате колебания молекул может происходить крекинг даже при отсутствии окислителя. При этом происходят реакции полного или частичного декарбонирования и дегидратации.

В работе [151] предложена сложная схема пиролиза карбоновых кислот с одновременным образованием кетенов или кетонов (в зависимости от уровня насыщения кислоты) диоксида углерода и молекулы воды:



где R_1 и R_2 – углеводороды карбоновой кислоты.

Теоретически возможна реакция разложения карбоксильной группы с образованием монооксида и диоксида углерода, воды и радикала углеводородного остатка кислоты:



где R - углеводородный радикал.

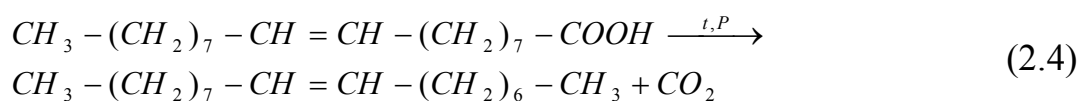
Таблица 2.5 – Содержание карбоновых кислот по массе в РМ [135]

Карбоновая кислота	Формула состава	Содержание по массе, %
Лауриновая	$C_{12}H_{24}O_2$	0,01
Миристиновая	$C_{14}H_{28}O_2$	0,05
Пентадекановая	$C_{15}H_{30}O_2$	0,02
Пальмитиновая	$C_{16}H_{32}O_2$	4,75-4,8
Пальмитолеиновая	$C_{16}H_{30}O_2$	0,2
Маргариновая	$C_{17}H_{34}O_2$	0,04
Маргаритолеиновая	$C_{17}H_{32}O_2$	0,06
Стеариновая	$C_{18}H_{36}O_2$	1,7-1,9
Олеиновая	$C_{18}H_{34}O_2$	43,7-59,53
Линолевая	$C_{18}H_{32}O_2$	20,9-21,36
Линоленовая	$C_{18}H_{30}O_2$	8,5-9,27
Арахидиновая	$C_{20}H_{40}O_2$	0,67
Гонделиновая	$C_{20}H_{38}O_2$	1,35-4,8
Эйкозодиеновая	$C_{20}H_{36}O_2$	0,14
Бегеновая	$C_{22}H_{44}O_2$	0,06
Эруковая	$C_{22}H_{42}O_2$	0,15-15,6
Лигноцериновая	$C_{24}H_{48}O_2$	0,13
Нервоновая	$C_{24}H_{46}O_2$	0,12

При высоких температурах кетоны и кетены также разлагаются с образованием монооксида углерода или воды и ненасыщенного углеводородного радикала [67]:



Декарбоксилирование является начальной стадией термического крекинга карбоновых кислот РМ. Уравнение реакции декарбоксилирования для олеиновой кислоты имеет вид:



Таким образом, в результате декарбоксилирования молекул жирных ки-

слот РМ образуются алканы и олефины с числом атомов углерода от 15 до 21, подвергающиеся дальнейшему термическому разложению.

Разложение алканов протекает согласно механизму Райса – Герцфельда – Косякова и является радикально-цепным процессом [6, 97, 158]. Зарождение цепи начинается с распада на два радикала с разрывом связи C-C. Наиболее вероятен разрыв связи между двумя третичными, затем между вторичными и наименее вероятен разрыв связи между первичными атомами углерода в соответствии с принципом региоселективности. Образовавшиеся радикалы большие, чем $CH_3\cdot$ и $C_2H_5\cdot$, распадаются, как правило, с разрывом ослабленной связи C-C, находящейся в β -положении к валентному атому углерода. Зарождение цепи распада олефинов происходит в результате разложения исходного олефина по связи C-C в β -положении к основной двойной связи, либо в результате отрыва атома водорода радикалами $H\cdot$ или $CH_3\cdot$, в β -, γ - и т. д. положении к двойной связи с образованием алкильных и алкенильных радикалов. Если в структуре радикала отсутствует связь C-C в β -положении, то разрывается связь C-H у атома углерода соседнего с валентным атомом. Наряду с отрывом атома водорода радикалы и с наибольшей вероятностью атомарный водород могут присоединяться к исходному олефину по месту двойной связи с образованием алкилрадикалов. Способность алкенов к реакциям присоединения падает по мере увеличения молекулярной массы углеводорода [16].

Радикал $C_2H_5\cdot$ в значительной степени также разлагается на этилен и атом водорода:



В результате дегидратации этилена образуется ацетилен, являющийся ключевым звеном в процессе сажеобразования:



Метильный радикал $CH_3\cdot$, реагируя с атомом водорода, может образовывать устойчивый до 1500 °С метан, не имеющий связи C-C:



При промежуточных температурах устойчивыми остаются молекулы со всё более короткими цепями, а также циклические молекулы и радикалы бензольного ряда. Согласно НТФМ фенильный $C_6H_5\cdot$ и бензильный $C_4H_3\cdot$ радикалы, взаимодействуя с ацетиленом и другими углеводородами, образуют химический зародыш сажевой частицы [74]. При температурах свыше $1500^\circ C$ только N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , CO , C_2H_2 и некоторые радикалы устойчивы к распаду. В зонах с большей концентрацией кислорода процесс распада значительно ускоряется. Энергия, освобожденная в результате соединения кислорода с неустойчивыми молекулами углеводородов, достаточна для того, чтобы вызвать в молекуле разрыв одной или нескольких $C-C$ связей. При такой реакции образуются разнообразные продукты, большинство из которых являются случайными промежуточными продуктами реакций. Высокоактивные радикалы с атомами кислорода ускоряют цикл превращений.

Процесс термического разложения олефина, образовавшегося в результате декарбоксилирования молекулы олеиновой кислоты с учетом индуктивного и мезомерного эффектов, представлен на рисунке 2.7.

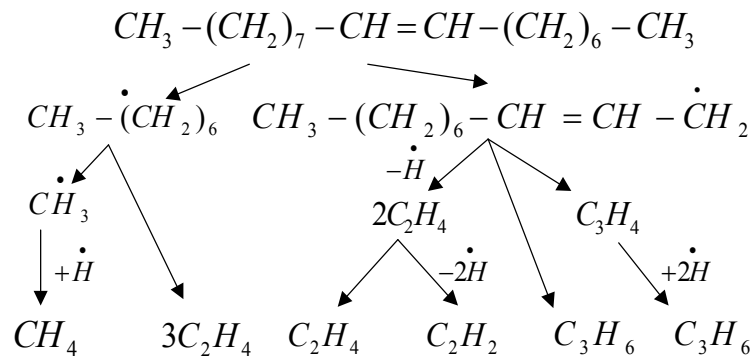
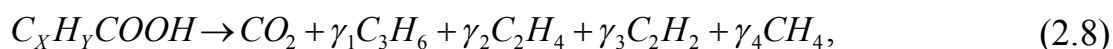


Рисунок 2.7 – Схема термического разложения олефина олеиновой кислоты

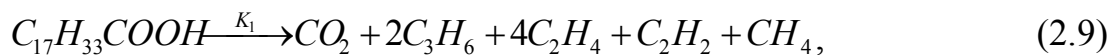
Проведем химическую аппроксимацию процессов декарбоксилирования и пиролиза одной мономолекулярной реакцией разложения карбоновой кислоты РМ с произвольно ограниченным числом стабильных компонентов:



где C_xH_yCOOH – условная молекула карбоновой кислоты РМ; γ_i – стехиометрический коэффициент.

Учитывая известное процентное содержание атомов кислорода водорода и углерода по массе, средний состав РМ можно приближенно выразить формулой молекулы олеиновой кислоты $C_{18}H_{34}O_2$. Тогда, используя данные высокотемпературного крекинга сложных олефинов, учитывая условия материального баланса, объемное содержание продуктов первичного разложения РМ составит: этилен 44,4%, пропилен 22,2%, ацетилен, диоксид углерода и метан по 11,1%. Образование большого объема легких олефинов, прежде всего этилена и пропилена, при термическом разложении РМ подтверждено экспериментально [169].

Уравнение реакции термического разложения осредненной молекулы РМ примем:

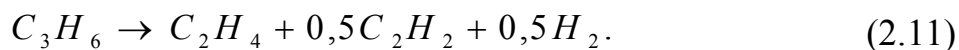


где K_1 – константа скорости брутто-реакции разложения карбоновой кислоты РМ.

Первичным продуктом высокотемпературного крекинга метана, согласно экспериментально подтвержденной схеме Г. Сторча [6], является этан, который в свою очередь подвергается распаду на этилен и водород. Стехиометрическое уравнение реакции имеет вид:

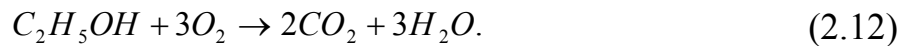


Мономолекулярная реакция распада пропилена описывается следующим брутто-уравнением [75]:

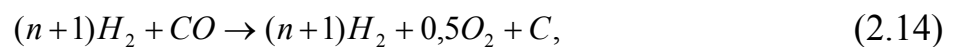
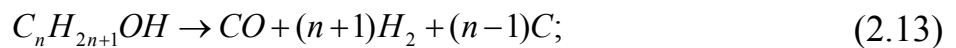


В зонах с недостаточной концентрацией углеводородного топлива с пониженной вследствие испарения спирта температурой, на границах слияния факелов РМ и этанола, процесс крекинга замедляется. В этих зонах возможно развитие холоднопламенных реакций, ведущих к образованию и осаждению на стенках цилиндра кислородсодержащих молекул, в частности пероксидов и альдегидов [80].

На участках факела спирта с достаточной концентрацией кислорода при распространении фронта пламени происходит выгорание спирта с образованием углекислого газа и воды по реакции:

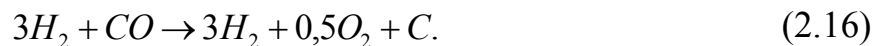


В зоне богатой ТВС молекула одноатомного спирта может разлагаться в две эндотермические стадии [74]:



где n – количество атомов углерода в молекуле спирта.

Для молекулы этанола уравнение реакции эндотермического разложения примет вид:



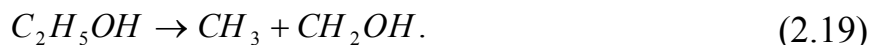
При интервале температур 1000...2500 К и давлении 5...10 МПа молекула этанола подвергается термическому распаду:



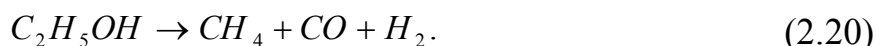
Для этилового спирта реакция дегидратации идет совместно с реакцией дегидрогенизации с образованием этилена [151]:



Установлено, при температурах выше 1500 К и давлении выше 10 атмосфер этанол может распадаться по реакции [193]:



Barnard и Hughes исследовали термическое разложения этанола в диапазоне температур 843 – 902 К и давлений 0,03 – 0,66 МПа в реакторе постоянного объема. Было установлено, что спирт распадается с образованием метана, монооксида углерода и водорода. Уравнение брутто-реакции может быть записано [166]:



Вода и этилен являются основными продуктами термического разложения этанола [189, 200]. Однако в продуктах пиролиза можно обнаружить радикалы H , CH_3 , CH_2OH , и молекулы метана, водорода, монооксида и диоксида углерода. Основные реакции и кинетические параметры процесса термического распада этанола представлены в таблице 2.6.

В результате процесса разложения спирта в реакционной зоне образуются молекулы, среди которых наибольший вклад в процесс образования и роста зародышей сажи вносит метан и этилен, как показано выше. Этилен в ходе дальнейшего разложения по уравнению реакции 2.6 образует ацетилен. Метан в цепи образования сажи участвует в реакциях дегидрирования и образования C-C связей. Эти углеводороды также расходуются на образование и рост зародышей сажи. Для учета влияния концентрации кислорода в топливном факеле необходимо систему дополнить реакциями разложения и окисления.

Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям состава продуктов термического разложения этилового спирта при высоких температурах и давлении, уравнения брутто-реакций распада этанола могут быть представлены в виде уравнений 2.18 - 2.20.

Таблица 2.6 – Основные реакции в зоне термического разложения этанола

№	Реакция	A	n	E, кал.	Источник
1.	$CH_3CH_2OH = C_2H_4 + H_2O$	3.8E20	-2,060	69426	[178, 190]
2.	$CH_3CH_2OH = CH_3 + CH_2OH$	1.8E47	-8,960	101002	[178, 190]
3.	$CH_3CH_2OH = C_2H_5 + OH$	6.2E51	-10,340	109879	[178]
4.	$CH_3 + OH = CH_3OH$	1.3E22	-2.66	2451	[180]
5.	$C_2H_5 + OH = C_2H_4 + H_2O$	4.7E18	-1.581	7999	[180]
6.	$CH_3 + CH_3 = C_2H_5 + H$	5.4E13	0	16055	[180]
7.	$C_2H_5 + OH = CH_2OH + CH_3$	6.5E22	-2.442	12647	[180]
8.	$CH_3CH_2OH + H = CH_3CHOH + H_2$	8.8E03	2.680	2913	[178]
9.	$CH_3CH_2OH + H = CH_2CH_2OH + H_2$	5.3E03	2.810	7491	[178]
10.	$CH_3CH_2OH + H = CH_3CH_2O + H_2$	9.5E02	3.140	8696	[178]
11.	$CH_3CH_2OH + OH = CH_3CHOH + H_2O$	6.9E16	-0.733	13,799	[178]
12.	$CH_3CH_2OH + OH = CH_2CH_2OH + H_2O$	2.4E10	0.881	5350	[178]
13.	$CH_3CH_2OH + OH = CH_3CH_2O + H_2O$	7.9E06	1.609	-461	[178]
14.	$CH_3CH_2OH + CH_3 = CH_3CHOH + CH_4$	2.0E01	3.370	7630	[178]
15.	$CH_3CH_2OH + CH_3 = CH_2CH_2OH + CH_4$	2.0E00	3.570	7717	[178]
16.	$CH_3CH_2OH + CH_3 = CH_3CH_2O + CH_4$	3.3E02	3.300	12,283	[178]
17.	$CH_3CHOH + H = CH_3CHOH + H_2$	3.1E12	0.270	-334	[178]
18.	$CH_3CHOH + H = C_2H_4 + H_2O$	1.6E20	-1.810	9448	[178]
19.	$CH_3CHOH + H = CH_3 + CH_2OH$	4.0E23	-2.527	13637	[178]
20.	$CH_3CHOH + H = C_2H_5 + OH$	6.3E21	-2.110	15269	[178]
21.	$CH_3CHOH + H = CH_3CH_2OH$	1.6E40	-7.820	12916	[178]
22.	$C_2H_4 + OH = CH_2CH_2OH$	6.0E37	-7.440	14269	[178]
23.	$C_2H_4 + H + M = C_2H_5 + M$	1.4E09	1.463	1355	[197]
24.	$CH_2CH_2OH = CH_2CHOH + H$	2.7E27	-4.440	37205	[178]
25.	$CH_2CH_2OH + H = C_2H_4 + H_2O$	3.6E16	-0.716	8767	[178]
26.	$CH_2CH_2OH + H = CH_2OH + CH_3$	7.5E20	-1.690	13429	[178]
27.	$CH_2CH_2OH + H = C_2H_5 + OH$	8.1E19	-1.510	15534	[178]
28.	$CH_3CH_2O + M = CH_3 + CH_2O + M$	6.3E10	0.930	17098	[197]
29.	$CH_3CH_2O + H + M = CH_3CH_2OH + M$	3.1E11	0.894	13	[178]
30.	$CH_3CH_2O + H + M = CH_3 + CH_2OH + M$	2.6E18	-1.050	5128	[178]
31.	$CH_3CH_2O + H = CH_3CHO + H_2$	7.5E09	1.150	673	[178]
32.	$CH_3 + CH_3 + M = C_2H_6 + M$	9.5E14	-0.540	179	[185]
33.	$CH_3 + H + M = CH_4 + M$	2.3E14	0.030	144	[181]
34.	$CH_3 + OH = CH_2 + H_2O$	4.3E04	2.570	3997	[181]
35.	$C_2H_6 + H = C_2H_5 + H_2$	7.4E03	3.100	5340	[201]
36.	$C_2H_6 + OH = C_2H_5 + H_2O$	1.6E06	2.220	741	[186]
37.	$C_2H_6 + CH_3 = C_2H_5 + CH_4$	3.5E01	3.440	10384	[197]
38.	$CH_4 + H = CH_3 + H_2$	4.1E03	3.160	8755	[181]
39.	$CH_4 + OH = CH_3 + H_2O$	1.0E06	2.180	2506	[181]
40.	$CH_3 + OH = CH_3O + H$	3.1E09	0.920	12981	[181]
41.	$CH_3 + OH = CH_2O + H_2$	2.4E09	0.450	3791	[181]
42.	$CH_3O + M = CH_2O + H + M$	1.1E10	1.210	24069	[181]
43.	$CH_2O + M = CO + H_2 + M$	3.7E13	0	71969	[181]
44.	$CH_2O + H = HCO + H_2$	4.2E09	1.294	3591	[181]
45.	$CH_2O + OH = HCO + H_2O$	1.1E09	1.330	-392	[181]
46.	$CH_2O + OH = H + CO + H_2O$	8.4E10	0.879	9843	[181]
47.	$HCO + M = H + CO + M$	4.9E16	-0.930	19724	[181]

Константы скоростей реакций могут быть вычислены с использованием справочных данных (таблица 2.6) по формуле:

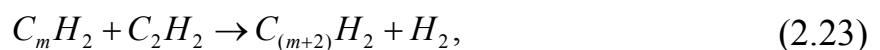
$$k_i = A \cdot T^n e^{\frac{-E}{RT}}, \quad (2.21)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации процесса, кал/моль; R – универсальная газовая постоянная, кал/моль·К; T – температура процесса, К.

Заключительным этапом пиролиза топлив является взрывное разложение ацетилена с образованием химических зародышей частиц сажи, достаточно подробно рассмотренное в монографии [75]. Общий вид уравнения реакции разложения ацетилена может быть записан следующим образом [6, 159]:



Науглероживание радикала зародыша происходит при взаимодействии с ацетиленом за счет присоединения атомов углерода и усиления их связей. При достижении числа атомов углерода 80...100 и более появляется физическая поверхность сажистой частицы [118]. Таким образом, происходит фазовый переход к твердой конденсированной фазе по следующей брутто-реакции:



где m – количество атомов углерода в зародыше сажи.

Дальнейший рост частицы сажи осуществляется за счет реакции разложения ацетилена и продуктов распада углеводородов топлива на поверхности частицы, а также гибели зародышей с равномерным распределением массы по поверхности частицы. Росту зародышей сажи в пламени этанола активно препятствуют радикалы ОН и водорода. Адсорбция радикалов водорода препятствует контакту частиц с окружающей средой. Гидроксидные группы взаимодействуют на поверхности частицы с атомами углерода, разрушают углеродный каркас, препятствуя дальнейшему росту частицы. В математической модели

необходимо учитывать конкурирующие процессы на поверхности частицы в зоне интенсивного образования и роста.

Для расчета равновесного состава продуктов окисления богатых ТВС кинетическим методом были использованы уравнения, приведенные в таблице 2.7 [48].

Таблица 2.7 – Реакции равновесного состава продуктов окисления богатых ТВС

№	Реакция	A	n	E, кДж
1	$C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$	9,221	1	163,2
2	$2CO + H_2 \rightarrow C_2H_2 + O_2$	-	-	-
3	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	14,56	0	28,7
4	$H_2O \rightarrow H_2 + 0,5 O_2$	-	-	-
5	$CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$	10,212	-	118,4
6	$CO_2 \rightarrow CO + 0,5 O_2$	-	-	-
7	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	13,5	0	0
8	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	-	-	-
9	$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2$	13,5	0	0
10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	-	-	-
11	$CH_4 + CH_4 \rightarrow C_2H_2 + 3H_2$	13,5	0	0
12	$C_2H_2 + 3H_2 \rightarrow CH_4 + CH_4$	-	-	-

При работе дизеля на РМ и этаноле, даже в зонах с богатой ТВС, параллельно с образованием и ростом сажевых частиц происходит их выгорание. Подробно механизм газификации углерода с поверхности частицы представлен в предыдущем разделе. В таблице 2.8 приведены уравнения окисления сажи, форма записи которых показывает, что при каждом элементарном акте взаимодействия молекулы окислителя частица сажи C_mH_2 изменяет размер и массу за счет отделения атома углерода, но при этом не исчезает полностью и не теряет индивидуальность.

Сажевыделение дизеля при работе на этаноле и РМ с двойной системой топливоподачи складывается из сажи, образовавшейся по различным механизмам в пламени богатой ТВС этанола и запального РМ.

В условиях подачи в КС двух топлив, различных по своим физико-химическим свойствам, в цилиндре дизеля характерна значительная темпера-

турная и концентрационная неоднородность ТВС в объеме КС. Следовательно, образование сажи потенциально может происходить по различным механизмам. Но по причине временной и пространственной ограниченности условий, необходимых для протекания низкотемпературных механизмов образования сажи (через ПАУ), мы предполагаем, что эти реакции не вносят существенного вклада в конечный выход сажи. Для этанола не характерен путь образования сажи путем высокотемпературной термической полимеризации и дегидрогенизации парожидкостного ядра испаряющихся капель, предложенный Разлейцевым [115], ввиду высокой скорости испарения [152]. Основная масса дизельной сажи образуется преимущественно по высокотемпературной ацетиленовой схеме, а низкотемпературный процесс полициклизации объясняет наличие ПАУ на поверхности частиц сажи.

Таблица 2.8 – Реакции газификации сажи [48]

№	Реакция	A	n	E, кДж.
1	$(C_mH_2+0,5 C_2) + O_2 \rightarrow CO_2 + C_{m-1}H_2$	3,463	0	0
2	$(C_mH_2+0,5 C_2) + 0,5O_2 \rightarrow CO + C_{m-1}H_2$	3,463	0	0
3	$(C_mH_2+0,5 C_2) + CO_2 \rightarrow 2 CO + C_{m-1}H_2$	3,463	0	0
4	$(C_mH_2+0,5 C_2) + H_2O \rightarrow CO + H_2 + C_{m-1}H_2$	3,463	0	0

Основные пути пиролиза топлив в КС дизеля с учетом кинетических данных основных химических реакций представлены на схеме (рисунок 2.8).

Состав газов в реакционной зоне главным образом зависит от локального КИВ и температурных условий. Кислород, вовлекаемый в ядро топливного факела, быстро реагирует с продуктами пиролиза и препятствует росту углеродных цепочек, при этом растет концентрация характерных кислородсодержащих соединений и падает концентрация метана и этилена.

Полная кинетическая модель для расчета концентрации продуктов пиролиза этанола и РМ в КС дизеля составлена из 113 реакций пиролиза, 32 реакций образования, гетерогенного роста и коагуляции сажи, 4 реакций газификации и 12 реакций расчета равновесного состава продуктов окисления. Расчет производится для 48 компонентов. Методика расчета рассмотрена в следующем разделе. Полный перечень уравнений реакций, рассматриваемых при моделирова-

нии процесса термического разложения этанола в КС дизеля, приведен в приложении А.

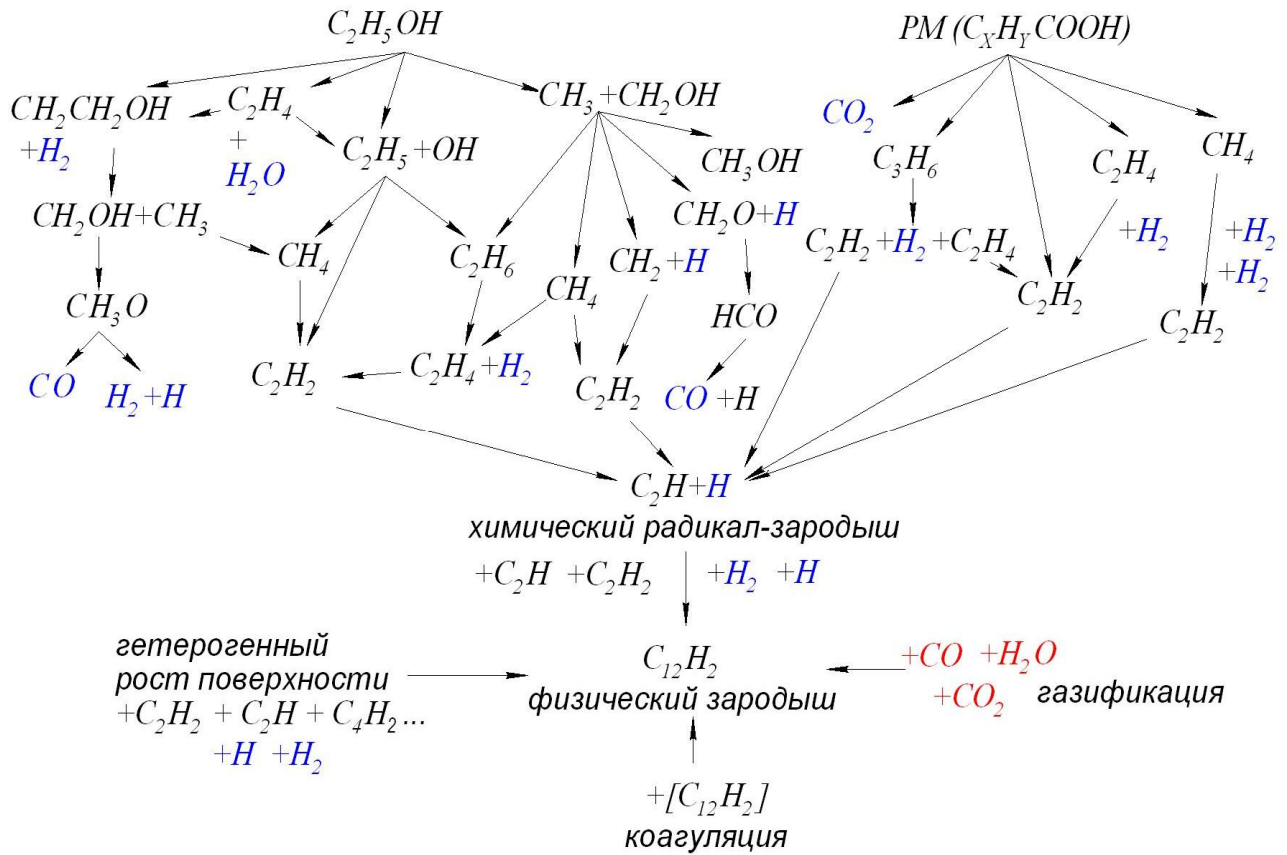


Рисунок 2.8 – Упрощенный химизм процесса сажеобразования при работе дизеля на этаноле и РМ

Разложение РМ упрощенно представлено брутто-реакцией 2.9. Распад продуктов пиролиза РМ в КС определяется уравнениями 4-6 таблицы 2.3. Реакции образования, роста и коагуляции частиц сажи представлены в таблице 2.3. Газификация сажи в зоне богатой ТВС определялась по реакциям, представленным в таблице 2.8. Равновесный состав продуктов пиролиза и окисления в зоне образования сажи определялся по реакциям, представленным в таблице 2.7.

2.4 Математическое моделирование процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ

Для моделирования процессов образования и выгорания частиц сажи в цилиндре дизеля условно разделили объем КС на три зоны:

- зона «чистого», не участвующего в сгорании воздуха;
- зона термического разложения топлива, в которой происходят процессы образования частиц сажи, их рост и коагуляция;
- зона продуктов сгорания, в которой преимущественно идут процессы окисления и газификации частиц сажи.

Геометрически зона чистого воздуха занимает периферийные объемы КС, в которых не происходят процессы пиролиза и горения. Зона термического разложения топлива и образования сажи совпадает с внутренней областью топливного факела. Зона выгорания частиц сажи находится на поверхности горячей паровой мантии факела. Каждая зона характеризуется однородным по всему объему составом и температурным полем. Аналогичная методика моделирования сажеобразования в цилиндре дизеля при работе на ДТ представлена в работах Батурина, Лоскутова, Кожина [6,48,82].

При работе дизеля на этаноле и РМ в зону термического разложения в процессе испарения топлив поступают углеводороды и газ из окружающего объема. Крупные молекулы подвергаются термическому разложению с образованием продуктов по соответствующим уравнениям реакций, представленных в предыдущем разделе. Допускаем, что по мере развития фронта пламени, часть углеводородов выгорает не проходя стадий глубокого пиролиза, тогда скорость изменения концентрации компонентов газовой смеси в реакционной зоне может быть выражена уравнением:

$$\frac{dM_i}{d\varphi} = \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{\sigma} + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{k} + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{\chi}, \quad (2.24)$$

где $dM_i/d\varphi$ – суммарная скорость изменения концентрации i -го компонента газовой смеси; $(dM_i/d\varphi)_{\sigma}$ – скорость изменения концентрации i -го компонен-

та, 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; φ – угол п.к.в. дизеля.

Предполагаем, что сажистые частицы 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.

$$\left(\frac{dN}{d\varphi}\right)_\Sigma = \left(\frac{dN}{d\varphi}\right)_O - \left(\frac{dN}{d\varphi}\right)_B, \quad (2.25)$$

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

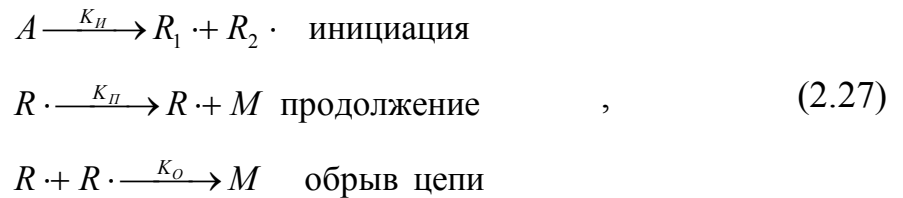
Скорости химических превращений реагентов газовой смеси определяется по уравнению:

$$\left(\frac{dM_i}{d\varphi}\right)_k = \frac{V_p}{6n} \cdot \sum_j W_j, \quad (2.26)$$

где V_p – объем реакционной зоны; W_j – скорость j -той химической реакции кинетического механизма, n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин^{-1} .

Скорость химической реакции определяются методами решения прямой задачи химической кинетики с использованием данных, приведенных в предыдущем разделе. Скорости брутто-реакций пиролиза РМ определяем исходя из предположения о двухстадийности процесса термического разложения молекулы жирной кислоты РМ. Декарбоксилирование является начальной стадией термического распада молекул жирных кислот РМ и происходит при более низких температурах, поэтому скорость брутто-реакции распада молекулы РМ в зоне высокотемпературного пиролиза лимитируется скоростью разло-

жения образовавшегося олефина. При этом расчет в математической модели производился с учетом продуктов разложения в первой стадии термического распада. Радикальный механизм процесса разложения олефина описывается уравнениями инициирования роста и обрыва цепи [11, 105, 125, 158, 160]:



где A – исходный олефин; $R_1 \cdot$, $R_2 \cdot$ – алкильный и алильный радикалы, $H \cdot$, $CH_3 \cdot$; M – продукт разложения; K_I , K_P , K_O – константы скоростей инициирования роста и обрыва цепи.

Используя предположение о квазистационарности концентрации радикалов для константы скорости разложения, из уравнений 2.24 можно получить выражение для определения константы скорости брутто-реакции распада молекулы карбоновой кислоты РМ [6]:

$$K_1 = 2 \frac{K_{OI} K_{OP}}{K_{OO}^{0,5}} \exp\left(-\frac{E_I + E_P - 0,5E_O}{RT}\right), \quad (2.28)$$

где E_I , E_P и E_O – энергии активации процессов инициирования, развития и обрыва цепи соответственно; K_{OI} , K_{OP} и K_{OO} – предэкспоненциальные множители цепного процесса разложения; R – универсальная газовая постоянная; T – температура в зоне пиролиза.

Объем реакционной зоны определяется из расчета суммарного числа молей газа в реакционной зоне:

$$V_P = 8,31 \cdot \sum R_i \cdot T_1 \frac{1}{P}, \quad (2.29)$$

где R_i – количество молей i -го компонента газа в расчете на кг основного топлива, моль; T_1 – температура газов в зоне реакции, К; P – индикаторное давление в цилиндре, МПа.

Учитывая, что процесс образования сажи происходит в предпламенной зоне, температура которой изменяется от индикаторной температуры газов T_{Γ} до среднемассовой температуры сажистых частиц T_m , за определяющую температуру процесса принимается среднеарифметическая:

$$T_{OBR} = \frac{T_{\Gamma} + T_m}{2}. \quad (2.30)$$

Под среднемассовой температурой T_m понимается среднеинтегральная температура частиц, распределенных в объеме, усредняющая действительную температуру частиц в зависимости от их местонахождения от T_{min} в пристеночной зоне до T_{max} в пламенной зоне. За определяющую температуру процесса выгорания принимаем среднемассовую температуру $T_{ВЫГ} = T_m$.

По данным исследований [6] температура частиц сажи в пламени находится в интервале 2600 - 2800 К, что значительно превышает индикаторную температуру газов. Очевидно, что такие высокие температуры частиц нельзя распространять на весь излучающий объем. Для определения среднемассовой температуры необходима информация о распределении температуры частиц в объеме КС. Поскольку выгорание частиц сажи происходит преимущественно в зоне продуктов сгорания, то характер изменения среднемассовой температуры в цикле соответствует изменению температуры пламени T_{II} . Тогда упрощенно T_m можно определить:

$$T_{ВЫГ} = T_m = T_{II} - \Delta T, \quad (2.31)$$

где T_{II} - температура пламени.

Величина ΔT на основании экспериментальных данных составляет 300-400 К. Отношение температуры пламени к температуре газов в общем виде можно определить функцией [80]:

$$\frac{T_{II}}{T_{I}} = 1,2\alpha^{0,3} + 2\left(\frac{P_i}{P_{iM}}\right)^{0,5} \left(\frac{C_m}{C_{mн}}\right)^{0,5} \exp - \left\{ \frac{2,4 \left[\varphi_i - 5,5\varphi_{2\max} \left(\frac{q_{ц}}{q_{цн}} \right)^{0,333} \right]^2}{5,5\varphi_{2\max} \left(\frac{q_{ц}}{q_{цн}} \right)^{0,333}} \right\}, \quad (2.32)$$

где α – средний КИВ в объеме КС; φ_i - текущий угол п.к.в., отсчитываемый от начала видимого горения; $\varphi_{2\max}$ - угол второго максимума тепловыделения; $P_i, q_{ц}, C_m$ - соответственно среднее индикаторное давление, цикловая подача топлива, средняя скорость движения поршня; $P_{iM}, q_{цM}$ - соответственно среднее индикаторное давление и цикловая подача топлива на режиме максимального крутящего момента; $C_{mн}$ - средняя скорость движения поршня на номинальном режиме работы двигателя.

Оценку температуры пламени можно произвести по балансу энтальпий газов в зоне продуктов сгорания. Для этого в программном комплексе написана отдельная программа для расчета состава газа в зоне выгорания, объема зоны сгорания. Состав газов в зоне горения характеризует локальный КИВ $\alpha_{г}$, который определяется по выражению [115]:

$$\alpha_{г} = \frac{\alpha \cdot \xi_B}{\chi}, \quad (2.33)$$

где ξ_B – степень эффективного использования воздушного заряда, χ - интегральная функция тепловыделения.

Функция $\xi_B(\varphi)$ в соответствии с работой [115] удовлетворительно аппроксимируется зависимостью:

$$\xi_B = 1 - C_B h \cdot \overline{\varphi_Z} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-h^2 \overline{\varphi_Z}^2), \quad (2.34)$$

где C_B и h – коэффициенты пропорциональности; $\overline{\varphi_Z}$ - отношение текущего угла п.к.в. к действительной продолжительности сгорания.

Коэффициенты пропорциональности определяются по формулам:

$$h = \frac{0,707}{\varphi_{Z \min}}, \quad (2.35)$$

$$C_B = \frac{1 - \xi_{B \min}}{0,485}, \quad (2.36)$$

где $\varphi_{Z \min}$ и $\xi_{B \min}$ - координаты минимума функции $\xi_B(\varphi)$.

Локальный КИВ в зоне образования сажи определяется с учетом геометрических характеристик топливного факела [48]:

$$\alpha_\phi = \frac{\rho_\phi \cdot W_\phi \cdot i_c}{L_0 \cdot \sigma_u}, \quad (2.37)$$

где ρ_ϕ – плотность воздуха; W_ϕ – объем факела, м³; L_0 - количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг; i_c – количество сопловых отверстий; σ_u – количество испарившегося топлива, кг.

Количество топлива, подведенного в реакционную зону в испаренном состоянии, вычислялось по математической модели, подробно описанной в работе [91]. Для этого топливный факел представлялся как множество капель со средним диаметром по Заутеру. Расчет характеристик впрыска и распыла топлив в КС дизеля производился по методике, представленной в работах В.А. Лиханова, А.Н. Чувашева, А.С. Полевщикова [68, 69]. Испарение каждой капли топлива подчиняется закону Срезневского [115]:

$$d_k^2 = d_0^2 - K \cdot \tau_u, \quad (2.38)$$

где d_0, d_k - соответственно начальный и текущий диаметр капли; K - константа испарения; τ_u - время от начала испарения данной капли (момента поступления ее в рассматриваемую зону) до текущего момента.

Функция испарения капли массой m от угла п.к.в. на основании закона Срезневского примет вид:

$$m = \frac{\rho \cdot \pi}{6} \left(d_0^2 - K \cdot \frac{\varphi_i}{6n} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.39)$$

где m – масса капли; φ_i – текущий угол п.к.в. от момента попадания капли в КС.

Если закон топливоподачи задан массивом, тогда количество топлива в цилиндре удобно определять по уравнению суммы неиспарившихся частей, поступивших в разный момент времени по закону топливоподачи. Отсюда можно определить количество испарившегося топлива в КС к моменту φ :

$$\sigma_u = \sum_{i=1}^j \frac{d\sigma_i}{d_0^3} \left(d_0^2 - K \cdot \frac{\varphi - \varphi_i}{6n} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.40)$$

где σ_u – доля испарившегося топлива; j – количество шагов расчета; i – шаг расчета.

Расчет осредненного КИВ в топливном факеле проводился с учетом исследований, представленных в работах А. С. Лышевского, И. В. Астахова, А. С. Хачияна, В. А. Кутового, Ю. Б. Свиридова, В. И. Балакина, Б. Н. Семенова и др., по методике, подробно описанной в [48].

Начальное содержание реагирующих веществ принимается пропорционально их объемной концентрации в исходной смеси r_{in} и количеству топлива $\sigma(\varphi_n)$, поданного в цилиндр к моменту $\varphi = \varphi_n$. Величина $\sigma(\varphi_n)$ определяется законом топливоподачи и скоростью испарения топлив, а значения начальных концентраций РМ, этанола соответственно равны:

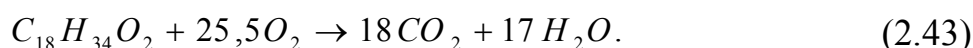
$$r_{1H} = \frac{\sigma_{uPMn}}{V_p}; \quad (2.41)$$

$$r_{2H} = \frac{\sigma_{uЭн} \cdot \nu}{V_p}, \quad (2.42)$$

где r_{1H} r_{2H} – начальная концентрация РМ и этанола в реакционной зоне, $\sigma_{uЭн}$ и σ_{uPMn} – доли испарившегося РМ и этанола к моменту начала расчета; ν –

соотношение количества молей этанола, поданного в цилиндр дизеля, к одному молю запального РМ.

Суммарное количество молей газа M_{Σ} изменяется в процессе массоподвода, химических преобразований и отвода компонентов газа в зону сгорания. Принимаем, что исходная смесь состоит из 4 компонентов: пары этанола и РМ, кислород O_2 и азот N_2 . В этой модели N_2 играет роль инертного газа, не участвует в процессе сгорания. Как уже говорилось выше, наличие кислорода в реакционной зоне оказывает существенное влияние на концентрацию молекул роста частиц сажи. В соответствии с принятой формулой аппроксимированной молекулы РМ уравнение реакции полного выгорания запального топлива примет вид:



Количество молей кислорода для сгорания одного моля топлива для этанола и РМ на основании уравнений (2.43) и (2.12) определится:

$$M_{0Э} = \frac{3}{0,21} = 14,28; \quad (2.44)$$

$$M_{0РМ} = \frac{25,5}{0,21} = 121,42. \quad (2.45)$$

Принимая, что скорость подвода воздуха в реакционную зону пропорциональна скорости испарения топлива, концентрация компонентов смеси в реакционной зоне изменялась с учетом постепенного подвода окислителя и инертного N_2 по закону испарения топлив. Начальное содержание компонентов в реакционной зоне определялось в соответствии с долей топлива, испарившегося к моменту начала сгорания, который устанавливался по функции тепловыделения.

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.:

$$\left(\frac{dM_i}{d\varphi}\right)_\chi = M_i \frac{d\chi/d\varphi}{\sigma_u - \chi}, \quad (2.46)$$

где σ_u – интегральный закон испарения топлива в КС.

В реакционную зону поступают молекулы углеводородов топлива пропорционально скорости испарения, которые распадаются на более мелкие молекулы и радикалы. Заключительным этапом цепочки реакций пиролиза углеводородов является взрывное разложение ацетилена с образованием химических зародышей сажи. Следовательно, скорость образования зародышей сажи пропорциональна скорости разложения ацетилена, которая определяется по представленным уравнениям химической кинетики. Состав продуктов в реакционной зоне зависит от скорости испарения топлива и локального КИВ.

Обозначим количество частиц сажи в реакционной зоне N_1 в зоне выгорания N_2 . 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 $C_2 z_q$ в частице диаметром D_C :

$$D_C = 0,342 \cdot \sqrt[3]{N_A \cdot z_q}, \quad (2.47)$$

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

Для того, чтобы установить средний диаметр частицы сажи, нужно общее количество молей $C_2 z_1$ поделить на количество частиц в реакционной зоне N_1 . Тогда скорость изменения среднего диаметра частицы сажи в зоне образования с учетом уравнения 2.47 определится по выражению:

$$\frac{dD_1}{d\varphi} = 0,342 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{z_1}{N_1}\right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \frac{\left[\frac{dz_1}{d\varphi} \cdot N_1 - \frac{dN_1}{d\varphi} z_1\right]}{N_1^2}, \quad (2.48)$$

где D_1 – среднемассовый диаметр частиц в зоне образования сажи, нм;

В зоне образования сажи происходит частичная газификация атомов углерода по гетерогенным реакциям окисления. Массовая скорость выгорания частиц сажи пропорциональна произведению потока углерода на суммарную поверхность частиц, находящихся в единице объема. Следовательно, скорость газификации углерода зависит от диаметра частицы. Согласно представленной выше теории газификации сажи окислителями в этих реакциях главным образом выступают диоксид углерода, вода и кислород. Поток углерода по этим реакциям суммируется. Аналогично скорость гетерогенного роста частиц сажи пропорциональна поверхности частиц, следовательно, зависит от диаметра.

В зону выгорания частицы поступают, проходя через фронт пламени без газификации. В зоне выгорания частицы сажи продолжают взаимодействовать с окислителем, смешиваясь с продуктами сгорания. Изменение диаметра частиц в зоне выгорания определяется совокупностью трех процессов: выгорания, массоподвода из зоны образования и процессом коагуляции.

Количество частиц сажи в зоне выгорания с учетом броуновской коагуляции можно определить по уравнению [48]:

$$\frac{dN_2}{d\varphi} = \frac{d\chi/d\varphi}{\sigma_u - \chi} \cdot N_1 - P_0 \cdot 3,51 \cdot 10^{14} \cdot \sqrt{T_2/1800} \cdot \sqrt{D_2} \cdot \frac{N_2^2}{6 \cdot n \cdot V_2}, \quad (2.49)$$

где P_0 – стерический фактор; T_2 – температура в зоне выгорания.

Первое слагаемое в уравнении 2.49 учитывает подвод частиц сажи из зоны образования. В первом приближении за V_2 можно принять текущий объем цилиндра. В более точной трактовке V_2 это объем КС, охваченный пламенем. 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:

$$\frac{dN_1}{d\varphi} = d\sigma_u \cdot N_H + \frac{dN_O}{d\varphi} - N_1 \cdot \frac{d\chi/d\varphi}{\sigma_u - \chi}, \quad (2.50)$$

где $dN_O/d\varphi$ – скорость образования зародышей частиц сажи, которая определяется по кинетическим уравнениям

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

$$\frac{dz_1}{d\varphi} = d\sigma_u \cdot z_{HO} + \frac{dz_K}{d\varphi} - z_1 \cdot \frac{d\chi/d\varphi}{\sigma_u - \chi}, \quad (2.51)$$

$$\frac{dz_2}{d\varphi} = -\frac{dz_{CF}}{d\varphi} + z_1 \cdot \frac{d\chi/d\varphi}{\sigma_u - \chi}, \quad (2.52)$$

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.

Количество молей C_2 , перешедших в твердую фазу, определяется по кинетическим уравнениям роста и окисления частиц сажи, представленных в таблице 2.3. В ходе реакций 30 и 31 присоединяется один моль C_2 , по реакциям 32 и 33 – 2 моль и т.д. В результате уравнение изменения молей C_2 в частицах будет иметь вид:

$$\frac{dz_K}{d\varphi} = \frac{1}{6 \cdot n \cdot V_p} \left[\begin{aligned} &K_{30} \cdot [C_2H_2] + K_{31} \cdot [C_2H] + \\ &+ 2 \cdot (K_{32} \cdot [C_4H_2] + K_{33} \cdot [C_4H]) + \\ &+ 3 \cdot (K_{34} \cdot [C_6H_2] + K_{35} \cdot [C_6H]) + \\ &+ 4 \cdot (K_{36} \cdot [C_8H_2] + K_{37} \cdot [C_8H]) + \\ &+ 5 \cdot (K_{38} \cdot [C_{10}H_2] + K_{39} \cdot [C_{10}H]) + \\ &+ 6 \cdot K_{40} \cdot [C_{12}H_2] - \\ &- 0,5 \cdot (K_{10} + K_{20} + K_{30} + K_{40}) \end{aligned} \right], \quad (2.53)$$

где K_i – константа скорости i -ой реакции; K_{iO} – константы реакций газификации сажи по таблице 2.8; $[C_xH_y]$ – концентрация компонента в реакционной зоне моль/см³.

Скорость газификации твердого углерода в зоне выгорания сажи определяется по уравнению:

$$\frac{dz_{cr}}{d\varphi} = -\frac{z_2 \cdot F_y \cdot J_c}{4 \cdot 6 \cdot n}, \quad (2.54)$$

где J_c – суммарный поток углерода, г/(м² с); F_y – удельная поверхность частиц сажи, г/м².

Величина J_c рассчитывается по выражениям для всех реакций газификации частиц сажи свободным оставшимся от сгорания топлива кислородом воздуха, углекислым газом и парами воды. Состав продуктов сгорания и величина потока углерода рассчитываются по отдельным подпрограммам. Удельную поверхность частицы сажи можно определить через плотность и средний диаметр частиц по выражению:

$$F_y = -\frac{6 \cdot 10^3}{\rho \cdot D_2} \quad (2.55)$$

Начальное количество молей C_2 определяется пропорционально доле воздуха в реакционной зоне и вычисляется по выражению:

$$z_{HO} = \frac{z_H \cdot \alpha_{\Gamma}}{\alpha}. \quad (2.56)$$

Текущую массу сажи в цилиндре можно определить, умножив количество молей C_2 в каждой зоне на молярную массу растущей сажи:

$$N = 24 \cdot (z_1 + z_2). \quad (2.57)$$

Количество частиц сажи в цилиндре также вычислялось алгебраическим сложением частиц, находящихся в каждой зоне. Массовая концентрация сажи в цилиндре определялась как отношение массы сажи к текущему объему цилиндра. Начальное содержание сажи в цилиндре принимается пропорциональ-

но объему остаточных газов и концентрации сажи, замеренной на выпуске.

Цикл вычислений уровня дымности ОГ включал несколько этапов:

1 – Определялось давление в цилиндре цифровой обработкой сигнала датчика давления путем наложения индикаторных диаграмм;

2 – По методике ЦНИДИ определялась интегральная и дифференциальная характеристика тепловыделения и осредненная температура рабочего тела в цилиндре (методика представлена в работе [147]);

3 – Определялись показатели топливоподачи и скорости испарения топлива, локальные КИВ в цилиндре с учетом нестационарных температурных условий (основные уравнения 2.37-2.40).

4 – По методике Разлейцева [115] определялся состав газов в зоне выгорания (основные уравнения по определению локального КИВ 2.33-2.36);

5 – Определялись температуры в зоне образования и выгорания сажи;

6 – Задавались начальные условия системы дифференциальных уравнений определения состава ТВС в зоне пиролиза топлив (уравнения 2.41, 2.42 и др.);

7 – Производилось численное решение системы дифференциальных уравнений методом Гира (2.24, 2.26, 2.48, 2.50, 2.51, 2.53), рассчитывались концентрации продуктов разложения и окисления РМ и этанола, количество частиц сажи, масса дисперсного углерода, скорости перехода частиц в зону выгорания. (Алгоритм вычислений представлен в приложении Б.);

8 – Производилось численное решение системы дифференциальных уравнений для зоны выгорания частиц сажи (по уравнениям 2.49, 2.52, 2.54);

9 – Складывались показатели сажесодержания в цилиндре в различных зонах, определялась текущая масса и концентрация сажи. Значение массового содержания сажи в момент открытия выпускного клапана принималось за результирующее содержание сажи в ОГ дизеля, т.е. не учитывалась газификация сажи на участке выпускной коллектор - пробоотборник.

При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

1. Сажистые частицы проходят через реакционную зону пламени без газификации и окисляются в зоне продуктов сгорания.

2. Полидисперсная система частиц сажи в цилиндре дизеля была представлена монодисперсной с эквивалентным среднемассовым диаметром сферических частиц $d_v = 30$ нм [103].

3. Плотность частиц ρ принималась постоянной вне зависимости от режима работы дизеля и составляла $\rho = 1,9$ г/см³ [80]. Принято допущение, что содержание минеральных веществ и сложных углеводов в частице сажи и на её поверхности пренебрежимо мало.

4. Скорость выгорания этанола и РМ пропорциональна скорости тепловыделения. Количество несгоревшего топлива определялось по функции тепловыделения и было равным для этанола и РМ. Фазы сгорания этанола и РМ протекали одновременно, длительность сгорания топлив принималась равной и определялась по характеристике тепловыделения.

2.5 Результаты математического моделирования сажевыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0

Отладка работы математической модели производилась по экспериментальным данным дымности ОГ дизеля при работе на ДТ при различных нагрузочных и скоростных режимах работы. В данном разделе представлены результаты вычисления по программе, оформленной в среде Matlab, при работе дизеля на номинальном режиме работы на традиционном топливе и на этаноле и РМ. Исходными данными для расчета являлись индикаторное давление в цилиндре, осредненная температура газов, скорость тепловыделения (рисунок 2.9), скорость испарения топлив (рисунок 2.10).

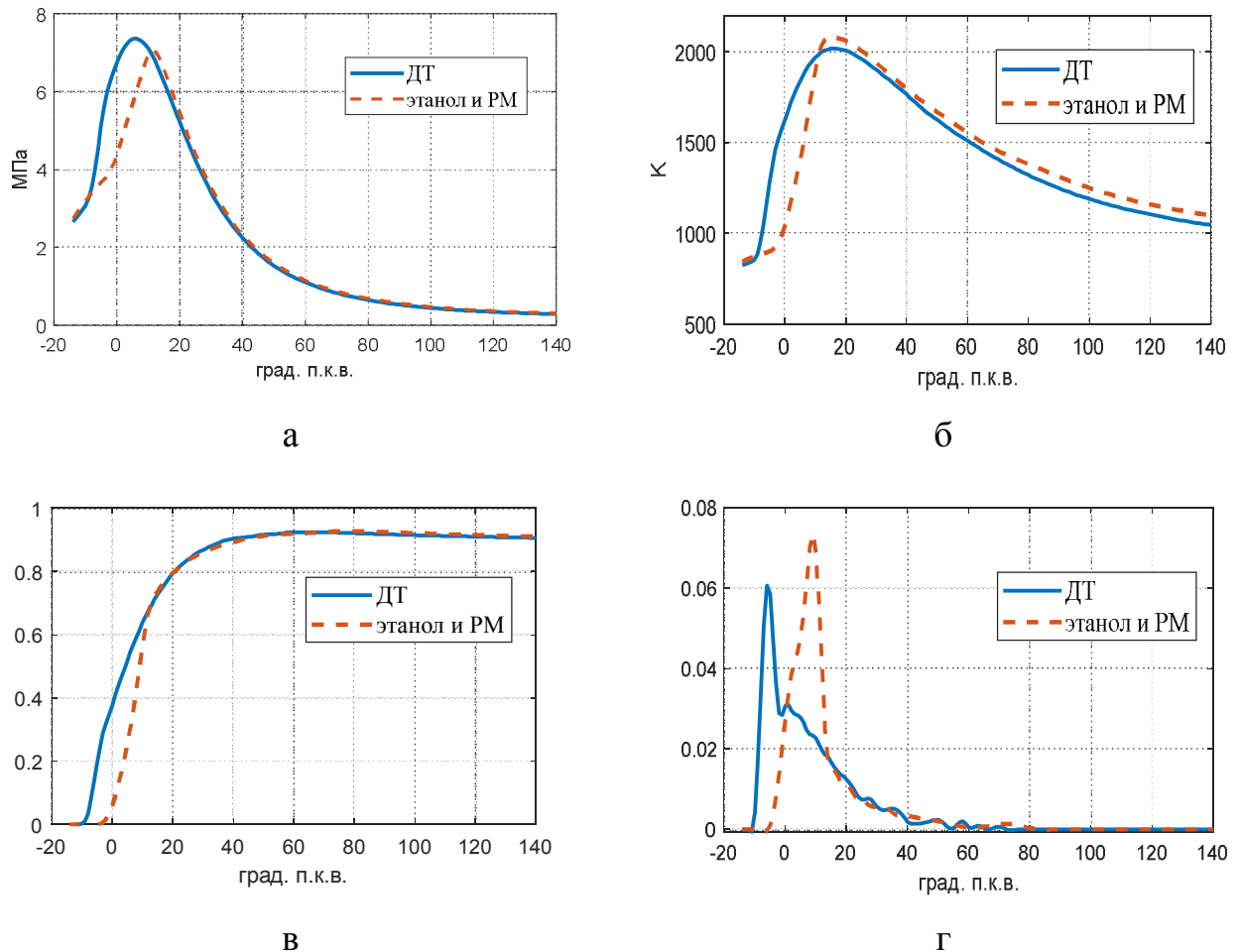


Рисунок 2.9 – Показатели процесса сгорания топлив в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на ДТ и этаноле и РМ на номинальном режиме работы: а – индикаторное давление; б – осредненная температура газов в цилиндре; в – активное тепловыделение; г – скорость тепловыделение.

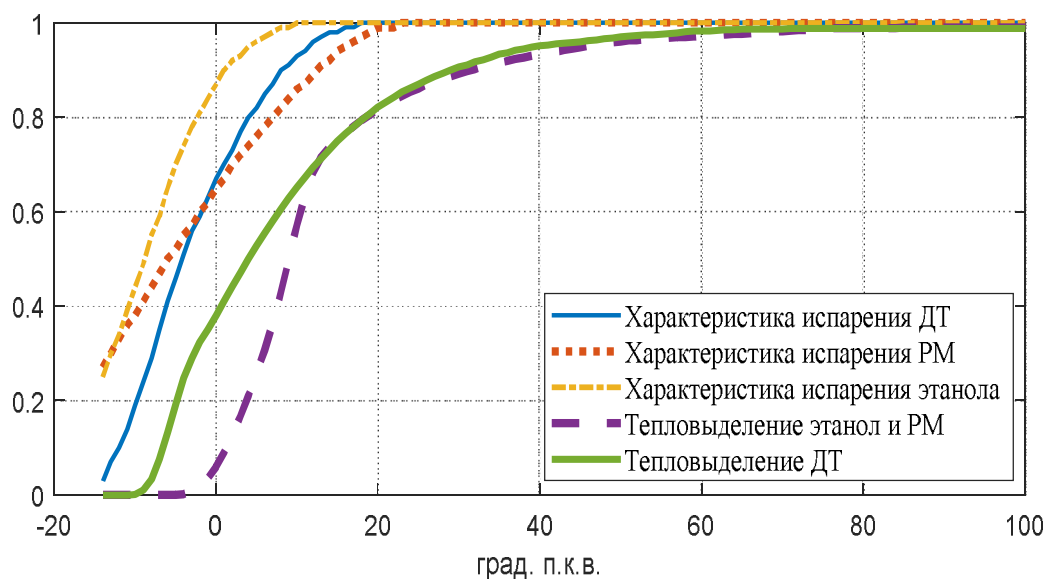


Рисунок 2.10 – Расчетные характеристики испарения топлив и тепловыделения в КС дизеля

Оптимальные установочные углы опережения впрыска топлив определялись экспериментально (представлено в главе 4) и составляли для РМ и этанола $\theta_{PM} = \theta_{Э} = 34^{\circ}$ п.к.в. до ВМТ. Цикловые подачи топлива были равны для этанола $q_{Э} = 52$ мг/цикл, для запального РМ $q_{PM} = 13$ мг/цикл [53, 91]. УУОВ дизельного топлива составлял 30 град. п.к.в. до ВМТ. Цикловая подача дизельного топлива составляла 42 мг/цикл.

ПЗВ при работе дизеля на альтернативных топливах существенно увеличивался. Это происходит по трем основным причинам: пониженное цетановое число, падение скорости испарения запального топлива в КС вследствие ухудшения процесса смесеобразования, снижение температуры газов в цилиндре при испарении спирта. Этот эффект компенсируется высокой скоростью сгорания этанола и активным подводом тепла к рабочему телу после ВМТ. Поскольку цикловая подача этанола на номинальном режиме на 20% больше цикловой подачи ДТ и начало подачи этанола смещено на 4 градуса п.к.в. от ВМТ, то увеличивается объем факела этанола к моменту начала сгорания. Теплота сгорания этилового спирта и РМ ниже, чем ДТ. Это приводит к снижению расчетной температуры газов в зоне сгорания (рисунок 2.11).

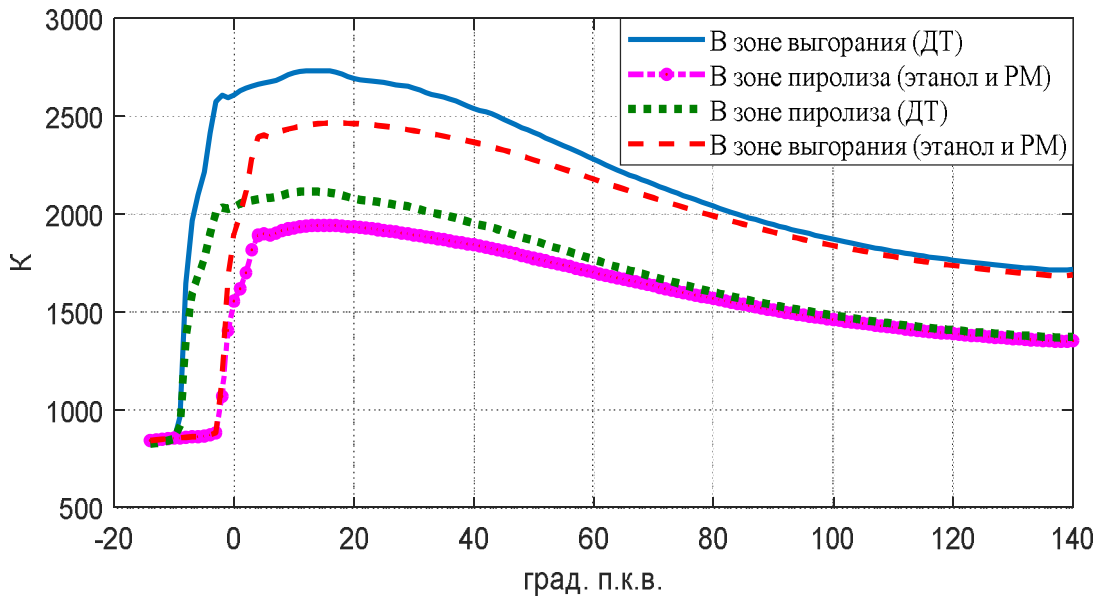


Рисунок 2.11 – Определяющие температуры процесса образования и выгорания сажи

Трансформация процесса сгорания и уменьшение соотношения С/Н топлив приводит к изменению состава газов в зоне сгорания (рисунок 2.12). Возрастает количество H_2O в ОГ дизеля, и уменьшается объем CO_2 . Благодаря меньшему стехиометрическому соотношению и наличию кислорода в молекулах топлива возрастает объемная доля кислорода в зоне сгорания, что способствует более интенсивному выгоранию частиц сажи в цилиндре. Допускаем, что наличие дополнительного топливного факела в КС и минимальное изменение её формы, связанное с размещением штифтовой форсунки, не оказывает существенного влияния на степень эффективности использования воздушного заряда, следовательно, при определении состава газов в зоне сгорания можно использовать эмпирические коэффициенты, полученные при исследовании процесса сгорания дизельного топлива в КС с объемным смесеобразованием.

Разложение топлив в КС рассчитывалось отдельно для факела РМ и этанола по кинетическим механизмам, представленным выше. Процесс пиролиза топлив инициируется в момент начала тепловыделения. До начала тепловыделения происходит постепенное увеличение концентрации паров топлива, связанное с продолжающимся испарением.

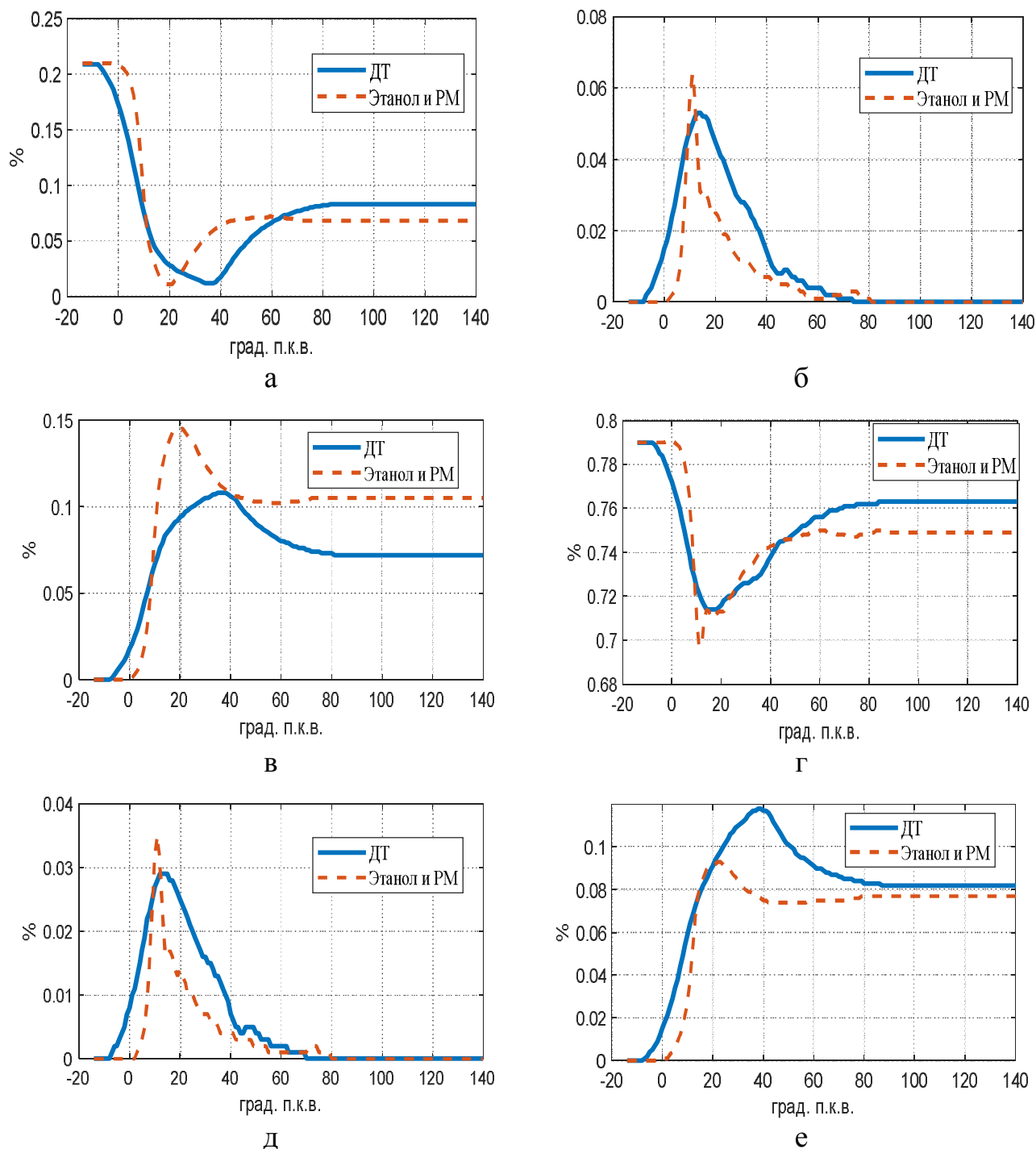


Рисунок 2.12 – Состав газов в зоне сгорания: а – O_2 ; б – CO ; в – H_2O ; г – N_2 ;
д – H_2 ; е – CO_2

С развитием кинетического сгорания и прогрева ТВС увеличивается скорость мономолекулярных реакций распада топлива, в связи с этим растет содержание продуктов пиролиза. Результаты математического моделирования пиролиза топлив и состав газов в зоне образования сажи представлен на рисунке 2.13.

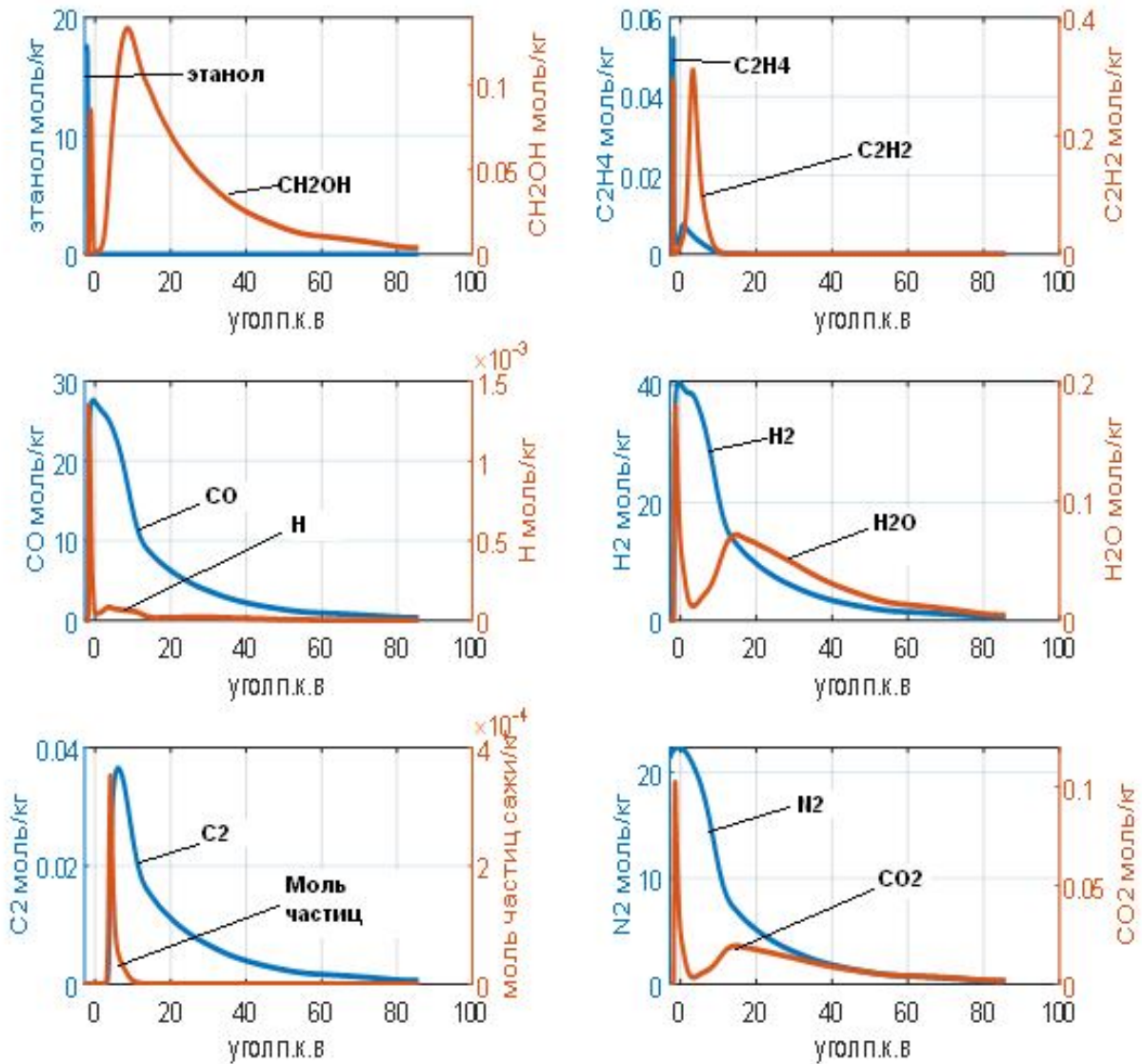


Рисунок 2.13 – Состав газов в зоне образования сажи в факеле этанола

Одновременно с термическим разложением и окислением углеводородов происходит отвод продуктов сгорания из реакционной зоны пропорционально скорости тепловыделения. Несмотря на то, что процесс испарения продолжается, испаренное топливо быстро подвергается термическому разложению и выгоранию, в связи с этим концентрация топлива в реакционной зоне быстро уменьшается, начиная с ВМТ.

Два пика содержания продуктов пиролиза связано с первичным разложением накопленного в индукционный период этанола, второй пик образуется за счет снижения скорости отвода продуктов сгорания в связи с падением скорости тепловыделения.

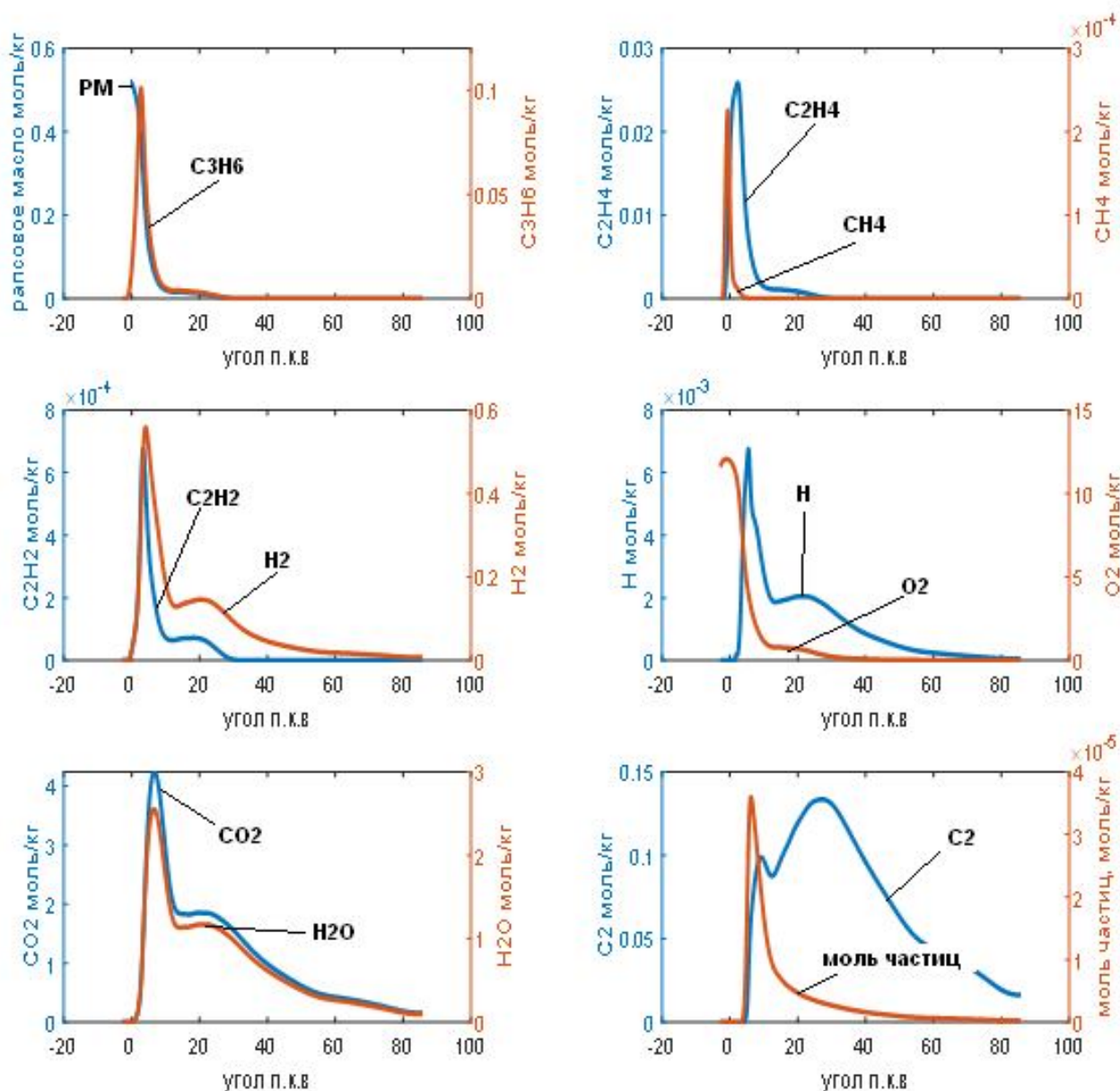


Рисунок 2.14 – Состав газов в зоне образования сажи в факеле РМ

Пиковое значение моль C_2 приведенного к одному килограмму топлива в факеле РМ достигает 0,135 моль, что в три раза выше, чем в факеле этанола. При этом моль частиц в факеле этанола на порядок выше. При сгорании этанола образуется большое количество зародышей частиц сажи (наименьшие среди них $C_{12}H_2$), однако скорость их коагуляции в зоне образования существенно ниже. Следует отметить также, что активный рост массы сажи происходит с задержкой на 4-6 град. п.к.в. после начала термического разложения топлива в момент начала активного тепловыделения и появления и роста первых частиц сажи в зоне образования.

После инициации тепловыделения начинается отвод частиц сажи из зоны образования и их смешивание с частицами, находящимися в зоне выгорания. Масса поступивших частиц распределяется на все частицы. До начала сгорания частицы сажи в зонах не претерпевали изменения диаметра. С появлением большого количества зародышей средний диаметр частиц сажи стремительно падает (рисунок 2.15). Максимальное количество частиц при работе дизеля на альтернативных топливах в 2,5 раза выше, чем при работе на ДТ. Это вызвано ростом ПЗВ и накопления большого количества углеводородов в реакционной зоне, а также низкой скоростью коагуляции частиц в реакционной зоне разложения этанола, что уже отмечалось выше. Перемещение экстремумов функций количества частиц и среднемассового диаметра на поздние углы п.к.в. вызвано смещением процесса сгорания.

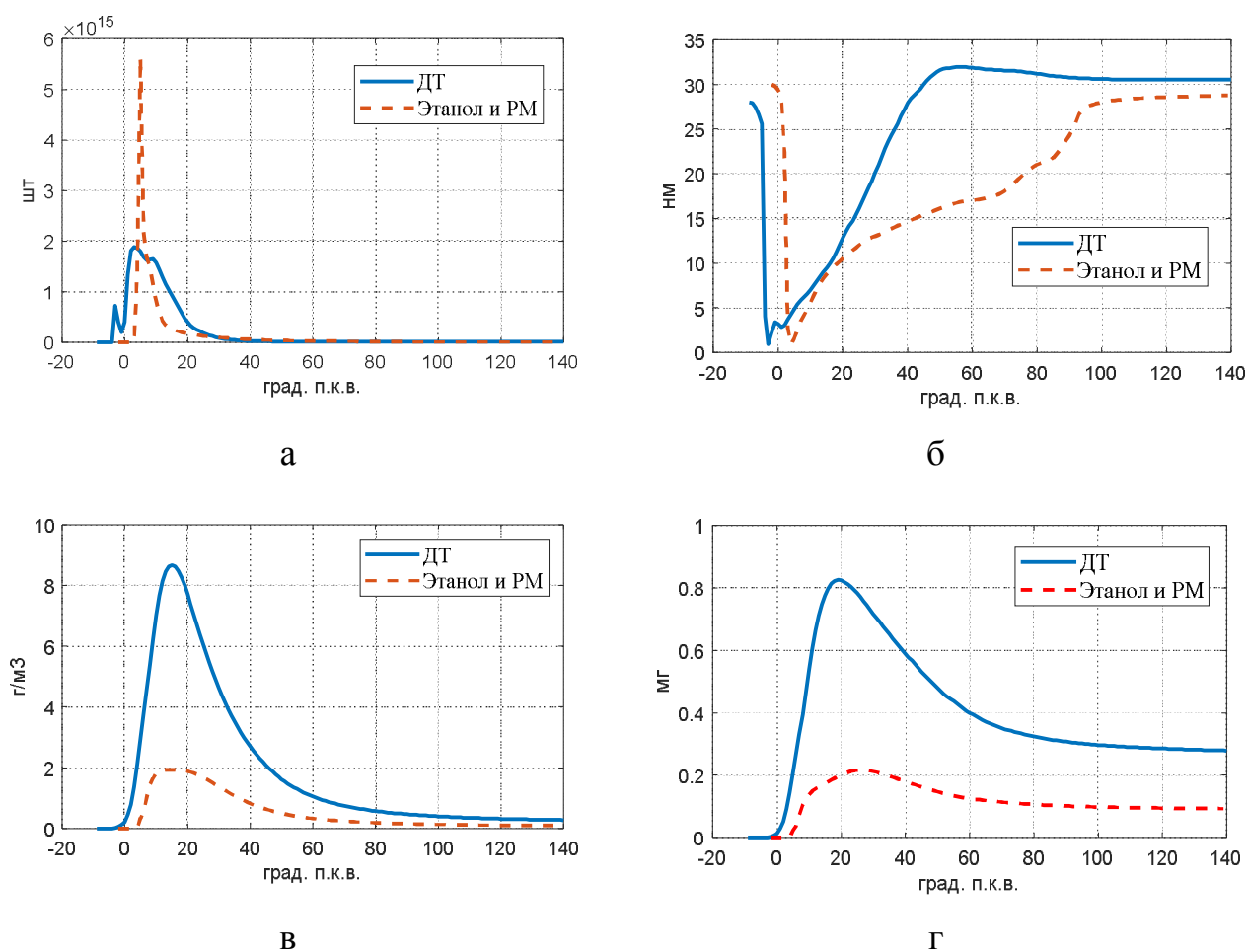


Рисунок 2.15 – Расчетные показатели сажесодержания в цилиндре дизеля при работе: а – количество частиц сажи, шт.; б – текущий среднемассовый диаметр частиц сажи в цилиндре, нм; в – массовая концентрация сажи в цилиндре, г/м³; г – массовое содержание сажи в цилиндре, мг

К моменту открытия выпускного клапана при $\varphi = 140^0$ п.к.в. массовое содержание сажи в цилиндре дизеля стабилизируется, а скорость газификации сажи постепенно снижается до минимальных значений.

По результатам расчета процесса сажеобразования мы видим, что концентрация сажи в цилиндре снижается на всех углах п.к.в. (рисунок 2.8). При работе дизеля на этаноле и РМ на номинальном режиме максимальная расчетная концентрация сажи в цилиндре составляет $1,93 \text{ г/м}^3$ при $\varphi = 15,6^0$ п.к.в. При $\varphi = 140^0$ п.к.в. концентрация сажи в цилиндре падает до $0,091 \text{ г/м}^3$. Массовое содержание сажи достигает максимального значения при $26,1$ град п.к.в. и составляет $0,216$ мг. В момент открытия выпускного клапана масса сажи падает до $0,092$ мг. При работе на ДТ расчетное максимальное содержание сажи составляет $0,825$ мг при $\varphi = 19,2^0$ п.к.в. Масса сажи при открытии выпускного клапана составляет $0,279$ мг, что в три раза больше, чем при работе на альтернативных топливах.

Расчетное количество частиц при открытии выпускного клапана при работе на ДТ составляет $9,84\text{e}+12$ шт. При работе на РМ и этаноле их количество в 2,5 раза меньше, составляет $3,9\text{e}+12$ шт.

Влияние режимов работы дизеля на расчетные показатели процесса сажеобразования подробнее рассмотрены в 4 главе.

Предложенная математическая модель позволяет рассчитать концентрацию сажи и основных компонентов газовой смеси в реакционной зоне КС и содержание сажи в ОГ при различных скоростных и нагрузочных режимах работы дизеля, получить ценную информацию о динамике протекания основных этапов образования и выгорания сажи в цилиндре при работе дизеля на этаноле и РМ. Результаты численного моделирования образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля при работе на ДТ и этаноле и РМ на номинальном режиме работы представлены в приложении В.

3 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ 2Ч 10,5/12,0 ПРИ РАБОТЕ НА ЭТАНОЛЕ И РМ

3.1 Объект и методика исследований

Для выполнения цели и задач исследования в качестве объекта испытаний был выбран двухцилиндровый дизель воздушного охлаждения 2Ч 10,5/12,0 производства Владимирского тракторного завода (ВТЗ). Это дизель без наддува, с неразделенной полусферической КС в поршне и непосредственным впрыском топлива [37].

Исследуемый дизель был модернизирован для работы на этаноле и РМ. Для этого на дизель установили дополнительную топливную систему для подачи запального РМ, включающую в себя дополнительный топливный насос высокого давления (ТНВД) и по одной форсунке с трубопроводами высокого давления на каждый цилиндр (рисунок 3.1). Рабочий чертеж головки для изготовления монтажных отверстий для установки дополнительной форсунки представлен в приложении Г.

Этанол подавался при помощи штатной системы топливоподачи. Для монтажа штифтовой форсунки ФШ-6—2 х 25, используемой для подачи РМ, в головках цилиндров были просверлены отверстия. Форсунка в каждой головке крепилась с помощью двух шпилек.

ТНВД 2УТН для подачи запального РМ крепился с помощью специальной проставки на посадочное место маслозаливной горловины и приводился во вращение от специально изготовленной для базового насоса шлицевой втулки с удлиненными шлицами посредством соединительной муфты с внутренним зубчатый венцом. На фланце проставки профрезерованы пазы для крепежных болтов, благодаря чему корпус насоса можно поворачивать относительно проставки, меняя при этом УУОВ РМ, поскольку кулачковый вал ТНВД остается неподвижным относительно дизеля. УУОВ этанола изменялся обычным способом. Шаг изменения УУОВ составлял 4 градуса п.к.в.

Вид системы раздельной топливоподачи этанола и РМ, смонтированной на дизеле 2Ч 10,5/12,0, представлен на рисунке 3.2.

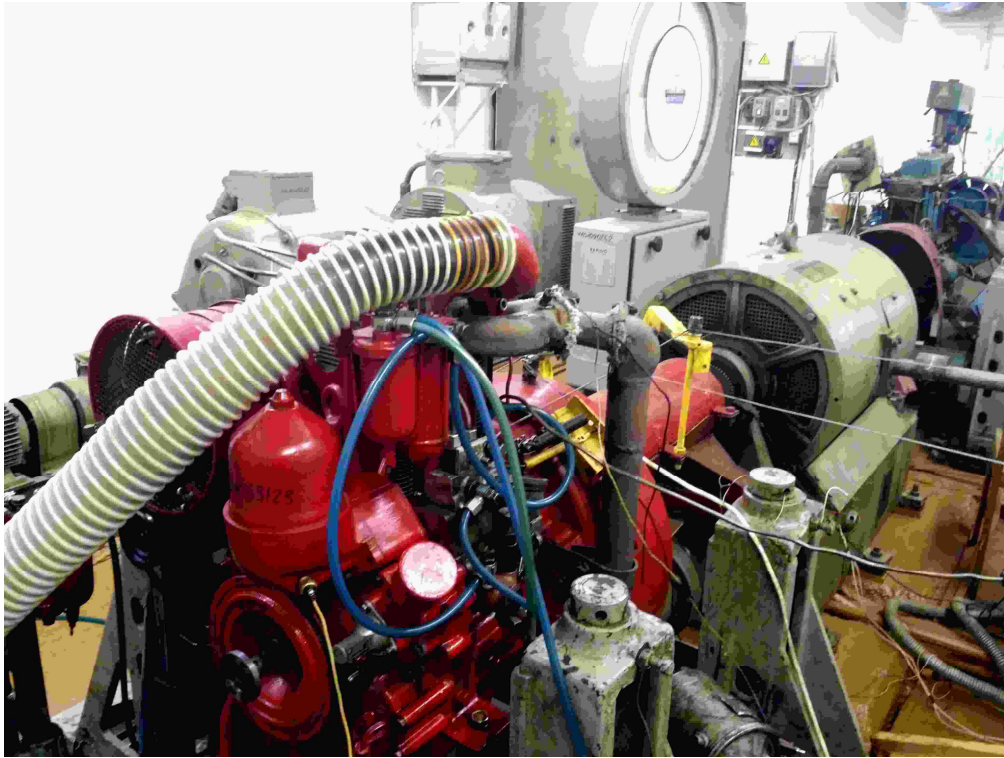


Рисунок 3.1 – Общий вид дизеля 2Ч 10,5/12,0, установленного на электротормозном стенде SAK - N 670

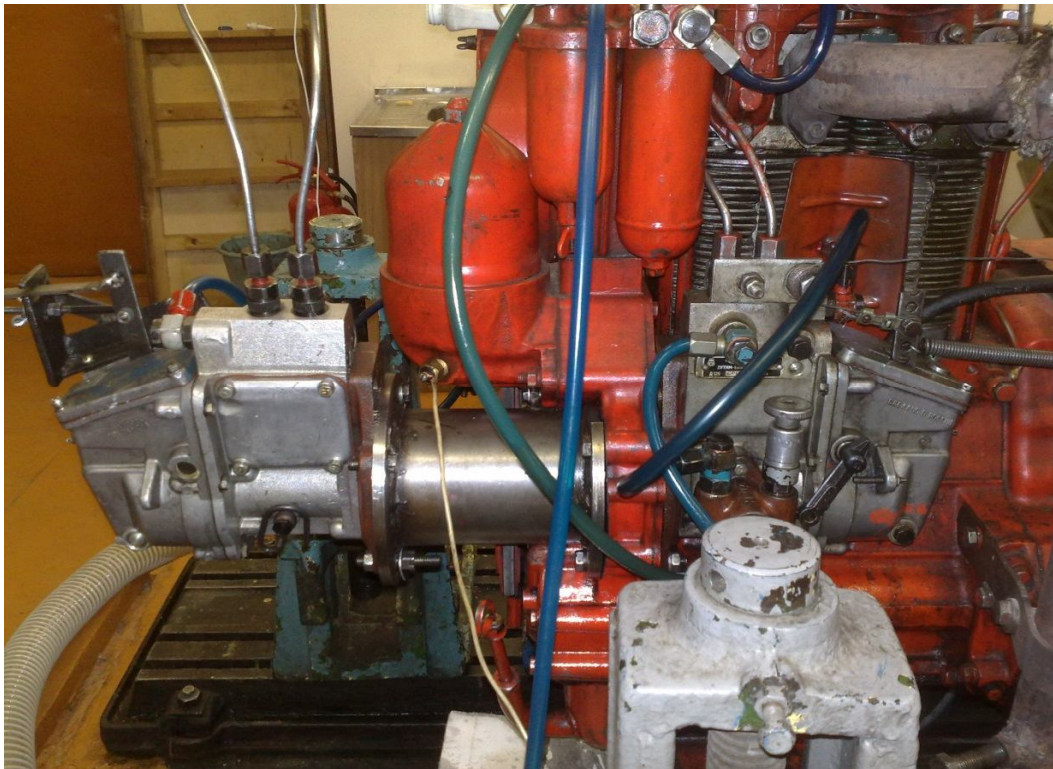


Рисунок 3.2 – Вид системы раздельной топливоподачи этанола и РМ, смонтированной на дизеле

При проведении стендовых испытаний использовалось ДТ марки Л-05 по ГОСТ 305-82 и ГОСТ 305-2013, моторное масло М-10Г₂ по ГОСТ 8581-78, спирт этиловый по ГОСТ Р 55878-2013, РМ по ГОСТ 31759-2012 [23, 24, 25, 28]. Учитывая специфику работы дизелей, основными режимами исследований являются номинальные скоростные режимы и режимы максимальных крутящих моментов. Разработка модификаций дизелей для работы на этаноле и РМ предусматривает в первую очередь сохранение мощностных и экономических показателей, присущих серийному дизелю.

Исследование работы дизеля на этаноле и РМ проводилось в несколько этапов. В основе исследований лежал сравнительный метод [95]. Приведенные к нормальным условиям показатели работы дизеля на альтернативных топливах сопоставлялись с показателями работы на ДТ на соответствующих установившихся режимах. Необходимым условием при испытаниях было сохранение одинаковых значений среднего эффективного давления p_e для каждого исследуемого режима работы.

Общая структурная схема исследований представлена на рисунке 3.3.

На первом этапе предусматривалось проведение регулировочных характеристик, получение эффективных показателей, определение параметров рабочего процесса путем индицирования, измерения токсичности и дымности ОГ на различных нагрузочных и скоростных режимах при работе на ДТ.

На втором этапе производилось исследование работы дизеля на РМ и этаноле с использованием отдельной топливоподачи. В соответствии с принятой методикой первоочередной задачей было определение оптимальных регулировочных параметров. Определялись оптимальная запальная порция РМ, подававшаяся через штифтовую форсунку и оптимальные УУОВ этанола и РМ. Критериями оптимизации при определении УУОВ были выбраны суммарный эквивалентный расход топлива, эффективный КПД и «жесткость» процесса сгорания. Определение оптимальных значений УУОВ запального топлива Θ_{PM} и этанола $\Theta_{Э}$ производились по соответствующим регулировочным характери -



Рисунок 3.3 - Структурная схема проведения исследований

стикам, представленным в четвертой главе. На каждом УУОВ РМ и этанола снимались нагрузочные характеристики на номинальной частоте вращения и частоте вращения максимального крутящего момента. После анализа регулировочных характеристик определялось лучшее сочетание установочных углов. На оптимальных УУОВ РМ и этанола снимались нагрузочные и скоростные характеристики работы дизеля. Одновременно со снятием всех характеристик проводилось индицирование и отбор проб для определения дымности и содержания вредных компонентов в ОГ. Перед началом испытаний двигатель прогревался до температуры масла в поддоне картера двигателя 85-95 °С. После прогрева двигатель выводился на номинальный режим работы и определялись его эффективные показатели. Данный режим является контрольным. Отклонение эффективных показателей дизеля более чем на 2 % свидетельствуют о нарушении работы какой-либо из систем двигателя, которое необходимо незамедлительно устранить.

После окончания испытаний дизель вновь выводился на контрольный режим и производилась проверка показателей. Для выравнивания температур дизель перед началом измерений работал на каждом режиме не менее 5 минут. Частота вращения коленчатого вала дизеля не отличалась от заданной более чем на 5 мин⁻¹. Объем КС при установке датчика индикатора для индицирования дизеля увеличивался за счет соединительного канала под датчиком не более чем на 2 %. Для уменьшения погрешности измерений, замеры показателей в каждом опыте повторялись не менее трех раз, а результат усреднялся. Таким же образом производился анализ ОГ и определение дымности ОГ.

При работе дизеля с отдельной топливной подачей пуск осуществлялся на РМ. Затем включалась подача этанола, а подача РМ уменьшалась до установленного оптимального значения. В дальнейшем цикловая подача РМ оставалась постоянной, а изменение нагрузочного режима производилось регулированием подачи этанола.

3.2 Приборы и оборудование для исследования рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ

Монтаж оборудования и приборов, проведение стендовых испытаний и анализ результатов проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 18509-88, ГОСТ Р 41.96-2011, ГОСТ 17.2.2.02-98 [21, 20, 27]. При испытаниях дизеля регистрировали показатели: частоту вращения коленчатого вала; крутящий момент; объемный расход воздуха; расход топлива; температуру масла; температуру ОГ; температуру и влажность воздуха; атмосферное давление. Погрешность применяемых средств измерений соответствовала требованиям ГОСТ 18509-88.

При стендовых испытаниях дизель загружался электротормозным стендом SAK–N670 с балансирной маятниковой машиной и весовым механизмом «Рапидо» (рисунок 3.4). Перед началом испытаний и после их окончания весовой механизм балансирной маятниковой машины тарировался с помощью эталонных гирь. Соединение коленчатого вала двигателя и балансирной машины осуществлялось карданным валом. Частота вращения коленчатого вала дизеля измерялась электронным цифровым тахометром ТЦ–1.

Индицирование рабочего процесса дизеля производилось при помощи датчика давления PS-01 с выводом данных на ПК (рисунок 3.6). Датчик давления устанавливался во втулке, вмонтированной в головку цилиндра, согласно инструкции к индикатору. Сигнал от датчика поступал на ПК через усилитель AQ05–A.1.001 и АЦП La-2USB12. Обработка индикаторных диаграмм проводилась при помощи специального алгоритма наложения массивов данных (рисунок 3.7). По осредненной индикаторной диаграмме по методике ЦНИДИ определялись показатели процесса сгорания.

Отбор и анализ проб ОГ производился на автоматической системе газового анализа АСГА-Т (рисунок 3.5) с соблюдением требований руководства по эксплуатации установки. Отбор проб ОГ производился через установленные согласно инструкции к АСГА – Ту на выпускном тракте дизеля газозаборники.



Рисунок 3.4 - Общий вид пульта управления стенда



Рисунок 3.5 - Общий вид автоматической системы газового анализа АСГА-Т

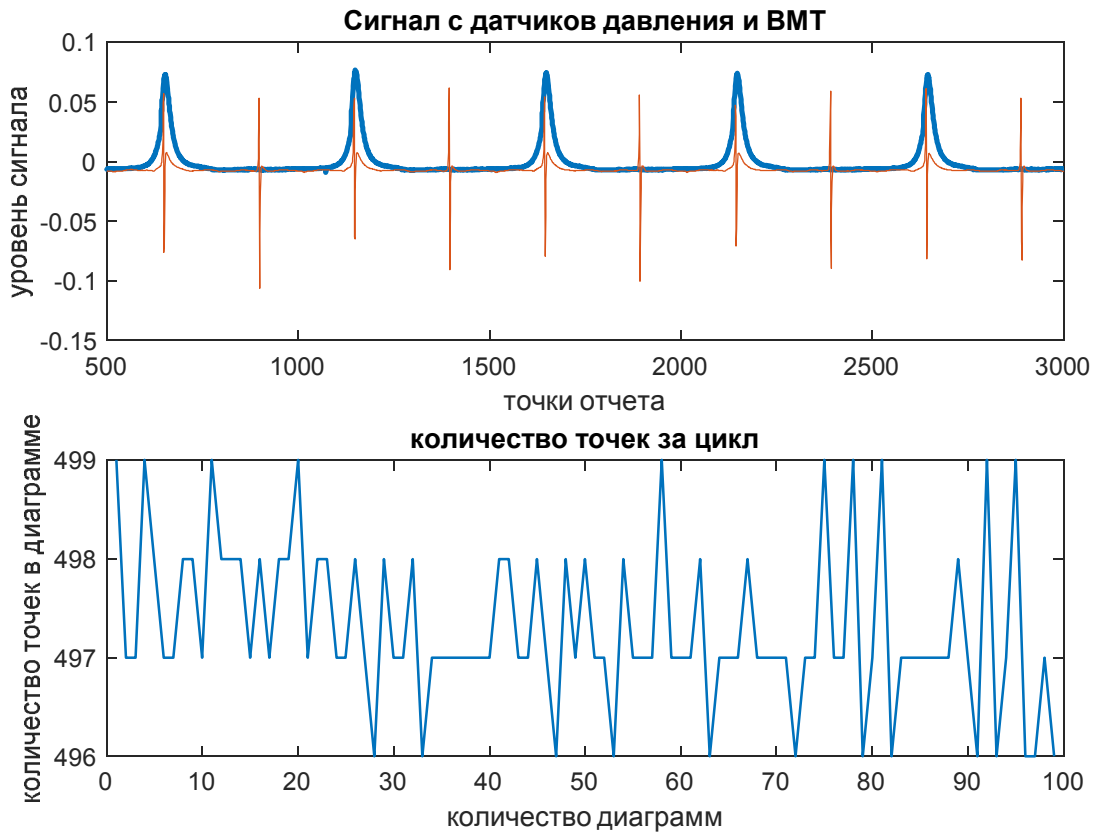


Рисунок 3.6 – Сигнал с датчиков давления и ВМТ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$

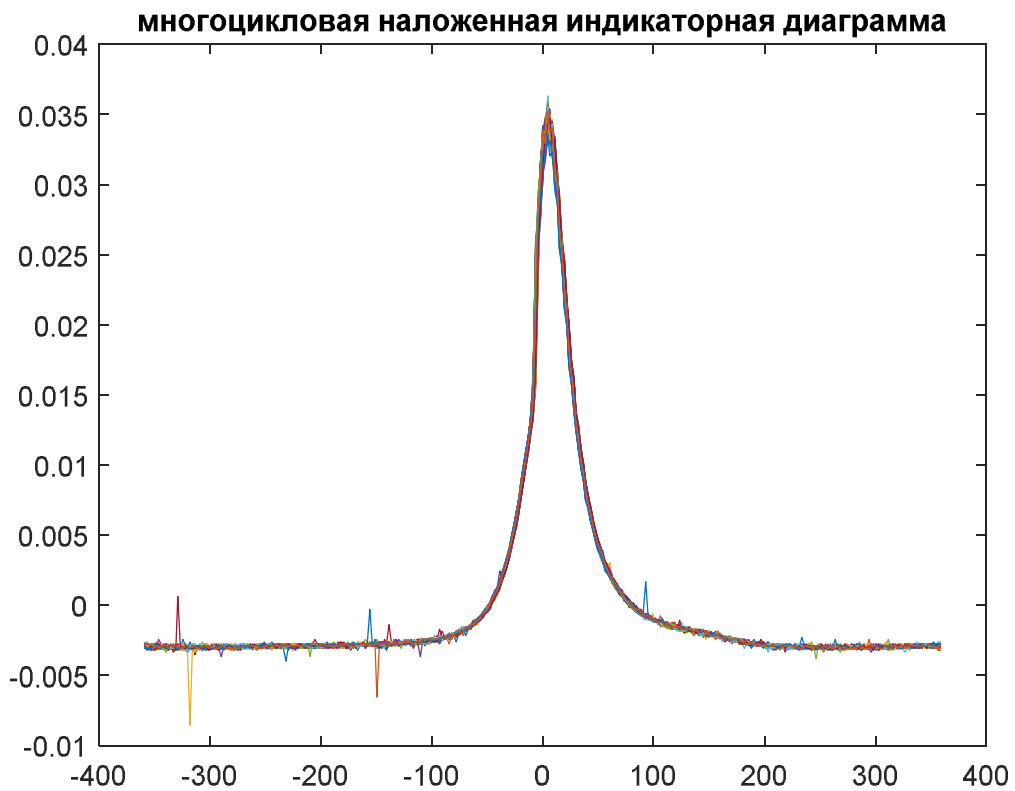


Рисунок 3.7 – Многочикловая наложенная индикаторная диаграмма

Перед началом газового анализа система прогревалась в течение 1,5 - 2 часов, после чего производилась калибровка измерительной аппаратуры поверочными газовыми смесями.

Измерение расхода этанола, РМ и дизельного топлива производилось весовым способом. Величина расхода РМ и этанола измерялась электронными расходомерами топлива АИР-50. Расход воздуха при работе дизеля определялся с помощью счетчика РГ-250, установленного перед впускным ресивером, и электронного цифрового тахометра ТЭМП-4. Количество импульсов счетчика РГ-250 измерялось за время расходования расходомером АИР - 50 50-ти грамм этанола. Полный перечень приборов и аппаратуры представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Приборы и аппаратура для экспериментальных исследований

№ п/п	Наименование	Марка, модель	Назначение
1	Балансирный тормозной стенд	SAK-N670	Измерение крутящего момента
2	Тахометр	ТЦ-1	Частота вращения
3	Расходомер топлива	АИР-50	Расход топлива
4	Расходомер воздуха	РГ-400	Расход воздуха
5	Счетчик импульсов	ТЭМП-4	Число импульсов, для расхода воздуха
6	Милливольтметр	Ш-4500	Температура ОГ
7	Датчик давления	PS-01	Давление газов в цилиндре
8	Датчик температуры	ТСМ-100	Температура масла
9	Стенд	КИ-22205	Регулировка топливной аппаратуры
10	Стенд	КИ-3333	Регулировка и проверка форсунок
11	Система газового анализа	АСГА-Т	Определение токсичных компонентов в ОГ
12	Дымомер	«BOSCH» EFAW-68A	Определение дымности

Влажность и барометрическое давление окружающего воздуха измерялись психрометром и барометром-анероидом. Температура окружающего воз-

духа и топлива измерялась ртутными термометрами. Температура масла измерялась с помощью термосифонного датчика температуры ТСМ-100. Температура ОГ дизеля замерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар. В качестве вторичного прибора применялся милливольтметр типа Ш-4500.

При определении дымности был применен фильтрационный метод измерения, сущность которого заключается в измерении степени почернения фильтра при пропускании через него строго определенного количества газов. Почернение фильтра оценивалось по степени его оптического отражения в сравнении с чистым фильтром и измерялось с помощью оптико-электрического рефлектомера «BOSCH» EFAW-68A.

Отбор проб для определения дымности ОГ проводился с учетом требований ГОСТ 24028-2013 и ГОСТ 17.2.2.02-98, ГОСТ Р 41.24-2003. Проба объемом 330 см^3 отбиралась из выпускного трубопровода 1 двигателя насосом-дозатором 7 через пробоотборник 2, установленный в соответствии со схемой (рисунок 3.8).

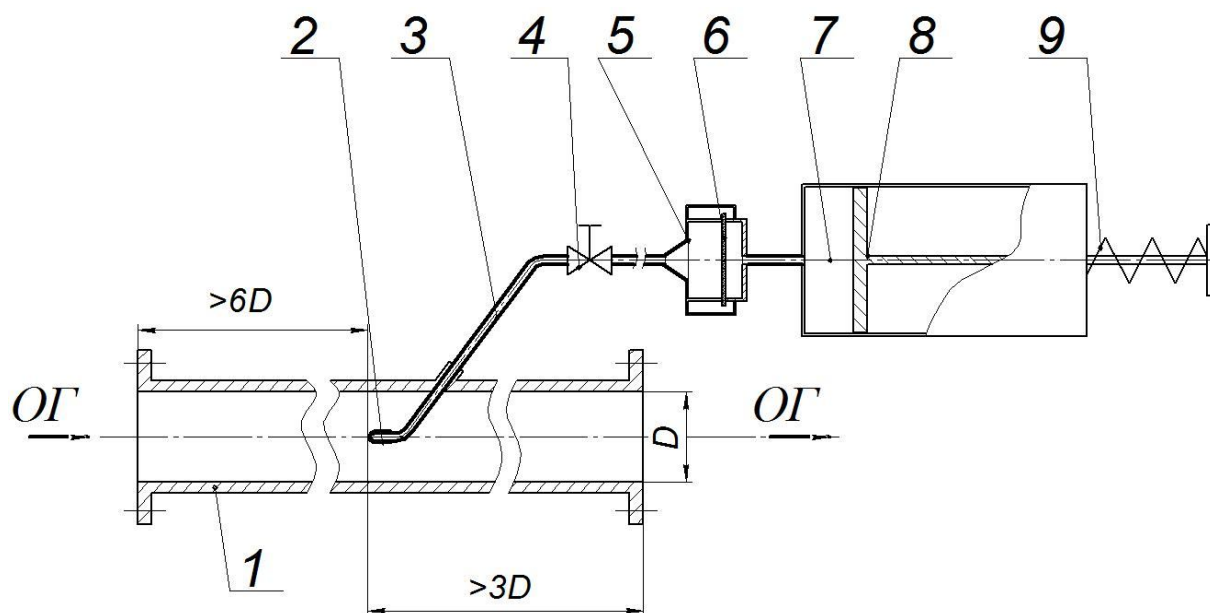
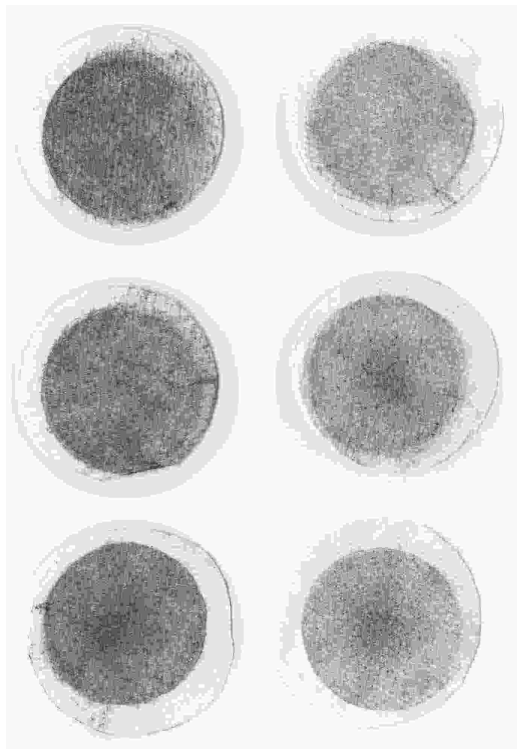


Рисунок 3.8 – Схема установки пробоотборника для измерения дымности ОГ

В системе пробоотбора для дымомера фильтрационного типа не допускается затекание газов в открытый конец зонда, за исключением периода отбора проб, поэтому в разрыв магистрали 3 был установлен газовый шаровой кран 4. Перед забором пробы зажимным устройством 5 устанавливался фильтр 6, после

чего открывался кран и поршень 8 под воздействием пружины 9 с заданным ускорением пропускал установленный объем газа через бумажный фильтр 6. Входное отверстие зонда располагалось на оси выпускного трубопровода по направлению навстречу потоку ОГ на расстоянии не менее 6 внутренних диаметров трубопровода от фланца выпускного коллектора. Общий вид рефлектомера и фильтров представлен на рисунке 3.9.

На каждом режиме работы дизеля проводилось три забора пробы. Промежуток времени между двумя последовательными измерениями составлял не более 1 минуты. Измерение проводилось после работы дизеля на заданном режиме не менее 10 минут. Результатом измерений принималось среднеарифметическое значение трех последовательных измерений, не образующих монотонную возрастающую или убывающую последовательность.



а



б

Рисунок 3.9 – Оборудование и приборы для измерения дымности ОГ:
а – фильтры после отбора пробы; б - рефлектомер «BOSCH» EFAW-68A

Для перевода расчетных и экспериментальных единиц измерения дымности и сопоставлением с установленными нормативами дымности ОГ дизелей

можно интерполировать данные, приведенные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Соотношение единиц измерения дымности ОГ [104]

Сажа, г/м ³	Единицы Bosch	Единицы Hartridge (L = 0,43 м)	
		%	м ⁻¹
0	0	0	0
0,025	0,9	10	0,245
0,050	1,75	20	0,519
0,100	2,6	30	0,829
0,1250	3,3	40	1,188
0,2125	3,85	50	1,612
0,325	4,6	60	2,131
0,430	5,15	70	2,800
0,650	5,7	80	3,743
0,675	6,05	85	4,412
0,750	6,35	90	5,355
0,950	7,0	94,5	6,900

Проверка и регулировка ТНВД и форсунок осуществлялась на комплексном стенде для испытаний топливной аппаратуры КИ-22205, оборудованном электронной системой измерения угла впрыска топлива М 3.558.048.

Давление топлива в магистрали перед форсункой определялось с помощью пьезокварцевого датчика PS-01 во время испытания дизеля.

3.3 Оценка погрешности измерений

Измерение исследуемых величин всегда связано с погрешностями, поэтому полученные величины всегда имеют приближенные значения, степень приближения которых зависит от правильности выбора и возможностей прибора, условий проведения опыта. Приведенные и абсолютные ошибки приборов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Предельные ошибки измерений

№	Наименование параметра	Предельная относительная ошибка %	Предельная абсолютная ошибка	Предел основной абсолютной погрешности по ГОСТ 18509-88
1.	Крутящий момент	$\pm 0,2$	$\pm 0,24$ Н·м	$\pm 0,59$ Н·м
2.	Частота вращения коленчатого вала	$\pm 0,5$	± 6 мин ⁻¹	± 9 мин ⁻¹
3.	Расход воздуха, поступающего в цилиндры дизеля	$\pm 1,6$	$\pm 1,92$ м ³ /ч	$\pm 1,96$ м ³ /ч
4.	Часовой расход основного и дополнительного топлив	$\pm 0,5$	$\pm 0,04$ кг/ч	$\pm 0,04$ кг/ч
5.	Число импульсов на счетчике электронного тахометра	$\pm 0,2$	5	-
6.	Температура ОГ в выпускном коллекторе	$\pm 1,5$	$\pm 9^{\circ}\text{C}$	$\pm 10^{\circ}\text{C}$
7.	Температура окружающего воздуха	± 5	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
8.	Температура топлива на входе в фильтр грубой очистки	± 5	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
9.	Относительная влажность окружающего воздуха	$\pm 2,4$	1 %	± 3 %
10.	Дымность ОГ	± 3	0,26 ед. по шкале Bosch	-

Для оценки объективности данных, полученных в результате исследований, производился подсчет ошибок измерения величин и определялась суммарная погрешность результатов опыта. Во избежание грубой погрешности одно-

кратное измерение повторялось 3 раза. Появление случайных погрешностей исключалось ввиду проведения проверок приборов и поддержания постоянных условий проведения опытов.

Верхняя оценка погрешности результата измерения Δ_{Σ} определяется сложением составляющих погрешностей по абсолютной величине (без учета знака):

$$\Delta_{\Sigma} = |\Delta_{np}| + \sum_{i=1}^m |\Psi_i|, \quad (3.1)$$

где Δ_{np} - предел допускаемой основной погрешности;

Ψ_i - дополнительная погрешность.

Границы суммы погрешностей могли быть оценены более точно, учитывая, что границы каждой погрешности также представляют собой случайную величину:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (3.2)$$

где Θ_i – граница i -й неисключенной составляющей систематической погрешности;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при $P = 0,95$ и $k = 1,1$) [104];

m – количество неисключенных составляющих систематической погрешности.

Относительная погрешность величины при косвенных измерениях оценивалась исходя из вида функции по формуле общего вида [30]:

$$\delta_Y = \pm \frac{k}{Y} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\partial Y}{\partial x} \cdot \Delta x \right)^2}, \quad (3.3)$$

где Y – функция нескольких независимых переменных x ;

δ_Y – относительная погрешность функции Y ;

Δx – погрешность независимой переменной.

Эффективная мощность двигателя вычислялась по формуле [21]

$$N_e = \pm \frac{M_k \cdot n}{9550}, \quad (3.4)$$

где M_k – крутящий момент, Н·м;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹.

Тогда относительная ошибка определения эффективной мощности может быть представлена:

$$\delta_N = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_n^2}, \quad (3.5)$$

где δ_M и δ_n относительная погрешность измерения крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала двигателя соответственно.

Данные относительных погрешностей при измерениях представлены в таблице 3.3. Согласно технической документации на электрический балансирный испытательный стенд SAK-N670 систематическая погрешность измерения крутящего момента составляет не более $\pm 0,2$ %.

Погрешность измерения частоты вращения КВ двигателя оценивалась по наиболее точному методу измерения - при помощи датчика давления PS-01 в КС двигателя и составляла не более ± 2 мин⁻¹ или не более $\pm 0,1$ % на номинальном режиме работы. Расчет частоты вращения производился делением временного отрезка всей многоцикловой индикаторной диаграммы на половину отрезка между пиками на диаграмме (точки p_z на индикаторной диаграмме).

Согласно исходным данным относительная погрешность измерения эффективной мощности дизеля составит:

$$\delta_N = \sqrt{0,2^2 + 0,1^2} = 0,22$$

Для удельного эффективного расхода топлива, вычисляемого по формуле [21]:

$$g_e = \frac{1000 \cdot G_T}{N_e}, \quad (3.6)$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч.

Относительная погрешность определения удельного эффективного расхода топлива, определяется из выражения:

$$\delta_g = \sqrt{\delta_N^2 + \delta_G^2}, \quad (3.7)$$

где δ_G – относительная погрешность измерения расхода топлива.

По паспортным данным погрешность измерения часового расхода топлива для номинального режима будет равна $\delta_G = \pm 0,5\%$. Тогда относительная погрешность определения удельного эффективного расхода топлива будет равна

$$\delta_g = \sqrt{0,05^2 + 0,5^2} = 0,5$$

Аналогичным образом производилась оценка погрешностей других измеряемых величин. Величины предельных ошибок вычислений представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Предельные ошибки вычисляемых величин

Наименование величины	Относительная ошибка %
Мощность	$\pm 0,22$
Удельный расход топлива	$\pm 0,5$
КИВ	$\pm 1,68$
Среднее эффективное давление	$\pm 0,2$
Коэффициент наполнения цилиндра	$\pm 1,6$
Эффективный к.п.д.	$\pm 0,5$

Значения мощности двигателя, крутящего момента, среднего эффективного давления и расходов топлив на различных скоростных режимах приводились к стандартным атмосферным условиям, температуре и плотности топлив согласно ГОСТ 18509-88.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЭТАНОЛА И РМ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ

4.1 Влияние величины запальной порции РМ на показатели работы дизеля на этаноле и РМ

На первом этапе исследований необходимо было определить цикловую подачу запального топлива, при которой дизель устойчиво работает на всех режимах, и при этом эффективные, экологические показатели были бы оптимальными.

Минимальная подача запального топлива q_3 , при которой двигатель работает без пропусков воспламенения на номинальном режиме работы составляет 8,3 мг/цикл (0,9 кг/ч) при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и 6,1 мг/цикл (0,51 кг/ч) при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$. С увеличением запальной порции РМ соответственно уменьшалась цикловая подача этанола. Так, при минимальной подаче запального топлива расход этанола на номинальном режиме работы составил 7,3 кг/ч (67 мг/цикл). При увеличении подачи РМ до 2,1 кг/ч (19,4 мг/цикл) расход этанола составил 5,2 кг/ч (48 мг/цикл). Наилучшие значения эффективных показателей работы двигателя достигаются при цикловой подаче РМ в диапазоне от 11 до 14 мг/цикл. На номинальном режиме работы при подаче запальной порции 11,7 мг/цикл суммарный расход топлива $G_{T\Sigma} = 7,06 \text{ кг/ч}$, расход этанола, $G_{\text{Э}} = 5,81 \text{ кг/ч}$, суммарный удельный эффективный расход топлива $g_{e\Sigma} = 384,5 \text{ г/кВт}$, удельный эффективный КПД $\eta_e = 0,324$ (рисунок 4.1).

На режиме максимального крутящего момента максимальный эффективный КПД $\eta_e = 0,334$ был достигнут при $q_3 = 12,5 \text{ мг/цикл}$. При этом суммарный расход топлива составил $G_{T\Sigma} = 4,92 \text{ кг/ч}$, а расход этанола $G_{\text{Э}} = 3,87 \text{ кг/ч}$. Дальнейшее увеличение цикловой подачи РМ ведет к уменьшению общего расхода топлив. Так, при цикловой подаче РМ $q_3 = 15,5 \text{ мг/цикл}$ расход этанола равен $G_{\text{Э}} = 3,54 \text{ кг/ч}$, соответственно суммарный расход $G_{T\Sigma} = 4,84 \text{ кг/ч}$. Однако эффективный КПД при этом незначительно падает и составляет $\eta_e = 0,32$. Максимальное значение КИВ было получено $\alpha = 1,72$ при $q_3 = 11,7 \text{ мг/цикл}$ при

$n = 1800 \text{ мин}^{-1}$.

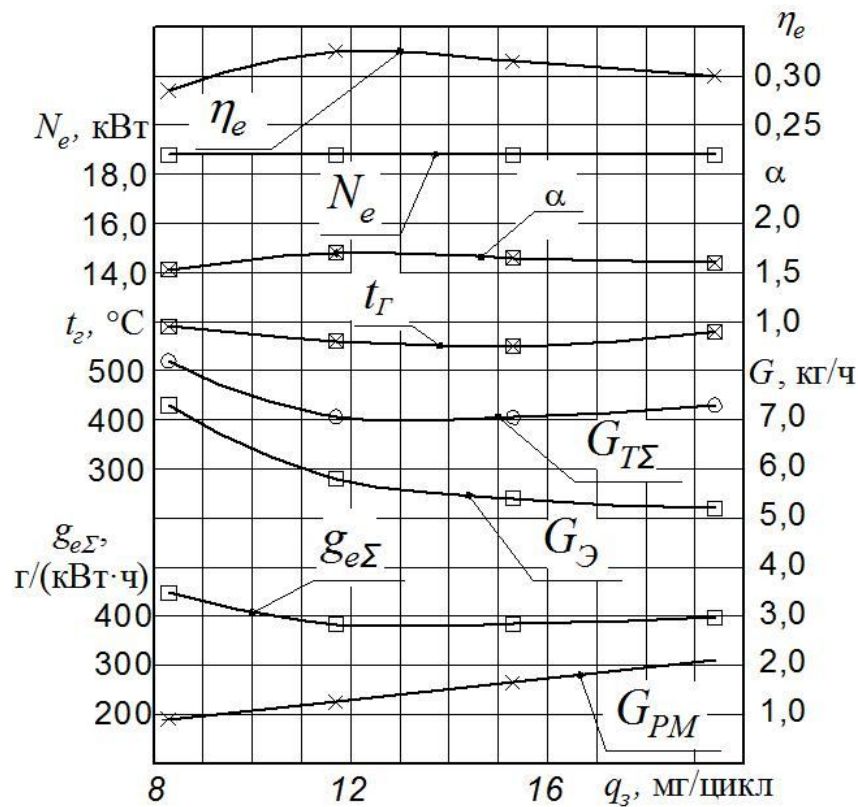
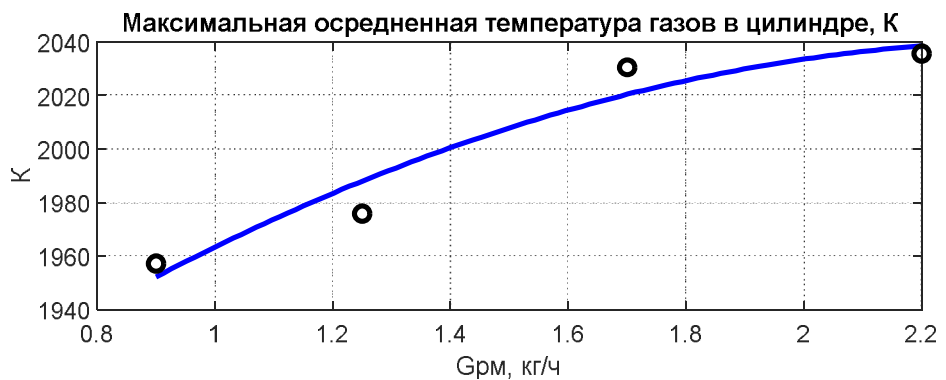


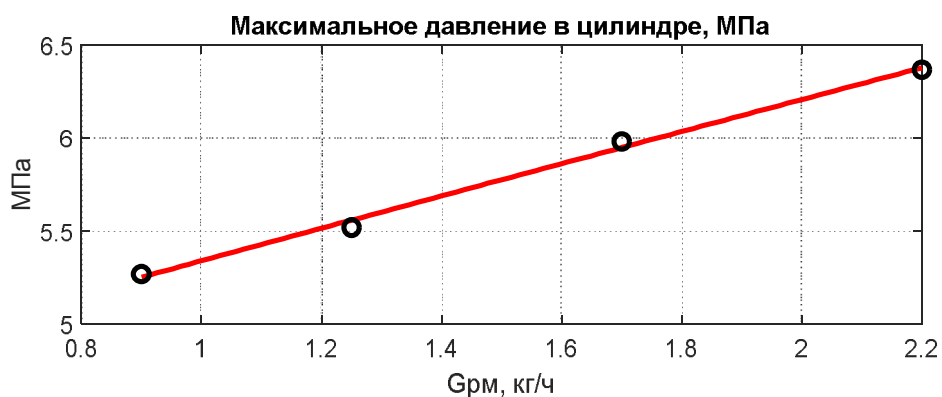
Рисунок 4.1 - Влияние величины запальной порции РМ на эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,588 \text{ МПа}$

С ростом цикловой подачи этанола увеличивается длительность топливоподачи, тем самым замедляется процесс испарения, возникает больше переобогащенных зон в топливном факеле этанола, падает локальный КИВ в зоне термического распада. Вместе с тем необходимо учитывать и изменение геометрических параметров топливного факела, увеличение его объема. Одновременно с этим уменьшается подача РМ, ухудшается качество распыливания топлива в КС штифтовой форсункой. Вследствие этого растет ПЗВ, процесс сгорания смещается на линию расширения, растет температура ОГ. Все это приводит к увеличению суммарной подачи топлива и снижению КИВ, что дополнительно ведет к снижению скорости выгорания частиц сажи. Ввиду поздней инициации процесса сгорания уменьшается не только эффективный КПД, но и значительно падает тепловыделение, что свидетельствует о неполном сгорании топлива.

С увеличением цикловой подачи РМ улучшается характеристика распыла топлива, снижается неравномерность подачи по цилиндрам, уменьшается ПЗВ. При этом растет полнота сгорания топлива и эффективный КПД, растет осредненная температура газов в цилиндре (рисунок 4.2, а), уменьшается степень гомогенизации смеси в начальный период сгорания, растет масса топлива, сгорающего в диффузионном пламени. При цикловых порциях РМ свыше 16 мг/цикл возрастает дальнобойность топливного факела, часть которого может осажаться на стенках КС, что ухудшает процесс смесеобразования и приводит к повышенному суммарному расходу топлива и увеличению сажеобразования. С увеличением подачи запального топлива растет максимальное давление сгорания p_z от 5,24 МПа при цикловой подаче РМ $q_3 = 8,3$ мг/цикл до 6,44 МПа при $q_3 = 19,4$ мг/цикл на номинальной частоте вращения коленчатого вала (рисунок 4.2, б).



а



б

Рисунок 4.2 - Влияние расхода РМ на показатели процесса сгорания:
а – максимальная осредненная температура газов, К; б – максимальное индикаторное давление в цилиндре, МПа

С увеличением запальной порции РМ расчетное значение максимальной концентрации $[C]_{max}$ сажи увеличивается на номинальном режиме и на режиме максимального крутящего момента. При этом угол достижения максимальной концентрации сажи в цилиндре смещается ближе к ВМТ (рисунок 4.3). Это вызвано уменьшением ПЗВ с ростом подачи РМ. Процесс сгорания и образования сажи смещается к ВМТ.

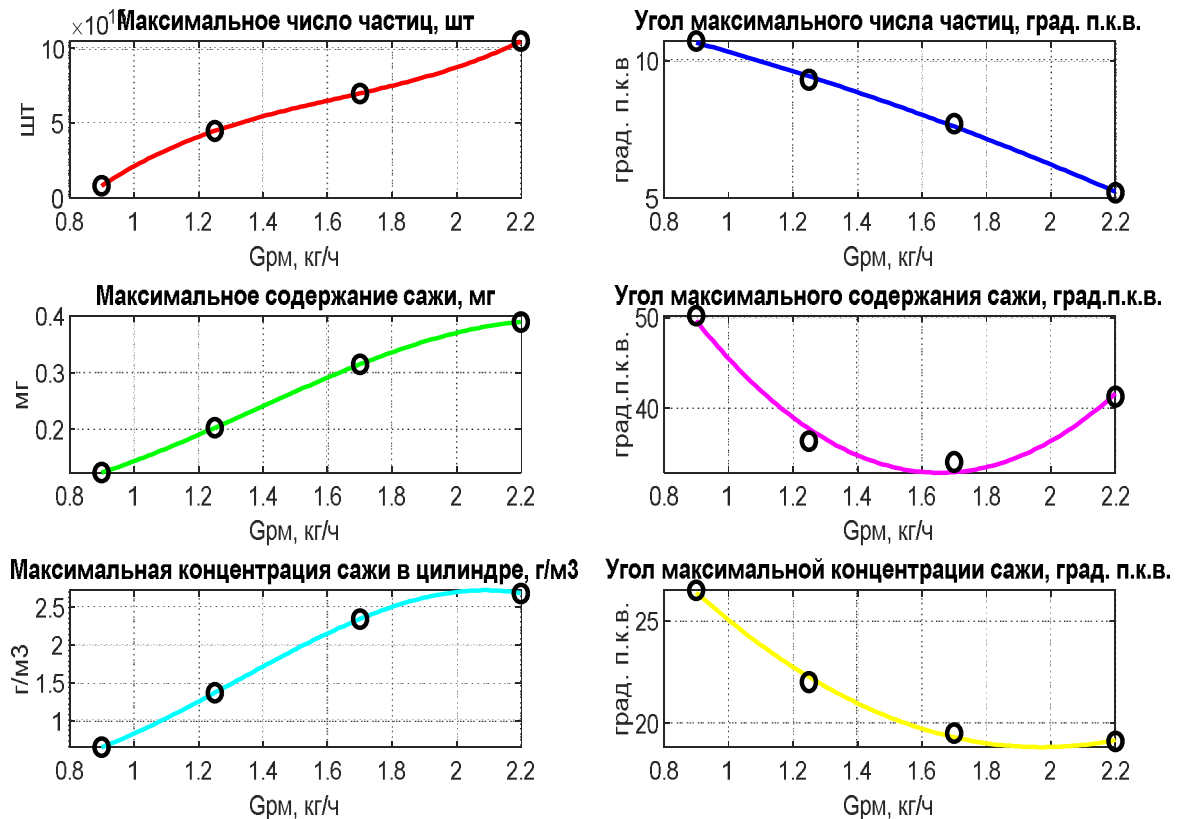


Рисунок 4.3 – Показатели сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от часового расхода РМ на номинальном режиме работы

При росте порции запального топлива свыше 16 мг/цикл процесс сгорания ухудшается, что отражается в снижении активного тепловыделения и росте суммарного количества потребляемого топлива. Это вызвано ростом количества запального топлива, попадающего на стенки КС. Увеличивается длительность испарения топлива и растет продолжительность сгорания, что вызывает смещение угла максимального содержания сажи N в цилиндре от ВМТ (рисунок 4.4). Скорость выгорания сажи в цилиндре также замедляется, поскольку увеличивается длительность процесса сажеобразования и снижается КИВ.

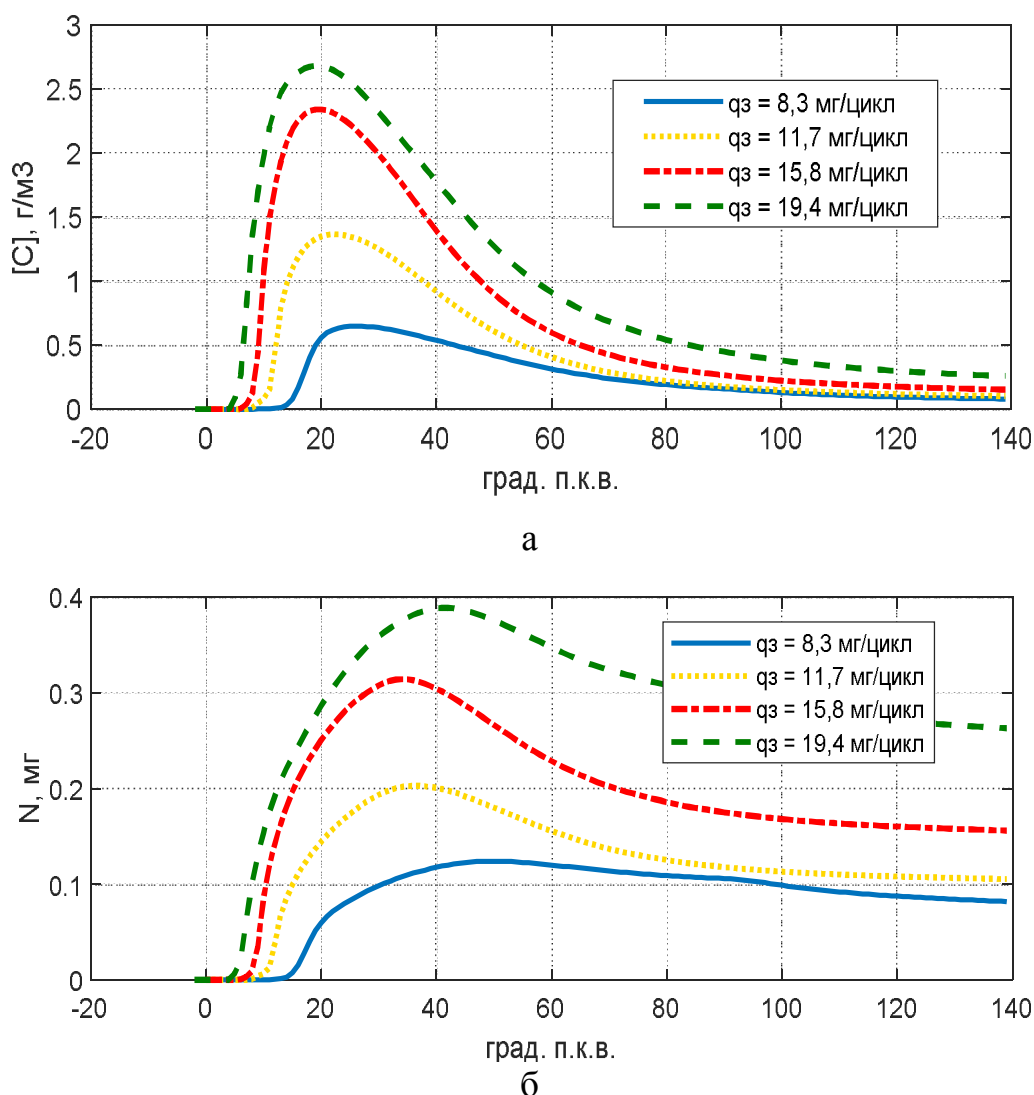


Рисунок 4.4 – Расчетные показатели сажеосодержания в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в. на номинальном режиме работы при различных подачах запального топлива:

а – массовая концентрация сажи в цилиндре, $г/м^3$;

б - массовое содержание сажи в цилиндре, мг

Экспериментально установленное значение дымности ОГ при минимальной запальной порции РМ составляет 1,6 единиц Bosch при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$, и 0,7 единиц Bosch при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$. С ростом подачи РМ до максимальных рассматриваемых значений дымность ОГ достигает 4,4 единиц Bosch при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и 2,1 единиц Bosch при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$. Такой рост прежде всего вызван увеличением доли запального топлива в ТВС и одновременным уменьшением подачи менее склонного к сажеобразованию спиртового топлива в КС дизеля.

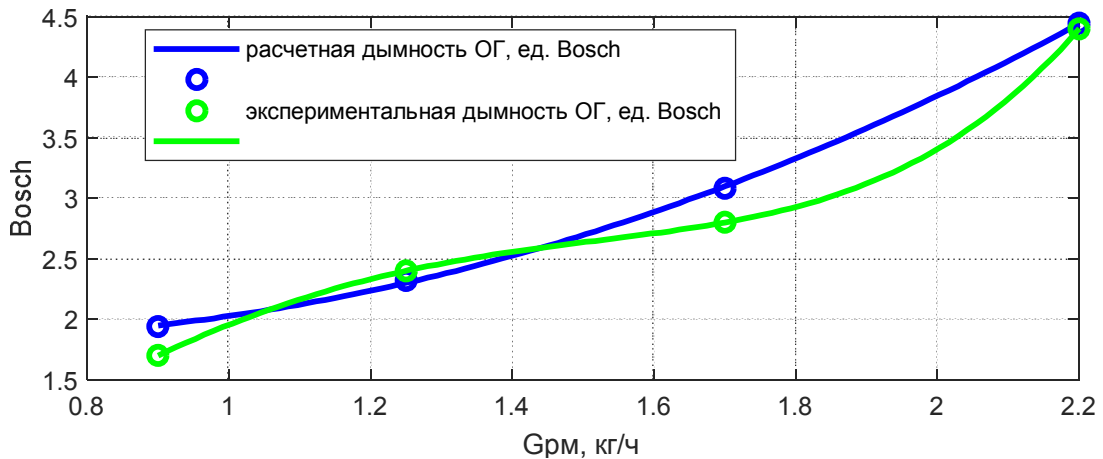


Рисунок 4.5 – Влияние часового расхода РМ на дымность ОГ

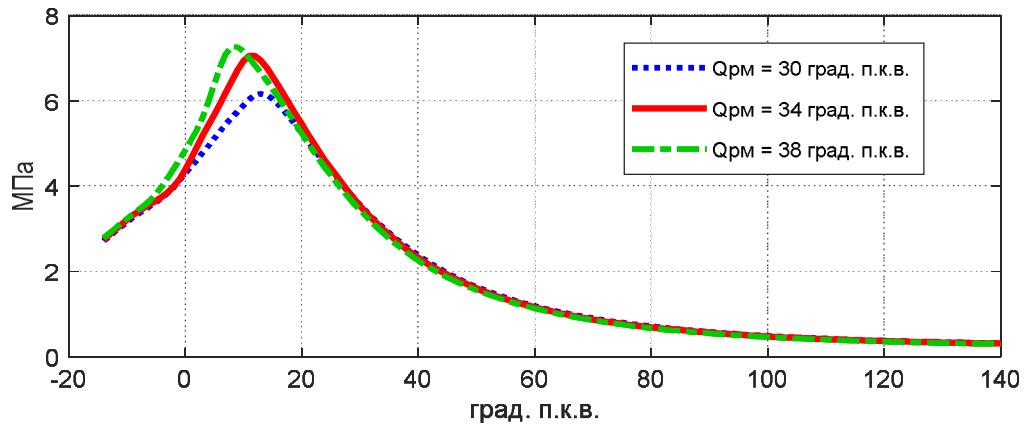
Таким образом, экспериментально установлено, исходя из эффективных показателей дизеля целесообразно установить подачу запального топлива $q_z = 13$ мг/цикл. С уменьшением величины запальной порции растет температура ОГ, удельный эффективный и суммарный расход топлива, ухудшается процесс сгорания. При увеличении запальной порции ухудшаются экологические показатели дизеля, растет дымность ОГ. Дальнейшие исследования проводились при цикловой подаче РМ $q_z = 13$ мг/цикл, что соответствует часовому расходу РМ $G_{PM} = 1,4$ кг/ч на номинальном режиме работы.

4.2 Показатели работы дизеля на этаноле и РМ в зависимости от УУОВ

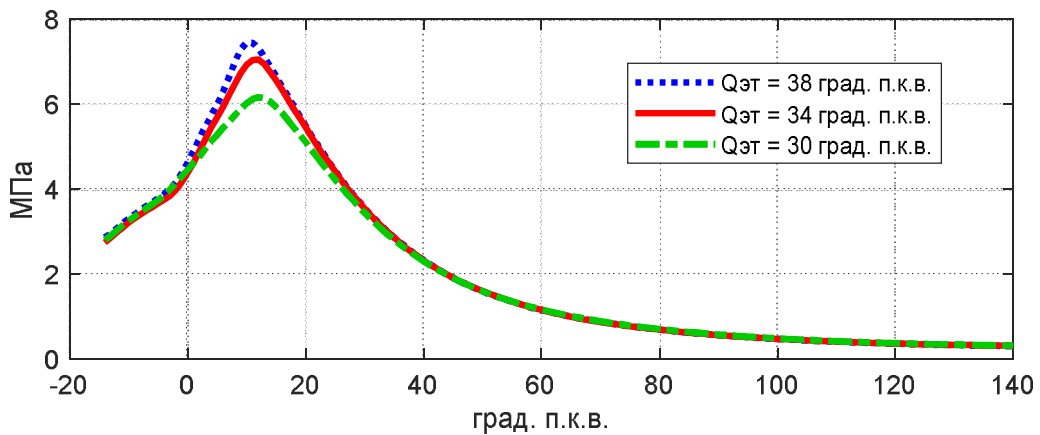
4.2.1 Показатели процесса сгорания в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ при различных УУОВ

После определения запальной порции РМ согласно структурной схеме исследований (рисунок 3.3) определялось оптимальное сочетание УУОВ РМ и этанола. УУОВТ оказывает сильное влияние на процесс сгорания. Со смещением УУОВ запального топлива от ВМТ с 30 град. п.к.в. до 38 п.к.в. максимальное давление в цилиндре растет, точка отрыва диаграммы от линии сжатия и пиковое давление в цилиндре (p_z) смещается влево на 5 градусов п.к.в. (рисунок

4.6, а). Рост давления с увеличением УУОВ РМ вызван интенсификацией горения топлива в окрестностях ВМТ.



а



б

Рисунок 4.6 – Давление газов в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ при различных УУОВ при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,588 \text{ МПа}$:
а – $\Theta_{Э} = 34^{\circ}$; б – $\Theta_{РМ} = 34^{\circ}$

При изменении УУОВ этанола при постоянном моменте впрыска РМ смещение характерных точек на индикаторной диаграмме относительно ВМТ менее существенно (рисунок 4.6, б). При раннем впрыске этанола индикаторное давление растет за счет выделения большего количества тепла в период гомогенного сгорания. Начало сгорания зависит от момента впрыска запального топлива, несмотря на то, что этанол ингибирует процесс воспламенения.

На рисунке 4.7 представлены результаты двумерной регрессии экспериментальных данных измерения максимального давления газов в цилиндре p_z в зависимости от УОВТ при работе дизеля на этаноле и РМ на

номинальном режиме (рисунок 4.7, а) и режиме максимального крутящего момента (рисунок 4.7, б).

Экспериментально установлено, что изменение максимального давления при постоянном УУОВ этанола в зависимости от УУОВ РМ менее выражено, особенно при поздних углах подачи этанола. С увеличением УУОВ этанола растет и влияние УУОВ РМ. Максимальное значение p_z достигается при $\Theta_{\text{Э}} = 38^\circ$ и $\Theta_{\text{РМ}} = 42^\circ$ и составляет $p_z = 7,72$ МПа.

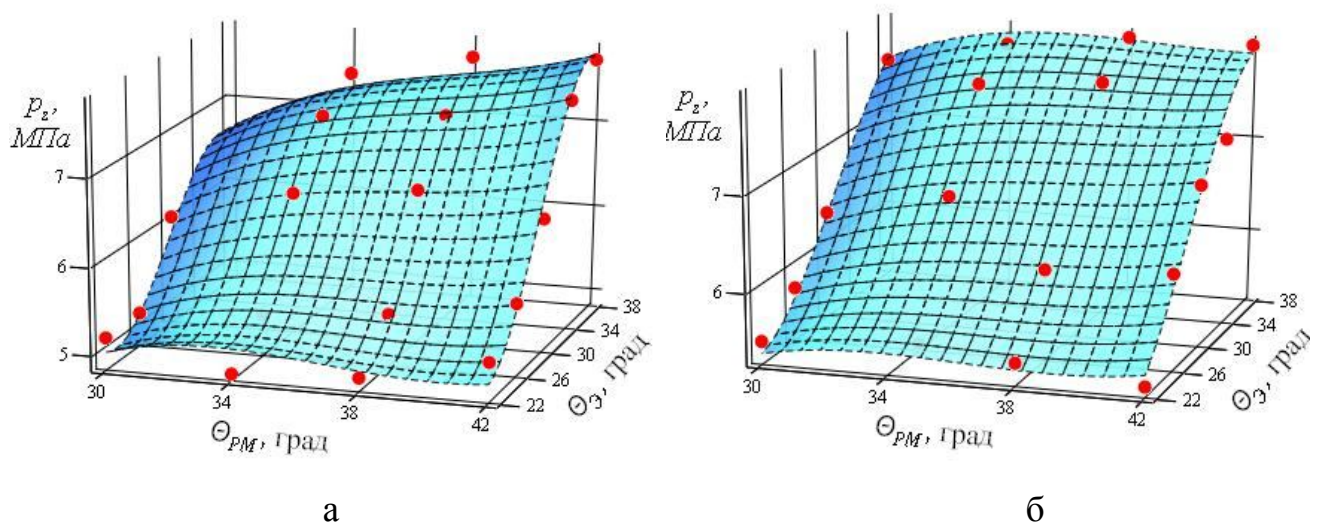
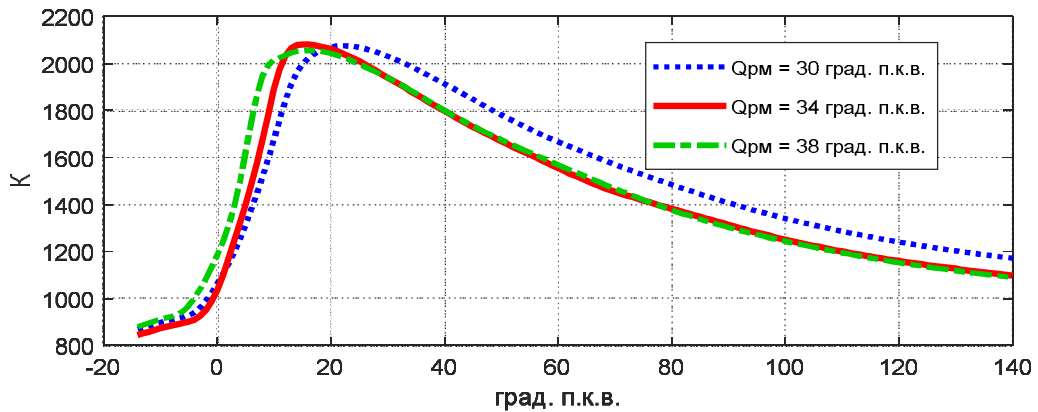


Рисунок 4.7 – Изменение максимального давления сгорания в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ при различных установочных УОВТ: а - при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,588 \text{ МПа}$; б - при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,594 \text{ МПа}$

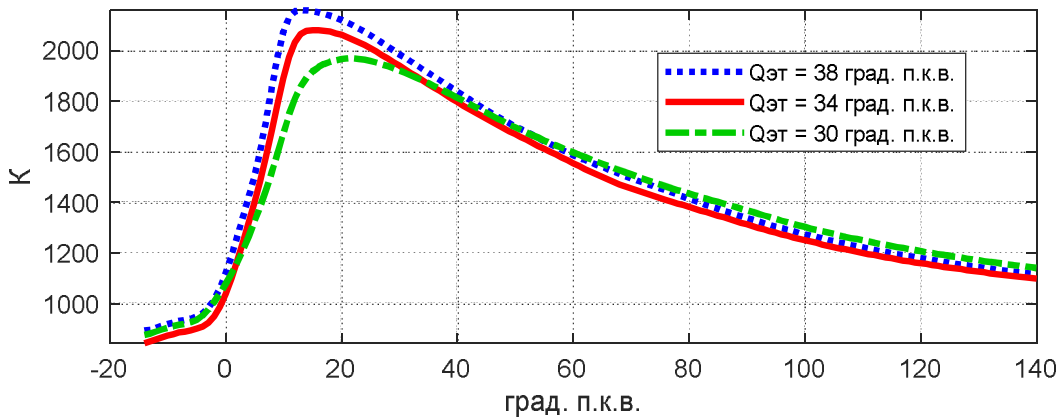
На режиме максимального крутящего момента при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ тенденции изменения максимального давления аналогичны номинальному режиму. Наибольшее давление $p_z = 7,98$ МПа достигается при сочетании УУОВ топлив $\Theta_{\text{Э}} = 38^\circ$ и $\Theta_{\text{РМ}} = 38^\circ$. Наименьшее $p_z = 5,32$ МПа при работе дизеля с УУОВ этанола и РМ $\Theta_{\text{Э}} = 26^\circ$ и $\Theta_{\text{РМ}} = 34^\circ$ соответственно. Из графика видно, что изменение УУОВ РМ не оказывает существенного влияния на максимальное давление газов. Это обусловлено большей цикловой подачей этанола. Теплота, подводимая при сгорании этанола, в 2,5 раза больше при этом соотношении цикловых подач.

Изменение УУОВ РМ вызывает соответствующее смещение функции осредненной температуры газов в цилиндре (рисунок 4.8). При более ранней по-

даче пик температуры достигается раньше. Максимальная температура газов при этом существенно не меняется.



а



б

Рисунок 4.8 – Осредненная температура газов в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ при различных УУОВ при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,588 \text{ МПа}$: а – $\Theta_{\mathcal{E}} = 34^{\circ}$; б – $\Theta_{PM} = 34^{\circ}$

При постоянном УУОВ запального топлива, варьируя значения УУОВ этанола, мы наблюдаем рост максимальной индикаторной температуры газов в цилиндре при ранней подаче спирта. Это вызвано также приведенными выше причинами – энергетической насыщенностью порций топлива и разными цетановыми числами РМ и этанола.

Максимальная температура газов растет с увеличением УУОВ этанола при всех УУОВ запального топлива. При поздних углах подачи РМ рост максимальной осредненной температуры газов в цилиндре более интенсивный, чем при ранних углах ($\Theta_{PM} = 42^{\circ}$). Наибольшие значения T_{max} достигаются при

$\Theta_{\text{э}} = 38^{\circ}$ п.к.в. до ВМТ как на номинальном режиме (рисунок 4.9, а), так и на режиме максимального крутящего момента (рисунок 4.9, б).

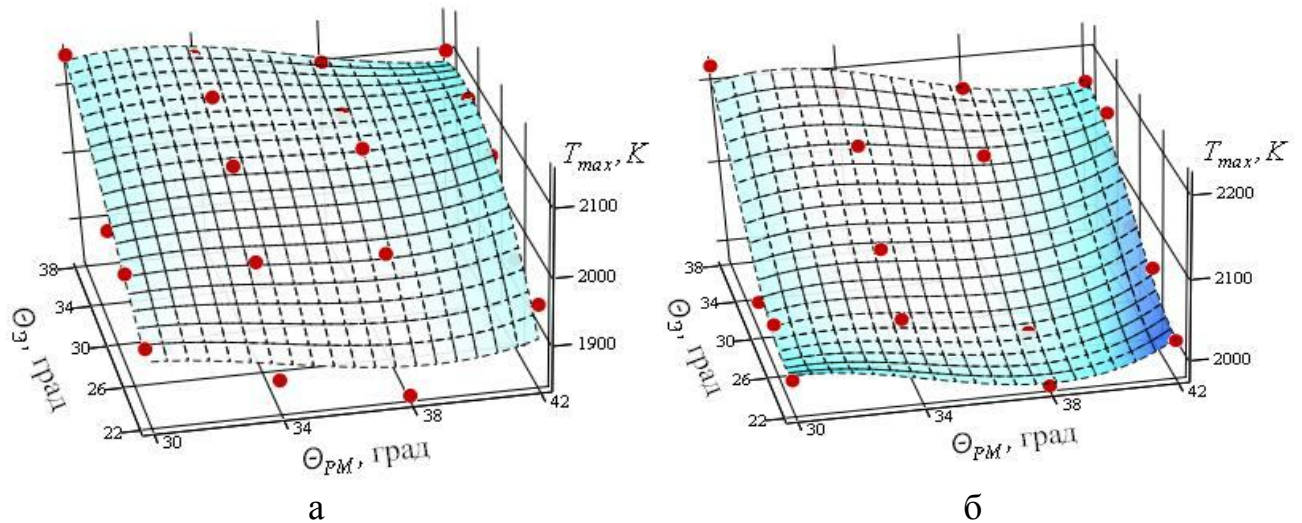


Рисунок 4.9 - Изменение максимальной осредненной температуры газов в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ при различных УУОВТ:
 а - при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,588 \text{ МПа}$;
 б - при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,594 \text{ МПа}$

Влияние УУОВ РМ на максимальную осредненную температуру газов в цилиндре имеет сложный характер. Это вызвано, в том числе, и различной степенью сгорания топлив и увеличением подачи топлив при неэффективной организации процесса сгорания в цилиндре на неоптимальных УУОВТ. Наибольшие значения температур достигаются при $\Theta_{PM} = 30^{\circ}$ и $\Theta_{PM} = 34^{\circ}$ на ранних УУОВ этанола.

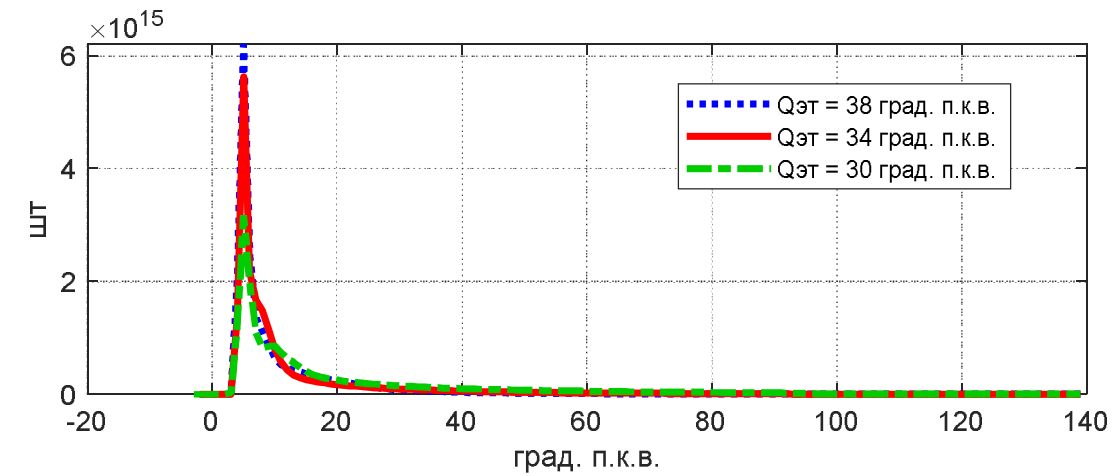
Анализируя значения основных показателей процесса сгорания p_Z и T_{max} в зависимости от УУОВ топлив можно отметить следующее. Значения этих параметров сильно зависят от УУОВ этанола и в меньшей степени от изменения УУОВ РМ. Слишком высокие значения максимального давления и осредненной температуры газов, при ранних УУОВ этанола, негативно сказываются на долговечности деталей двигателя, ведут к увеличению шумности работы дизеля и появлению стуков, повышается максимальная скорость роста давления в цилиндре. Слишком поздние углы подачи этанола сдвигают процесс сгорания на линию расширения, что приводит к росту температуры ОГ, повышенному удельному эффективному расходу топлива, снижению эффективного КПД.

4.2.2 Показатели сажесодержания в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ при различных УУОВ

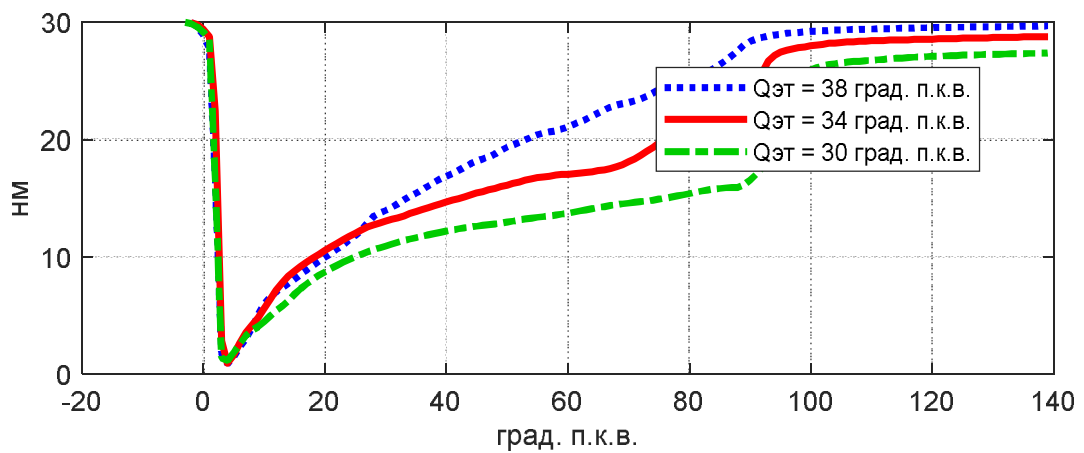
С ростом УУОВ этанола увеличивается ПЗВ. Следовательно, увеличивается масса топлива, испарившегося к моменту воспламенения и сгорающего в гомогенной ТВС. С этим связан рост максимального давления газов в цилиндре p_z и максимальной осредненной температуры T_{\max} . С повышением температуры в реакционной зоне ускоряются реакции разложения топлива, что сопровождается взрывным ростом количества частиц сажи (рисунок 4.10, а). Быстрое протекание процесса сгорания способствует ускоренному росту частиц при ранней подаче этанола (рисунок 4.10, б). Концентрация сажи достигает максимума при различных углах п.к.в. в зависимости от продолжительности ПЗВ и условий протекания процесса сгорания. После достижения максимального значения массовая концентрация сажи начинает уменьшаться вследствие увеличения объема КС и постепенного увеличения разности скоростей газификации и конденсации углерода на поверхности частицы сажи. При смещении подачи топлива к ВМТ максимальное содержание сажи в цилиндре достигается позднее (к 30 градусам п.к.в. при $\theta_{\text{э}} = 30^{\circ}$) ввиду увеличения продолжительности сгорания и смещения процесса сгорания на линию расширения (рисунок 4.10, в).

Характерной особенностью процесса сажеобразования при различных УУОВ этанола и неизменном моменте подачи РМ является синхронный рост количества частиц сажи. Минимальный диаметр частицы сажи достигают при одних и тех же значениях угла п.к.в. Это связано с тем, что начало сгорания и сажеобразования в цилиндре дизеля зависит в большей степени от УУОВ РМ, который в этом опыте сохранялся постоянным.

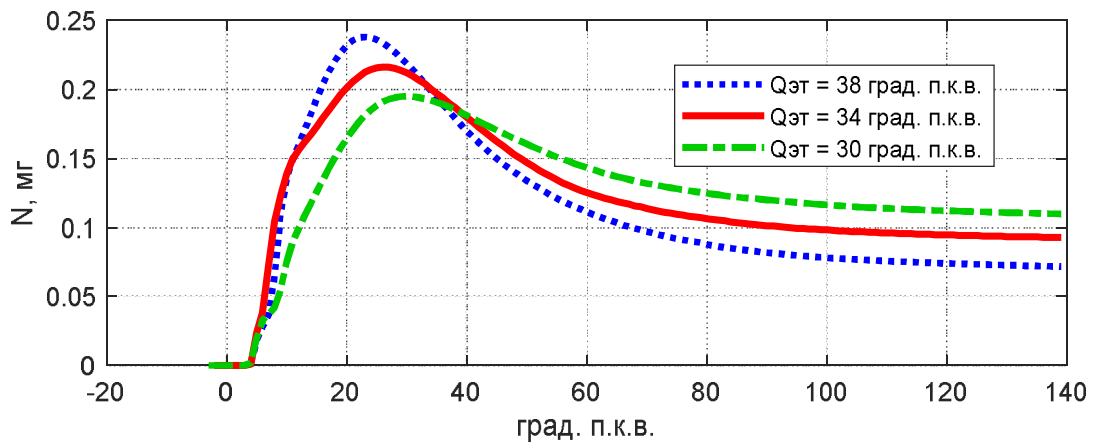
Изменение УУОВ РМ при постоянном $\theta_{\text{э}}$ оказывает влияние на момент начала воспламенения ТВС. С ростом УУОВ РМ увеличивается доля РМ в ТВС, готовой к сгоранию. Вместе с тем уменьшается объем гомогенной ТВС в связи с меньшей массой испарившегося к моменту появления очагов пламени



а



б



г

Рисунок 4.10 – Влияние УУОВ этанола на показатели сажесодержания в цилиндре в зависимости от угла п.к.в.:

а – количество частиц сажи, шт;

б – текущий среднемассовый диаметр частиц, нм;

в – массовое содержание сажи, мг

этаноло. Более ранняя инициация горения влечет смещение пиков концентрации и массового содержания сажи в цилиндре ближе к ВМТ, однако это не вызывает роста максимального содержания сажи в цилиндре, как при изменении УУОВ этанола. Ранняя подача запального топлива, более склонного к образованию сажи, способствует к уменьшению части РМ, сгорающего в диффузионном пламени. Это объясняет рост сажевыделения в цилиндре дизеля при уменьшении УУОВ запального топлива (рисунок 4.11). При увеличении УУОВ РМ смещается к ВМТ начало процесса сажеобразования. Максимальная концентрация частиц в цилиндре смещается с 6,3 град. п.к.в при $\Theta_{PM} = 30^0$ до 1,2 град. п.к.в. при $\Theta_{PM} = 38^0$ рисунок 4.11, а, т.е. более чем на 5 градусов п.к.в. Аналогичную тенденцию можем наблюдать на графике расчетного текущего среднемассового диаметра частицы сажи на рисунке 4.11, б. При малых УУОВ РМ и этанола сгорание в цилиндре происходит с задержкой, что ухудшает условия выгорания сажи и сокращается время газификации частиц в цилиндре. Кроме того, снижается максимальная осредненная температура газов, снижается КИВ, растет цикловая подача этанола, что в результате приводит к увеличению содержания сажи в ОГ дизеля, повышению дымности.

На рисунке 4.12 представлена двумерная регрессия экспериментальных данных дымности ОГ при работе дизеля на этаноле и РМ на номинальном режиме работы и режиме максимального крутящего момента при различных УУОВ РМ и этанола.

Минимальные значения дымности ОГ регистрируются при ранних УУОВ РМ и этанола. С уменьшением как УУОВ РМ, так и УУОВ этанола дымность растет. Так, на номинальном режиме работы двигателя при $\Theta_{PM} = 42^0$ и $\Theta_{Э} = 38^0$ минимальная дымность составляет 1,2 ед. по шкале Bosch (рисунок 4.12, а). С уменьшением УУОВ РМ до $\Theta_{PM} = 30^0$ дымность ОГ возрастает в 2 раза - до 2,4 ед. по шкале Bosch. Это свидетельствует о значительном вкладе в суммарное сажеобразование запальной порции РМ, несмотря на то, что она в четыре раза меньше по массе цикловой подачи основного топлива на номинальном режиме работы.

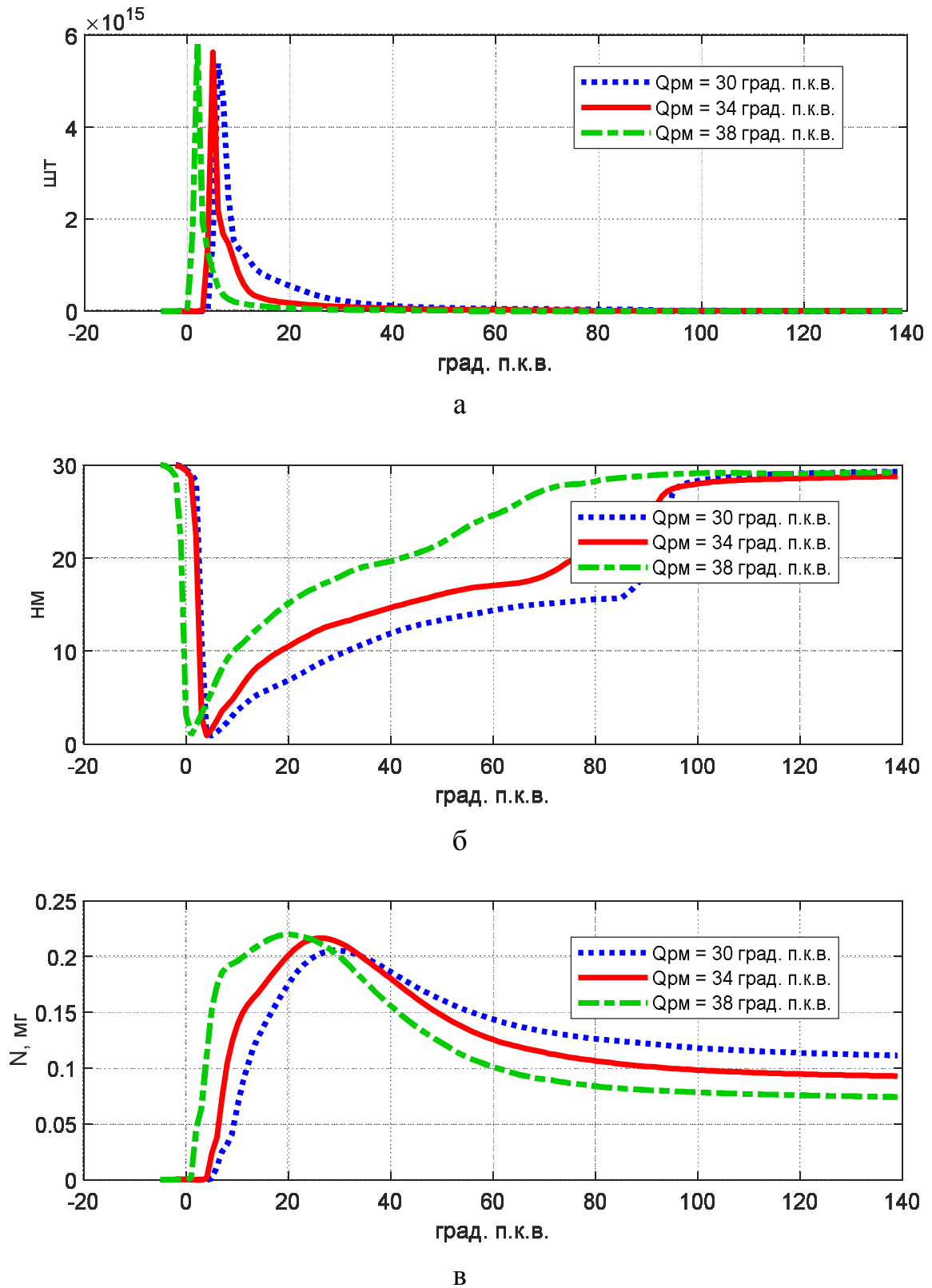


Рисунок 4.11 – Влияние УУОВ РМ на показатели сажесодержания в цилиндре в зависимости от угла п.к.в.:

а – количество частиц сажи, шт;

б – текущий среднемассовый диаметр частиц, нм;

в – массовое содержание сажи, мг

Рост дымности в зависимости от УУОВ этанола при всех УУОВ РМ незначительно выше, чем с изменением Θ_{PM} . Максимальное значение дымности ОГ составляет 3,0 ед. по шкале Bosch при сочетании поздних УУОВ РМ и этанола $\Theta_{PM}=30^0$ и $\Theta_{\text{Э}}=22^0$ соответственно. При подаче топлива на более поздних углах растет доля топлива, сгорающего в диффузионном пламени, что вызывает повышение дымности ОГ.

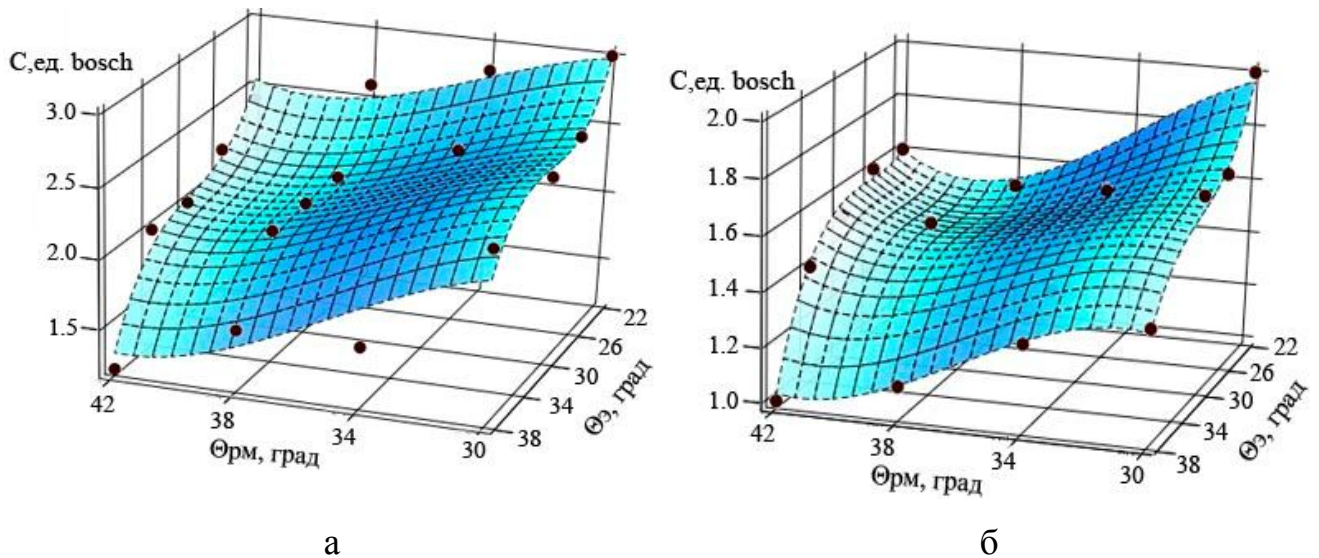


Рисунок 4.12 - Влияние применения этанола и запального РМ на дымность ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ при различных установочных УОВТ:

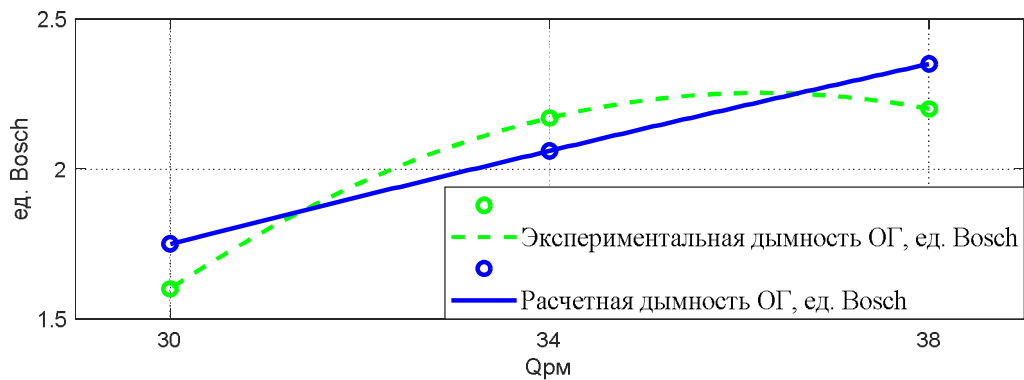
а - при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,588 \text{ МПа}$;

б - при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,594 \text{ МПа}$

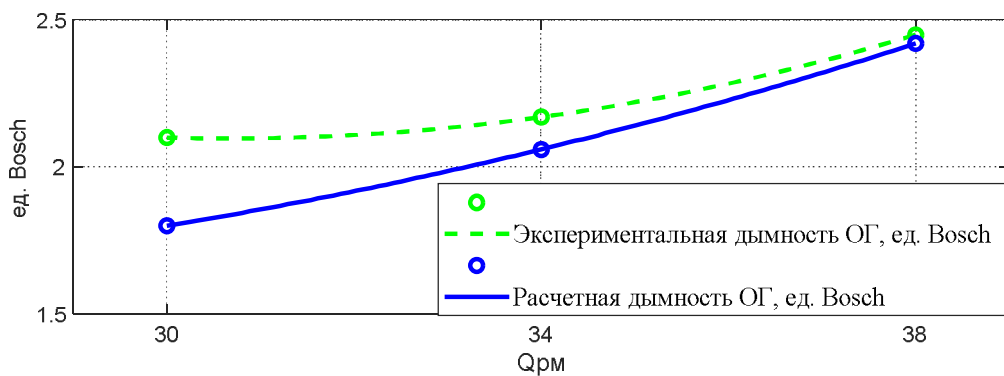
На режиме максимального крутящего момента при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ сохраняются те же тенденции изменения дымности в зависимости от УУОВТ (рисунок 4.12, б). Минимальное значение дымности ОГ составляет 1,0 ед. по шкале Bosch при $\Theta_{PM}=42^0$ и $\Theta_{\text{Э}}=38^0$. С уменьшением УУОВ запального РМ дымность ОГ растет и при $\Theta_{PM}=30^0$ принимает значение 1,4 ед. по шкале Bosch. Рост дымности вызывает и уменьшение УУОВ этанола до 1,6 ед. по шкале Bosch при $\Theta_{PM}=42^0$ и $\Theta_{\text{Э}}=22^0$. Максимальное значение дымности ОГ при работе на режиме максимальной мощности составляет 2,0 ед. по шкале Bosch при сочетании УУОВ $\Theta_{PM}=30^0$ и $\Theta_{\text{Э}}=22^0$.

Результаты экспериментальных измерений дымности ОГ согласуются с результатами расчетов дымности ОГ по результирующей концентрации сажи в

цилиндре дизеля в момент открытия выпускного клапана (рисунок 4.13)



а



б

Рисунок 4.13 – Влияние УУОВ РМ и этанола на дымность ОГ на номинальном режиме работы:

а – при изменении УУОВ этанола, $\theta_{PM} = 34^0$ п.к.в.;

б - при изменении УУОВ РМ, $\theta_{Э} = 34^0$ п.к.в

Как видим, по результатам расчетов показателей сажесодержания в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ в зависимости от УУОВ РМ и этанола нельзя сформировать представление о решающем вкладе одного из двух рассматриваемых регулировочных параметров на процесс сажевыделения в цилиндре. Результаты расчетов свидетельствуют о взаимном влиянии УУОВ этанола и РМ на дымность ОГ. Решающими факторами, определяющими дымность ОГ при изменении УУОВ являются следующие:

1. Изменяется цикловая подача топлива. Минимальная цикловая подача топлива достигается при сочетании углов $\theta_{PM} = 34^0$ и $\theta_{Э} = 34^0$. Чем больше цикловая подача топлива, тем меньше КИВ, следовательно, больше образуется сажи в КС дизеля. При УУОВ этанола и РМ $\theta_{PM} = \theta_{Э} = 38^0$ повышение цикловой

подачи не так существенно и не приводит к повышению концентрации сажи в ОГ.

2. Трансформируется процесс сгорания. С увеличением УУОВ большая часть топлива сгорает в гомогенной ТВС, следовательно, меньше сажи образуется в КС, однако растет осредненная температура газов в цилиндре, что приводит к относительному росту выделения сажи на ранних стадиях сгорания.

3. Ранняя инициация процесса сгорания создает условия для большей продолжительности сгорания и большего времени, отводимого на процесс газификации частиц сажи, что объясняет меньшее содержание сажи в ОГ при работе дизеля на режиме максимального крутящего момента.

Суммируя полученные экспериментальные данные, экономические и экологические показатели работы дизеля на этаноле и РМ в зависимости от УУОВ, можно сделать вывод, что оптимальным сочетанием УУОВ РМ и этанола является $\theta_{PM} = 34^0$ и $\theta_{Э} = 34^0$. На данных углах наблюдается минимальный часовой расход этанола, что с учетом постоянной на всех УУОВ запальной порции РМ и эффективной мощности N_e , свидетельствует о минимальном удельном эффективном расходе топлива и максимальном эффективном КПД. Рабочий процесс при этом сочетании УУОВ протекает без повышенной «жесткости» процесса сгорания.

4.3 Влияние применения этанола и РМ на эффективные и экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения нагрузки

Исследование работы дизеля на альтернативных топливах на различных нагрузочных режимах крайне важно для понимания и описания внутрицилиндровых процессов. В данном разделе приведен анализ нагрузочной характеристики на номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля. Изменения показателей работы дизеля на других частотах в зависимости от нагрузочного режима имеют аналогичный характер. Нагрузочная характеристика дизеля, работающего на ДТ и на этаноле и РМ проводилась на оптимальных регулировочных параметрах, установленных ранее и приведенных в предыдущих разделах главы.

На всем диапазоне значений среднего эффективного давления p_e цикловая подача РМ была установлена равной $q_z = 13$ мг/цикл, поэтому часовой расход запального РМ G_{PM} с ростом нагрузки не изменялся. Увеличение нагрузки осуществлялось изменением цикловой подачи этанола в КС.

Суммарный удельный эффективный расход топлива $g_{e\Sigma}$ для работы на этаноле и РМ определялся алгебраическим сложением. Минимальное значение $g_{e\Sigma}$ достигается при $p_e = 0,635$ МПа и составляет 367 г/(кВт·ч). При этом достигается максимальный эффективный КПД $\eta_e = 0,345$. При использовании ДТ минимум функции g_e и максимум η_e находится в области от $p_e = 0,540$ до $p_e = 0,560$ МПа, что существенно меньше, чем при работе на альтернативных топливах. 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. При этом на высоких нагрузках относительно работы на ДТ снижается температура ОГ t_T и растет КИВ α , что свидетельствует о полноте сгорания топлива и повышении эффективности использования тепла.

Суммарный приведенный расход топлива при работе дизеля на малых на-

грузках на этаноле и РМ выше, чем при работе дизеля на ДТ. Увеличение расхода топлива связано с тем, что этанол обладает меньшей теплотворной способностью, и для сохранения мощностных показателей на уровне дизеля этанол нужно подавать в больших количествах.

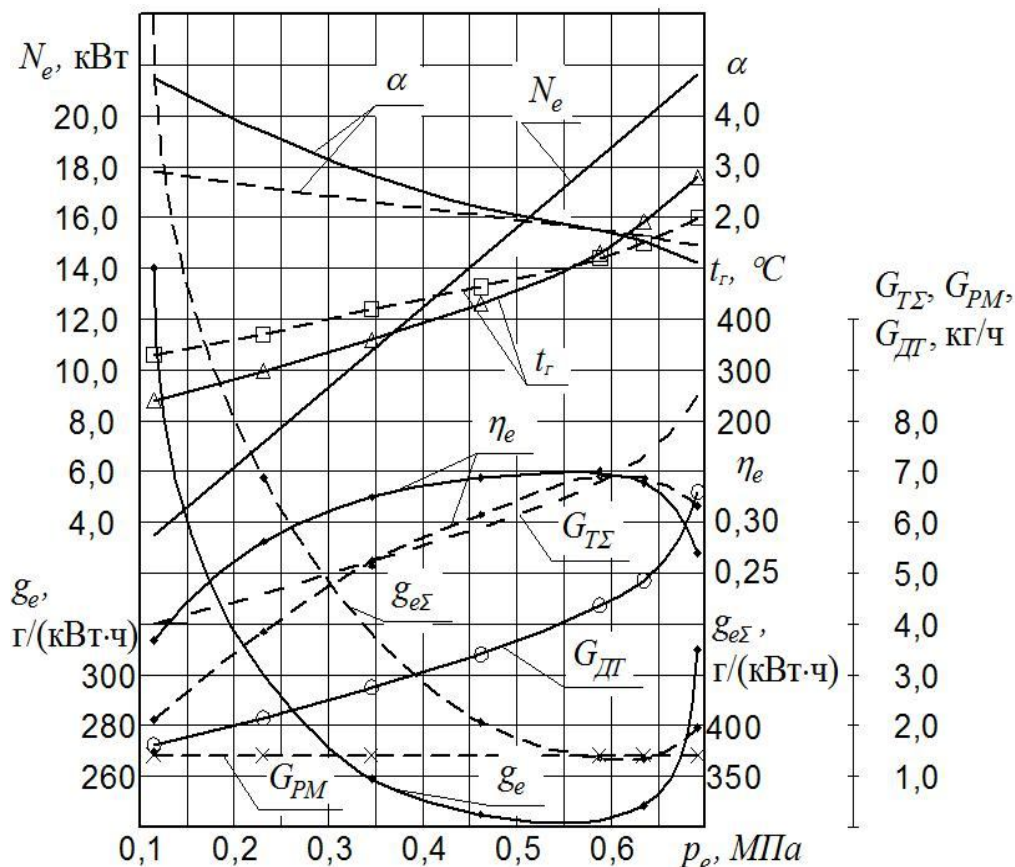


Рисунок 4.14 - Влияние применения этанола и РМ на эффективные показатели дизеля в зависимости от изменения нагрузки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$:

— — — — ДТ; — — — — этанол и РМ

Качество процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре отражаются на экологических показателях работы дизеля (рисунок 4.15). Ухудшение показателей процесса сгорания на малых нагрузках при работе дизеля на этаноле и РМ вызывает рост содержания продуктов неполного сгорания углеводородов C_xH_y и монооксида углерода CO в ОГ. С ростом нагрузки концентрация C_xH_y и CO уменьшается, достигает минимума в диапазоне от $p_e = 0,350$ до $p_e = 0,550$ МПа. На больших нагрузках при $p_e > 0,550$ концентрация продуктов неполного сгорания при работе двигателя на ДТ начинает превышать данные показатели при работе дизеля на этаноле и РМ. С ростом нагрузки увеличивается цикловая

подача этанола, который менее склонен к образованию большого количества несгоревших углеводородов C_xH_y . С уменьшением КИВ α начинается рост концентрации несгоревших углеводородов в ОГ.

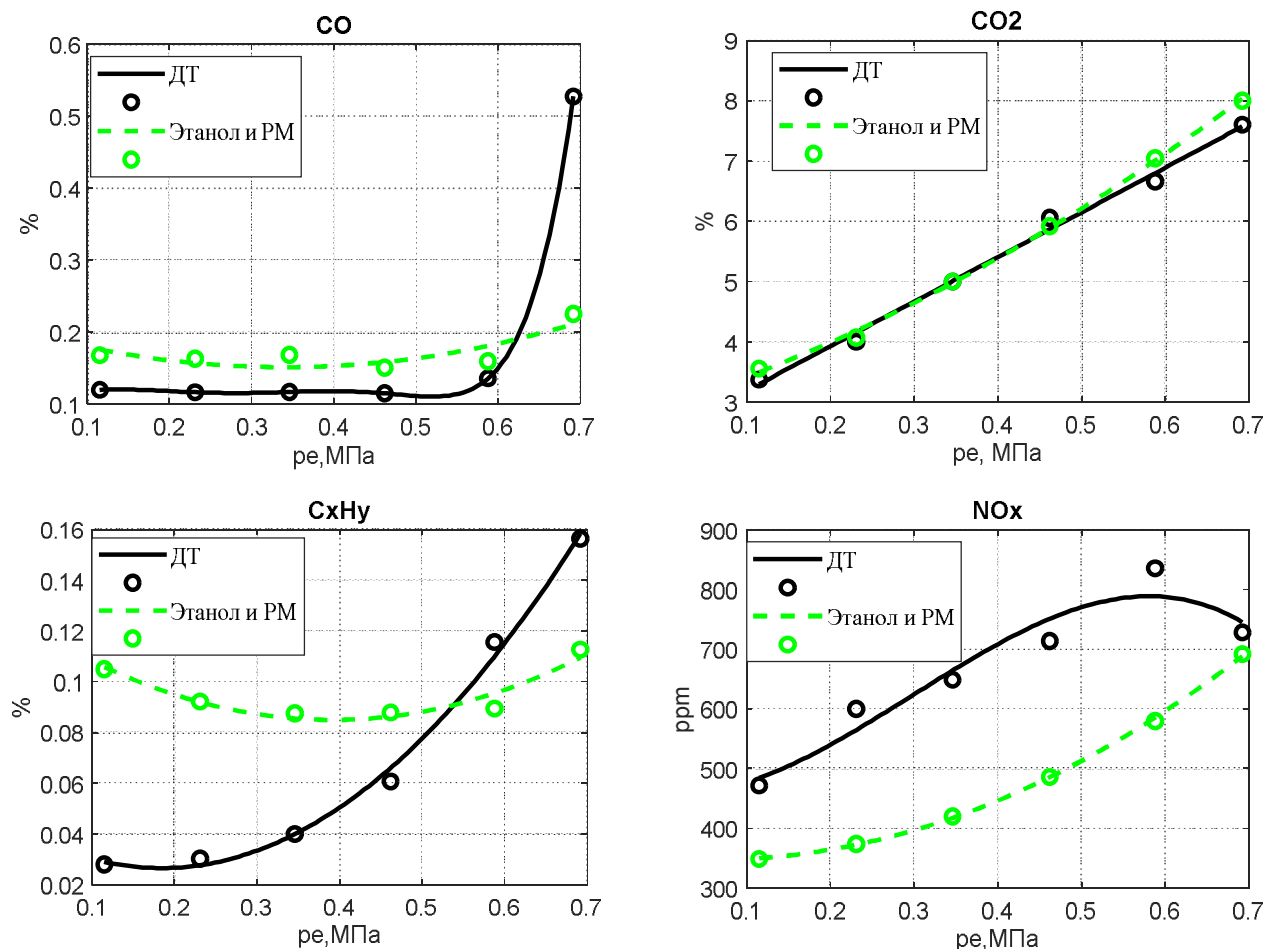


Рисунок 4.15 - Влияние применения этанола и РМ на экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения нагрузки

Рост нагрузки вызывает монотонное увеличение содержания CO_2 в ОГ. Концентрация диоксида углерода при работе дизеля на альтернативных топливах сохраняется такой же, как и при работе на традиционном топливе. На всем диапазоне нагрузок происходит снижение содержания NO_x в ОГ при работе дизеля на этаноле и РМ. На номинальном режиме работы концентрация NO_x снижается на 28,5%. Снижение концентрации оксидов азота может быть связано с уменьшением времени интенсивного тепловыделения в КС и роста зоны сгорания, которая по причине меньшей теплоты сгорания ТВС может иметь меньшие локальные температуры. Распределение тепла по зонам КС снижает скорость реакций окисления азота.

4.4 Влияние применения этанола и РМ на показатели процесса сгорания и сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от изменения нагрузки

При работе двигателя на этаноле и РМ максимальное значение осредненной температуры газов T_{max} в цилиндре на максимальных нагрузках выше, чем при работе на ДТ (рисунок 4.16, а) Равенство температур достигается при $p_e = 0,4$ МПа. При этом при малых нагрузках максимальная температура в цилиндре при работе дизеля на этаноле и РМ достигается значительно позднее, чем при работе на ДТ (рисунок 4.16, в). Это признаки позднего сгорания, что является причиной снижения эффективности работы дизеля на этаноле и РМ на малых нагрузках. Увеличение подачи этанола улучшает процесс сгорания, угол максимальной температуры газов смещается к ВМТ, растет максимальная температура газов в цилиндре.

Также при работе двигателя на этаноле и РМ происходит более интенсивный рост максимального давления сгорания с увеличением нагрузки (рисунок 4.16, б). Максимальное давление при $p_e = 0,115$ МПа $p_z = 3,91$ МПа, при $p_e = 0,692$ МПа $p_z = 8,1$ МПа. При нагрузках при $p_e < 0,500$ МПа максимальное давление p_z в цилиндре при работе дизеля на альтернативных топливах ниже, чем при работе на ДТ. Значения максимального давления газов в цилиндре дизеля при работе на ДТ растет с $p_z = 5,1$ МПа при $p_e = 0,115$ МПа до $p_z = 7,85$ МПа при $p_e = 0,692$ МПа. Угол град. п.к.в. максимального давления в цилиндре при работе на этаноле и РМ достигается позднее на 2-5 градусов в зависимости от нагрузочного режима. Смещение угла максимального давления на максимальных нагрузках не приводит к снижению эффективности подвода тепла, напротив, это позволяет повысить эффективный КПД дизеля за счет снижения части тепла, подводимой до ВМТ, за счет уменьшения продолжительности интенсивного сгорания.

Рост максимального давления и максимальной осредненной температуры газов в цилиндре с увеличением нагрузки связан с повышением цикловой подачи этанола, почти полностью сгорающего в пламени гомогенной ТВС. Пере-

распределение объема тепловыделения между периодами горения при работе на альтернативных топливах отражается в процессе сажеобразования.

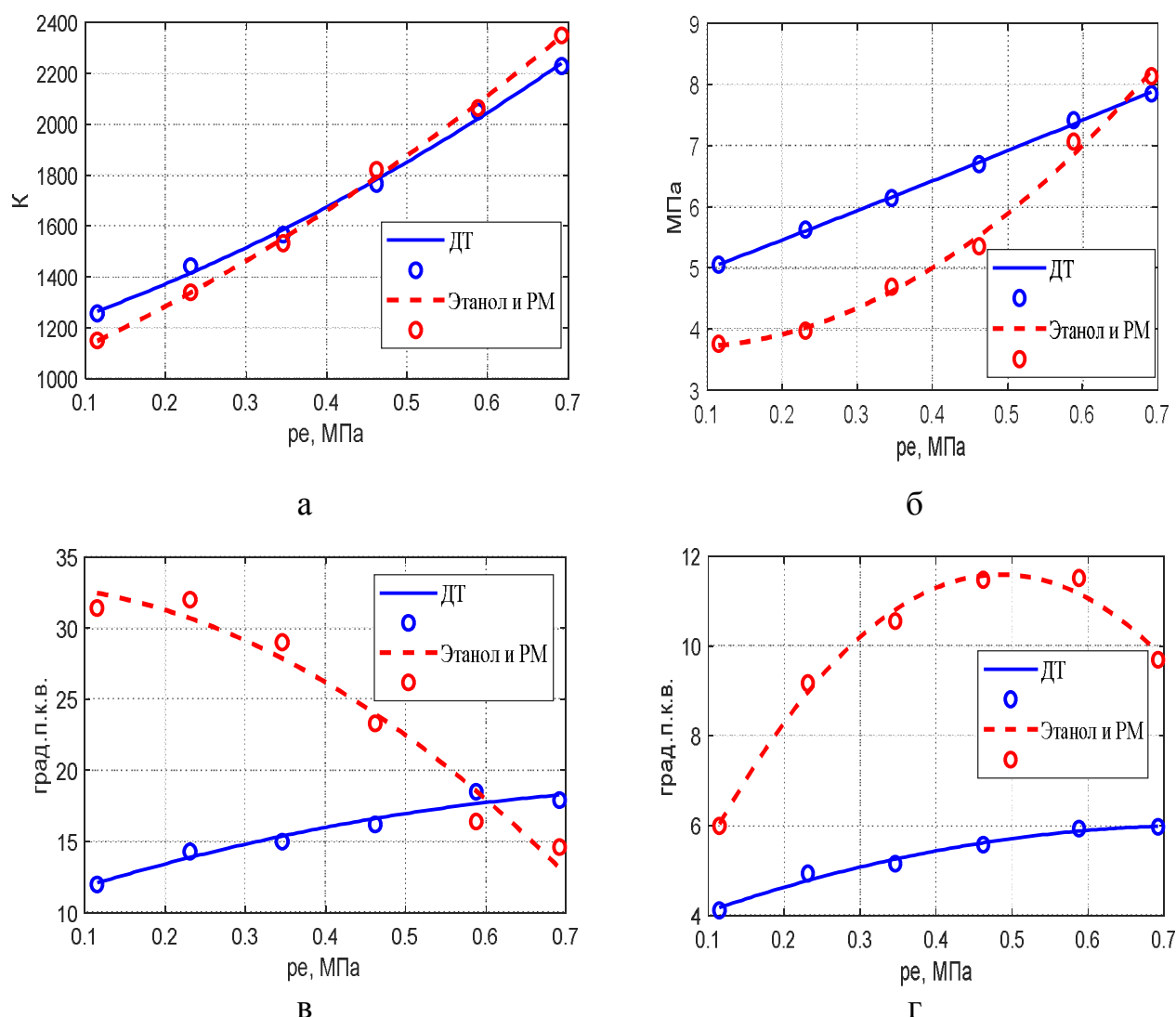


Рисунок 4.16 – Показатели процесса сгорания при работе дизеля на ДТ и этаноле и РМ на номинальной частоте вращения КВ двигателя в зависимости от нагрузки:

- а - максимальная осредненная температура газов в цилиндре;
- б – максимальное давление в цилиндре; в - угол град. п.к.в., соответствующий максимальной осредненной температуре газов в цилиндре; г - угол град. п.к.в., соответствующий максимальному давлению газов в цилиндре

С увеличением нагрузки происходит интенсивный рост скорости сажеобразования (рисунок 4.17). Этому способствует рост цикловой подачи топлива, температуры газов в зоне пиролиза топлив, снижение осредненного КИВ в КС. В то же время уменьшается объем чистого воздуха, не задействованного в процессе сгорания, растет температура в зоне выгорания сажи. Это приводит к рос-

ту скорости газификации частиц. Результатам моделирования процесса сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в. представлены на рисунке 4.17. С ростом нагрузки начало образования сажи смещается на более ранние углы п.к.в. Это вызвано ростом температуры газов в цилиндре и снижением ПЗВ с ростом нагрузки. На всем диапазоне углов п.к.в. содержание и концентрация сажи растет с увеличением среднего эффективного давления p_e .

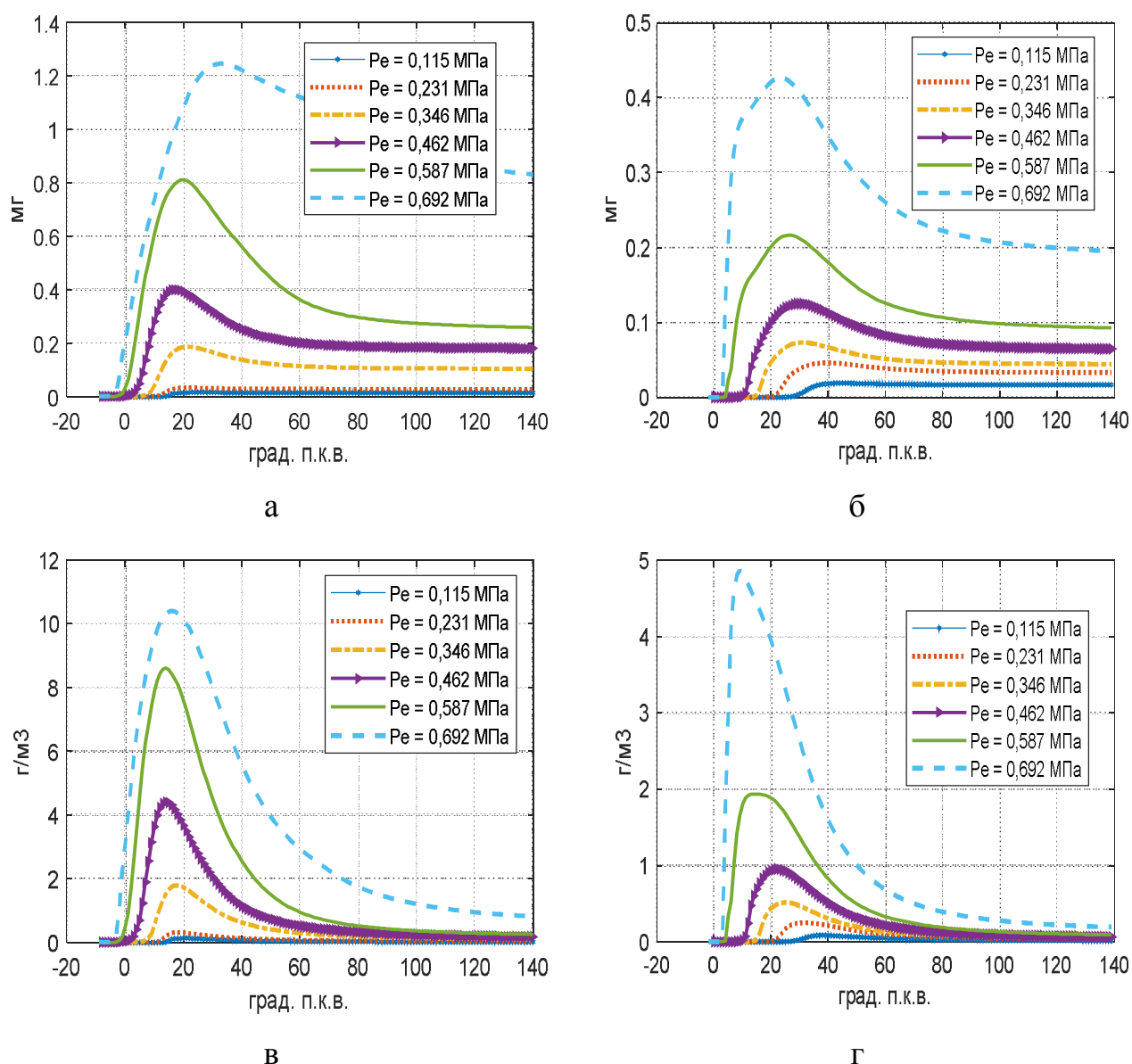


Рисунок 4.17 – Расчетные показатели сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в.: а – массовое содержание сажи при работе на ДТ; б – массовое содержание сажи при работе на этаноле и РМ; в – массовая концентрация сажи при работе на ДТ; г – массовая концентрация сажи при работе на этаноле и РМ

Увеличение продолжительности сгорания, рост ПЗВ и снижение темпера-

туры газов замедляет скорость роста частиц в цилиндре (рисунок 4.18, а). С падением цикловой подачи топлива уменьшается количество частиц сажи в цилиндре (рисунок 4.18, б). Существенный рост количества частиц сажи на высоких нагрузках объясняется также ростом температуры в зоне пиролиза. Это вызывает увеличение скорости распада углеводородов топлива и гетерогенных реакций конденсации дисперсного углерода.

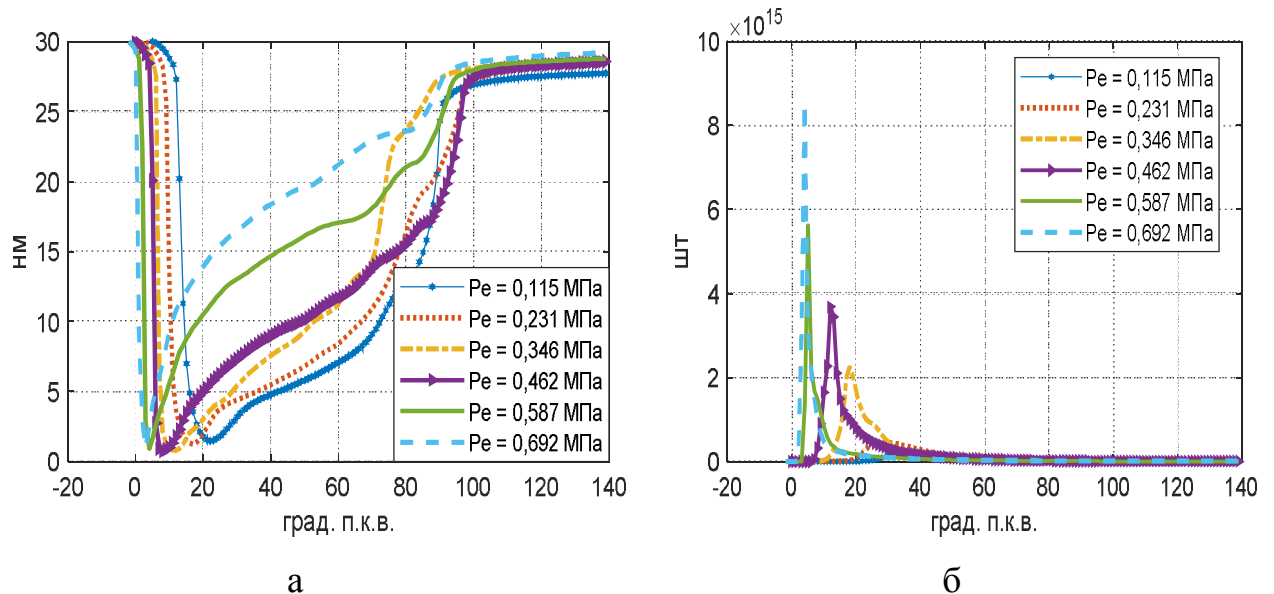


Рисунок 4.18 – Расчетные характеристики частиц сажи в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в. при работе дизеля на этаноле и РМ:
 а – текущий среднемассовый диаметр частиц, нм;
 б – количество частиц сажи, шт

Угол град. п.к.в. достижения максимального содержания сажи в цилиндре зависит от процесса сгорания (рисунок 4.19). При малых нагрузках падает интенсивность газификации сажи. Это происходит в связи с падением температуры в зоне выгорания частиц при распространении пламени в КС. Тем не менее, затухающий процесс сажеобразования и роста частиц сажи продолжается до конца тепловыделения. Это вызывает смещение максимального содержания сажи от ВМТ и уменьшение суммарной скорости падения концентрации частиц.

Расчетная максимальная массовая концентрация сажи в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ растет с 0,085 г/м³ при $p_e = 0,115$ МПа до 4,86 г/м³ при $p_e = 0,692$ МПа. При этом пик массовой концентрации сажи смещается к

ВМТ на 29 градусов п.к.в.

По результатам численного моделирования сажевыделения в дизеле при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ расчетная концентрация сажи в ОГ составляет $[C] = 0,018 \text{ г/м}^3$ при $p_e = 0,115 \text{ МПа}$, и $[C] = 0,238 \text{ г/м}^3$ при $p_e = 0,692 \text{ МПа}$. На номинальном режиме работы расчетная концентрация сажи в ОГ составляет $0,108 \text{ г/м}^3$.

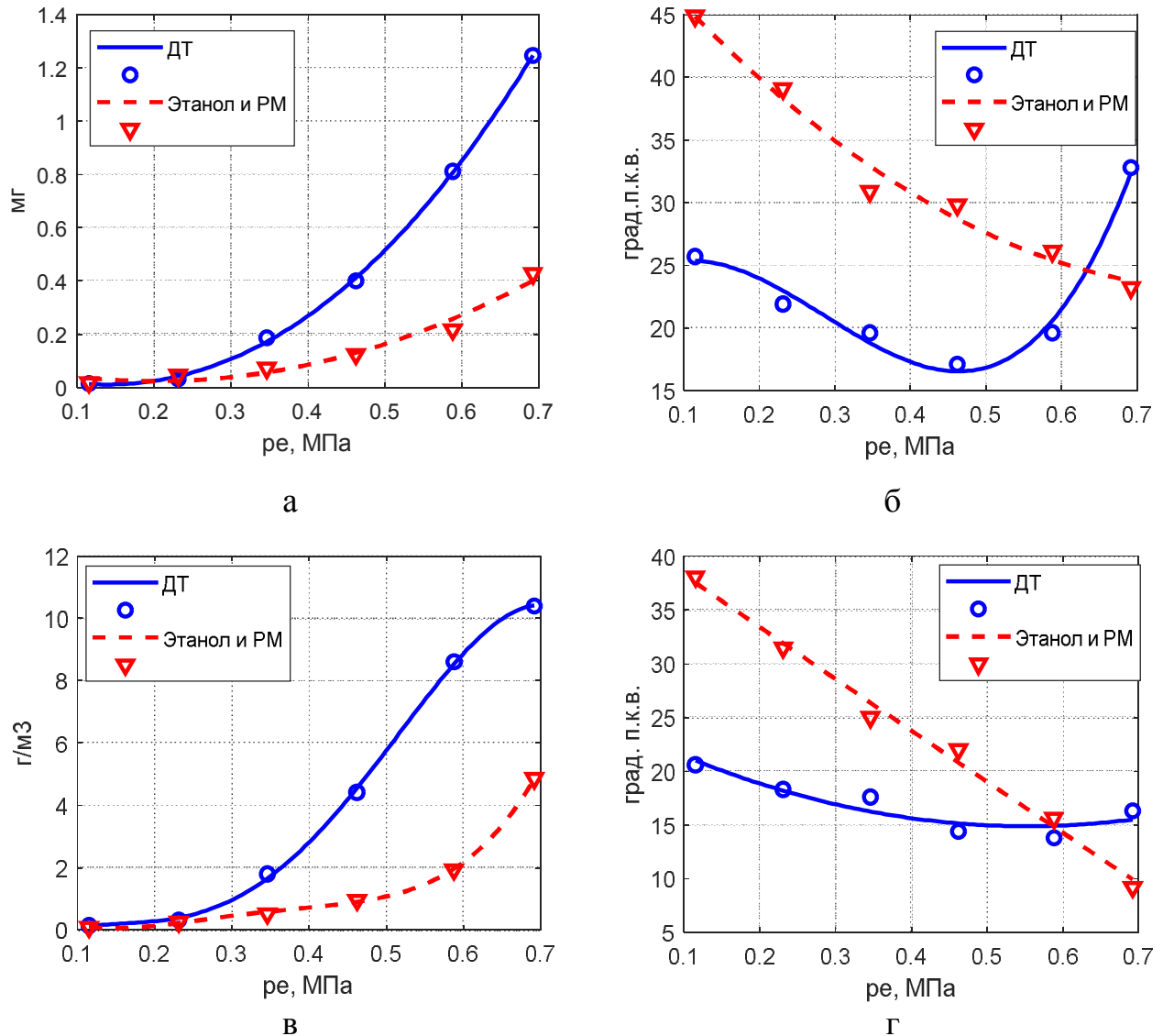


Рисунок 4.19 – Расчетные показатели процесса сажеобразования в цилиндре дизеля в зависимости от изменения нагрузки:

- а – максимальное массовое содержание сажи, мг;
- б – угол, соответствующий максимальному содержанию сажи в цилиндре;
- в – максимальная концентрация сажи в цилиндре, г/м³;
- г – угол, соответствующий максимальной концентрации сажи в цилиндре

При работе на ДТ при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ $p_e = 0,115 \text{ МПа}$ экспериментальная концентрация сажи в ОГ составляет $0,028 \text{ г/м}^3$, с увеличением нагрузки до

$p_e = 0,692$ МПа значение концентрации растёт в 36 раз и равняется $1,021 \text{ г/м}^3$. При использовании альтернативных топлив значение концентрации сажи в ОГ с увеличением нагрузки растёт менее интенсивно. Экспериментально установленная концентрация сажи в ОГ при $p_e = 0,115$ МПа $[C] = 0,037 \text{ г/м}^3$. При $p_e = 0,692$ МПа $[C] = 0,251 \text{ г/м}^3$, т.е. концентрация сажи в ОГ с ростом нагрузки увеличилась в 6,8 раза. На максимальной нагрузке концентрация сажи в ОГ снижается при работе на этаноле и РМ в 4,06 раза по сравнению с работой на ДТ.

Аналогично на частоте максимального крутящего момента ($n = 1400 \text{ мин}^{-1}$) концентрация сажи в ОГ по результатам опытов при работе на ДТ растёт с $0,019 \text{ г/м}^3$ при $p_e = 0,115$ МПа до $0,580 \text{ г/м}^3$ при $p_e = 0,692$ МПа. Рост концентрации сажи происходит в 30 раз. При работе дизеля на этаноле и РМ концентрация сажи в ОГ растёт с $0,032$ до $0,093 \text{ г/м}^3$ соответственно.

Дымность ОГ по расчетным данным определялась по эмпирическому уравнению [48]:

$$C = 10 \cdot (1 - 0,9536 \cdot \exp(-1,7055 \cdot [C]_{\text{ОГ}})), \text{ ед. Bosch} \quad (4.1)$$

где $[C]_{\text{ОГ}}$ – концентрация сажи в ОГ.

Расчетная концентрация сажи в ОГ определялась по уравнению состояния. Результаты расчетов и измерения дымности ОГ при работе дизеля на номинальной частоте вращения на ДТ и этаноле и РМ сопоставлены на рисунке 4.20.

С увеличением нагрузки растёт часовой расход топлива и цикловая подача топлива, что влечет рост дымности ОГ. При $p_e = 0,115$ МПа дымность ОГ при работе двигателя на альтернативных топливах незначительно выше, чем при работе на ДТ. На номинальном режиме при работе дизеля на ДТ дымность ОГ составляет 5,3 ед. по шкале Bosch, при работе на этаноле и РМ – 2,2 ед. по шкале Bosch.

Представленные расчетные теоретические массивы показателей сажесодержания в цилиндре дизеля на различных нагрузочных режимах работы дизеля на этаноле и РМ позволяют удовлетворительно описывать процессы сажеобразования

в цилиндре дизеля и подтверждаются экспериментальными данными концентрации сажи в ОГ.

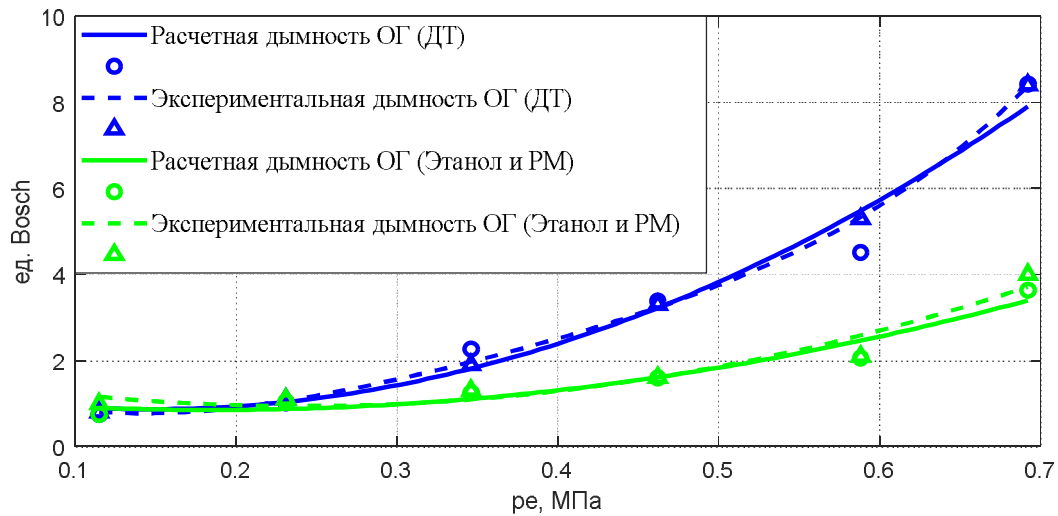


Рисунок 4.20 – Влияние изменения нагрузки на дымность ОГ дизеля на номинальной частоте вращения коленчатого вала при работе на ДТ и этаноле и РМ

По результатам исследований работы дизеля на различных нагрузочных режимах можно сделать вывод, что при малых p_e дымность и концентрация сажи в ОГ при работе на этаноле и РМ выше, чем при работе дизеля на ДТ, как на номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя, так и на частоте вращения максимального крутящего момента. С увеличением p_e происходит более интенсивный рост концентрации сажи в ОГ при работе двигателя на ДТ. На номинальном нагрузочном режиме достигается улучшение эффективности процесса сгорания, что отражается в существенном снижении дымности ОГ.

4.5 Влияние применения этанола и РМ на эффективные и экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала

При исследовании влияния скоростного режима работы дизеля с фиксированной цикловой подачей этанола и РМ на показатели работы дизеля были выявлены следующие особенности (рисунок 4.21).

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 . На режиме максимального крутящего момента значения показателей работы дизеля: $M_k = 112 \text{ Н·м}$ и $N_e = 16,1 \text{ кВт}$ на этаноле и РМ, $M_k = 110 \text{ Н·м}$ и $N_e = 15,8 \text{ кВт}$ при работе на ДТ.

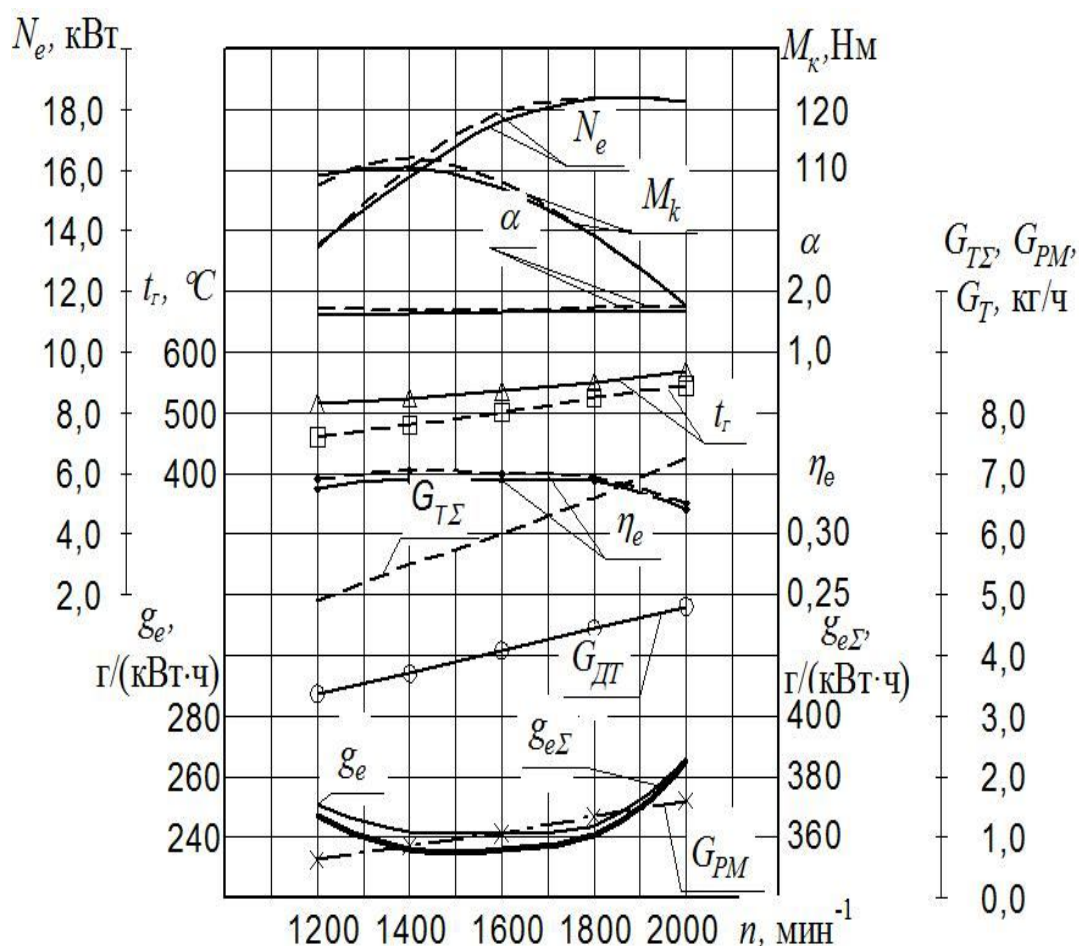


Рисунок 4.21 - Влияние применения этанола и РМ на эффективные показатели работы дизеля в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала:
 ————— ДТ; - - - - этанол и РМ

С увеличением частоты вращения происходит пропорциональный рост часового потребления двигателем топлива G . Суммарное потребление РМ и этанола выше, чем ДТ, на соответствующих режимах.

Применение РМ и спирта способствует уменьшению температуры ОГ t_f на 40-50 °С и увеличению КИВ α . За счет улучшения полноты сгорания топлив, особенно в области частот максимального крутящего момента, на 1,5-2% повышается эффективный КПД η_e . Это, в свою очередь, оказывает влияние на экологические показатели работы дизеля, представленные на рисунке 4.22.

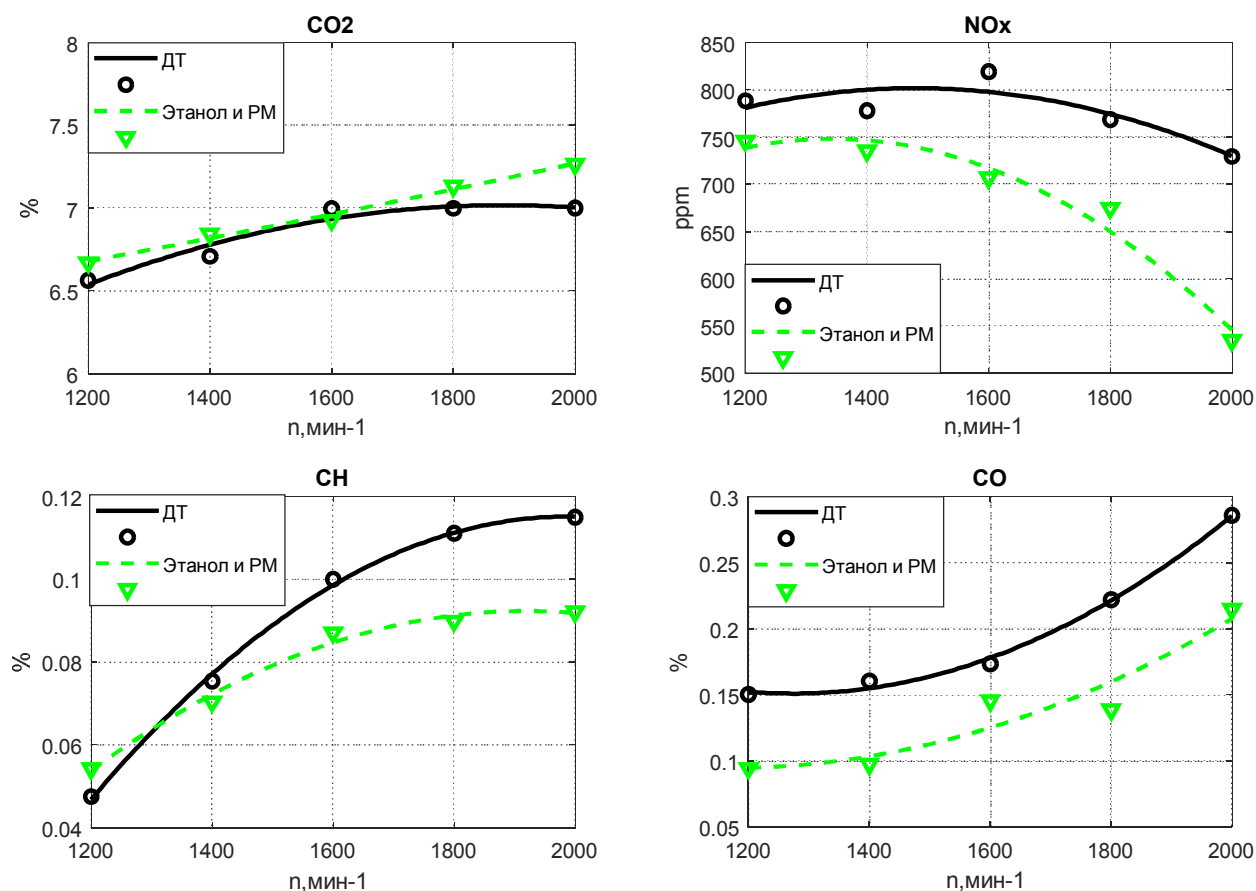


Рисунок 4.22 - Влияние применения этанола и РМ на экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения частоты вращения.

С увеличением частоты вращения коленчатого вала дизеля снижается концентрация оксидов азота NO_x в ОГ. На всем диапазоне скоростей концентрация NO_x при работе двигателя на альтернативных топливах ниже. На номинальном режиме и режиме максимального крутящего момента снижение достигает 28,5 и 6,1% соответственно.

Концентрация CO_2 существенно не изменяется, некоторое увеличение со-

держание CO_2 в ОГ вызвано снижением коэффициента наполнения с ростом частоты вращения коленчатого вала дизеля. Также рост частоты сопровождается почти двукратным ростом содержания CO . Содержание продуктов неполного сгорания при работе дизеля на альтернативных топливах ниже, чем при работе на ДТ. С увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя замедляется рост содержания углеводородов C_xH_y и сажи в ОГ.

4.6 Влияние применения этанола и РМ на показатели процесса сгорания и сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала дизеля

С увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя монотонно снижается максимальная осредненная температура газов в цилиндре как при работе на ДТ, так и при работе на альтернативном топливе (рисунок 4.23). Однако значение T_{max} при работе на этаноле и РМ на всем диапазоне частот выше, чем при работе на ДТ на 100-150 К.

Значение максимального давления сгорания p_z падает с 8,15 МПа при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 6,44 МПа при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ при работе на этаноле и РМ. Максимальное давление в этих точках при работе дизеля на ДТ составляет 7,75 и 7,14 МПа соответственно. Падение давления с увеличением частоты вращения коленчатого вала дизеля связано с изменением количества тепла, подводимого в кинетической фазе сгорания из-за уменьшения времени, отводимого на процессы смесеобразования и испарения топлива. Кроме того, на низких частотах вращения коленчатого вала процесс сгорания смещается к ВМТ из-за сокращения ПЗВ. Угол п.к.в. максимального давления в цилиндре при работе на этаноле и РМ изменяется в диапазоне от 2 до 13 градусов п.к.в., что говорит о значительном влиянии частоты вращения коленчатого вала на процесс сгорания и снижении эффективности работы дизеля на скоростных режимах при $n > 1800 \text{ мин}^{-1}$. Пик давления в цилиндре при работе дизеля на ДТ лежит в диапазоне от 5 до 6 град. п.к.в. на всем диапазоне частот.

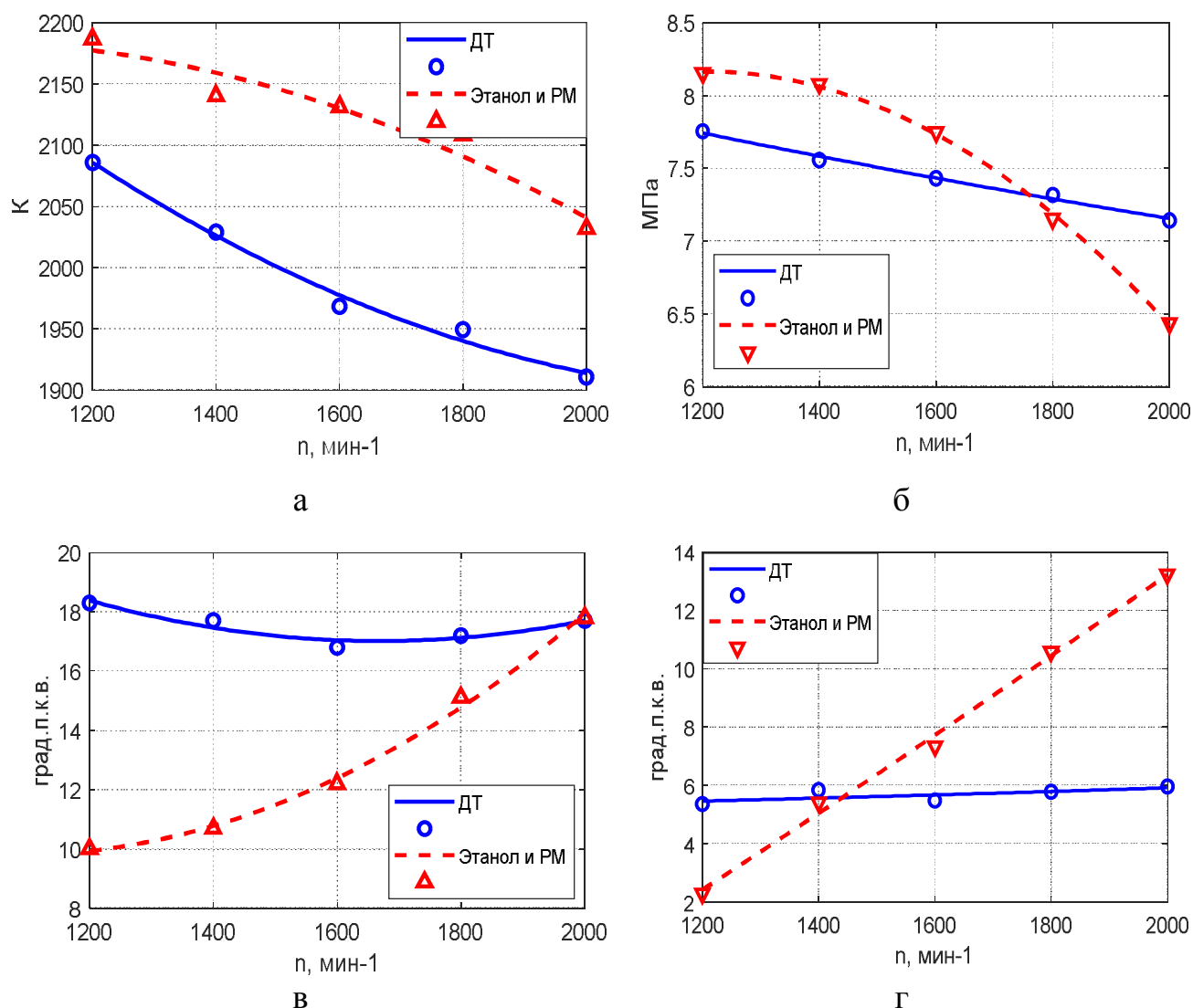


Рисунок 4.23 – Показатели процесса сгорания при работе дизеля на ДТ и этаноле и РМ в зависимости от частоты вращения коленчатого вала дизеля:

а – максимальная осредненная температура газов в цилиндре, К;

б – максимальное давление газов в цилиндре, МПа;

в – угол град. п.к.в., соответствующий максимальной осредненной температуре газов в цилиндре;

г – угол град. п.к.в., соответствующий максимальному давлению в цилиндре

Близость угла максимальной температуры к ВМТ при работе дизеля на малых частотах на этаноле и РМ объясняется короткой фазой интенсивного тепловыделения при сгорании этанола.

Ранняя инициация сгорания в цилиндре вызывает смещение начала сажеобразования (рисунок 4.24). При этом существенно растет масса сажи в цилиндре. С одной стороны, увеличивается продолжительность подачи топлива, что негативно отражается на качестве топливного факела, уменьшается степень

турбулизации заряда. С другой стороны, растет длительность всех внутрицилиндровых процессов, в том числе испарения, сгорания и газификации. На высоких частотах наблюдается ухудшение наполнения цилиндра свежим зарядом и падение КИВ. Это приводит к росту концентрации сажи в цилиндре на ранних стадиях сгорания.

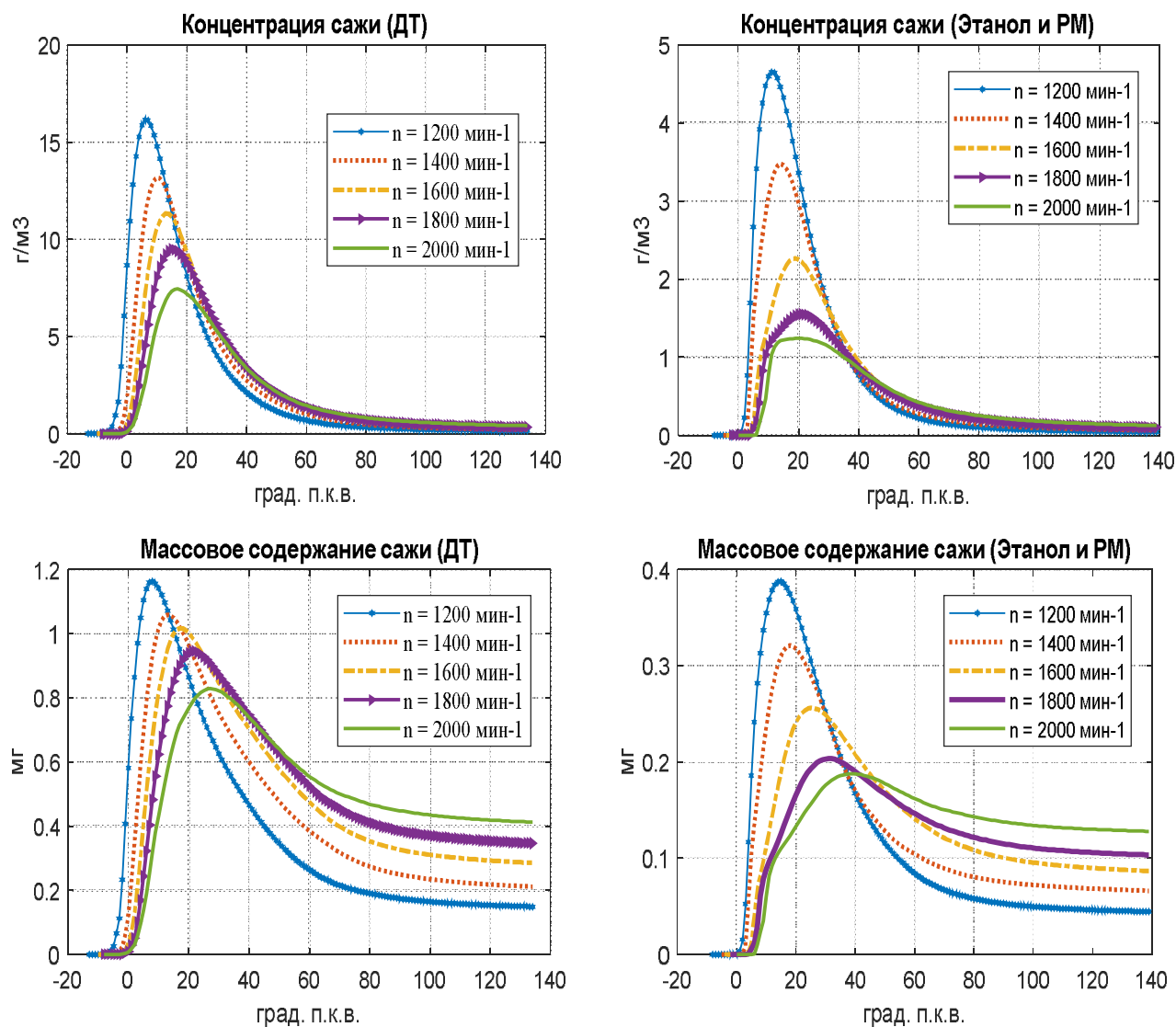


Рисунок 4.24 – Показатели сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в. при работе дизеля на ДТ и этаноле и РМ на различных скоростных режимах работы

Рост частоты вращения коленчатого вала двигателя вызывает смещение функции испарения топлива в цилиндре на более поздние углы п.к.в., и, несмотря на увеличение ПЗВ, снижается масса топлива, сгорающего в гомогенной ТВС. Процесс диффузионного сгорания продлевается на поздние углы п.к.в.,

что обуславливает дополнительную эмиссию сажи в зоне пиролиза топлива.

Также с повышением частоты вращения коленчатого вала дизеля растет максимальное количество частиц сажи в цилиндре. Связано это с увеличением ПЗВ, накоплением в зоне пиролиза большего количества углеводородов (рисунок 4.25). Увеличение продолжительности диффузионного сгорания по углу п.к.в. замедляет эффект роста среднемассового диаметра частиц сажи за счет появления в зоне образования новых частиц.

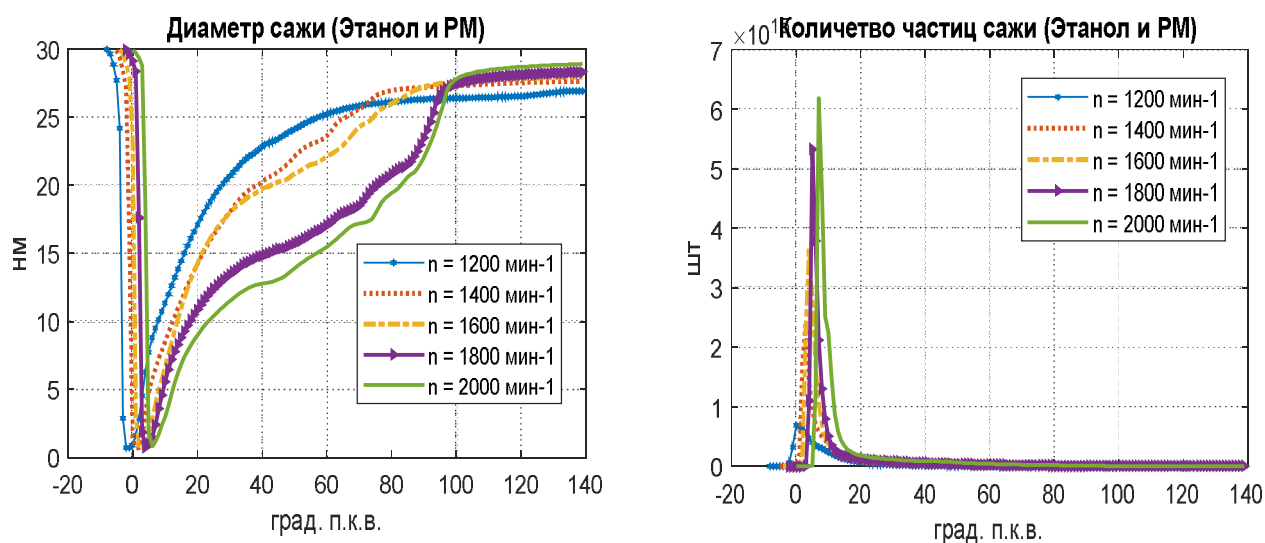


Рисунок 4.25 - Расчетные характеристики частиц сажи в цилиндре дизеля в зависимости от угла п.к.в. при работе дизеля на этаноле и РМ

На всех скоростных режимах работы двигателя на этаноле и РМ максимальная массовая концентрация и максимальное содержание сажи в цилиндре значительно меньше, чем при работе на ДТ.

Максимальная концентрация сажи в цилиндре снижается с увеличением частоты вращения коленчатого вала дизеля (рисунок 4.26). $[C]_{max} = 4,65 \text{ г/м}^3$ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ и $[C]_{max} = 1,24 \text{ г/м}^3$ при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Максимальная расчетная концентрация сажи при работе дизеля на ДТ падает с $16,1 \text{ г/м}^3$ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ и $7,4 \text{ г/м}^3$ при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Смещение угла п.к.в. максимальной концентрации сажи от ВМТ с ростом n составляет чуть более 8 градусов при работе дизеля на ДТ и этаноле и РМ. Максимальные значения массового содержания и массовой концентрации сажи в цилиндре при работе на ДТ достигаются раньше, чем при работе на этаноле и РМ.

Расчетная концентрация сажи в ОГ при работе двигателя на ДТ с увеличением частоты вращения коленчатого вала дизеля растет с $[C] = 0,159 \text{ г/м}^3$ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до $[C] = 0,472 \text{ г/м}^3$ при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Экспериментальная концентрация растет с $0,222 \text{ г/м}^3$ до $0,445 \text{ г/м}^3$ соответственно.

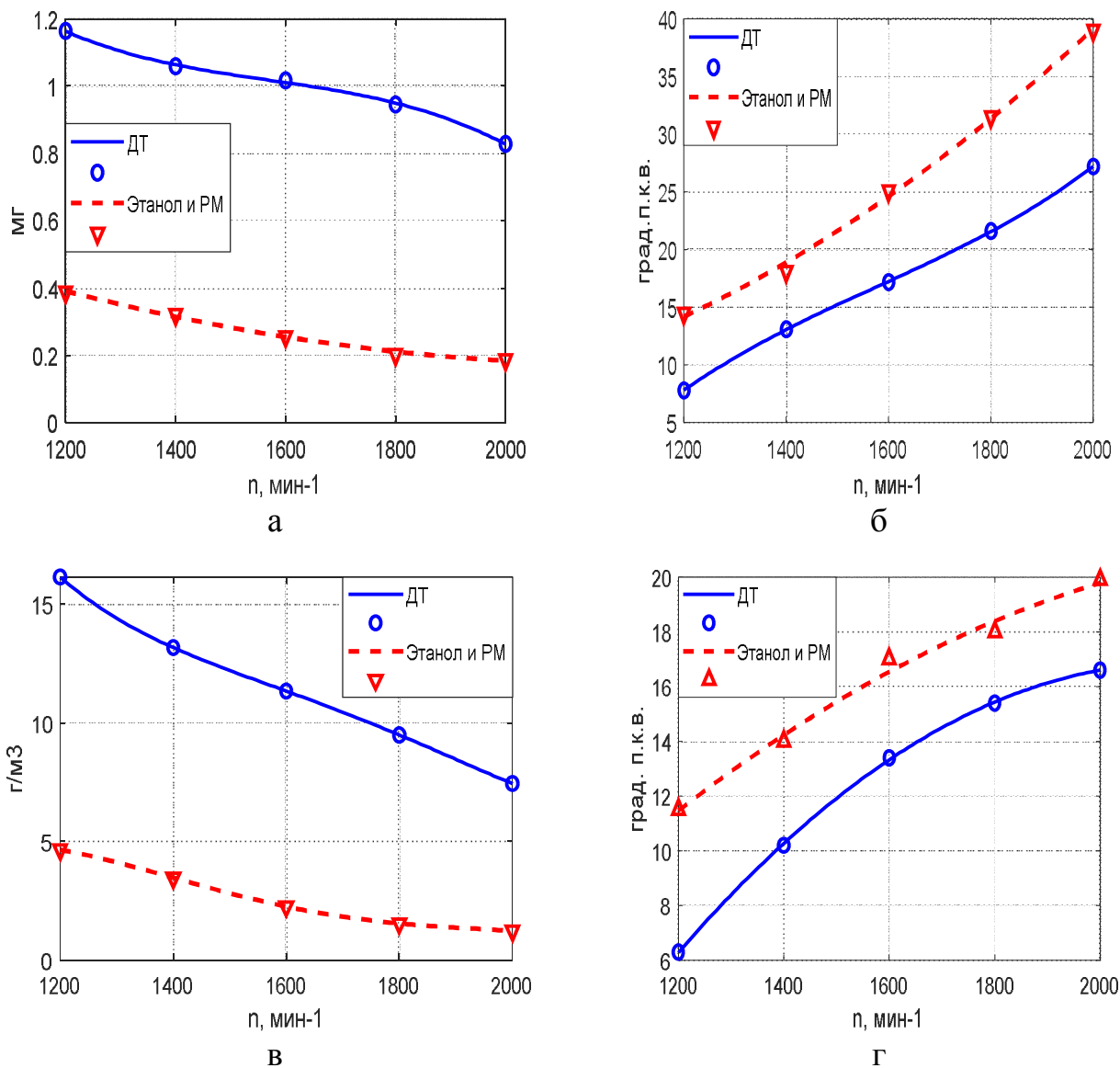


Рисунок 4.26 – Показатели сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от частоты вращения коленчатого вала:

- а – максимальное содержание сажи в цилиндре, мг;
- б – угол град. п.к.в., соответствующий максимальному содержанию сажи в цилиндре;
- в – максимальная концентрация сажи в цилиндре, г/м³;
- г – угол град. п.к.в., соответствующий максимальной концентрации сажи в цилиндре

При работе дизеля на этаноле и РМ расчетная концентрация сажи в ОГ

составляет $0,056 \text{ г/м}^3$ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$. При $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ расчетная массовая концентрация сажи в ОГ растет до $0,151 \text{ г/м}^3$. Экспериментальная концентрация сажи в ОГ при работе на этаноле и РМ $[C] = 0,069 \text{ г/м}^3$ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$, но при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ $[C] = 0,119 \text{ г/м}^3$.

На всем диапазоне частот вращения коленчатого вала дизеля наблюдается снижение дымности ОГ при работе дизеля на РМ и этаноле. На частоте 1200 мин^{-1} массовая концентрация сажи в ОГ сокращается в 3,2 раза, при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ концентрация сажи в ОГ уменьшается в 3,8 раза (рисунок 4.27).

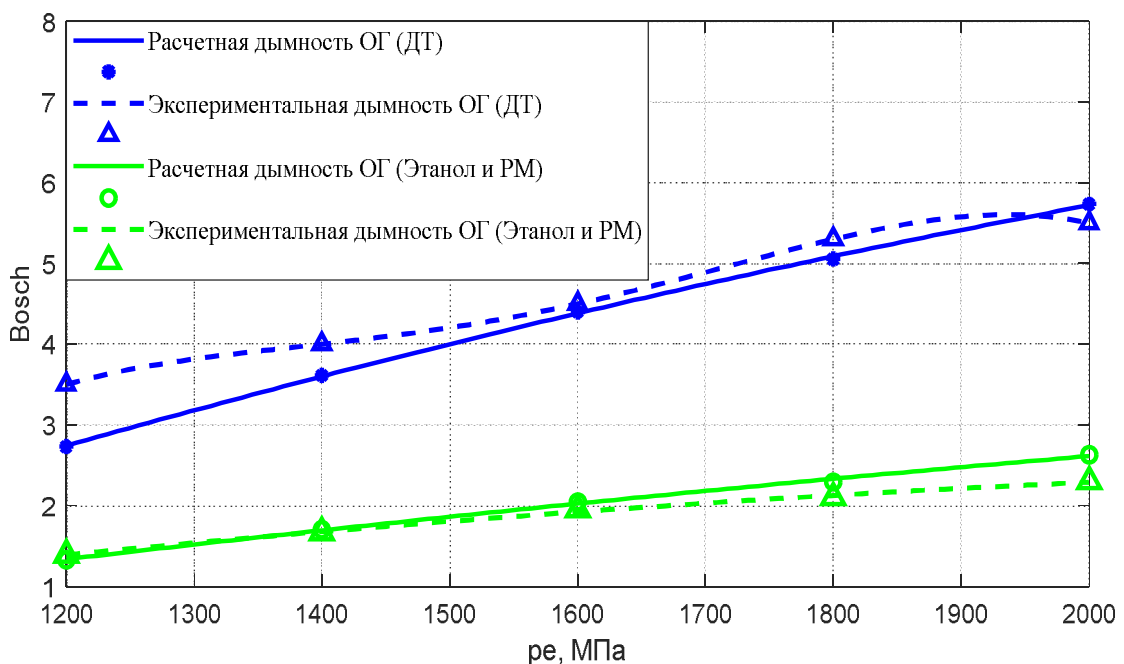


Рисунок 4.27 – Экспериментальная и расчетная дымность ОГ дизеля в зависимости от частоты вращения коленчатого вала дизеля

С увеличением частоты вращения коленчатого вала дымность дизеля растет как при работе на ДТ, так и на РМ с этанолом. При работе на ДТ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ дымность ОГ равна $C = 3,7$ ед. по шкале Bosch, при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ $C = 5,6$ ед. по шкале Bosch. При работе на этаноле и РМ $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ дымность ОГ равна $C = 1,6$ ед. по шкале Bosch, при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ $C = 2,4$ ед. по шкале Bosch.

Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Исходя из теоретических расчетов, дымность ОГ демонстрирует более интенсивный рост с увеличением частоты вращения коленчатого вала

дизеля.

Таким образом, применение этанола и РМ с отдельной топливной подачей позволяет не только сохранить его эффективные показатели работы дизеля, но и снизить концентрацию токсичных компонентов ОГ, таких как NO_x и сажа, на всех скоростных режимах работы двигателя при цикловых подачах этанола и РМ соответствующих номинальному режиму работы.

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 усовершенствована и оформлена в виде программного комплекса 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 п.к.в. 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 $p_e = 0,588 \text{ МПа}$ дым-

ность 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 снизилась 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 и выходных параметров, и может быть использована и модернизирована для моделирования процессов в КС других типов дизелей, работающих на традиционном и других альтернативных топливах.

Список сокращений и условных обозначений

1. ВМТ - верхняя мертвая точка
2. ДВС - двигатель внутреннего сгорания
3. ДТ - дизельное топливо
4. КС - камера сгорания
5. КПД - коэффициент полезного действия
6. КИВ – коэффициент избытка воздуха
7. НМТ - нижняя мертвая точка
8. НТФМ – низкотемпературный фенильный механизм
9. ОГ - отработавшие газы
10. ПАУ – полициклические ароматические углеводороды
11. ПЗВ – период задержки воспламенения
12. п.к.в. - поворот коленчатого вала
13. РМ - рапсовое масло
14. ТНВД - топливный насос высокого давления
15. ТЧ – твердые частицы
16. ТВС – топливовоздушная смесь
17. УУОВ – установочный угол опережения впрыска
18. NO_x - оксиды азота, %, ppm, г/(кВт·ч)
19. CO - оксид углерода, %, ppm, г/(кВт·ч)
20. CO_2 - диоксид углерода, %, ppm, г/(кВт·ч)
21. CH_x - углеводороды, %, ppm, г/(кВт·ч)
22. S - дымность, ед. по шкале Bosch
23. $[C]$ – концентрация сажи в цилиндре, г/м³
24. $[C]_{max}$ – максимальная концентрация сажи в цилиндре, г/м³
25. N – массовое содержание сажи в цилиндре, мг
26. p_e - среднее эффективное давление, МПа
27. p – давление газов в цилиндре, МПа
28. p_z - максимальное давление газов в цилиндре, МПа

29. $\Theta_{PM}, \Theta_{\text{Э}}$ - УУОВ РМ и этанола соответственно, градус
30. φ - угол п.к.в., градус
31. t_T - температура отработавших газов, °С
32. T - осредненная температура газов в цилиндре, К
33. T_{max} - максимальная осредненная температура газов в цилиндре, К
34. n - частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹
35. N_e - эффективная мощность дизеля, кВт
36. M_k - крутящий момент дизеля, Н·м
37. G_B - часовой расход воздуха, кг/ч
38. G_{DT} - часовой расход дизельного топлива, кг/ч
39. $G_{\text{Э}}$ - часовой расход этанола, кг/ч
40. G_{np} - приведенный расход топлива, кг/ч
41. G_{PM} - часовой расход запального РМ, кг/ч
42. q_z – цикловая подача запального топлива, мг/цикл
43. $g_{e\Sigma}$ - суммарный удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)
44. g_{en} – приведенный удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)
45. α - коэффициент избытка воздуха
46. η_e - эффективный коэффициент полезного действия
47. $d\chi/d\varphi$ – скорость тепловыделения, град⁻¹
48. χ – интегральная функция тепловыделения в цилиндре

Список литературы

1. Агафонов, Г.Л. Численное моделирование снижения образования твердых частиц сажи в камере сгорания дизелях [Текст] / Г.Л. Агафонов, П.А. Власов, О.Б. Рябиков // Горение и взрыв. – 2017. – Т. 10. № 3. – С. 15-21.
2. Арасланов, М.И. Определение оптимальных установочных углов опережения впрыска этанола дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле [Текст] / М.И. Арасланов, А.Н. Козлов, В.А. Лиханов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им Н.И. Вавилова. - 2014. - № 6. – С.47-50.
3. Арасланов, М.И. Работа дизеля на этаноле и рапсовом масле: монография [Текст] / В.А. Лиханов, А.Н. Козлов, М.И. Арасланов. - Киров: Вятская ГСХА, 2018. – 172 с.
4. Ассад, М.С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент [Текст] / М.С. Ассад, О.Г. Пенязьков. – Минск: Беларуская наука, 2010. – 305 с. – ISBN 978-985-08-1143-1.
5. Баранов, Н.А. Разработка методов и проведение экспериментальных исследований на двигателе условий образования и физических свойств дизельной сажи [Текст]: дис. ... канд. наук: 05.04.02 / Баранов Николай Анисимович. – Л., 1981. – 142 с.
6. Батурин, С.А. Физические основы и математическое моделирование процессов сажевыделения и теплового излучения в дизелях [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 / Батурин Сергей Ануфриевич. – Л., 1982. – 441 с.
7. Беляев, С.В. Влияние экологических стандартов ЕВРО на выбросы токсичных веществ автомобилей [Текст] / С.В. Беляев, Г.А. Давыдков, С.А. Кипелайнен // Новые материалы и технологии в машиностроении. - 2012. - № 15. - С. 216-219.
8. Березкин, В.И. Фуллерены как зародыши сажевых частиц [Текст] / В.И. Березкин // Физика твердого тела. – 2000. – Т.42, вып.3. – С. 567-572.
9. Бубнов, Д.Б. Адаптация дизеля сельскохозяйственного трактора для работы на рапсовом масле [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 /

Бубнов Дмитрий Борисович. - Москва, 1996. - 17 с.: ил.

10. Вальехо, П. Применение раздельной подачи топлива растительного происхождения в малоразмерный дизель с целью улучшения его экологических показателей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Вальехо П. – М.: Изд-во РУДН, 2000. – 16 с.

11. Веденеев, В.И. Константы скорости газозольных мономолекулярных реакций [Текст] / В.И. Веденеев, А.А. Кибало. - М.: Наука, 1972. – 164 с.

12. Влияние формы камеры сгорания на образование оксидов азота и сажи в цилиндре дизеля легкового автомобиля [Текст] / С.С. Сергеев, Р.З. Кавтардзе // В сборнике: Труды VI Российской национальной конф. по теплообмену. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. - С. 487-490.

13. Влияние этанола и рапсового масла на показатели процесса сгорания дизеля [Текст] / М.И. Арасланов [и др.] // Строительные и дорожные машины. - 2016. - № 11. - С. 50-52.

14. Воинов, А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях [Текст] / А.Н. Воинов. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.

15. Вылегжанин, П.Н. Снижение дымности отработавших газов тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения природного газа [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. / Вылегжанин Павел Николаевич. - Киров, 2003. – 204 с.

16. Гаврилов, Б. Г. Химизм предпламенных процессов в дизелях [Текст]: монография / Б.Г. Гаврилов. - Издательство Ленинградского университета, 1979. – 180 с.

17. Галышев, Ю.В. Расчет количества сажи, образующейся в дизельном двигателе [Текст] / Ю.В. Галышев, А.И. Макарин, А.А. Метелев // Неделя науки СПбГПУ. Материалы науч.-практ. конф. с международным участием: сб. науч. тр. – Институт энергетики и транспортных систем, 2014. – С. 13-15.

18. Гладышев, А.В. Разработка экспериментально-расчетного метода исследования мгновенных полей температуры и концентрации сажи в цилиндре дизеля [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Гладышев Алек-

сандр Валентинович. - Ленинград, 1990. - 16 с.

19. ГОСТ 17.2.2.01-84 Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 11 с.

20. ГОСТ 17.2.2.02-98 Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1998. - 11 с.

21. ГОСТ 18509-88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 34 с.

22. ГОСТ 24028-2013. Межгосударственный стандарт. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения [Текст]. - Введ. 06.09.2013. - М.: Стандартиформ, 2014. – 22 с.

23. ГОСТ 305-2013 Межгосударственный стандарт. Топливо дизельное. Технические условия. – Введ. 01.01.2015. - М.: Стандартиформ, 2014. – 11 с.

24. ГОСТ 31759-2012. Межгосударственный стандарт. Масло рапсовое. Технические условия [Текст]. – Введ. 29.11.2012. – М.: Стандартиформ, 2013. – 20 с.

25. ГОСТ 8581-78. Межгосударственный стандарт. Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия. – Введ. 04.08.1978. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 8 с.

26. ГОСТ Р 17.2.2.07-2000 Охрана природы. Атмосфера. Поршневые двигатели внутреннего сгорания для малогабаритных тракторов и средств малой механизации. Нормы и методы измерения выбросов вредных веществ с отработавшими газами и дымности отработавших газов [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2000. - 16 с.

27. ГОСТ Р 41.96-2011 Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2011. - 65 с.

28. ГОСТ Р 55878-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Спирт этиловый технический гидролизный ректифицированный. Технические условия [Текст]. – Введ. 22.11.2013. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.

29. ГОСТ Р ИСО 8178-7-99 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2000. -15 с.

30. Гоц, А.Н. Погрешности при экспериментальных исследованиях двигателей внутреннего сгорания [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Гоц, Ю.Г. Горнушкин. – Владимир: Владим. Гос. ун-т., 2003. – 64 с.

31. Грановский, Э.А. Роль сажи в распространении ламинарного пламени распада ацетилена [Текст] / Э.А. Грановский, В.Г. Кнорре, П.А. Теснер // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12. № 5. – С. 719–724.

32. Гребнев, А.В. Алгоритм расчёта характеристик тепловыделения дизеля [Текст] / А.В. Гребнев // Наука нового века – знание молодых. Материалы Международной науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и соискателей: сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2. Технические и экономические науки. - Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – С. 7 - 8.

33. Гремячкин, В.М. Гетерогенное горение частиц твердых топлив [Текст] / М.В. Гремячкин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 230 с.

34. Гуреев, А.А. Исследование влияния свойств топлива на сажеобразование [Текст] / А.А. Гуреев, В.З. Махов, М.М. Ховах // Автотракторные двигатели внутреннего сгорания: тр. МАДИ. – 1975. – Вып. 92. – С.29-38.

35. Денисова, Е.С. Аккумуляция некоторыми сельскохозяйственными растениями техногенной пыли сажевых заводов [Текст] / Е.С. Денисова // Омский научный вестник. – 2014. - №2. – С. 196 – 199.

36. Джувеликян, Х.А. Роль автомобильного транспорта в загрязнении воздушного бассейна города и влияние его на здоровье граждан [Текст] / Х.А. Джувеликян // Вестник Воронежского гос. университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. - 2006. - № 2. - С. 133-135.

37. Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода [Текст] / В.В. Эфрос [и др.]. – М.: Изд-во УДН, 1986. – 277 с.

38. Дизельное смесевое топливо [Текст]: монография / А.П. Уханов [и др.]. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – 147 с.

39. Единая кинетическая модель сажеобразования при пиролизе и окислении алифатических и ароматических углеводородов в ударных волнах [Текст] / Г.Л. Агафонов [и др.] // Горение и взрыв. - 2015. - Т.8. № 1. - С. 80-88.

40. Ефанов, А.А. Улучшение экологических характеристик дизеля регулированием состава смесевого биотоплива [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. / Ефанов Алексей Александрович. – М.: ВИМ, 2008. – 16 с.

41. Жосан, А.А. Альтернативные возобновляемые топлива [Текст] / А.А. Жосан, Ю.Н. Рыжов, А.А. Курочкин // Энергосберегающие технологии и техника в сфере АПК: материалы к межрегиональной конференции 17-19 ноября 2010 г. (сборник) / под редакцией д.т.н., проф. С.А. Родимцева, к.т.н., ст. преподав. В.В. Гончаренко. – Орел: изд-во ОрелГАУ, 2011. – С. 296-299.

42. Жосан, А.А. Сравнение физико-химических свойств дизельного топлива и рапсового масла [Текст] / А.А. Жосан, Ю.Н. Рыжов, А.А. Курочкин // Вестник ОрёлГАУ. – 2011.- №4. – С. 72-73.

43. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях [Текст] / В.А. Марков [и др.]. – М.: Инженер: Оникс-М, 2011. – 534 с.

44. К вопросу о механизме образования сажевых частиц [Текст] / А.В. Крестинин, М.Б. Кислов, А.В. Раевский [и др.] // Кинетика и катализ. – 2000. - №1. – С. 102 – 121.

45. Карташевич, А.Н. Использование смесевых топлив на основе рапсового масла для сельскохозяйственных тракторов [Текст] / А.Н. Карташевич, В.С. Товстыга. – Горки: БГСХА, 2012. – 212 с.: ил. – ISBN 978-985-467-360-8.

46. Кинетика сажеобразования из газообразных углеводородов [Текст] / В.Г. Кнорре [и др.] // Кинетика химических реакций: материалы VI Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. – Алма-Ата; Черноголовка: Ин-т. хим. физи-

ки АН СССР, 1980. – С.75-78.

47. Кнорре, В.Г. Образование сажи при детонации ацетилена [Текст] / В.Г. Кнорре, М.С. Копылов, П.А. Теснер // ФГВ. – 1974. – Т.10. №5. – С. 767-774.

48. Кожин, Д. В. Физико-химические основы математического моделирования процесса образования и выгорания сажи в дизельных ДВС: монография [Текст] / Д. В. Кожин. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – 176 с.

49. Козлов, А. Н. Влияние применения рапсового масла и этанола на дымность отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 на различных нагрузочных режимах работы [Текст]/ А.Н. Козлов, В.А. Лиханов, М.И. Арасланов // Основные направления развития техники и технологии в АПК: материалы и доклады VII Всероссийской науч.-практ. конф. – Княгинино: НГИЭУ, 2016. – С. 144 – 148.

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

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

52. Козлов, А.Н. Химизм образования сажи в цилиндре при работе дизеля на рапсовом масле и этаноле [Текст] / А.Н. Козлов, М.И. Арасланов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной науч.-практ. конф. «Наука – Технология - Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. – Киров: Вятская ГСХА, 2016. – Вып. 12. - С. 189-195.

53. Козлов, А.Н. Эффективные показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле с двойной системой топливоподачи [Текст] / А.Н.

Козлов, В.А. Лиханов, М.И. Арасланов // Тракторы и сельхозмашины. - 2014. - № 07. - С. 5-7.

54. Кокурин, А.Д. Переходные формы углерода и их графитация [Текст] / А.Д. Кокурин // Журн. Всесоюз. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 1979. – Т.24, №6. – С. 594 – 602.

55. Кокурин, А.Д. Химические процессы в углеводородных пламенах [Текст] / А.Д Кокурин // Процессы горения в химической технологии и металлургии. – Черногловка: Ин-т хим. физики АН СССР, 1975. – С. 217-226.

56. Коноваленко, Л.Ю. Использование отходов пищевой промышленности для получения альтернативных видов топлива [Текст] / Л.Ю. Коноваленко. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. – 44 с.

57. Коротких, Ю.С. Экологический стандарт ЕВРО-6 в Европе и России [Текст] / Ю.С. Коротких // Управление рисками в АПК. - 2016. - № 1. - С. 34-40.

58. Коршунов, Д.А. Улучшение эксплуатационных показателей транспортного дизеля путем использования биотоплив на основе рапсового масла [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн наук: 05.04.02 / Д.А.Коршунов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 16 с.

59. Кочетков, М.Н. Разработка технических средств обеспечения энергоавтономности сельскохозяйственного предприятия при замещении дизельного топлива рапсовым маслом [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.Н. Кочетков. – Москва, 2010. – 19 с.

60. Крестинин, А.В. Образование сажевых частиц как процесс химической конденсации полиинов [Текст] / А.В. Крестинин //Химическая физика. - 1998. – Т. 17. № 8. – С. 41–56.

61. Крестинин, А.В. Кинетика образования сажевых частиц при пиролизе углеводов: полииновая модель сажеобразования [Текст]: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.17 / А.В. Крестинин. - Черногловка: ИПХФ, 2000. – 128 с.: ил.

62. Ксенофонтов, С.И. Образование активных центров в саже [Текст] / С.И. Ксенофонтов, О.В. Васильева // Actualscience. - 2015. - Т. 1. № 4 (4). - С. 58-61.

63. Кулешов, А.С. Программа расчёта и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач [Текст] / А.С. Кулешов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 123 с.

64. Кулешов, А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 / Кулешов Андрей Сергеевич. – Москва, 2011. – 32 с.

65. Кулманаков, С.П. Особенности рабочего процесса дизельного двигателя при использовании смесей рапсового масла и дизельного топлива [Текст] / С.П. Кулманаков, Р.С. Семенов // Ползуновский вестник. - 2007. – №4. - С. 55-58.

66. Кульчицкий, А.Р. Исследование процессов образования и разработка методов снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей внедорожных машин [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 / Кульчицкий Алексей Рэмович. – Владимир, 2006. – 35 с.

67. Лиханов, В.А. Исследование процессов образования и выгорания сажи в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе [Текст]: монография / В.А. Лиханов, В.Г. Мохнаткин, А.В. Россохин. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 124 с.

68. Лиханов, В.А. Исследование рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле с двойной системой топливоподачи [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.Н. Чувашев. - Киров: Вятская ГСХА, 2007. – 129 с.

69. Лиханов, В.А. Исследование рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле с двойной системой топливоподачи [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.С. Полевщиков. – Киров: Вятская ГСХА, 2011. – 146 с.

70. 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] / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых; под. общ. ред. проф. В.А. Лиханова. – Киров: Вятская ГСХА, 2016. – 138 с.

71. Лиханов, В.А. Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5

при использовании в качестве топлива этанола-топливной эмульсии [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.И. Чупраков; под общ. ред. В.А. Лиханова. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – 146 с.

72. Лиханов, В.А. Рост, коагуляция и агрегация сажевых частиц в цилиндре газодизеля [Текст] / В.А. Лиханов, В.А. Кузьмин // Совершенствование технологий и технических средств в сельскохозяйственном производстве: тез. докл. науч. конф. инж. факульт. ВГСХА. – Киров, 1999. – С. 67-69.

73. Лиханов, В.А. Сгорание и сажеобразование в цилиндре газодизеля [Текст] / В.А. Лиханов. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. - 104 с.

74. Лиханов, В.А. Снижение дымности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле с двойной системой топливоподачи [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.А. Глухов; под общ. ред. В.А. Лиханова. – Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 139 с.

75. Лиханов, В.А. Снижение дымности отработавших газов дизеля 4Ч11,0/12,5 путем применения этанола-топливных эмульсий [Текст]: монография / В.А. Лиханов, И.М. Шаромов. – Киров: Вятская ГСХА, 2012. – 144 с.

76. Лиханов, В.А. Снижение токсичности автотракторных дизелей [Текст] / В.А. Лиханов, А.М. Сайкин. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Колос, 1994. – 224 с.

77. Лиханов, В.А. Снижение токсичности и улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путём применения метанола [Текст]: монография / В.А. Лиханов. - Киров: Вятская ГСХА, 2001. - 212 с.

78. Лиханов, В.А. Улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на метанола-топливной эмульсии путем снижения дымности отработавших газов [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.Е. Торопов; под общ.ред. В.А. Лиханова. – Киров: Вятская ГСХА, 2010. – 142 с.

79. Лиханов, В.А. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения альтернативных топлив [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 / Лиханов Виталий Анатольевич. - Киров, 1999. - 589 с.

80. Ложкин, В.Н. Исследование динамики и термических условий сажеобразования при сгорании распыленного топлива в цилиндре дизелей [Текст]:

дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Ложкин. – Л., 1978. – 228 с.

81. Лоскутов, А.С. Исследование механизмов образования топливных окислов азота и сажи в цилиндре дизеля [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.С. Лоскутов. – Л., 1982. – 293 с.

82. Лоскутов, А.С. Математическая модель начальной стадии процесса образования полидисперсной сажистой фазы в дизелях [Текст] / А.С. Лоскутов // Тр. Алтайского ПИ им. И.И. Ползунова. – 1989. – Вып. 9 – С. 10-31.

83. Макрокинетическая модель для расчета эмиссии сажи в дизеле [Текст] / В.Я. Басевич [и др.] // Горение и взрыв. - 2016. - Т. 9. № 3. - С. 36-46.

84. Мансуров, З.А. Сажеобразование в процессах горения (обзор) [Текст] / З.А. Мансуров // Физика горения и взрыва. – 2005. - №6. – С. 137-156.

85. Марков, В.А. Использование биодобавок растительного происхождения к топливу для снижения дымности отработавших газов дизелей [Текст] / В.А. Марков, Н.А. Иващенко, С.Н. Девянин // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2012. – № 12(99). - С. 5 - 9.

86. Марков, В.А. Исследование влияния некоторых конструкционных факторов на показатели дизеля, работающего на смесевом биотопливе [Текст] / В.А. Марков, А.С. Кулешов, В.Н. Афанасьев // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. - №7. – С. 3-11.

87. Марков, В.А. Оценка экологической безопасности силовых установок с дизельными двигателями / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.В. Маркова [Текст] // Безопасность в техносфере. — 2014. - № 2 . – С. 23 – 32.

88. Марьясин, И.Л. Исследование сажи, получаемой при пиролизе углеводородов в ударной волне [Текст] / И.Л. Марьясин, З.А. Набутовский // Химия твёрдого топлива. – 1972. – № 4. – С. 127–131.

89. Матвеев, С.Г. Взаимосвязь между выбросами сажи и бенз(а)пирена тепловыми двигателями на углеводородном топливе [Текст] / С.Г. Матвеев [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - 2009. - №3. – С. 210 – 214.

90. Математическая модель процесса сгорания в автотракторных двигателях / П.А. Болоев [и др.] // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. - 2010. - №38. - С. 36-40.

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

92. Матиевский, Д.Д. Анализ экономичности использования тепла в расчетном цикле ДВС [Текст] / Д.Д. Матиевский // Изв. вузов. Машиностроение. – 1981. - №8. – С. 71-74.

93. Матиевский, Д.Д. Влияние переменного состава топливо-воздушной смеси в зоне горения на сажевыделение, параметры рабочего цикла и индикаторный КПД цикла дизеля [Текст] / Д.Д. Матиевский, А.Е. Свистула // Ползуновский вестник. – 2002. - №1. – С. 10 – 16.

94. Мачульский, Ф.Ф. Дисперсность и структура дизельной сажи [Текст] / Ф.Ф. Мачульский // Токсичность двигателей внутреннего сгорания и пути её снижения. Симпозиум. – М., 1966. – С. 206-219.

95. Методика проведения стендовых испытаний дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на рапсовом масле и этаноле с использованием двойной системы топливоподачи [Текст] / А.Н. Козлов [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения: материалы Международной науч.-практ. конф. - Йошкар-Ола: Мар. Гос. ун-т, 2014. - Вып. XVI. – С. 202 -206.

96. Моделирование процессов смесеобразования и сгорания в дизеле с применением детального кинетического механизма окисления горючего [Текст]/ С.С. Сергеев [и др.] // Горение и взрыв. - 2018. – Т. 11. №2. - С. 88-98.

97. Мухина, Т.Н. Пиролиз углеводородного сырья [Текст] / Т.Н. Мухина, Н.Л. Барабанов, С.Е. Бабаш. – М.: Химия, 1987. – 240 с.

98. Мысник, М.И. Повышение экономичности и снижение вредных выбросов дизеля при работе на рапсовом масле [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.04.02 / М.И. Мысник. – Барнаул, 2015. – 16 с.

99. Нэджели, Д. У. Исследование в модельной камере сгорания тенденции к сажеобразованию топлив, содержащих полициклические ароматические углеводороды [Текст] / Д. У. Неджели, Л.Д. Додж, К.А. Мозек // Аэрокосм. техника. – 1983. – Т. 1, №10. – С. 153-162.

100. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив [Текст] / Ф.Г. Бакиров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 128 с.: ил.

101. Образование сажевых частиц при термическом разложении ацетилена [Текст] / П.А. Теснер [и др.] // Промысловая и заводская обработка природного газа: сб.; под ред. О.Ф. Худякова. – М.: ВНИИГАЗ, 1976. – С. 203–219.

102. Одинцов, В.И. Некоторые закономерности образования сажи в цилиндрах судовых дизелей [Текст] / В.И. Одинцов, Д.Ю. Глазков // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. - 2014. - № 3. – С. 83-88.

103. Определение размеров частиц сажи на различных участках системы выпуска дизеля [Текст] / В.А. Кузьмин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – Казань: Казанский гос. энергетический ун-т, 2013. – №.11-12. – С. 3 -10.

104. Пахомов, Ю.А. Основы научных исследований и испытаний тепловых двигателей. Учебник [Текст] / Ю.А.Пахомов. - М.: ТрансЛит, 2009. - 432 с.

105. Петренко, И.Г. Термодинамика реакций кислородсодержащих соединений алифатического ряда [Текст] / И.Г. Петренко, В.И. Филиппова. - М.: Наука, 1970. – 172 с.

106. Плотников, С.А. Улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем создания новых альтернативных топлив и совершенствования топливоподающей аппаратуры [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 / С.А. Плотников. – Нижний Новгород, 2011. – 39 с.

107. Пономарев, В.Е. Адаптация малоразмерного высокооборотного дизеля 1Ч 8/7,5 с непосредственным впрыском для работы на рапсовом масле [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02, 11.00.11 / В.Е. Пономарев. - Москва, 1998. - 19 с.

108. Применение спиртового топлива в дизелях [Текст] / М.М. Бендик,

В.М. Фомин, А.Г. Хайсам [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2003. - №8. – С. 10-13.

109. Прогноз рынка биотоплива в мире и в Российской Федерации. Аналитический обзор [Текст]. - М.: Российское энергетическое агентство, 2012. – 56 с.

110. Пушнин, В.П. Изменение дисперсности дизельной сажи при замене сорта топлива и введении присадок [Текст] / В.П. Пушнин, Д.О. Заонегин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2013.- №2. – С. 187-189.

111. Пушнин, В.П. Строение сферических наноразмерных частиц дизельной сажи [Текст] / В.П. Пушнин // Двигателестроение. – 2015. - № 1 (259). - С. 19 – 25.

112. Работа дизелей на нетрадиционных топливах [Текст] / В.А. Марков [и др.]. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.: ил.

113. Раздьяконова, Г.И. Дисперсный углерод [Текст] / Г.И. Раздьяконова. - Омск: Изд-во ОмГТУ. - 2013. — 231 с.

114. Раздьяконова, Г.И. Закономерности образования и физико-химические свойства электропроводного технического углерода, синтезированного методом термоокислительного пиролиза углеводородов в турбулентных потоках [Текст] / Г.И. Раздьяконова, В.А. Лихолобов // Каучук и резина. - 2013. - №3. – С. 16-19.

115. Разлейцев, Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н.Ф. Разлейцев. - Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. - 169 с.

116. Распоряжение Правительства Российской Федерации «О Транспортной стратегии Российской Федерации» [Текст]: утв. 22.11.2008 г. (ред. от 11.06.2014). - № 1734-р.

117. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [Текст]: утв. 13.11.2009 г. - № 1715-р.

118. Россохин, А.В. Особенности расчета сажевыделения в дизелях [Текст] / А.В. Россохин // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение»: Сборник научных трудов. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2013. – Вып.11. – С. 280 - 284.

119. Россохин, А.В. Улучшение экологических показателей дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе путем снижения дымности отработавших газов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Россохин Алексей Валерьевич. – Киров, 2006. – 178 с.

120. Руднев, Б.И. Экспериментальное исследование оптических характеристик и наноструктур частиц сажи судового дизеля [Текст] / Б.И. Руднев // Транспортное дело России. - 2015. - № 6. - С. 134-135.

121. Рыжов, Ю.Н. Особенности впрыска и горения рапсового масла и дизельного топлива в современных двигателях [Текст] / Ю.Н. Рыжов, А.А. Жосан, А.А. Курочкин // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. - №6. – С. 19-20.

122. Савельев, Г.С. Биологическое моторное топливо для дизелей на основе рапсового масла [Текст] / Г.С. Савельев, Н.В. Краснощеков // Тракторы и сельхозмашины. – 2005. - № 10. - С. 11-14.

123. Свистула, А.Е. Снижение сажевыделения и расхода топлива в дизеле присадкой газа и воды к топливу [Текст] / А.Е. Свистура // Ползуновский вестник. – 2007. - №4. – С. 95-104.

124. Семёнов, В.Г. Влияние физико-химических показателей биодизельного топлива на параметры дизеля и его эколого-эксплуатационные характеристики [Текст] / В.Г. Семёнов, С.В. Рудаченко // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. - №1. – С. 8 – 10.

125. Семенов, Н.Н. Цепные реакции [Текст] / Н.Н. Семенов. - Л.: ОНТИ, Госхимтехиздат, 1934. – 555 с.

126. Сергеев, С.С. Исследование процессов сгорания и образования вредных веществ в цилиндре быстроходного дизеля на базе трехмерной модели рабочего процесса / С.С. Сергеев, Р. З. Кавтарадзе // Горение и взрыв. – 2015. - Т.8. № 2. – С. 97-105.

127. Сергеев, С.С. Снижение концентрации оксидов азота и сажи в отработавших газах дизеля путем усовершенствования рабочего процесса [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / С. С. Сергеев. - Москва, 2011. - 16 с.

128. Сеницын, В.А. Экологические показатели вредных выбросов при работе на смесевых биотопливах [Текст] / В.А. Сеницын, С.С. Кулманаков // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолГТУ, 2012. - № 12 (99). – С. 18 -22.

129. Слепцов, О. Н. Эффективность применения топлив растительного происхождения в АПК [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / О. Н. Слепцов. - Москва, 2007. - 18 с.

130. Снегирёва, Т.Д. Кинетика образования сажевых частиц в ацетилен-водородном диффузионном племени [Текст] / Т.Д. Снегирева, П.А. Теснер // Переработка и использование природного газа: труды ВНИИГАЗ. – М.: Недра, 1969. – Вып. 40/48. – С. 3–8.

131. Снижение нагарообразования при работе дизеля на рапсовом масле с наноконпозицией [Текст] / Г.С. Савельев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. - №10. – С. 10-13.

132. Состав и концентрация твердых частиц в отработавших газах как критерии технического состояния двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Л.Н. Третьяк, А.С. Вольнов, Д.А. Косых // Фундаментальные исследования. - 2015. - № 2 (Ч. 21). - С. 4625-4634.

133. Сравнительные испытания альтернативных топлив для дизельных двигателей [Текст] / П. Вальехо, [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. -№6. – С. 59- 72.

134. Сравнительный анализ показателей дизельного двигателя, работающего на смесях нефтяного дизельного топлива и растительных масел [Текст] / В.А. Марков [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. "Машиностроение". - 2012. - Спец.выпуск № 7 "Теория и практика энергетического и транспортного машиностроения".- С. 59 – 73.

135. Сравнительный анализ технологий получения биотоплива для ди-

зельных двигателей [Текст]: научное издание / А.Н. Зазуля [и др.]. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – 96 с.

136. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст] / И.П. Суздаев. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.

137. Суровикин, В.Ф. Исследование процесса образования сажи при разложении углеводов в высокотемпературном турбулентном потоке продуктов полного горения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Ф. Суровикин. – М.: ВНИИГАЗ, 1965. –150 с.

138. Суровикин, В.Ф. Современные тенденции развития методов и технологии получения нанодисперсных углеродных материалов [Текст] // Российский химический журнал. – 2007. – Т. 51. № 4. – С. 92–97.

139. Теснер, П.А. Аналитическое описание процесса образования сажевых частиц при термическом разложении углеводов [Текст] / П.А. Теснер, В.Г. Кнорре // Физика горения и взрыва. – 1970. – Т. 6. № 3. – С. 386–390.

140. Теснер, П.А. Образование углерода из углеводов газовой фазы [Текст] / П.А. Теснер. – М.: Химия, 1972. – 136 с.

141. Уханов, А.П. Адаптация тракторного дизеля к работе на смесевом топливе [Текст] / А.П. Уханов, Д.А. Уханов, Е.А. Хохлова // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. - №10. – С.14-16.

142. Уханов, А.П. Биодиты – альтернативный вид моторного топлива для тракторных дизелей [Текст] / А.П. Уханов, Д.А. Уханов, В.А. Рачкин // Нива Поволжья. – 2009. - № 2 (11). - С. 71 - 76.

143. Уханов, А.П. Рапсовое биотопливо [Текст] / А.П. Уханов, В.А. Рачкин, Д.А. Уханов. – Пенза: РИО ПГСХА, 2008. – 229 с.

144. Фомин, В.М. Водород как химический реагент в кинетическом механизме образования углерода в дизеле [Текст] / В.М. Фомин, Р.Р. Хакимов, Д.В. Шевченко // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. - №3. - С. 10-13.

145. Фомин, В.М. Повышение эффективности тракторного дизеля, работающего на биотопливе [Текст] // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. - №5. –

С. 8-11.

146. Фомин, В.М. Совершенствование показателей работы тракторного дизеля на смесевом биодизельном топливе [Текст] / В.М. Фомин, Р. Атраш // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. - №5. – С. 5-10.

147. Фоминых, А.В. Исследование рабочего процесса дизеля 2Ч10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Фоминых Александр Валерьевич. – Санкт-Петербург, 2017. – 167 с.

148. Характеристики излучения частиц дизелей и газодизелей [Текст] / Н.А. Кутергина [и др.] // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы V Международной науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение», посвященной 60-летию инженерного факультета: сб. науч. тр. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – Вып. 10. – С. 40 – 45.

149. Характеристики процесса топливоподачи и показатели быстроходного дизеля, работающего на дизельном топливе и рапсовом масле [Текст] / С.В. Гусаков [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. - 2009. - №2. – С. 58-71.

150. Хеваге, Ч.А. Снижение выбросов сажи малоразмерного высокооборотного дизеля с непосредственным впрыском путем добавки рапсового масла в топливо [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02, 11.00.11 / Ч.А. Хеваге. - Москва, 1997. - 19 с.

151. Херд, Ч. Пиролиз соединений углерода [Текст]: монография / Ч. Херд. – Л.: Главная редакция химической литературы, 1938. – 778 с.

152. Химия горения [Текст] / У. Гардинер мл., Ю. Варнац [и др.]; перевод с английского под ред. У. Гардинера мл. – М.: Мир, 1988. – 464 с.

153. Хитрин, Л.Н. Об основных характеристиках процесса горения углерода [Текст] / Л.Н. Хитрин // Известия Академии наук СССР. – 1953. - №4. – С. 543 – 561.

154. Цыганков, Д.В. Исследование влияния оксигенатных присадок на

экономические и экологические показатели работы дизеля [Текст] / Д. В. Цыганков, А.М. Мирошников, И.Б. Текутьев // Вестник КузГТУ. - 2011. - № 1. - С. 98-99.

155. Шаромов, И.М. Образование бенз(а)пирена и зародышей сажи [Текст] / И.М. Шаромов, А.В. Зонов, А.И. Чупраков // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». – Киров: Вятская ГСХА, 2011. - С. 154-159.

156. Шашев, А.В. Совершенствование рабочего процесса дизеля с объемно-пленочным смесеобразованием при использовании в качестве топлива рапсового масла [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. / А.В. Шашев. – Барнаул: ВИМ, 2007. – 16 с.

157. Экспериментальная регистрация размеров частиц сажи в ДВС. Способы подготовки образцов [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Россохин, В.А. Кузьмин [и др.] // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы VI Международной науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2013. – Вып. 11. – С. 113 – 122.

158. Элементарные реакции и механизм пиролиза углеводородов [Текст] / Ю. П. Ямпольский. – М.: Химия, 1990. – 216 с.

159. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС [Текст] / Р.М. Петриченко, С.А.Батурин, Ю.Н. Исаков [и др.]. - Л.: Машиностроение, 1990. – 328 с.

160. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону [Текст] / Л.В. Гурвич [и др.]. - М.: Наука, 1974. - 351с.

161. Эффективные и экологические показатели дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на рапсовом масле и этаноле с ДСТ [Текст] / Р.Р. Деветьяров [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. 276-279.

162. Якимов, С.А. Исследование химии горения богатых углеводородных пламен [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Якимов Сергей Александрович. – Новосибирск, 2011. – 20 с.

163. Яковлев, В.В. Снижение содержания твердых частиц в отработавших газах дизеля [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Яковлев. – Барнаул, 2004. – 20 с.

164. Яндер, Х. Образование ионов, кластеров, нанотрубок и частиц сажи в углеводородном пламени [Текст] / Х. Яндер, Г.Дж. Вагнер // Физика горения и взрыва. - 2006. – № 6. – С. 81–88.

165. Alkidas, A.C. Relationship between smoke measurements and particulate measurements [Text] / A.C. Alkidas // SAE Techn. Pap. Ser. – 1984. – N 840412. – P. 1-9.

166. Barnard, J. A. The pyrolysis of ethanol [Text] / J. A. Barnard, H. W. D. Hughes // Trans. Faraday Soc. - 1960. № 56 - P. 55 – 63.

167. Bonne, U. Carbon formation in premixed flames [Text] / U. Bonne, K.H. Homann, H.Gg. Wagner // 10th Symposium (Int.) on Combustion «The Combustion Institute». – Pittsburg, 1965. – P. 503 –512.

168. Broome, D. The mechanisms of soot release from combustion of hydrocarbon fuels with particular reference to the diesel engine [Text] / D. Broome, I. Khan // Conf. on Air Pollution Control in Transport Engines. – London, 1971. – 14 p.

169. Catalytic conversion of rapeseed oil for the production of raw chemicals, fuels and carbon nanotubes over Ni-modified nanocrystalline and hierarchical ZSM-5 Applied Catalysis B [Text] / J.A. Botasa [et al.] // Environmental. - 2014. - V. 145. - P. 205-215.

170. Characteristics of evolution of in-cylinder soot particle size and number density in a diesel engine [Text] / N. Peiyong [et al.] // Fuel. – 2018. - V.228. – P.215–225.

171. Combustion Generated Fine Carbonaceous Particles [Text] / H. Bockhorn

[et al.] // Karlsruhe: Karlsruhe University Press, 2009. – 723 p.

172. Control of Soot Emission from Diesel Engines [Text] / Raed Al-Hasanat, Moh'd Qawasmi // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. - 2011. - V.5. - P. 77-82.

173. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC [Text] // Official Journal of the European Union, 2009. - P. 16-62.

174. Egolfopoulos, F.N. Experimental and numerical determination of laminar flame speeds: mixtures of C₂-hydrocarbons with oxygen and nitrogen [Text] / F.N. Egolfopoulos, D.L. Zhu, C.K. Law // Symp. (Int.) Combust. - 1991. - № 23 (1). - P. 471–478.

175. Feiyang, Z. Numerical modeling of soot formation and oxidation using phenomenological soot modeling approach in a dual-fueled compression ignition engine [Text] / Z. Feiyang, Y. Wenming // Fuel. – 2017. - V.188. – P. 382-389.

176. Frenklach, M. Reaction mechanism of soot formation in flames [Text] / M. Frenklach // J. Phys. Chem. Chem. Phys. - 2002. – V.4. - P. 2027-2037.

177. Fussey, D. E. A shock-tube study of induction times in the formation of carbon particles by pyrolysis of the C₂-hydrocarbons [Text] / D.E. Fussey, A.J. Gosling, D. Lampard // Combustion and Flame. – 1973. – V. 32. № 2. – P. 181–192.

178. Hashemi, H. High-pressure pyrolysis and oxidation of ethanol [Text] / H. Hashemi, J. M. Christensen, P. Glarborg // Fuel. – 2018. - № 218. - P. 247-257.

179. Henein, N.A. Analysis of pollutant formation and control and fuel economy in diesel engines [Text] / N.A. Henein // Prog. Energy Combust. Sci. - 1976. - V.1. - P. 165-207.

180. High-pressure oxidation of ethane [Text] / H. Hashemi, G.J. Jacobsen, C. T. Rasmussen [et al.] // Combustion and Flame. – 2017. - №182. - P. 150-166.

181. High-pressure oxidation of methane [Text] / H. Hashemi, J. M. Christensen, S. Gersen [et al.] // Combustion and Flame. – 2016. – № 172. – P. 349-364.

182. International Energy Agency, «Oil Market Report Template», 2016 [Elec-

tronic resource] / International Energy Agency// Market overview. – 2016. – Mode of access: <https://www.iea.org/media/omrreports/RussianOMR.pdf>

183. Khan, I.M. Formation and combustion of carbon in a diesel engine [Text] / I.M. Khan // Inst. Mech. Eng. Proc. - 1969. - V. 184. - P. 36-43.

184. Khan, I.M. Progress of diesel combustion research [Text] / J.M. Khan, H.C. Grigg // CIMAK: 9th Int. Congress on Combustion Engines. - Stockholm, Sweden, 1971. – P. 14 -18.

185. Klippenstein, S.J. Predictive theory for the combination kinetics of two alkyl radicals [Text] / S.J. Klippenstein, Y. Georgievskii, L.B. Harding // Phys. Chem. Chem. Phys. - 2006. - № 8 (10). - P. 1133–1147.

186. Krasnoperov, L.N. Shock tube studies using a novel multipass absorption cell: rate constant results for OH + H₂ and OH + C₂H₆ [Text] / L.N. Krasnoperov, J.V. Michael // J. Phys. Chem. – 2004. - № 108 (26). - P. 5643–5648 .

187. Lahaye, J. Mechanism of carbon formation during steamcracking of hydrocarbons [Text] / J. Lahaye, P. Badie, J. Duckert // Carbon. – 1977. – V. 15, № 2. – P.87–93.

188. Legrand, J.C. Processus de nucleation pour la formation des particules de carboneau cours de la pyrolyse de l, acetylene [Text] / J.C. Legrand, R. Ben-Aim // J. Chim. Phys. et Phys. Chim. Biol. - 1978. – V. 75. № 10. – P.903–907.

189. Li, J. Ethanol pyrolysis experiments in a variable pressure flow reactor [Text] / J. Li, A. Kazakov, F. L. Dryer // International Journal of Chemical Kinetics. - 2001. - V. 33. – P.859–867.

190. Li, J. Experimental and numerical studies of ethanol. Decomposition Reactions [Text] / Juan Li, A. Kazakov, F. L. Dryer // The Journal of Physical Chemistry A (Dynamics, Kinetics, Environmental Chemistry, Spectroscopy, Structure, Theory). -2004. - V. 108. № 38. - P.7671-7680.

191. Miller, J.A., Klippenstein, S.J. The H + C₂H₂ (+M) = C₂H₃ (+M) and H + C₂H₂ (+M) = C₂H₅ (+M) reactions: electronic structure, variational transition-state theory, and solutions to a two-dimensional master equation [Text] // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2004. - № 6 (6). - P.1192–1202.

192. On the road to 2030 – Decarbonizing Europe’s road transport sector Briefing Paper – June 2016 [Electronic resource] / Briefing Paper // European Commission. – 2016. – Mode of access: <http://epure.org/media/1350/briefing-on-the-road-to-2030-decarbonising-europes-road-transport-sector.pdf>

193. Park, J. Thermal decomposition of ethanol. I. Ab Initio molecular orbital [Text] / J. Park, R. S. Zhu, M. C. Lin // Journal of Chemical Physics. - 2002. - V.117. - P. 3224-3230.

194. Particle Formation and Models in Internal Combustion Engines [Text] / David Kittelson, Markus Kraft // Cambridge Centre for Computational Chemical Engineering. – 2014. – 39 p.

195. Perez, J.M. Cooperative development of analytical methods for diesel emission and particulates [Text] / J.M. Perez, F. Lipari, D.E. Seizinger // SAE Paper. – 1984. – № 840413. – P.22-24.

196. Performance Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil [Text] / N. Hemmerlein, V. Korte, H. Richter [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 1991. - № 910848. – P. 1-16.

197. Peukert, S.L. Direct measurements of rate constants for the reactions of CH₃ radicals with C₂H₆, C₂H₄, and C₂H₂ at high temperatures [Text] / S.L. Peukert, N.J. Labbe, R. Sivaramakrishnan, J.V. Michael // J. Phys. Chem. A. - 2013. - № 117 (40) - P.10228–10238.

198. Rate constants for the thermal decomposition of ethanol and its bimolecular reactions with OH and D: reflected shock tube and theoretical studies [Text] / R. Sivaramakrishnan [et al.] // Phys Chem A. - 2010. - № 114. - P.9425-9439.

199. Results Obtained by Methanol Fuelling Diesel Engine [Text] / M.G. Popa, N. Negurescu, C. Pana [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 2001. - № 2001-01-3748. – P.1-12.

200. Rotzoll, G. High-temperature pyrolysis of ethanol [Text] / G. Rotzoll // Journal of Analytical Pyrolysis. - 1985. - V. 9. №1. - P.43-52.

201. Sivaramakrishnan, R. High-temperature rate constants for H/D + C₂H₆ and C₃H₈ / R. Sivaramakrishnan, J.V. Michael, B. Ruscic // Int. J. Chem. Kinet.,

2012. - № 44 (3). - P.194–205.

202. Smith, O. J. Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application of Diesel Engine particulate Emissions [Text] / O. J. Smith // Progress in Energy and Combustion Science. – 1981. – Vol. 7. – № 4. – P.275-291.

203. Tanzawa, T. Mechanism of Acetylene Thermal Decomposition [Text] / T. Tanzawa, W. C. Gardiner // 17-th Int. Symposium on Combustion. Pittsburg (USA). – 1978. – P.147-148.

204. Theoretical assessment on reaction kinetics HCO and CH₂OH unimolecular decomposition [Text] / X. Yang , T. Tan , P. Diévert [et al.] // 8th U.S. Combustion Meeting, 2013. – P.280-284.

205. Wagner, H. Gg. Soot formation in combustion [Text] / H.Gg. Wagner // 17th Int. Symp. Combust. - Pittsburgh: The Combustion Inst., 1979. - P. 3-19.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень реакций, рассматриваемых для определения концентрации компонентов газовой смеси в зоне термического разложения этанола в КС дизеля

№	Реакция	А	п	Е, кал.	Е, Дж.	К(1000)	К(1500)	К(2000)
1.	$CH_3CH_2OH = C_2H_4 + H_2O$	3,80E+20	-2,06	69426	2,91E+05	1,62E-01	8122,1751	1,53E+06
2.	$CH_3CH_2OH = CH_3 + CH_2OH$	1,80E+47	-8,96	101002	4,23E+05	1,88E-02	11589,183	4,25E+06
3.	$CH_3CH_2OH = C_2H_5 + OH$	6,20E+51	-10,34	109879	4,60E+05	5,37E-04	838,01821	4,35E+05
4.	$CH_3 + OH = CH_3OH$	1,30E+22	-2,66	2451	1,03E+04	3,96E+13	2,032E+13	1,16E+13
5.	$C_2H_5 + OH = C_2H_4 + H_2O$	4,70E+18	-1,581	7999	3,35E+04	1,51E+12	3,047E+12	3,78E+12
6.	$CH_3 + CH_3 = C_2H_6 + H$	5,40E+13	0	16055	6,72E+04	1,66E+10	2,457E+11	9,46E+11
7.	$C_2H_5 + OH = CH_2OH + CH_3$	6,50E+22	-2,442	12647	5,30E+04	5,24E+12	1,629E+13	2,33E+13
8.	$CH_3CH_2OH + H = CH_3CHOH + H_2$	8,80E+03	2,68	2913	1,22E+04	2,22E+11	1,075E+12	2,97E+12
9.	$CH_3CH_2OH + H = CH_2CH_2OH + H_2$	5,30E+03	2,81	7491	3,14E+04	3,27E+10	3,6E+11	1,52E+12
10.	$CH_3CH_2OH + H = CH_3CH_2O + H_2$	9,50E+02	3,14	8696	3,64E+04	3,13E+10	4,81E+11	2,46E+12
11.	$CH_3CH_2OH + OH = CH_3CHOH + H_2O$	6,90E+14	-0,733	13,799	5,78E+01	4,33E+12	3,227E+12	2,62E+12
12.	$CH_3CH_2OH + OH = CH_2CH_2OH + H_2O$	2,40E+10	0,881	5350	2,24E+04	7,12E+11	2,5E+12	5,05E+12
13.	$CH_3CH_2OH + OH = CH_3CH_2O + H_2O$	7,90E+06	1,609	-461	-1,93E+03	6,69E+11	1,189E+12	1,82E+12
14.	$CH_3CH_2OH + CH_3 = CH_3CHOH + CH_4$	2,00E+01	3,37	7630	3,19E+04	5,51E+09	7,788E+10	3,90E+11
15.	$CH_3CH_2OH + CH_3 = CH_2CH_2OH + CH_4$	2,00E+00	3,57	7717	3,23E+04	2,10E+09	3,266E+10	1,74E+11
16.	$CH_3CH_2OH + CH_3 = CH_3CH_2O + CH_4$	3,30E+02	3,3	12,283	5,14E+01	2,61E+12	9,95E+12	2,57E+13
17.	$CH_3CHOH + H = CH_3CHOH + H_2$	3,10E+12	0,27	-334	-1,40E+03	2,37E+13	2,498E+13	2,63E+13
18.	$CH_3CHOH + H = C_2H_4 + H_2O$	1,60E+20	-1,81	9448	3,96E+04	5,09E+12	1,195E+13	1,57E+13
19.	$CH_3CHOH + H = CH_3 + CH_2OH$	4,00E+23	-2,527	13637	5,71E+04	1,09E+13	3,862E+13	5,87E+13
20.	$CH_3CHOH + H = C_2H_5 + OH$	6,30E+21	-2,11	15269	6,39E+04	1,34E+12	7,421E+12	1,46E+13
21.	$CH_3CHOH + H = CH_3CH_2OH$	1,60E+40	-7,82	12916	5,41E+04	8,28E+13	3,041E+13	9,48E+12
22.	$C_2H_4 + OH = CH_2CH_2OH$	6,00E+37	-7,44	14269	5,97E+04	2,17E+12	1,166E+12	4,54E+11
23.	$C_2H_4 + H + M = C_2H_5 + M$	1,40E+09	1,463	1355	5,67E+03	1,73E+13	3,936E+13	6,72E+13
24.	$CH_2CH_2OH = CH_2CHOH + H$	2,70E+27	-4,44	37205	1,56E+05	9,34E+05	79858655	5,06E+08
25.	$CH_2CH_2OH + H = C_2H_4 + H_2O$	3,60E+16	-0,716	8767	3,67E+04	3,09E+12	1,008E+13	1,71E+13
26.	$CH_2CH_2OH + H = CH_2OH + CH_3$	7,50E+20	-1,69	13429	5,62E+04	7,36E+12	3,536E+13	6,72E+13
27.	$CH_2CH_2OH + H = C_2H_5 + OH$	8,10E+19	-1,51	15534	6,50E+04	9,54E+11	7,024E+12	1,68E+13
28.	$CH_3CH_2O + M = CH_3 + CH_2O + M$	6,30E+10	0,93	17098	7,16E+04	7,05E+09	1,815E+11	9,97E+11
29.	$CH_3CH_2O + H + M = CH_3CH_2OH + M$	3,10E+11	0,894	13	5,44E+01	1,48E+14	2,133E+14	2,76E+14
30.	$CH_3CH_2O + H + M = CH_3 + CH_2OH + M$	2,60E+18	-1,05	5128	2,15E+04	1,39E+14	2,148E+14	2,44E+14
31.	$CH_3CH_2O + H = CH_3CHO + H_2$	7,50E+09	1,15	673	2,82E+03	1,51E+13	2,688E+13	3,96E+13
32.	$CH_3 + CH_3 + M = C_2H_6 + M$	9,50E+14	-0,54	179	7,49E+02	2,08E+13	1,724E+13	1,50E+13
33.	$CH_3 + H + M = CH_4 + M$	2,30E+14	0,03	144	6,03E+02	2,63E+14	2,729E+14	2,79E+14
34.	$CH_3 + OH = CH_2 + H_2O$	4,30E+04	2,57	3997	1,67E+04	2,94E+11	1,633E+12	4,78E+12
35.	$C_2H_6 + H = C_2H_5 + H_2$	7,40E+03	3,1	5340	2,24E+04	1,00E+12	8,633E+12	3,30E+13

№	Реакция	A	n	E, кал.	E, Дж.	K(1000)	K(1500)	K(2000)
36.	$C_2H_6 + OH = C_2H_5 + H_2O$	1,60E+06	2,22	741	3,10E+03	5,03E+12	1,403E+13	2,83E+13
37.	$C_2H_6 + CH_3 = C_2H_5 + CH_4$	3,50E+01	3,44	10384	4,35E+04	3,91E+09	9,017E+10	5,80E+11
38.	$CH_4 + H = CH_3 + H_2$	4,10E+03	3,16	8755	3,67E+04	1,50E+11	2,356E+12	1,22E+13
39.	$CH_4 + OH = CH_3 + H_2O$	1,00E+06	2,18	2506	1,05E+04	9,81E+11	3,617E+12	8,36E+12
40.	$CH_3 + OH = CH_3O + H$	3,10E+09	0,92	12981	5,43E+04	2,58E+09	3,31E+10	1,28E+11
41.	$CH_3 + OH = CH_2O + H_2$	2,40E+09	0,45	3791	1,59E+04	7,96E+09	1,805E+10	2,82E+10
42.	$CH_3O + M = CH_2O + H + M$	1,10E+10	1,21	24069	1,01E+05	2,54E+08	2,363E+10	2,53E+11
43.	$CH_2O + M = CO + H_2 + M$	3,70E+13	0	71969	3,01E+05	6,62E-03	1174,5838	4,95E+05
44.	$CH_2O + H = HCO + H_2$	4,20E+09	1,294	3591	1,50E+04	5,24E+12	1,619E+13	3,18E+13
45.	$CH_2O + OH = HCO + H_2O$	1,10E+09	1,33	-392	-1641,2256	1,31E+13	2,10E+13	2,98E+13
46.	$CH_2O + OH = H + CO + H_2O$	8,40E+10	0,879	9843	41210,672	2,56E+11	1,91E+12	5,61E+12
47.	$HCO + M = H + CO + M$	4,90E+16	-0,93	19724	82580,443	3,84E+09	7,23E+10	2,90E+11
48.	$H + O_2 = O + OH$	1,04E+14	0	15286	63999,425	4,70E+10	6,13E+11	2,21E+12
49.	$O + H_2 = H + OH$	3,82E+12	0	748	3131,7264	2,62E+12	2,97E+12	3,16E+12
50.	$H_2 + OH = H_2O + H$	2,16E+08	1,51	3430	14360,724	1,30E+12	4,27E+12	8,79E+12
51.	$OH + OH = O + H_2O$	1,35E+07	1,69	-1166	-4881,8088	2,85E+12	4,66E+12	6,86E+12
52.	$H_2 + M = H + H + M$	4,58E+19	-1,4	104380	437018,18	4,18E-08	9,73E-01	4,17E+03
53.	$O + O = O_2$	6,17E+15	-0,5	0	0	1,95E+14	1,59E+14	1,38E+14
54.	$O + H + M = OH + M$	4,71E+18	-1	0	0	4,71E+15	3,14E+15	2,36E+15
55.	$H_2O + M = H + OH$	6,06E+27	-3,32	120790	505723,57	2,47E-09	4,15E-01	4,06E+03
56.	$H_2O + H_2O = H + OH + H_2O$	1,01E+26	-2,44	120180	503169,62	2,44E-08	5,29E+00	6,33E+04
57.	$H + O_2 + M = HO_2 + M$	4,65E+12	0,44	0	0	9,72E+13	1,16E+14	1,32E+14
58.	$HO_2 + H = H_2 + O_2$	2,75E+06	2,09	-1451	-6075,0468	1,06E+13	1,95E+13	3,14E+13
59.	$HO_2 + H = OH + OH$	7,08E+13	0	295	1235,106	6,10E+13	6,41E+13	6,57E+13
60.	$HO_2 + O = O_2 + OH$	2,85E+10	1	-273	-1142,9964	3,27E+13	4,69E+13	6,11E+13
61.	$HO_2 + OH = H_2O + O_2$	1,93E+20	-2,49	584	2445,0912	4,87E+12	1,96E+12	1,00E+12
62.	$HO_2 + HO_2 = H_2O_2 + O_2$	1,18E+09	0,77	-1825	-7640,91	6,04E+11	6,07E+11	6,50E+11
63.	$H_2O_2 + M = OH + OH$	2,00E+12	0,9	48749	204102,31	2,16E+04	1,12E+08	8,68E+09
64.	$H_2O_2 + H = H_2O + OH$	2,41E+13	0	3970	16621,596	3,261E+12	6,3519E+12	8,87E+12
65.	$H_2O_2 + H = HO_2 + H_2$	4,82E+13	0	7950	33285,06	8,78E+11	3,34E+12	6,51E+12
66.	$H_2O_2 + O = OH + HO_2$	9,55E+06	2	3970	16621,596	1,29E+12	5,66E+12	1,41E+13
67.	$H_2O_2 + OH = HO_2 + H_2O$	1,74E+12	0	318	1331,4024	1,48E+12	1,56E+12	1,61E+12
68.	$CO + OH = CO_2 + H$	2,23E+05	1,89	1157,14	4844,73	5,82E+10	1,52E+11	2,89E+11
69.	$HCO + O_2 = CO + HO_2$	6,90E+06	1,9	-1369	-5731,7292	6,8929E+12	1,1834E+13	1,82E+13
70.	$CH_2O + M = HCO + H + M$	8,00E+15	0	87726	367291,22	5,10E-04	1,28E+03	2,02E+06
71.	$CH_2O + H = H + CO + H_2$	1,20E+09	1,812	13163	55110,848	4,32E+11	8,21E+12	4,17E+13
72.	$CH_2O + HO_2 = HCO + H_2O_2$	4,10E+04	2,5	10206	42730,481	7,58E+09	1,16E+11	5,61E+11
73.	$CH_2O + HO_2 = H + CO + H_2O_2$	2,50E+14	0,027	30120	126106,42	7,73E+07	1,23E+10	1,56E+11
74.	$CH_4 + O = CH_3 + OH$	4,40E+05	2,5	6577	27536,584	5,0623E+11	4,2099E+12	1,50E+13

№	Реакция	А	п	Е, кал.	Е, Дж.	К(1000)	К(1500)	К(2000)
75.	$CH_4 + HO_2 = CH_3 + H_2O_2$	4,70E+04	2,5	21000	87922,8	3,78E+07	3,54E+09	4,24E+10
76.	$CH_3 + OH = CH_2OH + H$	2,50E+10	0,91	6402	26803,894	5,33E+11	2,26E+12	5,03E+12
77.	$CH_3 + HO_2 = CH_3O + OH$	1,00E+12	0,27	-687	-2876,3316	9,13E+12	9,07E+12	9,26E+12
78.	$CH_4 + O_2 = CH_3 + HO_2$	2,00E+05	2,75	51714	216516,18	1,72E+02	3,10E+06	5,26E+08
79.	$CH_3 + O_2 = CH_3OO$	1,10E+19	-2,3	1800	7536,24	5,5916E+11	2,9772E+11	1,79E+11
80.	$CH_3 + O_2 = CH_3O + O$	7,50E+12	0	28297	118473,88	4,82E+06	5,59E+08	6,02E+09
81.	$CH_3 + O_2 = CH_2O + OH$	1,90E+11	0	9842	41206,486	1,33E+09	6,97E+09	1,59E+10
82.	$CH_3OO + H = CH_3O + OH$	1,00E+14	0	0	0	1,00E+14	1,00E+14	1,00E+14
83.	$CH_3OO + O = CH_3O + O_2$	2,90E+10	1	-724	-3031,2432	4,18E+13	5,55E+13	6,96E+13
84.	$CH_3OO + OH = CH_3OH + O_2$	1,70E+14	0	0	0	1,7E+14	1,7E+14	1,70E+14
85.	$CH_3OO + HO_2 = CH_3OOH + O_2$	2,50E+11	0	-1490	-6238,332	5,30E+11	4,12E+11	3,64E+11
86.	$CH_3OO + CH_3 = CH_3O + CH_3O$	5,10E+12	0	-1411	-5907,5748	1,04E+13	8,19E+12	7,28E+12
87.	$CH_3OO + CH_3OO = CH_3O + CH_3O + O_2$	1,10E+18	-2,4	1800	7536,24	2,80E+10	1,43E+10	8,36E+09
88.	$CH_3OO + CH_3OO = CH_3OH + CH_2O + O_2$	2,00E+11	-0,55	-1600	-6698,88	1,00E+10	6,13E+09	4,58E+09
89.	$CH_3OO + CH_4 = CH_3OOH + CH_3$	4,50E-03	4,69	19868	83183,342	23763591,7	4475898513	9,15E+10
90.	$CH_3OO + CH_2O = CH_3OOH + HCO$	4,10E+04	2,5	10206	42730,481	7,58E+09	1,16E+11	5,61E+11
91.	$CH_3OO + CH_2O = CH_3OOH + H + CO$	2,50E+14	0,027	30133	126160,84	7,68E+07	1,22E+10	1,55E+11
92.	$CH_3OOH + M = CH_3O + OH + M$	4,10E+19	-1,153	44226	185165,42	2997297,52	3157775860	9,29E+10
93.	$CH_3O + O_2 = CH_2O + HO_2$	4,80E-01	3,6	-1055	-4417,074	5,15E+10	1,86E+11	4,79E+11
94.	$CH_3OH + CH_3 = CH_3O + CH_4$	1,30E-02	4,161	6002	25129,174	1,92E+09	2,85E+10	1,56E+11
95.	$CH_3OH + OH = CH_2OH + H_2O$	1,50E+08	1,44	113	473,1084	2,96E+12	5,41E+12	8,26E+12
96.	$CH_2OH + O_2 = CH_2O + HO_2$	7,20E+13	0	3736	15641,885	1,10E+13	2,05E+13	2,81E+13
97.	$CH_3OH + HO_2 = CH_3O + H_2O_2$	1,50E-03	4,61	15828	66268,67	34896337	3228476913	4,59E+10
98.	$CH_3CH_2OH + HO_2 = CH_3 + CHOH + H_2O_2$	8,20E+03	2,55	10750	45008,1	1,63E+09	2,78E+10	1,43E+11
99.	$CH_3CH_2OH + HO_2 = CH_2CH_2OH + H_2O_2$	2,55E+04	2,55	15750	65942,1	4,08E+08	1,61E+10	1,26E+11
100.	$CH_3CH_2OH + HO_2 = CH_3CH_2O + H_2O_2$	2,50E+12	0	24000	100483,2	1,40E+07	7,89E+08	5,92E+09
101.	$CH_2CH_2OH + O_2 = CH_2O + CH_2O + OH$	1,20E+29	-5,44	11323	47407,136	1,91E+10	1,41E+10	7,63E+09
102.	$CH_2CH_2OH + O_2 = HOCH_2CH_2OO$	4,20E+26	-4,46	3940	16495,992	2,4051E+12	7,6409E+11	2,95E+11
103.	$HOCH_2CH_2OO = CH_2O + CH_2O + OH$	3,80E+18	-2,6	19972	83618,77	2,57E+06	2,56E+07	6,49E+07
104.	$CH_3CHOH + M = CH_3CHO + H + M$	6,20E+09	1,31	33778	141421,73	2,15E+06	1,06E+09	2,64E+10
105.	$CH_3CHOH + M = CH_2CHOH + H + M$	6,40E+09	1,33	35974	150615,94	8,41E+05	6,06E+08	1,82E+10
106.	$CH_3CHOH + M = CH_3 + CH_2O + M$	2,20E+09	1,18	33987	142296,77	2,79E+05	1,36E+08	3,31E+09
107.	$CH_3CHOH + O_2 = CH_3CHO + HO_2$	3,80E+20	-2,429	3090	12937,212	4,1368E+12	2,596E+12	1,67E+12
108.	$CH_3CHOH + O_2 = CH_2CHOH + HO_2$	4,40E+05	1,699	2330	9755,244	1,70E+10	5,01E+10	9,93E+10
109.	$CH_2CH_2OH + O_2 = CH_2CHOH + HO_2$	1,90E+30	-5,51	16616	69567,869	1,30E+10	2,26E+10	1,87E+10

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Программный код вычисления показателей сажесодержания в зоне
термического разложения этанола
(выполнено в среде Matlab)

```

%% исходные данные и обозначения
Bosch - измеренная дымность ОГ
%fi -Угол поворота коленчатого вала (п.к.в.)
Tfun(fi) - функция индикаторной температуры в цилиндре от угла п.к.в. fi
VD(fi) - функция объема цилиндра от угла fi
Pfunc(fi) - функция индикаторного давления в цилиндре от угла fi
B_b - угол открытия выпускного клапана
GR - коэффициент остаточных газов
PROD - коэффициент продувки
tog - температура ОГ
qs - цикловая подача топлива, г
ALS - коэффициент избытка воздуха общий
MC2H5OH - моль этанола, поступившего в КС
MC18H34O2 - моль РМ, поступившего в КС
ALCal - локальный коэффициент избытка воздуха в факеле этанола
ALCRM - локальный коэффициент избытка воздуха в факеле РМ
Mv - моль воздуха в КС
GC = 0.565*(log(10/(10-Bosch)))^1.206;%концентрация сажи г/м3
% газ совершая расширение и остывая в выпускной системе изменяет объем:
kVras = Tfun(B_b)*0.103/(PROD*Pfunc(B_b)*(273+tog)); % изменение объема ОГ
GC = GR*GC/kVras; % концентрация сажи в цилиндре
Nsahzy = 1000*GC*VD(B_b); % масса сажи в цилиндре измеренная, мг
Gc = Nsahzy/qs; % концентрация сажи г/кг
Na=6.022*10^23; % число Авогадро
Dc = 30; % начальный диаметр сажи, нм
ros = 1.9; % плотность сажи г/см3
% начальная масса частицы сажи
mch = pi*(Dc*10^(-7))^3*ros/6;% грамм
% атомов углерода в такой частице
Cnch = mch*Na/mC;
% количество частиц в цилиндре до начала тепловыделения
Nch = Nsahzy*GR*10^-3/mch;
% Количество атомов углерода во всей саже в цилиндре до начала сгорания
Cnsymm = Cnch*Nch;
CN = Nsahzy*GR/VD(B_b)*0.001; %начальная концентрация сажи г/м3
HN = Nsahzy*GR;% начальная масса сажи в цилиндре

%% РАСЧЕТ
Распределение массы сажи по зонам:
% В зоне пиролиза этанола, мг:
HNal = MC2H5OH*ALCal*Molvozda1*HN/(Mv*ALS);
% В зоне пиролиза РМ, мг:
HNRM = MC18H34O2*ALCRM*Molvozdz*HN/(Mv*ALS);
% В зоне ПС, мг:
HNvyg = HN - HNal - HNRM;

% расчет проводим на 1000 г этанола (q г/цикл)
koeffmol = 1000/q; %(расчет на 1000 г этанола)
RH(1)=koeffmol*MC2H5OH; % Начальное содержание этанола
RH(20)=0.21*MC2H5OH*ALCal*koeffmol*Molvozda1; % начальное количество моль O2/кг
топлива
RH(21)=0.79*MC2H5OH*ALCal*koeffmol*Molvozda1; %начальное значение моль N2/кг то-
плива
% Количество грамм сажи на 1000 г топлива
RH(48) = koeffmol*HNal/24000; % начальное моль C2 в зоне образования

```

```

RH(47) = koeffmol*HNa1/(1000*mch*Na); % начальное моль частиц сажи в зоне обра-
зования
% вычисляем начальный диаметр частицы:
Dch = 0.2715*(RH(48)*2/RH(47))^(1/3); % нм
R(49) = Dc; % диаметр сажи в зоне образования

for I=1:48
    R(I)= RH(I)*SIU1func(FIHC);
end
R(51) = 0; % начальное моль сажи, выведенное в зону выгорания
disp('решение системы дифференциальных уравнений скорости сажеобразования')
% импорт кинетических данных процесса разложения этанола
falename = 'KRE.xlsx'; % считываем файл с начальными условиями
[num,txt]= xlsread(falename);
% Кинетические параметры реакции
A = num(:,3);
nst = num(:,4);
E = num(:,5)*4.1868; % Энергия активации реакции, Дж

tspan = [FIHC FIK]; % Диапазон расчета от начала тепловыделения

%ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ ГИРА ПО ПЕРЕМЕННОЙ t
[t,y] = odel5s(@(t,y) kinetic(t,y), tspan, R');

% ПОДПРОГРАММА kinetic
% в результате работы программы получаем содержание компонентов продуктов
% реакции в предпламенной зоне, y(51) - моль C2/кг, y(50) - моль частиц/кг

T = T1func(t); % температура в предпламенной зоне
P = Pfunc(t); % давление, МПа
SI = SIU1func(t); % испарение этанола, интегральная характеристика
DSI = dSIU1func(t); % скорость испарения этанола
X = Xfunc(t); % тепловыделение
DX = dXfunc(t); % скорость тепловыделения

if X-0.02<=0
    otvod=0;
else
    otvod=DX/(SI-X);
end

for i=1:length(A)
K(i) = A(i)*T^nst(i)*exp(-E(i)/(8.31*T)); % константы скоростей реакций
end

AK = CONSTR(T); % константы скоростей образования сажи
AK(49)=AK(45)/AK(49);
AK(50)=AK(46)/AK(50);
AK(51)=AK(47)/AK(51);
AK(54)=AK(53)/AK(54);
AK(56)=AK(55)/AK(56);
AK(58)=AK(57)/AK(58);
AK(52)=AK(52)*FCСТЕР(y(49)/0.27145); % коагуляция с учетом стерического фактора

% ограничение выхода в отрицательную область
for i=1:length(y)
    if y(i)<0
        y(i)=0;
    end
end

% сумма моль газов в реакционной зоне
Sum = sum(y(1:47));

```

```

DDT = 8.314*Sum*T/P;% объем реакционной зоны, см3
C = y(1:47)/DDT; % концентрация моль/см3
CM = P/(8.31441*T); % моль/см
% об.доли окислительных компонентов
RO2=C(20)/CM;
RCO2=C(28)/CM;
RH2O=C(18)/CM;

% скорости гетерогенных реакций
AK(41)=WC1(P*10,RO2,T)*AK(41)*B2;
AK(42)=AK(42)*WC2(P*10,RO2,T)*B2;
AK(43)=AK(43)*WC3(P*10,RCO2,T)*B2;
AK(44)=AK(44)*WC4(P*10,RH2O,T)*B2;
AK(30:40)=AK(30:40)*B1;
AK(30:44)=AK(30:44)*y(49)^2;
AK(52)=AK(52)*y(49)^(1/2)*B1; % % скорости коагуляции

%% скорости реакций пиролиза этанола (109 реакций ПРИЛОЖЕНИЕ А)
W(1) = C(1);
W(2) = C(1);
W(3) = C(1);
W(4) = C(14)*C(19);
W(5) = C(9)*C(19);
W(6) = C(14)*C(14);
W(7) = C(9)*C(19);
W(8) = C(1)*C(16);
W(9) = C(1)*C(16);
W(10) = C(1)*C(16);
W(11) = C(1)*C(19);
W(12) = C(1)*C(19);
W(13) = C(1)*C(19);
W(14) = C(1)*C(14);
W(15) = C(1)*C(14);
W(16) = C(1)*C(14);
W(17) = C(4)*C(16);
W(18) = C(4)*C(16);
W(19) = C(4)*C(16);
W(20) = C(4)*C(16);
W(21) = C(4)*C(16);
W(22) = C(11)*C(19);
W(23) = C(11)*C(16);
W(24) = C(2);
W(25) = C(2)*C(16);
W(26) = C(2)*C(16);
W(27) = C(2)*C(16);
W(28) = C(3)*CM;
W(29) = C(3)*C(16)*CM;
W(30) = C(3)*C(16)*CM;
W(31) = C(3)*C(16);
W(32) = C(14)*C(14)*CM;
W(33) = C(14)*C(16)*CM;
W(34) = C(14)*C(19);
W(35) = C(10)*C(14);
W(36) = C(10)*C(19);
W(37) = C(10)*C(14);
W(38) = C(13)*C(16);
W(39) = C(13)*C(19);
W(40) = C(14)*C(19);
W(41) = C(14)*C(19);
W(42) = C(6)*CM;
W(43) = C(7)*CM;
W(44) = C(7)*C(16);
W(45) = C(7)*C(19);
W(46) = C(7)*C(19);

```

W(47) = C(8)*CM;
W(48) = C(16)*C(20);
W(49) = C(25)*C(17);
W(50) = C(17)*C(19);
W(51) = C(19)*C(19);
W(52) = C(17)*CM;
W(53) = C(25)*C(25);
W(54) = C(25)*C(16);
W(55) = C(18)*CM;
W(56) = C(18)*C(18);
W(57) = C(16)*C(20)*CM;
W(58) = C(26)*C(16);
W(59) = C(26)*C(16);
W(60) = C(26)*C(25);
W(61) = C(26)*C(19);
W(62) = C(26)*C(26);
W(63) = C(27)*CM;
W(64) = C(27)*C(16);
W(65) = C(27)*C(16);
W(66) = C(27)*C(25);
W(67) = C(27)*C(19);
W(68) = C(15)*C(19);
W(69) = C(8)*C(20);
W(70) = C(7)*CM;
W(71) = C(7)*C(16);
W(72) = C(7)*C(26);
W(73) = C(7)*C(26);
W(74) = C(13)*C(25);
W(75) = C(13)*C(26);
W(76) = C(14)*C(19);
W(77) = C(14)*C(26);
W(78) = C(13)*C(20);
W(79) = C(14)*C(20);
W(80) = C(14)*C(20);
W(81) = C(14)*C(20);
W(82) = C(29)*C(16);
W(83) = C(29)*C(25);
W(84) = C(29)*C(19);
W(85) = C(29)*C(26);
W(86) = C(29)*C(14);
W(87) = C(29)*C(29);
W(88) = C(29)*C(29);
W(89) = C(29)*C(13);
W(90) = C(29)*C(7);
W(91) = C(29)*C(7);
W(92) = C(30)*CM;
W(93) = C(6)*C(20);
W(94) = C(22)*C(14);
W(95) = C(22)*C(19);
W(96) = C(5)*C(20);
W(97) = C(22)*C(26);
W(98) = C(1)*C(26);
W(99) = C(1)*C(26);
W(100) = C(1)*C(26);
W(101) = C(2)*C(20);
W(102) = C(2)*C(20);
W(103) = C(31);
W(104) = C(4)*CM;
W(105) = C(4)*CM;
W(106) = C(4)*CM;
W(107) = C(4)*C(20);
W(108) = C(4)*C(20);
W(109) = C(2)*C(20);

```

%% скорость реакций для расчета сажесодержания
WS(5)=C(11);% C2H4 = C2H2+H2
WS(6)=C(13);% CH4 = 0,5C2H4+H2
WS(9)=C(33);% C2H2 = C2H+H
WS(10)=C(33)*C(33); % C2H2 + C2H2 = C4H3+H
WS(11)=C(33)*C(16);% C2H2 + H = C2H+H2
WS(12)=CM*C(34)*C(16); % C2H + H+M = C2H2+M
WS(13)=C(33)*C(34);% C2H2 + C2H = C4H2+H
WS(14)=C(35); % C4H3 = C4H2+H
WS(15)=CM*C(36); % C4H2 + M = C4H+H +M
WS(16)=C(37)*C(33);% C4H + C2H2 = C6H3
WS(17)=C(38); % C6H3 = C6H2+H
WS(18)=C(37)*C(33);% C4H + C2H2 = C6H2+H
WS(19)=CM*C(39) ; % C6H2 + M = C6H+H +M
WS(20)=C(40)*C(33);% C6H + C2H2 = C8H3
WS(21)=C(41); % C8H3 = C8H2+H
WS(22)=C(40)*C(33);% C6H + C2H2 = C8H2+H
WS(23)=CM*C(42);% C8H2 + M = C8H+H +M
WS(24)=C(43)*C(33);% C8H + C2H2 = C10H3
WS(25)=C(44); % C10H3 = C10H2+H
WS(26)=C(43)*C(33);% C8H + C2H2 = C10H2+H
WS(27)=CM*C(45); % C10H2 + M = C10H+H +M
WS(28)=C(45)*C(34);% C10H2 + C2H = C12H2+H
WS(29)=C(46)*C(33);% C10H + C2H2 = C12H2+H
WS(30)=C(47)*C(33);% C12H2 + C2H2 = C12H2+H2+C2
WS(31)=C(47)*C(34);% C12H2 + C2H = C12H2+H+C2
WS(32)=C(47)*C(36);% C12H2 + C4H2 = C12H2+H2+2C2
WS(33)=C(47)*C(37);% C12H2 + C4H = C12H2+H+2C2
WS(34)=C(47)*C(39);% C12H2 + C6H2 = C12H2+H2+3C2
WS(35)=C(47)*C(40);% C12H2 + C6H = C12H2+H+3C2
WS(36)=C(47)*C(42);% C12H2 + C8H2 = C12H2+H2+4C2
WS(37)=C(47)*C(43);% C12H2 + C8H = C12H2+H+4C2
WS(38)=C(47)*C(45);% C12H2 + C10H2 = C12H2+H2+5C2
WS(39)=C(47)*C(46);% C12H2 + C10H = C12H2+H+5C2
WS(40)=C(47)*C(47);% C12H2 + C12H2 = C12H2+H2+6C2
WS(41)=C(47); % (C12H2+0,5C2)+ O2 = CO2+C12H2
WS(42)=C(47); % (C12H2+0,5C2)+ 0,5O2 = CO+C12H2
WS(43)=C(47); % (C12H2+0,5C2)+ CO2 = 2CO+C12H2
WS(44)=C(47); % (C12H2+0,5C2)+ H2O = CO+H2 +C12H2
WS(45)=P^0.3*sqrt(C(33))*C(20); % C2H2 + O2 = 2CO+H2
WS(46)=C(20)*(C(17)^1.5) ;% H2+0,5O2 = H2O
WS(47)=C(15)*sqrt(C(20))*(C(18)^0.25); % CO+0,5O2 = CO2
WS(48)=CM*C(16)*C(16); % H + H+M = H2+M
WS(49)=C(15)*C(15)*C(17); % 2CO+H2=C2H2+O2
WS(50)=C(18)*sqrt(C(17)*C(20)); % H2O = H2+ 0,5O2
WS(51)=C(15)*((C(18))^0.25); % CO2 = CO+0,5O2
WS(52)=WS(40); % C12H2 + C12H2 = C12H2
WS(53)=C(15)*C(18); % CO+ H2O = CO2+H2
WS(54)=C(28)*C(17); %CO2 + H2 = CO+ H2O
WS(55)=C(13)*C(28); %CH4 + CO2 = 2CO+2H2
WS(56)=C(15)*C(15)*C(17)*C(17); %2CO+2H2 = CH4 + CO2
WS(57)=C(13)*C(13); % CH4 + CH4 = C2H2+3H2
WS(58)=C(33)*C(17)*C(17)*C(17); %C2H2+3H2 = CH4 + CH4

% произведение скоростей реакции на константы
for i = 1:length(WS)
    WS(i) = AK(i)*WS(i);
end

for i=1:length(W)
    W(i) = K(i)*W(i);
End

```


%% дифференциальные уравнения расчета скорости изменения концентрации компонентов газовой смеси в зоне пиролиза этанола

```

dydt (1) = -W(1)-W(2)-W(3)-W(8)-W(9)-W(10)-W(11)-W(12)-W(13)-W(14)-W(15) -
W(16)+W(21)+W(29)-W(98)-W(99)-W(100); %C2H5OH
dydt (2) = W(9)+W(12)+W(15)+W(22)-W(24)-W(25)-W(26)-W(27)+W(99)-W(101)-W(102) -
W(109); % CH2CH2OH
dydt (3) = W(10)+W(13)+W(16)-W(28)-W(29)-W(30)-W(31)+W(100); % CH3CH2O
dydt (4) = W(8)+W(11)+W(14)-W(17)-W(18)-W(19)-W(20)-W(21)-W(104)-W(105)-W(106) -
W(107)-W(108); % CH3CHOH
dydt (5) = W(2)+W(7)+W(19)+W(26)+W(30)+W(76)+W(95)-W(96); % CH2OH
dydt (6) = W(40)-W(42)+W(77)+W(80)+W(82)+W(83)+2*W(86)+2*W(87)+W(92) -
W(93)+W(95)+W(97); % CH3O
dydt (7) = W(28)+W(41)+W(42)-W(43)-W(44)-W(45)-W(46)-W(70)-W(71)-W(72) -
W(73)+W(81)+W(88)-W(90)-W(91)+W(93)+W(96)+2*W(101)+2*W(103)+W(106) ; % CH2O
dydt (8) = W(44)+W(45)-W(47)-W(69)+W(70)+W(72)+W(90); % HCO
dydt (9) = W(3)-W(5)+W(6)-W(7)+W(20)+W(23)+W(27)+W(35)+W(36)+W(37); % C2H5
dydt (10) = W(32)-W(35)-W(36)-W(37); % C2H6
dydt (11) = W(1)+W(5)+W(18)-W(22)-W(23)+W(25)-WS(5)+0.5*WS(6); % C2H4
dydt (12) = W(34); %C2H
dydt (13) = W(14)+W(15)+W(16)+W(33)+W(37)-W(38)-W(39)-W(74)-W(75)-W(78) -
W(89)+W(95)-WS(6)-2*WS(57)+2*WS(58)+WS(56)-WS(55); % CH4
dydt (14) = W(2)-W(4)-2*W(6)+W(7)-W(14)-W(15)-W(16)+W(19)+W(26)+W(28)+W(30) -
2*W(32)-W(33)-W(34)-W(37)+W(38)+W(39)-W(40)-W(41)+W(74)+W(75)-W(76)-W(77)+W(78) -
W(79)-W(80)-W(81)-W(86)+W(89)-W(95)+W(98)+W(106); % CH3
dydt (15) = W(43)+W(46)+W(47)-W(68)+W(69)+W(71)+W(73)+W(91)+2*WS(45) -
2*WS(56)+2*WS(55)+WS(54)-WS(53)+WS(42)+2*WS(43)+WS(44)-WS(47)-2*WS(49)+WS(51); %
CO
dydt (16) = W(6)-W(8)-W(9)-W(10)-W(17)-W(18)-W(19)-W(20)-W(21)-W(23)+W(24)-W(25) -
W(26)-W(27)-W(29)-W(30)-W(31)-W(33)-W(35)-W(38)+W(40)+W(42)-W(44)+W(47)+W(46) -
W(48)+W(49)+W(50)+2*W(52)-W(54)+W(55)+W(56)-W(57)-W(58)-W(59)-W(64) -
W(65)+W(68)+W(70)+W(73)+W(76)-W(82)+W(91)+W(104)+W(105)+WS(9)+WS(10)-WS(11) -
WS(12)+WS(13)+WS(14)+WS(15)+WS(17)+WS(18)+WS(19)+WS(21)+WS(22)+WS(23)+WS(25)+WS(
26)+WS(27)+WS(28)+WS(29)+WS(31)+WS(33)+WS(35)+WS(37)+WS(39)-2*WS(48); % H
dydt (17) = W(8)+W(9)+W(10)+W(17)+W(31)+W(35)+W(38)+W(41)+W(43)+W(44)-W(49) -
W(50)-W(52)+W(58)+W(65)+W(71)+WS(5)+WS(6)+WS(11)+WS(45)+3*WS(57)-3*WS(58) -
2*WS(56)+2*WS(55) -
WS(54)+WS(53)+WS(30)+WS(32)+WS(34)+WS(36)+WS(38)+WS(40)+WS(44)-WS(46)+WS(48) -
WS(49)+WS(50); % H2
dydt (18) = W(1)+W(5)+W(11)+W(12)+W(13)+W(18)+W(25)+W(34)+W(36)+W(39)+W(45) +
W(46)+W(50) +W(51)-W(55)-W(56)+W(61)+W(64)+W(67)+W(95)+WS(54)-WS(53)-WS(44) -
WS(50); % H2O
dydt (19) = W(3)-W(4)-W(5)-W(7)-W(11)-W(12)-W(13)+W(20)-W(22)+W(27)-W(34)-W(36) -
W(39)-W(40)-W(41)-W(45)-W(46)+W(48)+W(49)-W(50) -
2*W(51)+W(54)+W(55)+W(56)+2*W(59)+W(60)-W(61)+2*W(63)-W(67) -
W(68)+W(64)+W(66)+W(74)-W(76)+W(77)+W(81)+W(82)-W(84)+W(92)-W(95)+W(101)+W(103)
; % OH
dydt (20) = -W(48)+W(53)-W(57)+W(58)+W(60)+W(61)+W(62)-W(69)-W(78)-W(79)-W(80) -
W(81)+W(83)+W(84)+W(85)+W(87)+W(88)-W(93)-W(96)-W(101)-W(102)-W(107)-W(108) -
W(109)-WS(45)-WS(41)-0.5*WS(42)-0.5*WS(46)-0.5*WS(47)+WS(49)+0.5*WS(50); % O2
dydt (21) = 0; % N2
dydt (22) = W(4)+W(84)+W(88)-W(95)-W(95)-W(97); % CH3OH
dydt (23) = W(17)+W(24)+W(105)+W(108)+W(109); % CH2CHOH
dydt (24) = W(31)+W(104)+W(107); % CH3CHO
dydt (25) = W(48)-W(49)+W(51)-2*W(53)-W(54)-W(60)-W(66)-W(74)+W(80)-W(83)+WS(51);
%O
dydt (26) = W(57)-W(58)-W(59)-W(60)-W(61)-2*W(62)+W(65)+W(66)+W(67)+W(69)-W(72) -
W(73)-W(75)-W(77)+W(78)-W(85)+W(93)+W(96)-W(97)-W(98)-W(99) -
W(100)+W(107)+W(108)+W(109); % HO2
dydt (27) = W(62) -W(63)-W(64)-W(65)-W(66) -
W(67)+W(72)+W(73)+W(75)+W(97)+W(98)+W(99)+W(100); % H2O2
dydt (28) = W(68)+WS(56)-WS(55)-WS(54)+WS(53)+WS(41)-WS(43)+WS(47)-WS(51); %CO2
dydt (29) = W(79)-W(82)-W(83)-W(84)-W(85)-W(86)-2*W(87)-2*W(88)-W(89)-W(90) -
W(91); % CH3OO
dydt (30) = W(85)+W(89)+W(90)+W(91)-W(92); % CH3OOH

```

```

dydt(31) = W(102)-W(103) ;% HOCH2CH2OO
dydt(32) = W(98);% CHOH

% блок компонентов сажеобразования
dydt(33) = WS(5)-WS(9)-2*WS(10)-WS(11)+WS(12)-WS(13)-WS(45)+WS(57)-WS(58)-
WS(16)-WS(18)-WS(20)-WS(22)-WS(24)-WS(26)-WS(29)-WS(30)+WS(49); % C2H2
dydt(34) = WS(9)+WS(11)-WS(12)-WS(13)-WS(28)-WS(31); % C2H
dydt(35) = WS(10)-WS(14); % C4H3
dydt(36) = WS(13)+WS(14)-WS(15)-WS(32); % C4H2
dydt(37) = WS(15)-WS(16)-WS(18)-WS(33); % C4H
dydt(38) = WS(16)-WS(17); %C6H3
dydt(39) = WS(17)+WS(18)-WS(19)-WS(34);% C6H2
dydt(40) = WS(19)-WS(20)-WS(22)-WS(35); % C6H
dydt(41) = WS(20)-WS(21);% C8H3
dydt(42) = WS(21)+WS(22)-WS(23)-WS(36); %C8H2
dydt(43) = WS(23)-WS(24)-WS(26)-WS(37); %C8H
dydt(44) = WS(24)-WS(25); % C10H3
dydt(45) = WS(25)+WS(26)-WS(27)-WS(28)-WS(38); % C10H2
dydt(46) = WS(27)-WS(29)-WS(39); % C10H
dydt(47) = WS(28)+WS(29)-WS(40)-WS(52); % C12H2

% моль C2
dydt(48) = WS(30)+WS(31)+2*WS(32)+2*WS(33)+3*WS(34)+3*WS(35)+
4*WS(36)+4*WS(37)+5*WS(38)+5*WS(39)+6*WS(28)+6*WS(29)-
0.5*(WS(41)+WS(42)+WS(43)+WS(44));

% изменение концентрации компонентов
for i=1:48
    dydt(i) = dydt(i)*DDT/(6.*n)+DSI*RH(i)-otvod*y(i);
end

% диаметр частицы в реакционной зоне дифференциальное уравнение
dydt(49) = 0.0905*(2*dydt(48)*y(47)-2*y(48)*dydt(47))*...
(y(47)^(-2))*(2*y(48)/y(47))^(-2/3);

% количество частиц, перешедших в зону выгорания, моль/кг:
dydt(50) = otvod*y(47);

% моль C2, перешедших в зону выгорания, моль/кг:
dydt(51) = otvod*y(48);

% формирование вектора производных
dydt=dydt';

% вывод матрицы решений в текстовый файл
TXT(dydt,t);

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты численного моделирования

Результаты моделирования сажеобразования в цилиндре дизеля при работе на ДТ на номинальном режиме
($p_e = 0,588$ МПа, $n = 1800$ мин⁻¹)

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося топлива	Диаметр частиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
-14	2,648	0,104	825,3	0	0	0	-433,9	825,3	825,3	0,03				
-13	2,748	0,104	829,6	0	0	0	-441	829,6	829,6	0,07				
-12	2,85	0,096	835,1	0	0	0	-447,9	835,1	835,1	0,1				
-11	2,963	0,1	843,4	0	0	-0,0006	-454,5	843,4	843,4	0,14				
-10	3,086	0,138	855,2	0,001	0,001	0,0042	-460,8	851,3	851,3	0,19				
-9	3,272	0,223	884,4	0,011	0,01	0,0155	-467	922,135	966,53	0,24	27,9984	9823846689	0,0002	0,0029
-8	3,575	0,362	944,2	0,034	0,034	0,0328	-473	1379,006	1647,833	0,29	27,8925	9925125105	0,0002	0,0029
-7	4,018	0,505	1039,3	0,076	0,076	0,0509	-478,7	1594,76	1967,089	0,35	27,4213	10026785154	0,0002	0,0029
-6	4,562	0,571	1158,5	0,133	0,132	0,0606	-484,2	1685,35	2098,655	0,41	26,6811	10101760432	0,0002	0,0027
-5	5,116	0,538	1278,9	0,194	0,192	0,0585	-489,2	1766,634	2216,738	0,46	25,6257	10061974636	0,0002	0,0024
-4	5,605	0,444	1382,9	0,248	0,246	0,0486	-493,7	1901,099	2415,245	0,51	4,0609	2,0595E+12	0,0001	0,002
-3	5,994	0,333	1463,5	0,29	0,288	0,0366	-497,5	2010,131	2575,764	0,56	0,9513	7,25553E+14	0,0006	0,0092
-2	6,285	0,252	1523,3	0,323	0,319	0,0289	-500,4	2034,483	2609,143	0,59	2,1106	3,92573E+14	0,0037	0,0545
-1	6,519	0,223	1572,9	0,351	0,347	0,0284	-502,2	2027,179	2595,476	0,63	3,4223	1,93121E+14	0,0077	0,1148
0	6,733	0,211	1622,1	0,38	0,375	0,0307	-502,8	2037,109	2608,527	0,67	3,1917	4,04596E+14	0,0131	0,1954
1	6,926	0,181	1671,1	0,411	0,406	0,031	-502	2053,656	2632,093	0,7	2,8182	1,33388E+15	0,0297	0,4428
2	7,089	0,141	1718	0,442	0,435	0,0297	-499,9	2063,064	2645,259	0,73	3,0686	1,81579E+15	0,0522	0,7746
3	7,213	0,103	1761,3	0,471	0,464	0,0287	-496,2	2069,009	2653,553	0,77	3,6666	1,88931E+15	0,0927	1,3647
4	7,3	0,069	1801,1	0,5	0,491	0,0284	-491,1	2075,669	2663,25	0,8	4,2732	1,8599E+15	0,1445	2,1047
5	7,35	0,032	1837,4	0,528	0,518	0,0278	-484,4	2081,011	2671,156	0,82	4,8506	1,79732E+15	0,2042	2,936
6	7,364	-0,007	1870,3	0,555	0,544	0,0265	-476,2	2083,916	2675,575	0,85	5,4139	1,6894E+15	0,2669	3,7768
7	7,344	-0,041	1899,8	0,58	0,568	0,0248	-466,7	2088,356	2682,846	0,87	5,8897	1,62091E+15	0,3297	4,5804
8	7,293	-0,071	1926,1	0,605	0,592	0,0237	-455,7	2096,858	2696,978	0,9	6,2442	1,63171E+15	0,3956	5,382
9	7,211	-0,097	1949	0,629	0,614	0,0234	-443,5	2105,914	2712,327	0,91	6,5882	1,64269E+15	0,4677	6,219
10	7,103	-0,121	1968,3	0,652	0,636	0,0227	-430	2112,189	2723,518	0,93	7,0222	1,56844E+15	0,5408	7,0124
11	6,97	-0,142	1984,3	0,673	0,656	0,0212	-415,4	2115,409	2730,061	0,94	7,514	1,4377E+15	0,6073	7,6659
12	6,816	-0,161	1997	0,694	0,676	0,0195	-399,7	2116,089	2732,739	0,96	8,0249	1,28981E+15	0,6637	8,1411

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося топлива	Диаметр частиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
13	6,645	-0,176	2006,5	0,713	0,694	0,0187	-383	2115,5	2733,59	0,97	8,5235	1,15194E+15	0,7103	8,4533
14	6,46	-0,188	2013,1	0,731	0,711	0,0182	-365,5	2114,573	2734,107	0,98	8,998	1,0297E+15	0,7469	8,6137
15	6,265	-0,196	2017,1	0,749	0,727	0,0168	-347,2	2113,021	2733,798	0,98	9,4717	9,1721E+14	0,7761	8,6616
16	6,062	-0,202	2018,7	0,765	0,742	0,0154	-328,3	2110,181	2731,566	0,99	9,9696	8,08539E+14	0,7978	8,6084
17	5,855	-0,204	2018,4	0,78	0,756	0,0145	-308,8	2104,92	2725,56	0,99	10,5493	6,95534E+14	0,8131	8,475
18	5,645	-0,205	2016,2	0,794	0,769	0,0138	-288,9	2096,863	2715,149	1	11,2504	5,79686E+14	0,8219	8,2698
19	5,435	-0,204	2012,4	0,808	0,781	0,0132	-268,7	2087,834	2703,246	1	12,0477	4,74141E+14	0,8256	8,0132
20	5,227	-0,203	2007	0,821	0,793	0,0125	-248,4	2079,732	2692,889	1	12,8182	3,92804E+14	0,8237	7,7093
21	5,021	-0,202	2000,2	0,832	0,804	0,0116	-227,9	2073,702	2685,92	1	13,524	3,3239E+14	0,8186	7,3848
22	4,819	-0,199	1992,2	0,843	0,813	0,0105	-207,5	2070,012	2682,763	1	14,1337	2,8857E+14	0,8112	7,0518
23	4,622	-0,195	1983,2	0,853	0,822	0,0093	-187	2066,937	2680,615	1	14,7228	2,52632E+14	0,8028	6,723
24	4,43	-0,189	1973,3	0,862	0,83	0,0081	-166,6	2063,003	2677,077	1	15,4078	2,17756E+14	0,7931	6,3986
25	4,245	-0,182	1962,7	0,87	0,837	0,0074	-146,3	2058,251	2672,212	1	16,1433	1,86757E+14	0,7823	6,0805
26	4,066	-0,175	1951,5	0,878	0,844	0,0074	-126,1	2053,128	2666,733	1	16,9273	1,59626E+14	0,7709	5,7724
27	3,894	-0,168	1939,7	0,886	0,851	0,0077	-106	2048,489	2662	1	17,702	1,37215E+14	0,7579	5,4679
28	3,729	-0,16	1927,5	0,893	0,857	0,0075	-86,2	2044,527	2658,312	1	18,4236	1,19536E+14	0,7443	5,175
29	3,571	-0,154	1914,9	0,9	0,863	0,0067	-66,6	2039,503	2652,884	1	19,1743	1,04063E+14	0,7304	4,8952
30	3,42	-0,147	1902,1	0,906	0,868	0,0057	-47,2	2032,247	2643,844	1	20,0629	8,90318E+13	0,7159	4,6258
31	3,276	-0,14	1889	0,911	0,872	0,0051	-28,2	2023,94	2633,079	1	21,0017	7,61712E+13	0,7026	4,378
32	3,138	-0,132	1875,8	0,917	0,877	0,0048	-9,4	2015,839	2622,597	1	21,9391	6,55698E+13	0,6894	4,1447
33	3,007	-0,126	1862,6	0,922	0,881	0,0049	9,1	2008,383	2613,096	1	22,823	5,71565E+13	0,6766	3,9254
34	2,883	-0,122	1849,5	0,927	0,886	0,005	27,2	2001,689	2604,761	1	23,624	5,05789E+13	0,664	3,7192
35	2,765	-0,116	1836,4	0,933	0,89	0,0052	45	1995,374	2596,983	1	24,3302	4,54219E+13	0,6514	3,5239
36	2,652	-0,109	1823,2	0,937	0,894	0,0051	62,4	1988,84	2588,811	1	24,9585	4,12309E+13	0,6383	3,3364
37	2,544	-0,104	1809,6	0,942	0,898	0,0046	79,6	1981,14	2578,737	1	25,5969	3,74535E+13	0,6254	3,1602
38	2,442	-0,102	1795,6	0,945	0,9	0,0038	96,4	1971,85	2566,087	1	26,4548	3,32602E+13	0,6132	2,9961
39	2,343	-0,099	1781	0,948	0,903	0,0028	112,8	1962,082	2552,644	1	27,2448	2,987E+13	0,6015	2,8434
40	2,249	-0,092	1766	0,951	0,904	0,0019	128,8	1953,089	2540,408	1	27,9176	2,72044E+13	0,5894	2,697
41	2,159	-0,084	1750,7	0,953	0,906	0,0015	144,4	1945,836	2530,891	1	28,4322	2,52373E+13	0,5776	2,5593
42	2,073	-0,081	1735,4	0,955	0,907	0,0014	159,7	1940,182	2523,855	1	28,8086	2,37702E+13	0,5659	2,4293
43	1,992	-0,079	1720,1	0,956	0,908	0,0014	174,7	1933,182	2514,64	1	29,1127	2,25612E+13	0,5543	2,3064
44	1,914	-0,076	1705	0,958	0,909	0,0015	189,3	1922,973	2500,303	1	29,4905	2,12521E+13	0,5427	2,1899

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося топлива	Диаметр частиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
45	1,841	-0,071	1690,5	0,96	0,91	0,0016	203,6	1911,765	2484,351	1	29,9563	1,98582E+13	0,5315	2,0808
46	1,773	-0,067	1676,5	0,962	0,911	0,0017	217,6	1901,532	2469,914	1	30,4142	1,85901E+13	0,5208	1,9787
47	1,708	-0,063	1663,2	0,964	0,913	0,0019	231,3	1891,86	2456,334	1	30,7927	1,75548E+13	0,5104	1,883
48	1,646	-0,06	1650,5	0,966	0,914	0,0022	244,6	1882,317	2442,926	1	31,0952	1,66964E+13	0,4998	1,7917
49	1,588	-0,057	1638,4	0,968	0,916	0,0024	257,7	1873,467	2430,577	1	31,3567	1,59492E+13	0,4896	1,7059
50	1,534	-0,054	1626,6	0,97	0,917	0,0024	270,4	1865,356	2419,362	1	31,5662	1,52968E+13	0,4791	1,623
51	1,481	-0,05	1614,8	0,972	0,918	0,0021	282,8	1856,243	2406,528	1	31,7095	1,47773E+13	0,4691	1,5462
52	1,43	-0,047	1602,3	0,973	0,919	0,0014	294,9	1845,259	2390,705	1	31,7903	1,43701E+13	0,4597	1,4747
53	1,381	-0,047	1589,3	0,974	0,919	0,0007	306,7	1834,617	2375,402	1	31,848	1,40514E+13	0,452	1,4117
54	1,335	-0,046	1576,6	0,974	0,919	0,0002	318,3	1825,85	2363,044	1	31,8927	1,37591E+13	0,4444	1,3523
55	1,291	-0,044	1564,7	0,975	0,92	0,0003	329,6	1817,348	2351,084	1	31,9296	1,34956E+13	0,4374	1,2971
56	1,25	-0,04	1553,4	0,977	0,921	0,001	340,6	1807,76	2337,382	1	31,9506	1,32195E+13	0,4293	1,2412
57	1,21	-0,037	1542,4	0,979	0,922	0,0018	351,3	1797,772	2323,027	1	31,9579	1,29578E+13	0,4211	1,1875
58	1,173	-0,036	1531,3	0,981	0,924	0,0021	361,9	1788,063	2309,093	1	31,9365	1,27319E+13	0,4129	1,1363
59	1,137	-0,035	1520,4	0,982	0,924	0,0014	372,1	1778,401	2295,213	1	31,9004	1,25526E+13	0,4057	1,09
60	1,102	-0,034	1509,7	0,982	0,924	0,0005	382,2	1768,527	2280,982	1	31,8616	1,24092E+13	0,3996	1,0485
61	1,069	-0,033	1499,3	0,983	0,924	0,0003	392	1758,511	2266,512	1	31,8325	1,22733E+13	0,3942	1,0103
62	1,038	-0,031	1488,9	0,984	0,925	0,0006	401,5	1748,51	2252,052	1	31,7902	1,2136E+13	0,3882	0,9725
63	1,008	-0,029	1478,4	0,985	0,925	0,001	410,9	1738,768	2237,983	1	31,7417	1,20013E+13	0,3822	0,9361
64	0,979	-0,028	1467,7	0,985	0,925	0,0008	420	1729,476	2224,601	1	31,6945	1,18742E+13	0,3764	0,9019
65	0,951	-0,027	1457	0,986	0,925	0,0003	428,9	1720,642	2211,917	1	31,6577	1,17578E+13	0,3714	0,8708
66	0,924	-0,026	1446,6	0,986	0,925	0	437,6	1712,206	2199,84	1	31,6411	1,16486E+13	0,3674	0,8432
67	0,898	-0,025	1436,6	0,986	0,925	0	446,1	1704,015	2188,131	1	31,6172	1,15407E+13	0,3632	0,8161
68	0,874	-0,024	1427	0,986	0,925	0,0003	454,3	1695,926	2176,566	1	31,5929	1,14319E+13	0,3589	0,7901
69	0,851	-0,022	1417,7	0,987	0,925	0,0006	462,4	1687,868	2165,037	1	31,5696	1,13255E+13	0,3548	0,7654
70	0,829	-0,022	1408,4	0,987	0,925	0,0007	470,3	1679,801	2153,483	1	31,5479	1,12257E+13	0,351	0,7421
71	0,807	-0,021	1399,1	0,988	0,925	0,0005	477,9	1671,744	2141,932	1	31,5273	1,11337E+13	0,3474	0,7204
72	0,787	-0,021	1389,8	0,988	0,925	0,0002	485,4	1663,704	2130,397	1	31,5199	1,10507E+13	0,3446	0,7009
73	0,767	-0,02	1380,6	0,988	0,924	-0,0001	492,7	1655,639	2118,816	1	31,5164	1,09788E+13	0,3422	0,6831
74	0,748	-0,02	1371,7	0,988	0,924	-0,0001	499,8	1647,554	2107,196	1	31,4741	1,09176E+13	0,3389	0,6641
75	0,73	-0,019	1362,8	0,988	0,923	-0,0001	506,7	1639,592	2095,757	1	31,4372	1,08676E+13	0,3362	0,6468
76	0,712	-0,018	1354,2	0,988	0,923	0	513,5	1631,823	2084,604	1	31,3958	1,08259E+13	0,3336	0,6304

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося топлива	Диаметр частиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
77	0,695	-0,017	1345,6	0,988	0,923	0	520,1	1624,056	2073,447	1	31,3501	1,07925E+13	0,3311	0,6148
78	0,679	-0,017	1337,2	0,988	0,922	0	526,5	1616,206	2062,159	1	31,3018	1,07695E+13	0,3289	0,6002
79	0,664	-0,016	1329	0,988	0,922	0	532,7	1608,589	2051,217	1	31,2531	1,07465E+13	0,3266	0,5861
80	0,649	-0,016	1320,8	0,988	0,922	0	538,8	1601,389	2040,901	1	31,204	1,07235E+13	0,3244	0,5725
81	0,634	-0,016	1312,9	0,988	0,921	0	544,8	1594,277	2030,715	1	31,1545	1,07006E+13	0,3222	0,5593
82	0,62	-0,015	1305,1	0,988	0,921	0	550,6	1587,041	2020,333	1	31,1032	1,06881E+13	0,3202	0,547
83	0,607	-0,015	1297,5	0,988	0,921	0	556,2	1579,992	2010,23	1	31,038	1,0677E+13	0,3179	0,5345
84	0,594	-0,014	1290,1	0,988	0,92	0	561,7	1573,333	2000,712	1	30,9915	1,06664E+13	0,3161	0,5234
85	0,582	-0,013	1282,8	0,988	0,92	0	567	1566,748	1991,3	1	30,9488	1,06541E+13	0,3145	0,5128
86	0,57	-0,011	1275,7	0,988	0,92	0	572,3	1560,039	1981,694	1	30,912	1,06405E+13	0,3129	0,5027
87	0,559	-0,011	1268,7	0,988	0,919	0	577,4	1553,544	1972,404	1	30,8798	1,06257E+13	0,3115	0,4932
88	0,548	-0,011	1261,8	0,988	0,919	0	582,3	1547,479	1963,76	1	30,8475	1,06109E+13	0,3101	0,4839
89	0,537	-0,011	1255,1	0,988	0,919	0	587,2	1541,505	1955,248	1	30,8151	1,05961E+13	0,3087	0,475
90	0,527	-0,011	1248,6	0,988	0,919	0	591,9	1535,403	1946,533	1	30,7824	1,05814E+13	0,3073	0,4663
91	0,517	-0,011	1242,1	0,988	0,918	0	596,5	1529,498	1938,11	1	30,7515	1,05662E+13	0,3059	0,4579
92	0,508	-0,01	1235,8	0,988	0,918	0	601	1524,015	1930,319	1	30,7314	1,05488E+13	0,3048	0,4502
93	0,499	-0,009	1229,7	0,988	0,918	0	605,4	1518,676	1922,738	1	30,7112	1,05313E+13	0,3037	0,4427
94	0,49	-0,008	1223,6	0,988	0,917	0	609,7	1513,268	1915,047	1	30,691	1,05139E+13	0,3026	0,4355
95	0,481	-0,007	1217,7	0,988	0,917	0	613,8	1507,973	1907,521	1	30,6706	1,04965E+13	0,3015	0,4284
96	0,473	-0,008	1212	0,988	0,917	0	617,9	1502,921	1900,355	1	30,6501	1,04791E+13	0,3004	0,4216
97	0,465	-0,008	1206,4	0,988	0,917	0	621,9	1497,928	1893,272	1	30,6373	1,04607E+13	0,2995	0,4153
98	0,458	-0,008	1200,9	0,988	0,916	0	625,7	1492,868	1886,082	1	30,6256	1,04421E+13	0,2987	0,4091
99	0,45	-0,008	1195,5	0,988	0,916	0	629,5	1487,898	1879,023	1	30,6139	1,04235E+13	0,2978	0,4032
100	0,443	-0,007	1190,2	0,988	0,916	0	633,2	1483,127	1872,255	1	30,6021	1,04049E+13	0,2969	0,3974
101	0,436	-0,006	1185,1	0,988	0,915	0	636,8	1478,406	1865,557	1	30,5903	1,03863E+13	0,296	0,3918
102	0,43	-0,006	1180	0,988	0,915	0	640,3	1473,63	1858,774	1	30,5817	1,03677E+13	0,2953	0,3865
103	0,423	-0,006	1175,1	0,988	0,915	0	643,7	1468,924	1852,09	1	30,5756	1,03492E+13	0,2946	0,3814
104	0,417	-0,006	1170,2	0,988	0,915	0	647	1464,394	1845,665	1	30,5694	1,03308E+13	0,2938	0,3765
105	0,411	-0,006	1165,4	0,988	0,914	0	650,3	1460,007	1839,449	1	30,5632	1,03123E+13	0,2931	0,3717
106	0,405	-0,006	1160,8	0,988	0,914	0	653,5	1455,738	1833,404	1	30,557	1,02938E+13	0,2924	0,367
107	0,4	-0,006	1156,2	0,988	0,914	0	656,6	1451,636	1827,604	1	30,5518	1,02759E+13	0,2918	0,3626
108	0,394	-0,005	1151,7	0,988	0,914	0	659,6	1447,702	1822,05	1	30,5493	1,02593E+13	0,2912	0,3584

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося топлива	Диаметр частиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
109	0,389	-0,005	1147,3	0,988	0,913	0	662,5	1443,764	1816,485	1	30,5469	1,02428E+13	0,2907	0,3543
110	0,384	-0,006	1143	0,988	0,913	0	665,4	1439,754	1810,81	1	30,5444	1,02262E+13	0,2902	0,3503
111	0,379	-0,005	1138,7	0,988	0,913	0	668,2	1435,951	1805,438	1	30,5419	1,02097E+13	0,2896	0,3465
112	0,374	-0,004	1134,6	0,988	0,913	0	670,9	1432,523	1800,618	1	30,5394	1,01931E+13	0,2891	0,3427
113	0,37	-0,004	1130,5	0,988	0,913	0	673,6	1429,196	1795,946	1	30,5369	1,01766E+13	0,2885	0,3391
114	0,365	-0,003	1126,5	0,988	0,912	0	676,2	1425,771	1791,123	1	30,5344	1,01601E+13	0,288	0,3355
115	0,361	-0,004	1122,5	0,988	0,912	0	678,7	1422,436	1786,431	1	30,5318	1,01435E+13	0,2875	0,3321
116	0,357	-0,005	1118,7	0,988	0,912	0	681,2	1419,318	1782,055	1	30,5298	1,01282E+13	0,287	0,3288
117	0,353	-0,005	1114,9	0,988	0,912	0	683,6	1416,208	1777,687	1	30,5287	1,01148E+13	0,2866	0,3256
118	0,349	-0,005	1111,2	0,988	0,911	0	686	1413,005	1773,177	1	30,5276	1,01015E+13	0,2861	0,3226
119	0,345	-0,004	1107,5	0,988	0,911	0	688,2	1410,041	1769,018	1	30,5264	1,00881E+13	0,2857	0,3196
120	0,341	-0,003	1104	0,988	0,911	0	690,5	1407,486	1765,46	1	30,5253	1,00747E+13	0,2853	0,3168
121	0,337	-0,003	1100,5	0,988	0,911	0	692,6	1404,893	1761,843	1	30,5241	1,00614E+13	0,2849	0,314
122	0,334	-0,003	1097	0,988	0,911	0	694,8	1401,995	1757,768	1	30,523	1,0048E+13	0,2845	0,3113
123	0,331	-0,003	1093,7	0,988	0,91	0	696,8	1399,255	1753,925	1	30,5218	1,00346E+13	0,2841	0,3086
124	0,327	-0,004	1090,4	0,988	0,91	0	698,8	1396,971	1750,75	1	30,5207	1,00213E+13	0,2837	0,306
125	0,324	-0,004	1087,1	0,988	0,91	0	700,8	1394,671	1747,549	1	30,5198	1,0009E+13	0,2833	0,3036
126	0,321	-0,003	1084	0,988	0,91	0	702,7	1392,052	1743,874	1	30,5191	9,99784E+12	0,283	0,3012
127	0,318	-0,003	1080,9	0,988	0,909	0	704,6	1389,584	1740,417	1	30,5185	9,98669E+12	0,2826	0,2989
128	0,315	-0,002	1077,8	0,988	0,909	0	706,4	1387,574	1737,632	1	30,5179	9,97553E+12	0,2823	0,2967
129	0,312	-0,002	1074,8	0,988	0,909	0	708,1	1385,557	1734,835	1	30,5173	9,96438E+12	0,282	0,2946
130	0,31	-0,001	1071,9	0,988	0,909	0	709,8	1383,227	1731,57	1	30,5166	9,95322E+12	0,2816	0,2924
131	0,307	-0,001	1069,1	0,988	0,909	0	711,5	1381,019	1728,481	1	30,516	9,94207E+12	0,2813	0,2904
132	0,305	-0,002	1066,3	0,988	0,908	0	713,1	1379,245	1726,029	1	30,5154	9,93091E+12	0,281	0,2884
133	0,302	-0,002	1063,6	0,988	0,908	0	714,7	1377,575	1723,729	1	30,5148	9,91976E+12	0,2806	0,2865
134	0,3	-0,002	1060,9	0,988	0,908	0	716,2	1375,741	1721,185	1	30,5148	9,90869E+12	0,2803	0,2846
135	0,297	-0,002	1058,2	0,988	0,908	0	717,7	1373,918	1718,655	1	30,5154	9,89767E+12	0,28	0,2828
136	0,295	-0,003	1055,7	0,988	0,908	0	719,1	1372,356	1716,506	1	30,516	9,88666E+12	0,2797	0,2811
137	0,293	-0,003	1053,1	0,988	0,908	0	720,5	1371,306	1715,102	1	30,5165	9,87564E+12	0,2794	0,2794
138	0,291	-0,004	1050,6	0,988	0,907	0	721,8	1371,015	1714,808	1	30,5171	9,86462E+12	0,2792	0,2777
139	0,289	-0,004	1048,2	0,988	0,907	0	723,1	1371,734	1715,99	1	30,5177	9,85361E+12	0,2789	0,2761
140	0,287	-0,004	1045,7	0,988	0,907	0	724,4	1373,713	1719,014	1	30,5182	9,84259E+12	0,2786	0,2746

Результаты моделирования сажеобразования в цилиндре дизеля при работе на этаноле и РМ
на номинальном режиме ($p_e = 0,588$ МПа, $n = 1800$ мин⁻¹)

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося этанола	Доля испарившегося РМ	Диаметр частиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
-14	2,75	0,099	843,5	0	0	0	-480,4	843,5	843,5	0,25	0,27				
-13	2,865	0,097	851,3	0	0	0	-487,8	846,6	846,6	0,3	0,3				
-12	2,98	0,096	859,2	0	0	0	-494,9	849,7	849,7	0,34	0,33				
-11	3,094	0,093	866,9	0	0	0,0001	-501,8	852,4	852,4	0,39	0,36				
-10	3,205	0,09	874	0	-0,001	0,0002	-508,2	854,7	854,7	0,44	0,38				
-9	3,31	0,086	880,4	0	-0,001	0,0001	-514,3	857,2	857,2	0,49	0,41				
-8	3,408	0,08	885,9	0	-0,001	-0,0003	-519,9	859,8	859,8	0,55	0,44				
-7	3,498	0,075	890,5	0	-0,001	-0,0006	-525	862	862	0,59	0,47				
-6	3,58	0,071	894,9	0	-0,001	-0,0004	-529,5	863,9	863,9	0,65	0,5				
-5	3,661	0,074	900,8	0	-0,001	0,0009	-533,5	866,6	866,6	0,7	0,52				
-4	3,747	0,087	909,8	0,002	0,001	0,0037	-536,8	871,9	871,9	0,74	0,55				
-3	3,851	0,113	925,4	0,008	0,006	0,008	-539,4	883,6	883,6	0,78	0,57				
-2	3,986	0,151	950,8	0,019	0,017	0,0137	-541,4	1069,603	1174,449	0,81	0,6	29,9795	2246781485	0,0001	0,0009
-1	4,162	0,197	988,4	0,036	0,034	0,0205	-542,6	1405,573	1677,592	0,84	0,62	29,8221	2259009455	0,0001	0,0009
0	4,38	0,24	1038,5	0,06	0,057	0,0275	-543	1555,03	1899,879	0,87	0,65	29,4044	2270585771	0,0001	0,0009
1	4,631	0,27	1099,5	0,091	0,088	0,0337	-542,5	1619,968	1994,917	0,9	0,67	28,7695	2285766995	0,0001	0,0008
2	4,902	0,281	1169,3	0,127	0,124	0,0384	-540,8	1700,357	2113,261	0,92	0,7	22,4397	4440754336	0	0,0007
3	5,176	0,274	1243,9	0,167	0,163	0,0415	-538	1817,433	2286,895	0,93	0,72	2,8035	2,00353E+12	0	0,0006
4	5,44	0,259	1321	0,21	0,206	0,044	-534	1891,749	2396,168	0,95	0,74	0,9048	1,3849E+15	0,001	0,0149
5	5,693	0,25	1400,7	0,256	0,252	0,0475	-528,6	1898,834	2404,26	0,96	0,76	1,6206	5,62555E+15	0,0238	0,3427
6	5,946	0,254	1486,4	0,307	0,302	0,0533	-521,8	1893,689	2394,08	0,97	0,78	2,5928	2,19134E+15	0,038	0,5381
7	6,209	0,27	1580,9	0,364	0,359	0,0613	-513,7	1904,368	2407,98	0,98	0,8	3,5403	1,66974E+15	0,0738	1,0248
8	6,475	0,281	1683,1	0,43	0,423	0,0698	-504,2	1917,177	2425,46	0,99	0,82	4,1365	1,4802E+15	0,1043	1,4193
9	6,727	0,252	1789,2	0,501	0,494	0,0735	-493,3	1924,354	2434,908	0,99	0,84	4,7801	1,13985E+15	0,124	1,6483
10	6,934	0,173	1891,1	0,572	0,564	0,0688	-481	1929,432	2441,656	1	0,86	5,5522	8,14536E+14	0,1388	1,8001
11	7,049	0,061	1975,1	0,635	0,625	0,0566	-467,4	1934,441	2448,771	1	0,87	6,3645	5,81431E+14	0,1493	1,884
12	7,051	-0,06	2032,9	0,683	0,672	0,04	-452,4	1938,484	2454,92	1	0,89	7,1419	4,31619E+14	0,1566	1,9204
13	6,947	-0,154	2064,5	0,716	0,704	0,025	-436,1	1941,075	2459,379	1	0,91	7,8053	3,42645E+14	0,1622	1,9309
14	6,774	-0,198	2077,5	0,737	0,723	0,0172	-418,6	1942,507	2462,589	1	0,92	8,3227	2,91635E+14	0,1674	1,9306
15	6,565	-0,211	2080,3	0,752	0,737	0,0153	-400,1	1942,986	2464,834	1	0,94	8,7555	2,59011E+14	0,1731	1,932

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	ХА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося этанола	Доля испарившегося РМ	Диаметр час-тиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
16	6,347	-0,217	2080,2	0,767	0,751	0,0149	-380,7	1942,547	2466,087	1	0,95	9,1563	2,34264E+14	0,1791	1,9322
17	6,124	-0,221	2078	0,781	0,764	0,0136	-360,7	1941,277	2466,382	1	0,96	9,5314	2,1455E+14	0,185	1,9282
18	5,9	-0,222	2074	0,794	0,775	0,0118	-340,4	1939,353	2465,864	1	0,97	9,8778	1,98804E+14	0,1908	1,9195
19	5,677	-0,221	2068,6	0,805	0,785	0,0107	-319,8	1936,976	2464,745	1	0,98	10,199	1,85811E+14	0,1963	1,9051
20	5,455	-0,218	2061,5	0,816	0,795	0,0108	-298,9	1934,363	2463,31	1	0,99	10,5146	1,7392E+14	0,2013	1,884
21	5,236	-0,213	2052,9	0,827	0,804	0,0105	-277,8	1931,571	2461,617	1	0,99	10,8349	1,62469E+14	0,2058	1,8562
22	5,021	-0,207	2043,1	0,836	0,813	0,0093	-256,8	1928,448	2459,423	1	0,99	11,1454	1,51954E+14	0,2095	1,8209
23	4,813	-0,202	2032,4	0,845	0,82	0,0081	-235,8	1924,952	2456,651	1	1	11,4394	1,42556E+14	0,2125	1,7795
24	4,611	-0,196	2021,1	0,853	0,828	0,008	-214,8	1921,199	2453,464	1	1	11,7289	1,3358E+14	0,2146	1,7314
25	4,415	-0,189	2008,9	0,861	0,834	0,0079	-193,9	1917,238	2449,927	1	1	12,0148	1,2502E+14	0,2159	1,6781
26	4,226	-0,182	1995,8	0,869	0,841	0,007	-173,2	1913,023	2445,961	1	1	12,282	1,17309E+14	0,2164	1,6204
27	4,044	-0,175	1982,2	0,875	0,846	0,0062	-152,8	1908,572	2441,592	1	1	12,5209	1,1066E+14	0,2163	1,5604
28	3,869	-0,167	1968,2	0,881	0,851	0,0058	-132,7	1903,999	2436,992	1	1	12,722	1,05094E+14	0,2155	1,4981
29	3,703	-0,159	1954,2	0,887	0,856	0,0056	-112,7	1899,359	2432,243	1	1	12,8881	1,00414E+14	0,214	1,4344
30	3,544	-0,151	1940,1	0,892	0,86	0,0055	-92,9	1894,627	2427,304	1	1	13,0326	9,62307E+13	0,2121	1,3704
31	3,393	-0,144	1925,9	0,897	0,865	0,0055	-73,6	1889,792	2422,154	1	1	13,1744	9,21287E+13	0,2098	1,3071
32	3,249	-0,138	1911,6	0,902	0,868	0,0054	-54,6	1884,875	2416,817	1	1	13,3272	8,78367E+13	0,207	1,2446
33	3,112	-0,131	1897,2	0,907	0,872	0,0052	-35,8	1879,87	2411,284	1	1	13,4975	8,33069E+13	0,204	1,1834
34	2,982	-0,123	1882,7	0,911	0,875	0,0048	-17,3	1874,739	2405,504	1	1	13,6814	7,87077E+13	0,2007	1,1242
35	2,858	-0,117	1868,2	0,915	0,879	0,0042	0,8	1869,412	2399,371	1	1	13,8643	7,42861E+13	0,1971	1,0664
36	2,74	-0,113	1853,6	0,919	0,882	0,0037	18,7	1863,794	2392,729	1	1	14,0434	7,02991E+13	0,1939	1,0134
37	2,628	-0,108	1839,1	0,923	0,885	0,0035	36,1	1858,126	2385,952	1	1	14,2054	6,67154E+13	0,1904	0,9622
38	2,521	-0,101	1824,7	0,926	0,887	0,0034	53,2	1853,068	2380,076	1	1	14,3626	6,33824E+13	0,187	0,9137
39	2,42	-0,095	1810,5	0,93	0,89	0,0033	69,9	1848,498	2374,909	1	1	14,5153	6,02582E+13	0,1835	0,8675
40	2,324	-0,092	1796,5	0,933	0,893	0,0033	86,4	1843,253	2368,632	1	1	14,6692	5,72482E+13	0,1799	0,8234
41	2,234	-0,09	1782,8	0,936	0,895	0,0032	102,4	1836,965	2360,676	1	1	14,8224	5,43873E+13	0,1764	0,7814
42	2,148	-0,084	1769,3	0,939	0,898	0,0031	118	1830,376	2352,214	1	1	14,9739	5,16879E+13	0,1728	0,7418
43	2,066	-0,078	1756	0,942	0,9	0,0029	133,4	1823,88	2343,866	1	1	15,1227	4,91534E+13	0,1693	0,7043
44	1,989	-0,074	1743	0,945	0,902	0,0028	148,4	1817,323	2335,381	1	1	15,2685	4,67822E+13	0,1658	0,669
45	1,915	-0,071	1730,3	0,948	0,904	0,0027	163	1810,678	2326,713	1	1	15,4124	4,45589E+13	0,1624	0,6359
46	1,845	-0,069	1717,8	0,951	0,906	0,0025	177,3	1804,118	2318,135	1	1	15,5539	4,24693E+13	0,1591	0,6046
47	1,779	-0,065	1705,5	0,953	0,908	0,0024	191,3	1797,399	2309,273	1	1	15,6922	4,05183E+13	0,1559	0,5752
48	1,716	-0,061	1693,4	0,955	0,91	0,0023	205	1789,747	2298,919	1	1	15,8325	3,86606E+13	0,1528	0,5476

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XA (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося этанола	Доля испарившегося РМ	Диаметр час-тиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
49	1,656	-0,056	1681,5	0,958	0,911	0,0022	218,3	1781,387	2287,423	1	1	15,9763	3,68905E+13	0,1498	0,5219
50	1,6	-0,053	1669,7	0,96	0,913	0,002	231,4	1773,852	2277,183	1	1	16,1151	3,52746E+13	0,147	0,498
51	1,545	-0,052	1658,1	0,962	0,914	0,0019	244,1	1767,47	2268,707	1	1	16,2529	3,3758E+13	0,1443	0,4756
52	1,493	-0,051	1646,5	0,963	0,915	0,0017	256,6	1760,903	2259,905	1	1	16,3889	3,23321E+13	0,1417	0,4546
53	1,444	-0,048	1634,9	0,965	0,916	0,0015	268,8	1753,616	2249,945	1	1	16,5079	3,11095E+13	0,1393	0,4353
54	1,397	-0,044	1623,4	0,966	0,917	0,0014	280,7	1746,253	2239,838	1	1	16,6261	2,99207E+13	0,1369	0,4166
55	1,351	-0,042	1611,8	0,967	0,917	0,0012	292,3	1739,091	2230,019	1	1	16,7241	2,89157E+13	0,1347	0,3994
56	1,308	-0,041	1600,3	0,968	0,918	0,001	303,6	1731,828	2220,022	1	1	16,8101	2,80002E+13	0,1324	0,3829
57	1,267	-0,04	1588,8	0,97	0,919	0,0008	314,7	1724,375	2209,71	1	1	16,8825	2,72228E+13	0,1304	0,3678
58	1,227	-0,039	1577,3	0,97	0,919	0,0007	325,5	1716,963	2199,439	1	1	16,9435	2,6546E+13	0,1286	0,3538
59	1,189	-0,036	1565,8	0,971	0,919	0,0006	336,1	1709,611	2189,239	1	1	16,9971	2,5949E+13	0,1269	0,3408
60	1,153	-0,033	1554,4	0,972	0,92	0,0006	346,5	1702,044	2178,682	1	1	17,0417	2,54297E+13	0,1253	0,3288
61	1,118	-0,031	1543,2	0,973	0,92	0,0005	356,6	1694,333	2167,879	1	1	17,0857	2,49358E+13	0,1238	0,3174
62	1,085	-0,03	1532,1	0,974	0,92	0,0006	366,5	1687,017	2157,665	1	1	17,1341	2,44616E+13	0,1225	0,3069
63	1,054	-0,03	1521,3	0,975	0,921	0,0006	376,2	1680,22	2148,232	1	1	17,1878	2,39843E+13	0,1213	0,297
64	1,023	-0,029	1510,7	0,976	0,921	0,0006	385,6	1673,496	2138,891	1	1	17,2531	2,34744E+13	0,12	0,2876
65	0,995	-0,028	1500,4	0,976	0,922	0,0007	394,8	1666,664	2129,361	1	1	17,3277	2,29658E+13	0,119	0,2789
66	0,967	-0,026	1490,5	0,977	0,922	0,0008	403,8	1659,934	2119,966	1	1	17,4252	2,23703E+13	0,1179	0,2704
67	0,941	-0,025	1481	0,979	0,923	0,0009	412,6	1653,408	2110,866	1	1	17,5371	2,17509E+13	0,1168	0,2625
68	0,916	-0,024	1471,9	0,98	0,923	0,001	421,2	1647,017	2101,951	1	1	17,6868	2,10015E+13	0,1157	0,2547
69	0,892	-0,023	1463,3	0,981	0,924	0,0012	429,6	1640,583	2092,951	1	1	17,8681	2,02194E+13	0,1149	0,2477
70	0,87	-0,023	1455	0,982	0,925	0,0013	437,8	1633,814	2083,423	1	1	18,0962	1,92966E+13	0,1139	0,2408
71	0,848	-0,022	1447	0,983	0,926	0,0013	445,8	1626,721	2073,384	1	1	18,3559	1,83365E+13	0,1129	0,2342
72	0,828	-0,02	1439,2	0,984	0,926	0,0014	453,6	1619,712	2063,455	1	1	18,6585	1,73193E+13	0,112	0,2279
73	0,808	-0,019	1431,6	0,985	0,927	0,0014	461,3	1612,992	2053,954	1	1	18,9869	1,6308E+13	0,1111	0,2219
74	0,789	-0,018	1424,2	0,986	0,927	0,0013	468,7	1606,472	2044,743	1	1	19,3347	1,53313E+13	0,1103	0,2162
75	0,771	-0,017	1416,9	0,987	0,928	0,0012	476	1600,047	2035,665	1	1	19,6764	1,44516E+13	0,1096	0,2109
76	0,753	-0,017	1409,7	0,988	0,928	0,0011	483,1	1593,62	2026,575	1	1	20,021	1,36226E+13	0,1089	0,2057
77	0,736	-0,016	1402,6	0,988	0,928	0,0009	490,1	1587,182	2017,458	1	1	20,3342	1,29268E+13	0,1082	0,201
78	0,72	-0,016	1395,6	0,988	0,928	0,0007	496,9	1580,833	2008,466	1	1	20,606	1,23466E+13	0,1076	0,1963
79	0,705	-0,015	1388,7	0,989	0,928	0,0005	503,5	1574,657	1999,729	1	1	20,8392	1,18709E+13	0,107	0,1919
80	0,689	-0,015	1381,8	0,989	0,928	0,0004	510	1568,705	1991,326	1	1	21,0332	1,14779E+13	0,1063	0,1877
81	0,675	-0,014	1375	0,989	0,927	0,0002	516,4	1562,871	1983,095	1	1	21,1901	1,11608E+13	0,1057	0,1836

φ (град. п.к.в.)	Р (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	Т (средняя температура газов, К)	Х (полное тепловыделение)	ХА (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	Т1 (Температура в зоне образования сажи, К)	Т2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося этанола	Доля испарившегося РМ	Диаметр час-тиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
82	0,661	-0,014	1368,2	0,989	0,927	0,0001	522,5	1556,846	1974,57	1	1	21,3082	1,0921E+13	0,1052	0,1797
83	0,647	-0,014	1361,4	0,989	0,927	0	528,5	1550,606	1965,714	1	1	21,3712	1,07751E+13	0,1047	0,1761
84	0,634	-0,014	1354,6	0,989	0,927	-0,0001	534,4	1544,502	1957,054	1	1	21,5224	1,04806E+13	0,104	0,1723
85	0,621	-0,014	1347,7	0,99	0,926	-0,0001	540,2	1538,653	1948,774	1	1	21,8093	1,00273E+13	0,1036	0,1689
86	0,609	-0,013	1340,9	0,99	0,926	-0,0001	545,8	1532,851	1940,561	1	1	22,2081	9,45284E+12	0,1031	0,1656
87	0,597	-0,012	1334	0,99	0,926	0	551,2	1526,988	1932,253	1	1	22,6506	8,8704E+12	0,1026	0,1625
88	0,586	-0,012	1327,1	0,99	0,926	0	556,6	1521,118	1923,93	1	1	23,1508	8,27256E+12	0,1022	0,1595
89	0,574	-0,011	1320,2	0,99	0,925	0	561,8	1515,309	1915,692	1	1	23,7063	7,67306E+12	0,1018	0,1566
90	0,563	-0,01	1313,3	0,99	0,925	0	566,9	1509,633	1907,651	1	1	24,3208	7,07771E+12	0,1014	0,1538
91	0,553	-0,01	1306,5	0,99	0,925	0	571,8	1504,148	1899,893	1	1	25,0083	6,485E+12	0,101	0,1512
92	0,543	-0,009	1299,7	0,99	0,924	0	576,7	1498,887	1892,466	1	1	25,7889	5,89177E+12	0,1006	0,1486
93	0,533	-0,008	1293,1	0,99	0,924	0	581,4	1493,78	1885,265	1	1	26,6975	5,28625E+12	0,1002	0,146
94	0,523	-0,008	1286,6	0,99	0,924	0	586	1488,634	1877,999	1	1	27,1891	4,99201E+12	0,0999	0,1438
95	0,514	-0,008	1280,3	0,99	0,923	0	590,6	1483,463	1870,687	1	1	27,4589	4,82896E+12	0,0995	0,1414
96	0,506	-0,009	1274	0,99	0,923	0	595	1478,56	1863,771	1	1	27,607	4,73706E+12	0,0992	0,1393
97	0,497	-0,009	1267,9	0,99	0,923	0	599,3	1474,032	1857,41	1	1	27,7285	4,66135E+12	0,099	0,1372
98	0,489	-0,008	1262	0,99	0,922	0	603,5	1469,72	1851,366	1	1	27,8305	4,59743E+12	0,0987	0,1352
99	0,481	-0,008	1256,2	0,99	0,922	0	607,6	1465,482	1845,426	1	1	27,9024	4,55045E+12	0,0984	0,1333
100	0,473	-0,007	1250,5	0,99	0,922	0	611,6	1461,222	1839,447	1	1	27,9755	4,50346E+12	0,0982	0,1314
101	0,466	-0,006	1244,9	0,99	0,921	0	615,6	1456,955	1833,451	1	1	28,0498	4,45648E+12	0,0979	0,1296
102	0,459	-0,006	1239,5	0,99	0,921	0	619,4	1452,827	1827,66	1	1	28,1252	4,4095E+12	0,0977	0,1279
103	0,452	-0,006	1234,2	0,99	0,921	0	623,1	1448,869	1822,113	1	1	28,1974	4,36478E+12	0,0974	0,1262
104	0,445	-0,006	1229,1	0,99	0,921	0	626,8	1444,94	1816,605	1	1	28,2326	4,33935E+12	0,0972	0,1246
105	0,439	-0,006	1224	0,99	0,92	0	630,3	1440,975	1811,037	1	1	28,2682	4,31392E+12	0,097	0,123
106	0,433	-0,006	1219,1	0,99	0,92	0	633,8	1437,017	1805,474	1	1	28,3041	4,28849E+12	0,0968	0,1215
107	0,427	-0,006	1214,2	0,99	0,92	0	637,2	1433,072	1799,925	1	1	28,3404	4,26306E+12	0,0966	0,1201
108	0,421	-0,006	1209,5	0,99	0,919	0	640,5	1429,091	1794,318	1	1	28,3755	4,23845E+12	0,0964	0,1186
109	0,415	-0,006	1204,8	0,99	0,919	0	643,8	1425,114	1788,713	1	1	28,3952	4,22221E+12	0,0963	0,1173
110	0,41	-0,005	1200,3	0,99	0,919	0	647	1421,299	1783,343	1	1	28,415	4,20598E+12	0,0961	0,116
111	0,404	-0,004	1195,8	0,99	0,918	0	650	1417,647	1778,211	1	1	28,435	4,18974E+12	0,0959	0,1147
112	0,399	-0,004	1191,4	0,99	0,918	0	653,1	1413,951	1773,011	1	1	28,4551	4,17351E+12	0,0957	0,1135
113	0,394	-0,003	1187,1	0,99	0,918	0	656	1410,225	1767,761	1	1	28,475	4,15753E+12	0,0956	0,1123
114	0,39	-0,003	1182,9	0,99	0,918	0	658,9	1406,782	1762,926	1	1	28,4897	4,1449E+12	0,0954	0,1112

φ (град. п.к.в.)	P (Давление в цилиндре)	dP/dφ (скорость изменения давления)	T (средняя температура газов, К)	X (полное тепловыделение)	XA (Активное тепловыделение)	dx/dφ (скорость тепловыделения)	Работа цикла, Дж	T1 (Температура в зоне образования сажи, К)	T2 (Температура в зоне выгорания сажи, К)	Доля испарившегося этанола	Доля испарившегося РМ	Диаметр час-тиц, нм	Количество частиц сажи, шт	N (массовое содержание сажи, мг)	[C] (массовая концентрация сажи, г/м ³)
115	0,385	-0,004	1178,8	0,99	0,917	0	661,7	1403,676	1758,585	1	1	28,5045	4,13227E+12	0,0953	0,1101
116	0,381	-0,005	1174,8	0,99	0,917	0	664,4	1400,604	1754,289	1	1	28,5193	4,11964E+12	0,0951	0,109
117	0,376	-0,006	1170,8	0,99	0,917	0	667,1	1397,456	1749,876	1	1	28,5342	4,10701E+12	0,095	0,108
118	0,372	-0,005	1167	0,99	0,916	0	669,7	1394,399	1745,594	1	1	28,5491	4,09449E+12	0,0949	0,107
119	0,368	-0,004	1163,3	0,99	0,916	0	672,3	1391,532	1741,59	1	1	28,5616	4,08388E+12	0,0947	0,106
120	0,364	-0,004	1159,6	0,99	0,916	0	674,8	1388,838	1737,836	1	1	28,5742	4,07327E+12	0,0946	0,1051
121	0,36	-0,003	1156	0,99	0,916	0	677,2	1386,264	1734,255	1	1	28,5868	4,06266E+12	0,0945	0,1041
122	0,357	-0,004	1152,5	0,99	0,915	0	679,5	1383,721	1730,716	1	1	28,5995	4,05205E+12	0,0944	0,1033
123	0,353	-0,004	1149	0,99	0,915	0	681,9	1381,152	1727,136	1	1	28,6122	4,04144E+12	0,0943	0,1024
124	0,349	-0,004	1145,6	0,99	0,915	0	684,1	1378,546	1723,496	1	1	28,625	4,03083E+12	0,0941	0,1016
125	0,346	-0,004	1142,3	0,99	0,915	0	686,3	1375,954	1719,873	1	1	28,6364	4,02134E+12	0,094	0,1008
126	0,343	-0,003	1139	0,99	0,914	0	688,4	1373,5	1716,449	1	1	28,6472	4,01239E+12	0,0939	0,1
127	0,34	-0,003	1135,8	0,99	0,914	0	690,5	1371,209	1713,262	1	1	28,6581	4,00343E+12	0,0938	0,0992
128	0,337	-0,002	1132,6	0,99	0,914	0	692,5	1368,972	1710,152	1	1	28,669	3,99447E+12	0,0937	0,0985
129	0,334	-0,002	1129,5	0,99	0,913	0	694,5	1366,696	1706,98	1	1	28,6799	3,98551E+12	0,0936	0,0978
130	0,331	-0,003	1126,4	0,99	0,913	0	696,4	1364,326	1703,667	1	1	28,6909	3,97656E+12	0,0935	0,0971
131	0,328	-0,003	1123,4	0,99	0,913	0	698,3	1361,977	1700,381	1	1	28,7014	3,96799E+12	0,0934	0,0964
132	0,325	-0,003	1120,4	0,99	0,913	0	700,1	1359,973	1697,599	1	1	28,7108	3,96028E+12	0,0933	0,0958
133	0,323	-0,004	1117,5	0,99	0,912	0	701,8	1358,289	1695,284	1	1	28,7203	3,95258E+12	0,0932	0,0952
134	0,32	-0,003	1114,7	0,99	0,912	0	703,5	1356,436	1692,719	1	1	28,7298	3,94488E+12	0,0931	0,0946
135	0,317	-0,003	1111,8	0,99	0,912	0	705,1	1354,29	1689,724	1	1	28,7393	3,93718E+12	0,0931	0,094
136	0,315	-0,003	1109	0,99	0,912	0	706,7	1352,248	1686,878	1	1	28,7488	3,92948E+12	0,093	0,0934
137	0,313	-0,003	1106,3	0,99	0,912	0	708,3	1350,739	1684,809	1	1	28,7584	3,92177E+12	0,0929	0,0929
138	0,31	-0,003	1103,6	0,99	0,911	0	709,8	1350,193	1684,148	1	1	28,7672	3,91465E+12	0,0928	0,0923
139	0,308	-0,003	1100,8	0,99	0,911	0	711,2	1351,04	1685,523	1	1	28,7758	3,90767E+12	0,0927	0,0918
140	0,306	-0,003	1098,2	0,99	0,911	0	712,6	1353,71	1689,564	1	1	28,7758	3,90767E+12	0,0927	0,0918

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Макетный образец трактора Т-30А80

На базе кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятской ГСХА был создан макетный образец трактора Т-30А80 для работы на рапсовом масле и этаноле. Рапсовое масло использовалось в качестве запального топлива и впрыскивалось в камеру сгорания отдельной форсункой. Для этого в головках дизеля были изготовлены посадочные отверстия под форсунки (рисунки Г-1 и Г-2).

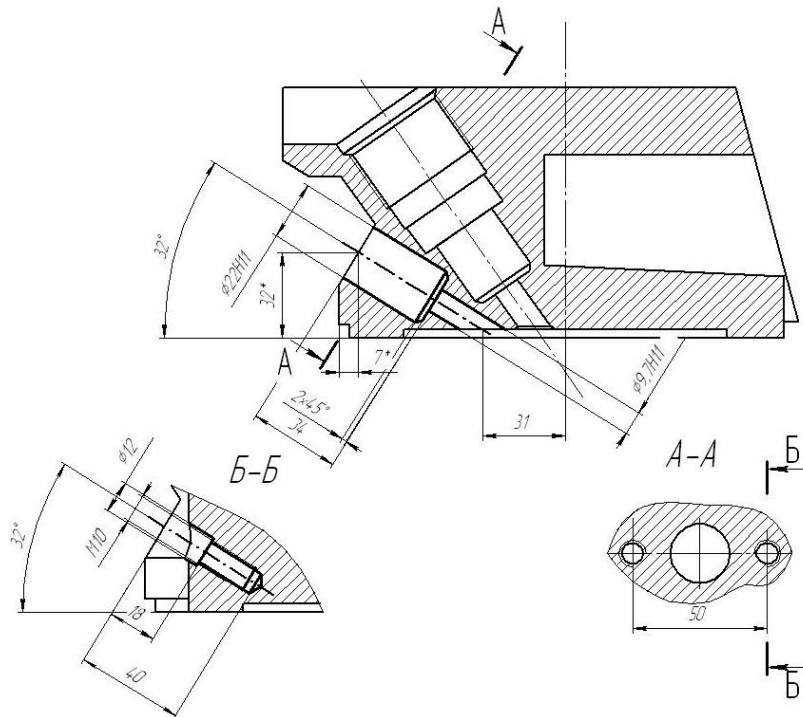


Рисунок Г-1 - Рабочий чертеж отверстия в головке цилиндра дизеля 2Ч10,5/12,0, выполненного для установки штифтовой форсунки



Рисунок Г-2 – Вид головок цилиндра с двойной системой топливоподдачи, установленных на тракторе

На днище поршня протачивалась канавка для распространения запального топливного факела в камеру сгорания. Запальное топливо подавалось при помощи отдельной системы подачи топлива, которая включала в себя дополнительный ТНВД, фильтры, топливопроводы высокого и низкого давления, комплект форсунок, дополнительный топливный бачок. Схема раздельной подачи топлива представлена на рисунке Г-3.

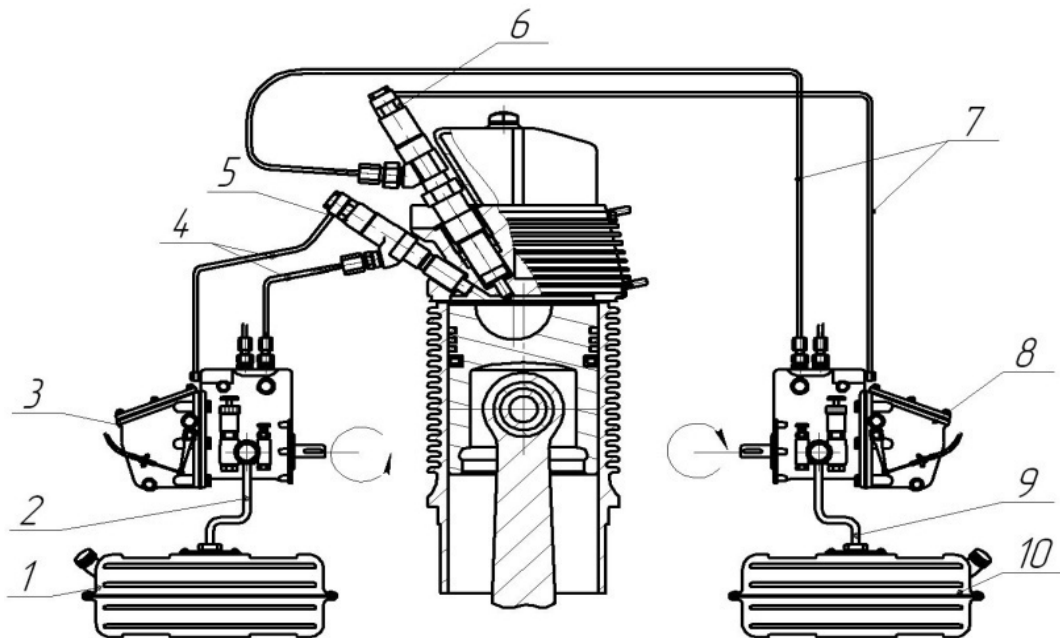


Рисунок Г-3 – Схема раздельной системы подачи топлива

1 и 10 - топливные баки для РМ и этанола; 2 и 4- топливопроводы низкого и высокого давления для подачи РМ; 3 и 8-ТНВД для подачи РМ и этанола; 5 и 6-форсунки для подачи РМ и этанола в цилиндр; 7 и 9- топливопроводы высокого и низкого давления для подачи этанола



Рисунок Г-4 – Размещение топливных насосов на тракторе

Пуск двигателя и работа на холостом ходу осуществлялся на рапсовом масле. Дальнейшее увеличение крутящего момента двигателя происходило за счет подачи спирта, при этом подача РМ оставалась постоянной.

Макетный образец трактора был представлен на выставке третьего международного экономического форума БиоКиров 2015 (рисунок Г-5).



Рисунок Г-5 – Трактор на выставке БиоКиров – 2015

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акты внедрения результатов исследований в учебный процесс и производство

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия»

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по научной и инновационной работе
ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА
доцент, с.н.к., профессор Е.В. Дабахова



Дабахова
_____ 2017 г.

АКТ
об использовании (внедрении) научно-исследовательской
работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерного факультета, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин, докт. техн. наук, профессор А.В. Пасин, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА), докт. техн. наук, профессор А.И. Новожилов и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов А.Н. Козлов составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Улучшение экологических показателей дизеля путем снижения дымности отработавших газов при работе на этаноле и рапсовом масле» (исполнитель – А.Н. Козлов, ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА) внедрена (использована) в учебном процессе: при чтении лекций, в курсовых и выпускных квалификационных работах для студентов, обучающихся по специальности 35.03.06 и 35.04.06 «Агроинженерия» на инженерном факультете ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА.

Декан инженерного факультета,
профессор кафедры мобильных энергетических
средств и сельскохозяйственных машин
ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА,
докт. техн. наук, профессор



А.В. Пасин

Заведующий кафедрой эксплуатации
мобильных энергетических средств
и сельскохозяйственных машин
ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА,
докт. техн. наук, профессор



А.И. Новожилов

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
ассистент кафедры тепловых
двигателей, автомобилей и тракторов



А.Н. Козлов

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего образования
 «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия»



УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА
 А.Е. Макушев

11 2017 г.

АКТ

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
 работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерного факультета, канд. техн. наук, доцент Пушкаренко Николай Николаевич, заведующий кафедрой транспортно-технологических машин и комплексов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА), докт. техн. наук, профессор Акимов Александр Петрович и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Козлов Андрей Николаевич составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Улучшение экологических показателей дизеля путем снижения дымности отработавших газов при работе на этаноле и рапсовом масле» (исполнитель – А.Н. Козлов, ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА) внедрена (используется) в учебном процессе на инженерном факультете ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА при чтении лекций студентам бакалаврам специальности 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.03.06 «Агроинженерия», магистрам специальности 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.04.06 «Агроинженерия», выполнении ими курсовых и выпускных квалификационных работ.

Декан инженерного факультета
 ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА,
 канд. техн. наук, доцент

Н.Н. Пушкаренко

Заведующий кафедрой
 транспортно-технологических машин и комплексов
 ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА,
 докт. техн. наук, профессор

А.П. АКИМОВ

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
 ассистент кафедры тепловых
 двигателей, автомобилей и тракторов

А.Н. Козлов

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Вятская государственная сельскохозяйственная академия»

И.о. ректора ФГБОУ ВО Вятская ГСХА
докт. техн. наук, профессор В.Е. Мохнаткин



2017 г.

АКТ
об использовании (внедрении) научно-исследовательской
работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерного факультета, заведующий кафедрой эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка, докт. техн. наук, профессор Р.Ф. Курбанов, заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов, докт. техн. наук, профессор В.А. Лиханов и ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА) А.Н. Козлов составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Улучшение экологических показателей дизеля путем снижения дымности отработавших газов при работе на этаноле и рапсовом масле» (исполнитель – А.Н. Козлов, ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), внедрена (использована) 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» на инженерном факультете ФГБОУ ВО Вятская ГСХА.

Декан инженерного факультета,
заведующий кафедрой эксплуатации и
ремонта машинно-тракторного парка
ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
докт. техн. наук, профессор

Р.Ф. Курбанов

Заведующий кафедрой
тепловых двигателей, автомобилей и тракторов
ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
докт. техн. наук, профессор

В.А. Лиханов

Ассистент кафедры тепловых
двигателей, автомобилей и тракторов
ФГБОУ ВО Вятская ГСХА

А.Н. Козлов



Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
 Департамент научно-технологической политики и образования
**федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего образования**

«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»
 156530, Костромская обл., Костромской р-н, пос. Караваяво, Учебный городок, Караваявская с/а, дом 34,
 ОКПО 00493296, ОГРН 1024402232513, ИНН 4414001246, КПП 441401001
 Факс: (4942) 65-76-99; Тел: (4942) 65-71-10; E-mail: van@ksaa.edu.ru. Сайт: www.kgsxa.ru

№ 84-21/20 от « 10 » 11
 2017 г.
 На № _____ от « » _____
 20 г.



УТВЕРЖДАЮ:
 Ректор ФГБОУ ВО Костромская ГСХА
С.Ю. Зудин
 « 10 » ноября 2017 г.

АКТ

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
 работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерно-технологического факультета, кандидат технических наук, доцент С.А. Полозов, заведующий кафедрой тракторы и автомобили федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Костромская ГСХА), кандидат технических наук, доцент А.М. Молодов и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов А.Н. Козлов составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Улучшение экологических показателей дизеля путем снижения дымности отработавших газов при работе на этаноле и рапсовом масле» (исполнитель – А.Н. Козлов, ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), внедрена (использована) в учебном процессе при изучении дисциплин по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства, бакалавриата по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» на инженерно-технологическом факультете ФГБОУ ВО Костромская ГСХА.

Декан инженерно-технологического
 факультета ФГБОУ ВО Костромская ГСХА,
 канд. техн. наук, доцент

С.А. Полозов С.А. Полозов

Заведующий кафедрой
 Тракторы и автомобили
 ФГБОУ ВО Костромская ГСХА,
 канд. техн. наук, доцент

А.М. Молодов А.М. Молодов

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
 ассистент кафедры тепловых
 двигателей, автомобилей и тракторов

А.Н. Козлов А.Н. Козлов

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Казанский государственный аграрный университет»



УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО Казанский ГАУ,
профессор Д.И. Файзрахманов

«___» _____ 2018 г.

АКТ

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, директор института механизации и технического сервиса, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин доктор технических наук, профессор С.М. Яхин, заведующий кафедрой тракторы, автомобили и энергетические установки доктор технических наук, профессор К.А. Хафизов и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», ассистент кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов А.Н. Козлов составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему «Улучшение экологических показателей дизеля путем снижения дымности отработавших газов при работе на этаноле и рапсовом масле» (исполнитель А.Н. Козлов, ассистент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), внедрена (используется) в учебном процессе при изучении дисциплин по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки: 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» в институте механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО Казанский ГАУ.

Директор института механизации
и технического сервиса
доктор технических наук, профессор

С.М. Яхин

Заведующий кафедрой тракторы,
автомобили и энергетические установки
доктор технических наук, профессор

К.А. Хафизов

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
ассистент кафедры ТД,АиТ

А.Н. Козлов

УТВЕРЖДАЮ
И.о. ректора
ФГБОУ ВО Вятская ГСХА
профессор В.Е. Мохнатин
« 12 » 2018 г.



СОГЛАСОВАНО
Декан инженерного факультета
ФГБОУ ВО Вятская ГСХА
профессор Р.Ф. Курбанов
« 12 » 2018 г.



Акт

о создании опытного образца трактора Т-30А80

Настоящий акт составлен комиссией в составе: заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятской ГСХА доктор технических наук, профессор В.А. Лиханов, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов, заместитель декана инженерного факультета кандидат технических наук, доцент А.В. Россохин, кандидат технических наук О.П. Лопатин, в том, что по результатам научно-исследовательской работы, проведенной аспирантами кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятской ГСХА В.Н. Копчиковым, А.В. Фоминых, М.И. Араслановым, А.Н. Козловым, на базе кафедры создан опытный образец трактора Т-30А80 с дизелем Д-21А1, переоборудованным для работы на этаноле и рапсовом масле с улучшенными экологическими показателями, с целью проведения его функциональных и эксплуатационных испытаний для подтверждения заявленных мощностных и экологических характеристик и выработки практических рекомендаций для внедрения образца в серийное производство. Опытный образец трактора принял участие в выставке третьего международного экономического форума БиоКиров 2015.

Заведующий кафедрой тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов, доктор технических наук,
профессор

В.А. Лиханов

Заместитель декана инженерного факультета,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Россохин

Доцент кафедры тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов,
кандидат технических наук

О.П. Лопатин



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ЗАО Племзавод «Октябрьский»А.Н. Росляков
2018 года

АКТ

о проведении эксплуатационных испытаний

Настоящий акт составлен комиссией в составе: главный инженер ЗАО Племзавод «Октябрьский» В.В. Снигерев, инженер по эксплуатации машинно-тракторного парка ЗАО Племзавод «Октябрьский» С.Н. Цепелев, сотрудники кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» М.И. Арасланов, А.Н. Козлов, заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор В.А. Лиханов в том, что в 2018 году на животноводческом комплексе ЗАО Племзавод «Октябрьский» проведены эксплуатационные испытания трактора Т-30А80, модернизированного для работы на этиловом спирте и рапсовом масле, в составе машинно-тракторного агрегата с раздатчиком кормов РММ-5,0. Во время эксплуатационных испытаний, проходивших с апреля по октябрь 2018 года, наработка трактора составила 240 моточасов при среднем часовом расходе этанола 2,9 кг/моточас, и рапсового масла 0,9 кг/моточас. В результате испытаний трактор показал высокую эффективность и надежность работы, подтвердил заявленные проектные характеристики.

От ЗАО Племзавод «Октябрьский»:

Главный инженер

В.В. Снигерев

Инженер по эксплуатации
машинно-тракторного парка

С.Н. Цепелев

От кафедры ТД,АиТ ФГБОУ ВО Вятской ГСХА:

Заведующий кафедрой ТД,А и Т

В.А. Лиханов

Ассистент кафедры ТД,А и Т

А.Н. Козлов

Ассистент кафедры ТД,А и Т

М.И. Арасланов



**МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ
КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

ул. Дерендяева, д.23,
г. Киров обл., 610020
Тел.: (8332) 64-68-57
Факс: (8332) 64-76-88, 32-10-59
E-mail: dsx@dsx-kirov.ru

Руководителям сельскохозяйственных
предприятий Кировской области
(по списку)

14.02.2019 № *226-44-11*

на № _____

Рекомендации
для использования в производстве

Министерство сельского хозяйства и продовольствия Кировской области, рассмотрев результаты исследований применения рапсового масла в качестве топлива для дизелей, проведенных аспирантами А.Н. Козловым, М.И.Араслановым, В.Н. Копчиковым, А.В. Фоминых, под руководством заведующего кафедрой, доктора технических наук, профессора В.А. Лиханова, на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», рекомендует предприятиям, занимающимся производством и переработкой рапса, в частности ООО «Лебяжский завод растительных масел», предлагать рапсовое масло для реализации в качестве альтернативного моторного топлива с целью расширения объемов производства.

Заместитель министра сельского
хозяйства и продовольствия
Кировской области,
кандидат сельскохозяйственных наук



Е.А. Софронов