

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»
Институт механизации и технического сервиса
Кафедра «Эксплуатация и ремонт машин»
Направление подготовки – 35.04.06 Агроинженерия
Магистерская программа – Технический сервис в сельском хозяйстве

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

ТЕМА: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИСАДКИ К ТОПЛИВУ НА
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ

Студент магистратуры _____ Галлямов Н.Ф.

Научный руководитель,
к.т.н., доцент _____ Матяшин А.В.

Рецензент
д.т.н., профессор _____ Нуруллин Э.Г.

Обсужден на заседании кафедры и допущен к защите

Протокол № 14 от 3.06.2019 г.

Заведующий кафедрой

«Эксплуатация и ремонт машин» _____ Адигамов Н.Р.

Казань – 2019

АННОТАЦИЯ

К выпускной квалификационной работе магистра Галлямова Н.Ф. на тему «Исследование влияния присадки к топливу на экологические показатели двигателя»

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки на ____ листах машинописного текста.

Записка состоит из введения, четырех разделов, выводов и включает ____ рисунков, ____ таблицы. Список используемой литературы содержит ____ наименований.

В первом разделе выполнен анализ состояния вопроса, определены факторы влияющие на экологические показатели работы двигателя приведены экологические нормативы изучаемых параметров.

Во втором разделе проведены теоретические расчёты двигателя, составлены математические модели и проведены численные эксперименты.

В третьем разделе разработана методика проведения натурных исследований.

В четвертом разделе представлены результаты проведения натурных исследований и их анализ.

В пятом разделе приведены расчеты по экономическому обоснованию результатов проведенных исследований.

Записка завершается выводами.

ANNOTATION

To the final qualifying work of the master Gallyamov N.F. on the theme "The study of the effect of fuel additives on the environmental performance of the engine"

Final qualifying work consists of an explanatory note on ____ sheets of typewritten text.

The note consists of an introduction, four sections, conclusions and includes ____ figures, ____ tables. The list of used literature contains ____ items.

In the first section, an analysis of the state of the issue is carried out, the factors influencing the environmental performance of the engine are determined and the environmental standards of the parameters studied are given.

In the second section, theoretical calculations of the engine are performed, mathematical models are compiled, and numerical experiments are performed.

In the third section, a methodology for carrying out field studies is developed.

The fourth section presents the results of field studies and their analysis.

The fifth section provides calculations for the economic justification of the results of the research.

The note ends with a conclusion.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	
1.1 Снижение токсичности отработавших газов как фактор повышения экологической безопасности дизелей.....	
1.2 Вредные выбросы дизелей и их воздействие на окружающую среду.....	
1.3 Оценка и нормирование вредных выбросов дизелей, природоохранные стандарты.....	
1.4 Основные пути снижения вредных выбросов в процессе эксплуатации дизелей.....	
1.5 Антидымные присадки к топливу, механизмы их действия.....	
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	
2.1 Присадки для топлива.....	
2.2 Механизм действия антидымной присадки на основе аминоксилола.....	
2.3 Математическая модель процесса тепловыделения в цилиндре двигателя при добавлении в топливо антидымной присадки	
2.4 Математическая модель процесса образования сажи при горении в цилиндре двигателя топлива.....	
2.5 Показатели эффективности использования антидымной присадки к топливу.....	
2.6 Выводы по разработанным математическим моделям.....	
3 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	
3.1 Методика экспериментальных исследований.....	
3.2 Эксплуатационные испытания.....	
3.3 Методика проведения измерений.....	
4 ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	
4.1. Анализ концентрации оксида углерода в отработавших газах двигателя....	
4.2 Анализ концентрации сажи в отработавших газах двигателя.....	
4.3 Анализ концентрации оксидов азота в отработавших газах двигателя.....	
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	

5.1 Расчет годового экономического эффекта от применения антидымной присадки.....	
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом возрастает техногенное воздействие транспортных средств на окружающую среду. Около 40 % токсичных веществ и сажи поступает в атмосферу с отработавшими газами ДВС. Ежегодный экологический ущерб от работы транспортных средств в Российской Федерации составляет более 900 млрд. руб.

Дизелизация транспорта привела к усугублению проблемы, так как двигателями выбрасывается до одного процента сажи в виде твердых частиц от общего расхода топлива.

Снижение выбросов твердых частиц связано со значительным удорожанием и усложнением систем питания, применением дополнительно системы ЕГР в системе выпуска двигателей. Ввиду взаимосвязанности внутрицилиндровых процессов почти все мероприятия, направленные на повышение топливной экономичности и снижение выбросов продуктов неполного сгорания топлива, приводят, как правило, к увеличению образования оксидов азота NO_x .

Удельные выбросы дизелей при работе на режимах полной нагрузки достигают: с оксидом углерода (CO) - 1,5...12,0 г/(кВт·ч); с углеводородами суммарно (C_xH_y) - 1,5...8,00 г/(кВт·ч); с бенз(а)пиреном - $1 \cdot 10^{-6}$... $2 \cdot 10^{-6}$ г/(кВт·ч); с оксидом азота (NO_x) - 10...30 г/(кВт·ч); с твердыми частицами, включая сажу, - 0,25...2,0 г/(кВт·ч) [55].

Традиционно сложилось несколько направлений снижения вредных выбросов дизелей, в том числе за счет:

- совершенствования рабочих процессов;
- применения малотоксичных регулировок;
- использования альтернативных топлив и антидымных присадок к дизельному топливу;
- установки в выпускной системе двигателя каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров.

Последние два направления не требуют модернизации в дизелестроении и

рассчитаны в основном на дизели, находящиеся в эксплуатации. Учитывая длительность создания и отработки новых рабочих процессов, небольшую эффективность влияния регулировок на снижение вредных выбросов, наиболее перспективным и простым в применении способом является изменение состава топлива путем добавления в него специальных присадок и использование его в рабочем процессе двигателя.

Актуальность настоящего исследования заключается во внедрении антидымных присадок на основе аминоксилола к топливу, позволяющих снизить выбросы вредных веществ с отработавшими газами без изменения конструкции дизелей и систем их питания не только относительно новых, но и находящихся длительное время в эксплуатации.

Цель работы - улучшение экологических показателей тракторного двигателя Д 240 с применением антидымных присадок к топливу на основе аминоксилола, обеспечивающего эффективное снижение вредных выбросов при его эксплуатации.

Объект исследований — рабочий процесс двигателя на топливе с антидымной присадкой.

Предмет исследований: экологические показатели и характеристики двигателя с антидымной присадкой к топливу, работающего на различных скоростных и нагрузочных режимах.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- скорректированная методика теплового расчёта рабочего цикла двигателя, позволяющая производить оценку параметров цикла двигателя, работающего с антидымной присадкой на основе аминоксилола;

- математическая модель процесса образования сажи в цилиндре двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой;

- комплексная оценка эффективных и токсических характеристик двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой на основе аминоксилола :

- проведены испытания антидымной присадки , добавляемой в дизельное

топливо и обеспечивающей эффективное снижение продуктов неполного сгорания (СО, СН и сажи).

Методология и методы исследований. Методологической основой для выполнения работы являлись современные методы теоретических и экспериментальных исследований антидымной присадки. Теоретические исследования включали в себя типовые апробированные методики: тепловой расчёт двигателя; основу экспериментальных исследований составили эксплуатационные испытания.

Реализация результатов исследований. Участие в международной научно-практической конференции «Современное состояние проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса» Казань 2018-2019.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика теплового расчёта рабочего цикла двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой на основе аминоксилола;
2. Математические модели процессов тепловыделения и образования сажи в цилиндре двигателя, работающего на топливе с присадками.
3. Результаты экспериментальных исследований эффективных и токсических характеристик двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой, технико-экономическая оценка их применения.

Апробация результатов исследования. Положение работы и ее результаты отражены в статьях:

1. Влияние технического состояния газораспределительного механизма на экологические показатели двигателя
2. Технические решения по снижению токсичности отработавших газов дизельных двигателей

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы .

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Снижение токсичности отработавших газов как фактор повышения экологической безопасности дизелей

Атмосферный воздух загрязняется различными токсичными веществами. Большое количество вредных веществ поступает в атмосферу с отработавшими газами ДВС. В современных мегаполисах наблюдается превышение среднесуточных предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в воздухе в 2-3 раза. Так, например, содержание в атмосферном воздухе оксидов азота (NO_x) вблизи напряженных автотранспортных магистралей с интенсивным движением превышает ПДК в 7-8 раз, вблизи крупных железнодорожных узлов - в 8-10 раз, в месте размещения стационарных ДВС с мощностью более 1 МВт - в 12-14 раз [77, 78].

Согласно прогнозам ООН, основанным на анализе тенденций смены автотракторного парка и современных достижений в создании новых альтернативных источников энергии, ДВС в ближайшие 50 лет сохранят ведущее положение на транспортных средствах.

Проблеме снижения токсичности и дымности отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей посвящено множество отечественных и зарубежных научных работ. Большой вклад в изучение вопросов, связанных с повышением экологической безопасности дизелей, внесли ученые: Звонов, В.Ф. Кайзер, М.Г. Ла-дыгичев, В.А. Лиханов, В.Н. Ложкин, П.Д. Лупачёв, Р.В. Малов, М. Муссави, А.В. Николаенко, А.Л. Новоселов, В.И. Панчишный, Н.Н. Патрахальцев, С. Пи-шингер, А.М. Сайкин, и др. Результатами проведенных ими исследований являются: обобщение данных о содержании в отработавших газах токсичных веществ, методики расчетов их концентраций в цилиндре двигателя, разработка методов и средств очистки ОГ, математические модели процессов, протекающих в системах

нейтрализации, и данные об их эффективности.

По данным Министерства транспорта РФ, к началу 2019 г. автомобильный парк г России составил 27,06 млн транспортных средств, в том числе 20,12 млн легковых, 4,57 млн грузовых автомобилей, 0,65 млн автобусов. Ежегодный экологический ущерб от работы транспортных средств РФ составляет 3,4 млрд долл. США, или около 1,5 % валового национального продукта России [84].

К основным факторам воздействия мобильной техники на человека и окружающую среду относят: выбросы вредных химических веществ; виброакустическое воздействие; электромагнитное излучение (не ионизирующее); отходы эксплуатации.

Биологическое действие электрических и магнитных полей автотранспорта не превышает порога гигиенической безопасности в диапазоне от $100 \text{ мкВт} \cdot \text{см}^{-2}$ до $1 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ [100].

Иначе обстоит дело с виброакустическим и химическим воздействием автотранспорта и мобильной сельскохозяйственной техники на человека и окружающую среду, так как с их отработавшими газами в атмосферу выбрасываются сильнейшие токсичные и канцерогенные вещества (таблица 1.1).

Таблица 1.1- Основные опасные ингредиенты, содержащиеся в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания

Ингредиент	Топливо		
	дизельное	природный газ	бензин
Оксид углерода (CO), млн ⁻¹	200...400	10...8000	300...50000
Летучие углеводороды ($\sum$ CH), млн ⁻¹	До 300	До 600 (метан CH ₄)	До 10000
Альдегиды, млн ⁻¹	До 20	«Следы»	До 40
Оксиды азота (NO _x)	200...2000	300...800	1000...4000
Сажа, г/м ³	До 0,25	«Следы»	До 0,05
Бенз(а)пирен, мкг/м ³	До 20	До 0,8	До 80

Для канцерогенных веществ (например, бенз(а)пирена), вызывающих злокачественные опухоли, и ионизирующей радиации не существует нижних пределов безопасности: любые их количества, превышающие природный фон, опасны для человека.

Дизельный двигатель наиболее эффективен для преобразования тепловой энергии, выделяющейся при сгорании топлива, в механическую. Удельный расход топлива у дизельного двигателя на 26-35 % ниже, чем у карбюраторного, за счет более высокого коэффициента полезного действия. Поэтому основной объем перевозок в Российской Федерации и за рубежом осуществляется дизельным автотранспортом, а мобильная сельскохозяйственная техника работает в основном на дизельной тяге. Однако токсичные выбросы дизелей негативно влияют на экологическую обстановку и в районах возделывания сельскохозяйственных культур. Они загрязняют состав воздуха как в кабинах тракторов, самоходных машин, комбайнов, так и в животноводческих комплексах, внутрицеховых помещениях, парниках, хранилищах, складах и других местах с ограниченным воздухообменом. Поэтому отработавшие газы дизелей,

содержащие высокотоксичные вещества, являются серьёзной экологической проблемой, актуальность которой возрастает в связи с постоянным ростом мирового парка мобильной техники. Общий ущерб от этого загрязнения в развитых странах составляет десятки миллиардов долларов ежегодно [75, 78, 102].

Действующие в России нормы на выбросы токсичных компонентов значительно уступают требованиям ИСО и правилам ЕЭК ООН. Ситуация для производителей автомобилей ещё более усугубляется тем, что с 1 января 2018 г. в РФ введены строгие нормы на выброс основных токсичных компонентов (CO , CH , NO_x , сажи) «Евро-6», которые ужесточают действующие почти на порядок. Отсюда уменьшение токсичных выбросов и дымности становится одной из первоочередных задач для отечественного дизелестроения. Это послужило основанием для разработки высокоэффективных методов и систем снижения токсичности отработавших газов автотракторных дизелей, что отражено в «Концепции развития сельскохозяйственных тракторов и тракторного парка России» [61]. Специальные исследования показывают, что уровень загрязнения атмосферного воздуха может быть существенно снижен и даже нормализован, если технические нормативы выбросов всех эксплуатируемых двигателей будут соответствовать действующим стандартам [53, 97].

Токсичность ДВС в настоящее время снижают способами, которые основаны на конструктивном изменении двигателей, использовании альтернативных видов топлива и присадок к нему. Применяются также рециркуляция отработавших газов и оснащение двигателей нейтрализаторами и сажевыми фильтрами.

Внесение значительных изменений в конструкцию двигателей, а также применение альтернативных видов топлива потребуют серьёзной перестройки промышленности, топливно-энергетического комплекса, вложения крупных инвестиций. А это в условиях российской экономики почти невозможно. Данные методы, снижая токсичность, как правило,

ухудшают мощностные и экономические показатели двигателей.

Динамично развивающийся парк дизельной мобильной техники создаёт высокую экологическую нагрузку на природную среду, значительно превосходящую допустимые нормы. Однако применение большинства существующих методов снижения токсичных выбросов дизелей по указанным причинам весьма затруднительно. Достаточно эффективным и приемлемым с точки зрения материальных затрат способом достижения современных и еще более жестких перспективных норм допустимой токсичности является термохимическая очистка ОГ в выпускной системе двигателя и применение антидымных присадок к топливу [60, 102].

При этом присадки, как правило, используются в двух основных случаях:

- при изготовлении топлив для получения продукта, удовлетворяющего требованиям стандартов;
- при использовании стандартных топлив с присадками для улучшения их эксплуатационных, экологических и ресурсных характеристик.

Таким образом, снижение токсичных выбросов и дымности ДВС становится первоочередной задачей как при проектировании и изготовлении новых отечественных дизелей, так и при эксплуатации имеющихся.

1.2 Вредные выбросы дизелей и их воздействие на окружающую среду

Проблема охраны окружающей среды обострилась в XX в., когда скачкообразное развитие промышленности и транспорта, а также несовершенство технологических процессов привели к загрязнению окружающей среды. Ежегодно в мире в атмосферу выбрасывается около 350 млн т окиси углерода, более 50 млн т различных углеводородов, 150 млн т двуокиси серы [7, 67]. В атмосфере увеличивается содержание углекислого газа, уменьшается количество кислорода.

Один из главных источников загрязнения атмосферного воздуха -

отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания (в том числе и дизелей), которые установлены практически на всех мобильных машинах [107, 119].

Выбросы дизелей мобильной техники в РФ представлены в таблице 1.2

Таблица 1.2- Выбросы дизелей мобильной техники в Российской Федерации

Вид мобильной техники	Вредные вещества, млн т				
	оксиды азота	оксиды углерода	углеводороды	оксиды серы	твердые частицы
Тракторы, используемые в сельском	1,50	0,80	0,15	0,10	0,06
Прочие тракторы и самоходные	1,20	0,64	0,12	0,08	0,03
Комбайны	0,30	0,16	0,03	0,01	0,01
Итого	3,00	1,60	0,30	0,19	0,010

Отработавшие газы дизелей представляют собой сложную смесь, которая включает более 200 компонентов. Содержание основных компонентов в ОГ дизелей представлено на рисунке 1.1. По химическому составу и свойствам, а также по характеру воздействия на организм человека их объединяют в группы [51, 60].

Первая группа содержит нетоксичные вещества: азот, кислород, водород, водяной пар, углекислый газ и другие естественные компоненты атмосферного воздуха.

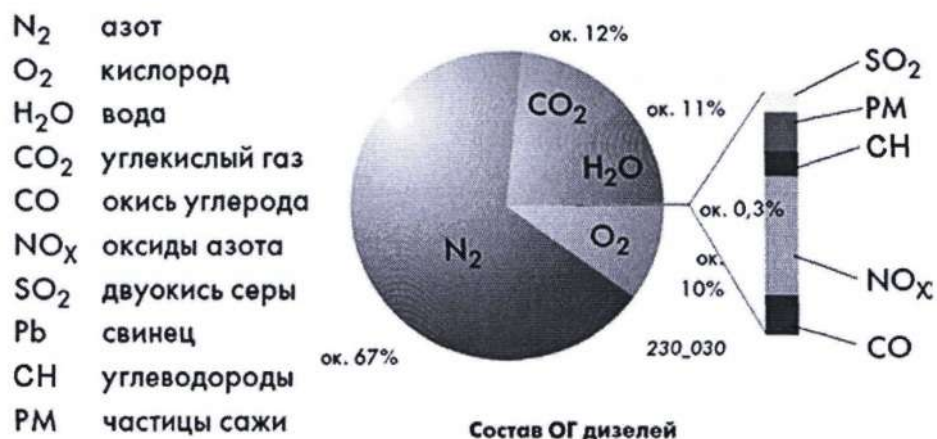


Рисунок 1.1 - Состав отработавших газов дизелей

Вторая группа. К ней относят только одно вещество - оксид углерода, или угарный газ (CO). Являясь продуктом неполного сгорания нефтяных видов топлива, он не имеет цвета и запаха, легче воздуха, обладает выраженным отравляющим действием.

Третья группа. В неё входят оксиды азота, главным образом, NO - оксид азота и NO_2 - диоксид азота. Это газы, образующиеся в камере сгорания двигателя при температуре $2800^\circ C$ и давлении около 1 МПа. Оксид азота - бесцветный газ, не взаимодействует с водой и мало растворим в ней, не вступает в реакции с растворами кислот и щелочей. Легко окисляется кислородом воздуха и образует диоксид азота. Он тяжелее воздуха, поэтому собирается в углублениях, канавах и представляет большую опасность при техническом обслуживании транспортных средств.

Четвертая группа — различные углеводороды - этан, метан, бензол, ацетилен и др. В отработавших газах содержатся углеводороды различных гомологических рядов: парафиновые (алканы), нафтеновые (цикланы) и ароматические (бензолы) - всего около 160 компонентов. Они образуются в результате неполного сгорания топлива в двигателе.

Наличие углеводородов в отработавших газах двигателей объясняется тем, что смесь в камере сгорания является неоднородной, поэтому у стенок, в переобогащенных зонах, происходит гашение пламени и обрыв цепных реакций (рисунок 1.2).

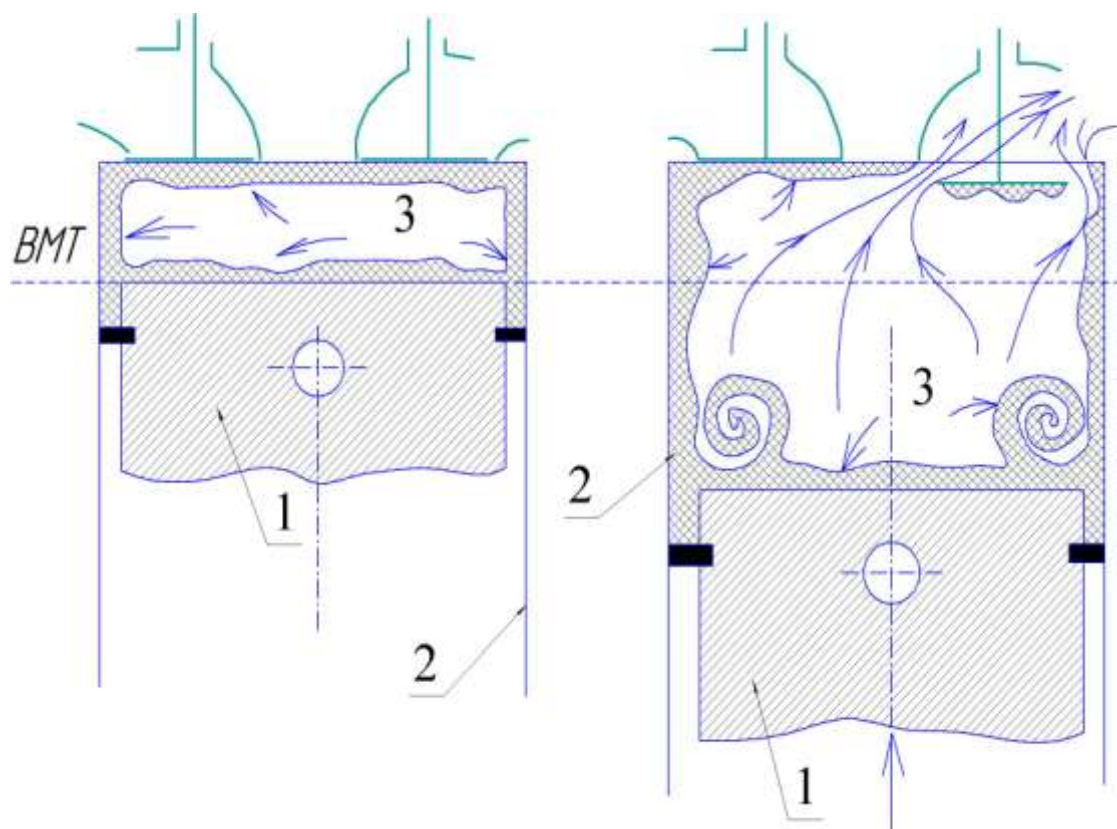


Рисунок 1.2 - Схема образования СН в выхлопных газах: 1 - поршень; 2 - гильза; 3 - пристеночные слои смеси

Углеводороды (олефины) и оксиды азота при определенных метеорологических условиях активно способствуют образованию смога.

Пятая группа - альдегиды - органические соединения O, содержащие альдегидную группу C, связанную с атомом водорода H и углеводородным радикалом.

В отработавших газах присутствуют в основном формальдегид, акролеин и уксусный альдегид. Наибольшее количество альдегидов образуется на режимах холостого хода и малых нагрузок, когда температуры сгорания в двигателе невысокие.

Формальдегид - бесцветный газ с неприятным запахом, тяжелее воздуха, легко растворим в воде. Он раздражает слизистые оболочки человека, дыхательные пути, поражает центральную нервную систему. Обуславливает запах отработавших газов, особенно у дизелей.

Акролеин, или альдегид акриловой кислоты, - бесцветный ядовитый газ

с запахом подгоревших жиров. Оказывает воздействие на слизистые оболочки.

Уксусный альдегид - газ с резким запахом и токсичным действием на человеческий организм.

Шестая группа включает в себя взвешенные твердые вещества (сажу и другие дисперсные частицы - продукты износа двигателей, аэрозоли, масла, нагар и др.), которые состоят из мелкодисперсных частиц (диаметром менее 1 мкм) и способны находиться во взвешенном состоянии в течение суток.

Сажа - частицы твердого углерода черного цвета, образующиеся при неполном сгорании и термическом разложении углеводородов топлива. Она не представляет непосредственной опасности для здоровья человека, но может раздражать дыхательные пути. Создавая дымный шлейф за транспортным средством, сажа ухудшает видимость на дорогах. Наибольший вред сажи проявляется в адсорбировании на ее поверхности бенз(а)пирена, который в этом случае оказывает более сильное негативное воздействие на организм человека, чем в чистом виде.

Поэтому уменьшение выбросов сажи - весьма актуальная задача, от решения которой зависят как экологические показатели воздушного бассейна, так и развитие дизельного транспорта.

По данным В.В. Горбунова [22], диаметр первичных сажевых частиц составляет 0,02...0,17 мкм. В отработавших газах сажа находится в виде образований не правильной формы размером 0,3... 10,0 мкм. Наибольшее количество частиц сажи имеет размеры до 0,5 мкм [6, 22, 47, 66,96, 98].

Токсичность ОГ дизелей во многом зависит от качества дизельного топлива. Доказано, что при уменьшении количества серы в топливе с 0,31 до 0,03 % содержание NO_x в ОГ снижается на 0,2-1,8 %, CH_x - на 24,4 %, сажи - на 13,2-22,6 %.

На величину выбросов вредных веществ с ОГ сильно влияет также техническое состояние двигателя. Например, в двигателях любая

неисправность элементов системы топливоподачи повышает дымность ОГ, а выработка моторесурса двигателя - выброс токсичных веществ. Так, из-за износа деталей цилиндро-поршневой группы дымность может увеличиться в два раза [19, 91].

1.3 Оценка и нормирование вредных выбросов дизелей, природоохранные стандарты

В природоохранной практике России, как и во всем мире, экологическое нормирование используется в качестве одной из основных мер или инструментов охраны окружающей среды.

Разработка и принятие экологических нормативов представляет собой одно из направлений природоохранной деятельности уполномоченных государственных органов.

Применительно к использованию отдельных природных ресурсов и их охране нормирование регулируется соответствующим природоресурсным законодательством - земельным, водным, лесным, об охране атмосферного воздуха и др.

В систему экологических нормативов входят:

- нормативы качества окружающей среды;
- нормативы предельно допустимого вредного воздействия на состояние окружающей среды;
- нормативы использования природных ресурсов;
- экологические стандарты;
- нормативы санитарных и защитных зон.

Понятие «экологические стандарты» включает в себя собственно стандарты как формы нормативных документов, в которых определяются отдельные экологические требования.

В Российской Федерации продолжают действовать природоохранные стандарты [27, 28]: ГОСТ 17.2.2.05-97 и 17.2.2.02-98 «Охрана природы.

Атмосфера. Нормы и методы определения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин» (введены в действие соответственно с 1 июля 1999 г. и 1 января 2000 г.). Стандарты в части методов определения дымности и выбросов оксидов азота, оксида углерода и углеводородов в основном соответствуют Международному стандарту ИСО 789/4-86 «Сельскохозяйственные тракторы. Методы испытаний. Часть 4. Измерение дымности отработавших газов» и Правилам ЕЭК ООН № 96 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения дизелей для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах в отношении выброса этими двигателями загрязняющих веществ» [29]. В то же время установленные этими ГОСТами нормы выбросов и дымности менее жесткие, чем регламентированные Правилами № 96.

Испытания, согласно ГОСТ 17.2.2.05-97, проводятся по тринадцатирежимному циклу, включающему три режима холостого хода с минимальной частотой вращения коленчатого вала двигателя и по пять режимов с номинальной частотой и частотой, соответствующей максимальному крутящему моменту. Двигатели следует испытывать в комплектации, предусмотренной техническими условиями. Сопротивление воздуха на впуске в двигатель и ОГ на выпуске из него должно соответствовать максимальным значениям, оговорённым в технических условиях на двигатель [52, 68].

К безусловному недостатку ГОСТ 17.2.2.05-97 надо отнести регламентирование тринадцатирежимного испытательного цикла, в то время как в нормативно-технической документации США и ЕЭС, в частности в Правилах № 96, используют более «экономичный» (за счет снижения продолжительности испытаний и уменьшения числа анализируемых проб ОГ) восьмireжимный цикл [52, 66, 119].

Постановлением Госстандарта России от 1 апреля 1998 г. № 19 с 1 октября 1998 г. (в ред. Приказа Ростехрегулирования от 10.12.2007 №

3453) введены «Правила по проведению работ в системе сертификации механических транспортных средств и прицепов» [95].

Документом предусмотрено введение более жестких (по сравнению с ранее применявшимися в России) экологических требований. Переход на выпуск двига телей, соответствующих этим требованиям, осуществляется поэтапно и требует радикальных перемен в области производства и эксплуатации автотракторной техники [116].

Нормы предельной токсичности отработавших газов, принятые в Европе, базируются на Директивах R15 ЕЭК и 70/220 ЕЭС, а также дополнениях к этим документам. Существующие нормы для малотоннажных грузовиков (полной массой менее 3,5 т) указаны в Директиве 93/59 ЕС/ЕЭС. Менее строгие нормы применяются для дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива. Следующим шагом в ужесточении норм токсичности является Директива 1997 г. ЕС 94/12 (таблица 1.3).

Таблица 1.3 — Нормативные документы, в соответствии с которыми в странах Ев ропейского экономического сообщества осуществляется сертификация АТС и двигателей АТС по выбросам загрязняющих веществ

Индекс (экологический класс) нормирования	Легковые АТС	Двигатели грузовых АТС
0	Правила ЕЭК ООН83-02А (EURO-0)*	Правила ЕЭК ООН49-01 (EURO-0)**
1	Правила ЕЭК ООН83-02В (EURO-1)	Правила ЕЭК ООН49-02 А (EURO-1)
2	Правила ЕЭК ООН83-03В, 83- 04В (EURO-2)	Правила ЕЭК ООН49-02В (EURO-2)
3	Правила ЕЭК ООН83-05А (EURO-3)	Директива ЕС 99/96 (EURO-3)
4	Правила ЕЭК ООН83-05В (EURO-4)	Директива ЕС 99/96 (EURO-4)

5	Правила ЕЭК ООН 83-06B (EURO-5)	Директива ЕС 99/96 (EURO-5)
---	------------------------------------	--------------------------------

* Соответствуют Правилам ЕЭК ООН 15-04.

** Соответствуют ОСТ 37.001.070-94.

Опыт ведущих стран мира показывает, что внедрять экологические стандарты можно ступенчато на протяжении 10-20 лет (таблица 1.4). Необходимо создать развернутую инфраструктуру, обеспечивающую функционирование автотранспорта согласно данным стандартам. Речь, прежде всего, идет о соответствии экологическим стандартам топлива, потребляемого автотранспортом. Евро-1-6 - это нормы одновременно к двигателям и топливу.

Если смотреть на общую тенденцию введения норм Евро, то Россия значительно отстает от нее. Из таблицы 1.4 видно, что страна пытается ускоренными темпами сократить существующее отставание в 10 лет.

Таблица 1.4- Предельно допустимые выбросы дизелей

Нормирующий документ	Год введения требований		Предельно допустимые выбросы, г/км			
	Европа	Россия	CO	CH	NO _x	Сажа
Евро-1	1993	1999	4,5	1,1	8,0	4,5
Евро-2	1996	2005	4,0	1,1	7,0	4,0
Евро-3	2000	2011	2,1	0,66	5,0	2,1
Евро-4	2005	2013	1,5	0,46	3,5	1,5
Евро-5	2009	2015	1,5	0,25	2,0	1,5
Евро-6	2018		1.0	0.15	1.5	0.8

Реализацию на практике новых методов контроля применительно к национальным особенностям и условиям производства двигателей в РФ предлагается осуществлять на основе разработанного и принятого ГОСТ Р 52408-2005 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Измерения в условиях

эксплуатации» [23], который является модификацией действующего Международного стандарта ИСО 8178/2-96. Модификация выполнена в части введения упрощенных и контрольных процедур и назначения временных норм выбросов для двигателей в случае применения этих процедур на месте установки. Стандарт содержит рекомендации к подготовке изготовителем нового документа, сопровождающего двигатель на протяжении его полного эксплуатационного цикла, — «Технического паспорта выбросов двигателя».

Новая техническая политика упрощенного контроля выбросов двигателей в процессе эксплуатации основана на следующих теоретически обоснованных и экспериментально подтверждённых положениях:

1. Двигатели со сходным конструктивным исполнением компонентов, влияющих на образование вредных веществ (системы воздухообмена, газообмена и выпуска, камеры сгорания и топливной аппаратуры), имеют сходные показатели выбросов. На основе такого конструктивного сходства двигатели могут объединяться в семейства или группы.

2. В пределах сформированного семейства (группы) показатели выбросов вредных веществ зависят от регулировок (угол опережения и закон подачи топлива, фаза газообмена) и рабочих параметров (температура и давление наддувочного воздуха, степень и давление сжатия, среднее эффективное и максимальное давление в цилиндре, противодействие выпуску) и находятся в непосредственной зависимости от их значений.

3. Двигатель по совокупности перечисленных регулировок, компонентов и рабочих параметров, имеющий наибольший уровень выбросов, является базовым и представляет сформированное семейство (группу) при сертификационных испытаниях на стенде.

4. Идентификация (маркировка) компонентов, регулировок и рабочих параметров базового двигателя семейства (группы) и результаты его стендовых испытаний регистрируются в «Техническом паспорте

выбросов двигателя», содержание которого распространяется на каждый двигатель, входящий в семейство (группу).

5. Если подвергнутый инструментальному контролю базовый двигатель (представляющий семейство или группу) соответствует техническому нормативу выбросов, то результаты этого контроля распространяются на все двигатели, входящие в семейство (группу).

6. Технические нормативы выбросов каждого двигателя, входящего в семейство (группу) и установленного на объекте применения, продолжают соответствовать установленным нормам до тех пор, пока его компоненты, регулировки и рабочие параметры соответствуют данным «Технического паспорта выбросов двигателя».

1.4 Основные пути снижения вредных выбросов в процессе эксплуатации дизелей

Основные причины образования токсичных веществ в отработавших газах дизелей - несовершенство процессов сгорания топлива и его загрязнение. Поэтому основными направлениями снижения содержания вредных веществ в двигателях являются совершенствование процессов сгорания топлива, применение средств очистки отработавших газов и повышение качества топлива [94].

Для уменьшения выбросов вредных веществ используются системы, включающие рециркуляцию отработавших газов дизелей, каталитический нейтрализатор и специальный сажевый фильтр [2, 21].

Каталитический нейтрализатор имеет носитель, заключенный в корпус. Носитель представляет собой керамический материал (сотовой конструкции или в виде шариков), покрытый тонким слоем катализатора из благородных металлов, например, платины, палладия, родия. При температуре поверхности катализатора свыше 250...300 °С содержащиеся в отработавших газах оксиды углерода CO, уг. леводороды CH эффективно

окисляются, а их концентрация в выхлопных газах снижается во много раз.

На современных транспортных средствах устанавливаются трехкомпонентные каталитические нейтрализаторы. Трехкомпонентными их называют потому, что они нейтрализуют три вредные составляющие выхлопных газов: CO, CH и NO_x. Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор представляет собой корпус из нержавеющей стали, включенный в систему выпуска до глушителя. В корпусе располагается блок носителя с многочисленными продольными порами, покрытыми тончайшим слоем вещества катализатора, которое само не вступает в химические реакции, но своим присутствием ускоряет их течение. В качестве катализатора используются платина и палладий, которые способствуют окислению CO и CH, а родий нейтрализует NO_x. В результате реакций в нейтрализаторе токсичные соединения CO, CH и NO_x окисляются или восстанавливаются до углекислого газа CO₂, азота N₂ и воды H₂O [34, 54].

На первый взгляд может показаться, что установка каталитического нейтрализатора решает все экологические проблемы. Однако температура, при которой катализатор начинает действовать (температура активации), изменяется от 250 до 350 °C. Время же, необходимое для разогрева, может достигать нескольких минут и зависит от типа транспортного средства, способа его эксплуатации и температуры воздуха. Проблему частично решили, приблизив нейтрализатор к выпускному коллектору (такое сочетание часто называют катколлектором). Другой способ быстрое прогревание нейтрализатора - подать в отработавшие газы дополнительную порцию воздуха и одновременно обогатить смесь. Топливо догорает уже на выпуске, температура выхлопных газов растет, и нейтрализатор быстрее выходит на рабочий режим. Иногда его разогревают электрическим термоэлементом, однако это требует дополнительных энергозатрат.

В разработанной фирмой «Фольксваген» (Германия) системе нейтрализации дизельного выхлопа регенерация происходит благодаря использованию диоксида азота, который содержится в катализаторе окисления. Катализатор окисления, расположенный рядом с двигателем, очищает отработавшие газы от СО и СН. В это время в другом катализаторе интенсивно образуется двуокись азота, необходимая для окисления твердых частиц. Для снижения в отработавших газах оксидов азота использован накопительный катализатор. Через определенные промежутки времени его необходимо очищать богатой горючей смесью.

Система рециркуляции отработавших газов (EGR) применяется на бензиновых, дизельных и газовых двигателях для снижения токсичности отработавших газов (главным образом содержания оксидов азота NO_x) в режимах прогрева и резкого ускорения двигателя, который на данных режимах работает на обогащенной топливной смеси. Часть отработавших газов попадает обратно в цилиндры, что вызывает снижение максимальной температуры горения и как следствие - выбросов оксидов азота, образующихся при высоких температурах и являющихся одними из самых токсичных веществ. Система EGR не используется на холостых оборотах (прогретый двигатель), на холодном двигателе и при полностью открытой заслонке. Работа системы вызывает снижение эффективной мощности двигателя.

Сажевые фильтры изготавливают в виде пористого фильтрующего материала из карбида кремния. В конструкциях прошлых лет фильтры периодически очищали от накопившейся сажи отработавшими газами, температуру которых для этого повышали путем обогащения смеси. Очистка фильтра происходила по команде блока управления после каждых 400...500 км пробега автомобиля. Однако в этом случае резко увеличивались выбросы других вредных веществ. Поэтому современный сажевый фильтр чаще всего работает в паре с окислительным нейтрализатором, который восстанавливает NO_x до NO_2 и одновременно

дожигает сажу, причем при более низких температурах - около 250 °С.

В фильтрах нового поколения общий принцип остался прежним: задержать и нейтрализовать. Для достижения температуры, необходимой для сгорания частиц сажи, во-первых, фильтр размещают сразу за выпускным коллектором; во-вторых, через каждые 300...500 км пробега контроллер включает режим многофазного впрыска, увеличивая количество поступающего в цилиндр топлива. И, наконец, главное: поверхность фильтрующего элемента покрыта тонким слоем катализатора, который дополнительно повышает температуру выхлопных газов до необходимых 560...600 °С. Режим обогащения включается по сигналу от датчиков твердых частиц давления, установленных на входе и выходе фильтра. Когда разность показаний становится значительной, компьютер воспринимает это как признак закупоренности фильтра сажей. Выжигание контролируют с помощью датчика температуры.

Яркий пример современного механизма очистки выхлопа дизелей - электронная система управления дизельным двигателем EDC (electronic diesel control), разработанная компанией « Bosch» (Германия). Ее конструкция включает в себя многокомпонентную систему выпуска отработавших газов, в которой предусмотрено семь датчиков - два лямбда-зонда, два температурных, два давления и один уровня сажи в выхлопе, а также три очистительных элемента -каталитический нейтрализатор, катализатор-накопитель и сажевый фильтр накопительного типа. Датчики в системе выхлопа позволили оптимизировать процессы смесеобразования и сгорания. Кстати, для этого под контроль EDC передали и многие системы двигателя - топливо- и воздухоподачи, рециркуляции отработавших газов, электронную дроссельную заслонку и турбонаддув. С помощью датчиков давления на входе и выходе из сажевого фильтра EDC контролирует степень его загрязнения. Эффективность работы катализаторов оценивается по показаниям двух лямбда-зондов (на входе и выходе). Корректировка работы систем

двигателя осуществляется на основании показаний лямбда-зондов, датчиков температуры и уровня сажи на выходе. Каталитический нейтрализатор «перерабатывает» токсичные составляющие выхлопа - NO, NO₂, CO, CH в нетоксичные и малотоксичные соединения - H₂O, N₂, CO₂, а катализатор-накопитель выполняет функции дополнительной очистки от окиси азота (NO₂) и предварительной - от частиц сажи.

Система очистки отработавших газов дизелей, созданная компанией «Пежо» (Франция), включает в себя блок управления работой двигателя, датчики давления, систему дозирования специальной присадки к топливу, систему питания «Common rail» и фильтр, который очищает от сажи и выполняет функцию катализатора [1, 32, 36]. В качестве фильтрующего материала фильтра-катализатора используется карбид кремния, который имеет пористую структуру, где и накапливаются частицы сажи. Очистка фильтра осуществляется путем подачи топлива в цилиндры с запозданием, чем обеспечивается повышение температуры отработавших газов. Для снижения температуры регенерации фильтра применяется специальная присадка, вводимая в топливо. Очистка фильтра происходит по команде блока управления двигателем после каждых 400...500 км пробега. Необходимость очистки фильтра определяется блоком управления на основании показаний двух датчиков давления на входе и выходе фильтра.

Таким образом, современные комплексные системы очистки отработавших газов дизелей состоят из каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров. Их ресурс ограничен, а стоимость высока из-за использования катализаторов на основе благородных металлов.

Поэтому одним из наиболее эффективных, не требующих дорогостоящих конструктивных решений, простых по применению в условиях эксплуатации способов снижения дымности и токсичности ОГ дизелей является использование антидымных присадок.

Новые типы двигателей разрабатывают с учетом агротехнических требований, выдвинутых сельскохозяйственным производством, также для

военных целей и экологической безопасности окружающей среды. Цель ученых, инженеров, конструкторов – создание системы двигателей определенной мощности. Это позволит повысить производительность труда, значительно сократить затраты труда, повысить надежность двигателей разных климатических условиях.

После введения в России норм токсичности Euro-4, большинство дизельных двигателей не могут выполнить эти нормы. Для эффективного снижения токсичности отработавших газов потребовалось усовершенствовать рабочий процесс дизелей.

Эксплуатация автомобиля и трактора сопровождаются постоянно изменяющимися нагрузками, в результате чего изменяются условия смесеобразования, температура сгорания топлива, что влияет на содержание отработавших газов. В двигателях внутреннего сгорания важен контроль отработавших газов, то есть процентное количество оксида углерода CO и водорода H_2 , а также определение дымности. Обусловленной наличием несгоревшего топлива и картерного масла.

Токсичность отработавших газов дизельных двигателей определяется тремя факторами:

- Низкая температура отработавших газов и работа на бедных смесях;
- Повышенный выброс на некоторых режимах работы в дизельных двигателях;
- Частицы сажи и твердые частицы, которые являются носителями канцерогенов в выхлопных газах дизеля;

Низкая температура работы двигателя приводит неполному сгоранию дизельного топлива, тем самым увеличивает концентрацию вредных веществ в отработавших газах. В результате эффективность каталитических нейтрализаторов крайне низкая. В разных режимах работы двигателя выделяются вещества с характерным неприятным запахом. Среди них альдегиды, акролеины и другие химические вещества. Поэтому

инженеры разрабатывают методы сокращения времени прогрева двигателя. При работе двигателя в отработавших газах выделяются частицы сажи и твердые частицы, которые являются носителями канцерогенов. Одним из эффективных способов снижения сажеобразования является применение наддува. Компания «Scania» разработала для своих дизельных двигателей рециркуляцию отработавших газов. Это предусматривает перепуск отработавших газов во впускной трубопровод, в результате этого сокращается выброс оксидов азота до современных европейских норм.

Использование наддува дизеля. Рабочая смесь, качество которой определяется коэффициентом избытка воздуха λ , оказывает решающее влияние на состав отработавших газов. Турбокомпрессор обеспечивает изменение коэффициента избытка воздуха λ в соответствии с режимом работы двигателя. При этом углероды и углеводороды догорают снижая количество СО и СН в отработавших газах. Управление значением λ дает возможность в широких пределах снижению температуры в камере сгорания. Вследствие этого уменьшаются количества NO_x .

Использование массивных маховиков и демпферов. Использование маховиков или демпферов крутильных колебаний способствует поддержанию скоростного режима и обеспечивает равномерность вращения коленчатого вала в дизельных двигателях. Необходимо согласовать цикловую подачу топлива с расходом воздуха. Дымность двигателя пропорционально уменьшается с количеством несгоревших углеводородов в отработавших газах.

Повышение максимального давления впрыска топлива. Увеличение тонкости распыливания достигается повышением максимального давления впрыска топлива. В процессе сгорания улучшается смесеобразование и в свою очередь, способствует более полному сгоранию топлива. В результате снижается сажеобразование, дымность отработавших газов, но одновременно происходит увеличение количества оксидов азота в отработавших газах.

Система рециркуляции отработавших газов (EGR). Система EGR это возврат некоторого количества отработавших газов во впускной коллектор двигателя для дожигания. Отработавшие газы снижают максимальную температуру сгорания с целью снижения образования NO_x . В система EGR используется внутренней или внешней рециркуляцией отработавших газов. Благодаря этому принципу улучшаются эксплуатационные показатели и выхлоп мотора становится менее токсичным.

Улучшение геометрии распыла топлива. Применениями с улучшенными геометрическими данными распылителей позволяет улучшить достаточную тонкость распыливания топлива. В современных условиях разрабатываются и внедряются изготовление распылителей с использованием нанотехнологий. Такие распылители обеспечивают достаточную тонкость распыливания топлива и улучшает экологичность отработавших газов.

Метод дозирования топлива. Оптимальная топливная экономичность достигается при смесях, характеризующихся $\lambda = 1,1$. При этом выбросы CO и CH минимальны, а выбросы NO_x при этом максимальны. Так как обедненная смесь приводит к появлению пропусков при работе двигателя и влечет за собой быстрое увеличение выбросов CH . Полное прекращение подачи топлива к двигателю используется для предотвращения работы двигателя на сверхвысоких оборотах. Но для этого требуется постоянное использование богатой смеси. Контроль за составом смеси в системе впрыска топлива значительно снижает выбросы отработавших газов.

Сажевый фильтр. Для того чтобы очистить выбросы сажи в атмосферу применяется устройство - сажевый фильтр. Оно позволяет уменьшить количество сажи на 80- 90%. Основная задача – это улавливать сажу при выхлопе работы двигателя. Фильтр состоит из ячеистой нихромовой сетки, на стенке которого и оседают частички. После улавливания фильтр постепенно начинает забиваться. Регенерация таких фильтров осуществляется подводом к фильтрующим элементам электрического

напряжения. Элементы при прохождении тока раскаляются и очищаются от сажи.

Система SCRи каталитический нейтрализатор. Во время работы двигателя происходит выброс окислов азота и твердых частиц. Технология SCR (SelectiveCatalyticReduction) основывается на очистке выхлопных газов за счет добавления специального раствора(мочевины). Раствор впрыскивается небольшой порцией в систему выхлопа. В результате неполного сгорания углеводородов образуются химически активные вещества, восстанавливающие NO_x . Этот раствор расщепляет вредные оксиды азота на газообразный азот и водяной пар.

Изменение фаз газораспределения. Для нормальной работы системы рециркуляции необходимо изменить фазы газораспределения. На холостом ходу уместны поздним открытием и ранним закрытием клапанов. Это позволяет исключить заброс выхлопных газов во впускной коллектор и выброс горючей смеси в выхлопную трубу. При работе двигателя на максимальной мощности необходимо открытие клапанов чуть раньше и увеличивать продолжительность открытия. Это позволяет увеличить внутреннюю рециркуляцию отработавших газов и поэтому может помочь в снижении выбросов NO_x . Оптимальным решением является применение изменяемых фаз газораспределения.

Конструкция камеры сгорания. Камера сгорания играет существенную роль в обеспечении экологических характеристик. Проектирование двигателей включает предотвращение образования вредных веществ, а также повысить эффективность сжигания топлива. Снижению выхода CO и NO_x необходимо выполнить взаимно противоположные мероприятия. Установлено, что только в очень узком диапазоне температур можно одновременно добиться требуемых уровней выбросов NO_x и CO . Снижение выбросов CH обеспечивается компактной камерой сгорания, имеющей минимальную площадь поверхности с отсутствием выемок.

Вентиляция картера двигателя. Система вентиляции картера основан

на разрежении, которое создается во впускном коллекторе. Давление в картере становится больше чем во впускном коллекторе. Картерные газы подаются в камеру сгорания и дожигаются. Раньше картерные газы выбрасывались в атмосферу при этом происходило усиленное загрязнение окружающей среды. Сейчас наличие системы снижения токсичности картерных газов является обязательным требованием.

1.5 Антидымные присадки к топливу, механизмы их действия

В последние годы, наряду с традиционными способами снижения вредных выбросов автотракторных дизелей, широко используются присадки к топливам, которые позволяют снизить дымность в 1,5-2 раза и более (в зависимости от процента содержания присадки в топливе и от режима работы двигателя) [112]. Так, к настоящему времени налажено производство альтернативных антидетонаторов и цетаноповышающих присадок в объеме, удовлетворяющем современный транспортный парк. Гораздо хуже обстоит дело с производством моющих и противоизносных, антинагарных присадок, депрессоров и диспергаторов парафинов для дизтоплива, а также антидымных присадок.

Применение антидымных присадок к дизельному топливу имеет ряд преимуществ перед другими методами, так как не требует изменения конструкции двигателя, не снижает его мощностных показателей и практически не сказывается на топливной экономичности (в некоторых случаях улучшает ее). Кроме того, помимо своего основного назначения антидымные присадки могут служить для регенерации (очистки) сажевых фильтров, обеспечивая выгорание сажевых частиц даже при температурах ОГ, соответствующих малым нагрузкам двигателя [20, 39, 52, 65, 69, 92, 102, 108].

К антидымным присадкам в эксплуатации предъявляются следующие

требования: высокая эффективность воздействия на сажесодержание в ОГ; отсутствие неприятных запахов; токсичности; невысокая стоимость и доступность; снижение коррозионных и нагарообразующих свойств топлив; устойчивость и совместимость с другими присадками; растворимость в топливе [10, 37, 38, 40, 46, 51, 63, 73, 76, 79, 80,93].

Антидымные присадки обычно вводят в топливо на местах применения. Однако имеется возможность производить специальные марки дизельного топлива с антидымными присадками на нефтеперерабатывающих заводах.

С целью сравнительной оценки эффективности использования присадок на основе различных составов был проведен комплекс исследований [20].

Результаты эффективности присадок оценивали по изменению эффективного расхода топлива Δb , концентрации окиси углерода ΔC_{CO} , дымности $\Delta \Gamma$ ОГ и эффективности снижения сажесодержания E .

Таблица 1.5 - Сравнительная оценка эффективности использования присадок на основе различных составов

Наименование присадки	Содержание активного металла в присадке	Концентрация присадки, %	Изменение контролируемых параметров			E, %
			Δb , г/(кВт·ч)	ΔC_{CO} , %	$\Delta \Gamma$, ед. Бош	
Изобарол-1	22,8 % Ва	0,5	+0,5	+0,01	-1,6	62,0
Изобарол-2	5,4 % Ва, 6,6 % Fe	0,5	0	-0,01	-1,8	67,0
Кальциевая	40 % Са	0,5	0	-0,03	-1,3	50,6
Марганцевая	6,8 % Мп	0,5	+2	+0,02	-0,2	11,0
ИХП-706	20 % Ва	0,5	+0,5	+0,01	-2,2	73,0
Изобарол-1	22,8 % Ва	0,3	0	0	-1,4	57,5

Изобарол-2	5,4 % Ва, 6,6 % Fe	0,3	0	0	-1,1	47,0
Марганцевая	6,8 % Мп	0,3	+1,4	+0,02	-0,1	5,0
ИХП-706	20 % Ва	0,3	-2	-0,01	-2,2	76,0

Примечание. Знаки «+» и «-» означают рост или уменьшение параметров.

Результаты испытаний, приведенные в таблице 1.5, показывают, что заметное влияние на изменение сажевого содержания оказывают только присадки на основе Ва и Са [20, 39, 46, 63, 65, 69, 73].

По химической структуре металлосодержащие присадки можно разделить на следующие группы: органические соли щелочно-земельных металлов; органические соединения щелочных металлов; соли и оксиды переходных металлов. Наиболее исследованы присадки, созданные на основе щелочно-земельных металлов (Са, Sr, Ва) [18, 33, 40, 50, 52, 79].

В состав присадок, созданных на их основе, входят соли бария или кальция и алкилсульфокислот. Для улучшения горения в присадки добавляют низкомолекулярный спирт. Иногда барий используют в сочетании с другими металлами той же группы, например, с цинковой солью карбоновой кислоты.

Рост концентрации бариевой присадки А-2 в топливе значительно снижает дымность ОГ, особенно при больших нагрузках. При добавлении в топливо 0,5 % этой присадки или аналогичной ей присадки SLD, разработанной фирмой «Labo-fina» (Бельгия), дымность уменьшалась в 4-5 раз [46].

Присадка SSA (Англия) [51, 52, 63] при ее оптимальной концентрации в топливе 0,2-0,35 % к массе снижает дымность ОГ по Хартриджу с 60 до 20 ед. При этом уменьшается число сажистых частиц, но не изменяется их средний размер 16 мкм. Кроме того, присадка SSA не влияет на содержание в ОГ углеводородов и оксида углерода (II), хотя количество альдегидов возрастает, вследствие чего и на холостом ходу наблюдается выделение токсичного соединения ВаСОз. С применением

SSA отмечено повышение экономичности на 0,9-1,4 %. Однако после проведенных испытаний на двигателе увеличился износ деталей топливной аппаратуры, клапанов и поршневых колец. Более того, имея большую плотность, присадка SSA при длительном хранении выпадает в осадок в топливных баках.

Под руководством академика А.М. Кулиева была разработана серия отечественных барийсодержащих антидымных присадок (алкилфенолятов бария), наибольшей эффективностью из которых обладает соединение ИХП-706 (ТУ ИХП-402-7-73). Некоторые исследователи [18, 33, 50, 63] указывают на то, что присадка ИХП-706 снижает дымность ОГ на 60-80 % и по своим эксплуатационным качествам не уступает лучшим зарубежным аналогам (SLD, SSA, Lubrizol-565). Однако в других работах [10, 37, 38] установлено влияние присадок серии ИХП на увеличение нагара в камере сгорания дизелей и на распылителях форсунок и усиление коррозии в высоко- и низкотемпературных зонах газового тракта.

В настоящее время из отечественных антидымных присадок вырабатывается только присадка ЭФАП-Б, которая используется при производстве специальных марок топлив.

ЭФАП-Б (ТУ 0257-002-40439881-97) - композиция алкилфенолята бария (65 %), диспергирующего компонента (5 %) и растворителя (30 %), подобранных таким образом, чтобы обеспечить низкую температуру застывания присадки и невысокую вязкость. При производстве присадки стадия карбонатации не предусмотрена [52].

Бариевые присадки, несмотря на хорошие показатели снижения дымности ОГ дизелей, имеют существенные недостатки, препятствующие их широкому применению:

1. Склонность к нагарообразованию и коррозии.
2. Малая стабильность и высокая стоимость.
3. Высокая токсичность.

Согласно токсикологическим исследованиям, все присадки

отечественного ассортимента относятся к умеренно токсичным веществам III класса опасности по ГОСТ 12.1.007-76. Серьезную опасность представляют продукты сгорания соединений бария. Подробно они исследованы на примере присадки ЭФАП-Б при испытаниях на двигателе КамАЗ-740 в АО «НАМИ-ХИМ» совместно с Институтом медицины труда [13]. Бариевые органические присадки дают до 25 % токсичных продуктов в составе ОГ (BaCO_3 и т.д.), увеличивая выброс твердых частиц при работе на частичных нагрузках. Таким образом, токсичность, уменьшение моторесурса двигателя и высокая стоимость бариевых антидымных присадок являются препятствием к их распространению в настоящее время.

В литературе мало изучены присадки, разрабатываемые на основе солей и кислот щелочных металлов (Li, Na, K, Rb, Cs), что, вероятно, связано с их недостаточной эффективностью по снижению дымности ОГ, а также с образованием в процессе сгорания высокоактивных щелочей, вызывающих коррозию выпускной системы двигателя.

В связи с тем, что в последнее время потребность в дизельном топливе сильно возрастает и ресурсы его увеличиваются в основном за счет вовлечения в переработку сернистой нефти, повышающей коррозию и нагарообразование, представляет интерес применение органических и неорганических соединений переходных металлов (Fe, Mn, Mo, Ni, Си, Zn).

К данной группе относится присадка фирмы «Slip» (Англия) [52, 74, 102], которая содержит растворимые в топливе металлосодержащие соединения, главным образом, на медной и магниевой основе, которые добавляют в топливо в количестве 0,05 % к массе. Основными компонентами, повышающими полноту сгорания, являются окиси меди и цинка, которые служат катализаторами процесса сгорания. Применение «Slip» снижает дымность ОГ, кроме того, сокращается количество нагара на днище поршней, в выпускных клапанах. Окислы металлов, оседая на

деталей Ці 11, уменьшают коррозионное действие на них сернистых газов. Однако стабильность топлива с этой присадкой при хранении снижается, т.к. медь способствует его окислению и образованию смолистых веществ.

Большой интерес для разработчиков твердых частиц антидымных присадок представляют соединения таких металлов, как марганец (Mn) и железо (Fe). В настоящее время известны два соединения марганца - циклопентадиенилтрикарбонил (ЦТМ) и метилциклопентадиенилтрикарбонил (МЦТМ), которые широко используются в бензинах и рекомендуются для применения в дизельных топливах [65, 69, 73]. Добавка их в дизельное топливо в количестве 0,05-0,2 % к массе снижает дымность ОГ во всем диапазоне изменения нагрузки двигателя, повышает эффективность горения топлива, уменьшая нагарообразование и износ деталей цилиндро-поршневой группы, при сохранении или даже улучшении экономических показателей двигателя [10, 93].

В качестве антидымных присадок, содержащих атомы железа, применяют производные ферроцена и эфира, а также олеиновой кислоты, которые вводят в дизельное топливо в концентрации 0,02-0,2 % к массе. Результаты снижения дымности ОГ двигателя Д 240 [37] приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Снижение дымности в зависимости от концентрации природы железосодержащих соединений

Концентрация, % к	Эффективность снижения дымности, %		
	Ферроцен	1,1-8 Диэтилферроцен	Ацетилацетонат железа
0,05	55	29	30
0,1	45	33	65
0,2	50	48	15
0.3	45	35	-

Известны также присадки, содержащие ацетилацетонат железа в смеси

с различными органическими веществами [5, 86, 87, 105, 106, 113]. Однако основными их недостатками являются сложный химсостав и, соответственно, сложность производства и высокая стоимость. Кроме того, наличие в присадке органических радикалов приводит к присутствию в ОГ дизелей дополнительных токсичных веществ.

В настоящее время недостаточно изучены антидымные присадки, которые на основе координационных соединений поступающие из-за рубежа. Данные присадки представляют собой индивидуальные вещества. Так как на сегодняшний день не существует единого мнения о механизме действия антидымных присадок, необходимо проанализировать имеющиеся исследования, проводимые в данном направлении.

В работе [51] доказывается положение, что при сгорании топлива с бариевой присадкой увеличивается эффективность воздействия металла присадки на сгорание углерода. При сгорании происходит процесс диффузии окислителя через газовый слой, который окружает поверхность частицы углерода. Барий, имея высокую температуру испарения, будет разрушать граничный газовый слой, способствуя ускорению окисления твердого углерода.

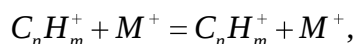
Авторы работы [85] предполагают, что противодымные присадки могут ускорять начальные предпламенные реакции, способствовать разветвлению окислительных цепей и образованию новых начальных центров реакции. Это происходит в результате разложения присадки и образования продуктов ее взаимодействия с исходными углеводородами. Для азотсодержащих соединений такое ускорение связывают с каталитическим действием окислов азота, которые сокращают период индукции окисления парафиновых углеводородов и ускоряют процесс окисления образующихся продуктов.

В работе [10] говорится о том, что барий препятствует дегидрогенизации молекул углеводородов и тем самым снижает образование сажи, т.е. бариевые присадки действуют на первой стадии

химического процесса.

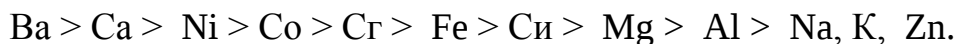
Установлено, что противодымная бариевая присадка препятствует образованию конгломератов сажи в выпускной системе и приводит к уменьшению размеров частиц в 2-3 раза [10]. Маленькие частицы сажи, видимо, быстрее и полнее сгорают в выпускном тракте, особенно при каталитическом воздействии металла присадки (снижается температура воспламенения сажи).

Существует гипотеза [93, 108], согласно которой все металлосодержащие присадки действуют по ионному механизму, так как при горении в пламени происходит интенсивная ионизация металлов. Ионы металлов уменьшают скорость образования углеводородных зародышей и их коагулирование. В результате либо уменьшается количество сажи, либо размеры ее частиц, что облегчает ее выгорание. Ионный механизм действия присадки может быть описан уравнением:



где M^+ - ион используемого металла.

Такой механизм характерен для металлов первой группы, обладающих низкими величинами ионизационных потенциалов. Автор приводит данные по антидымной активности металлов, которые могут быть представлены следующим рядом:



Ряд авторов [33, 73, 74] указывают, что существенную роль при снижении дымности ОГ играет каталитическое действие некоторых элементов, снижающих температуру сгорания углерода в воздухе. Однако температура воспламенения сажи понижается и при введении других веществ (металлов) в топливо - свинца, хрома, меди, но дымность ОГ при этом может и увеличиваться [8, 63].

В работе [15] доказывается, что все присадки, содержащие металлы,

вступают в гомогенную реакцию с продуктами горения. В результате образуются гидроксильные радикалы, которые быстро газифицируют сажу или ее предшественников.

Особенностью действия антидымных присадок на основе металлов переходной группы является то, что они эффективны на заключительной стадии горения, когда и происходит окисление сажи [51].

Большой вклад в исследование механизма действия антидымных присадок на органической основе внес М.О. Лернер [64, 65], который разделил химические элементы и их соединения на две группы по механизмам их действия.

К первой группе относятся вещества и присадки на основе металлов II группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева:

Ba, Ca, Mg, Zn, Cd.

Во вторую группу входят соединения на основе металлов VII и VIII групп этой системы:

Mn, Fe, Co, Ni, Mo.

Известно, что элементы, являющиеся носителями антидетонационного эффекта, тормозят дегидрогенизацию углеводородов и способствуют дезактивации пероксидов. Однако, если антидетонаторы на основе марганца, железа, никеля снижают дымность ОГ дизельного топлива, то соединения бария, магния, цинка, кадмия и других металлов II группы системы элементов не обнаруживают антидымного эффекта. При использовании антидымных присадок на основе этих элементов, очевидно, тормозится процесс образования углеродных конгломератов в объеме.

На основании проведенного анализа установлены следующие механизмы действия антидымных присадок на органической основе:

1) каталитическое воздействие на процесс сгорания или дожигания образовавшихся в цилиндре частиц сажи;

2) интенсивная ионизация металлов в пламени, что способствует уменьшению скорости образования углеводородных зародышей и их

коагулированию;

3) диспергирование сажистых частиц;

4) препятствование протеканию процессов, вызывающих образование частиц сажи, т.е. ингибирование (замедление) процесса сажеобразования при дегидрогенизации молекул топлива, протекающей в условиях локального недостатка кислорода и высоких температур.

Наличие множества рабочих гипотез механизма действия антидымных присадок связано в первую очередь с разной природой металлов, различием в составе топлива, в которое вводится присадка, аппаратурой и методами исследования [52].

Присадки на поступающие из-за рубежа мало изучены в практической жизни. Однако имеются сведения, что в качестве противодымных присадок могут быть предложены соединения на основе смеси с кислородсодержащими соединениями типа альдегидов, кетонов, спиртов и простых эфиров в концентрации 0,0025-1,5 % к массе. Так, при добавлении в топливо 0,083 % к массе октаноата церия и 2 % к массе н-гексилкарбитола содержание сажи в выхлопе уменьшается на 22 %. Отмечается высокая эффективность церия как активатора горения и противодымного компонента, однако его соединения склонны к образованию осадков в дизельном топливе [122]. Поэтому церий предложено заменить другими лантаноидами или смесью их солей. Повышают эффективность горения хелатные соединения, в частности ацетилацетонаты редкоземельных элементов: церия, неодима, лантана, эрбия.

Цель и задачи исследования

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ научно-технической литературы и электронных изданий по вопросам воздействия выбросов дизелей на окружающую среду показал, что загрязнение атмосферы вредными веществами в Российской Федерации значительно превышает допустимые экологические нагрузки и

достигает более 9,5 млн т в год.

При этом автотракторная техника выделяет более 40 % всех выбросов в атмосферу, в которых одним из основных токсичных компонентов является сажа, выступающая накопителем канцерогенных веществ.

2. Изучение современных способов снижения токсичных выбросов дизелей по казало, что в настоящее время одним из наиболее перспективных и эффективных средств уменьшения содержания токсичных веществ в ОГ дизелей являются антидымные присадки к топливу, которые позволяют снизить дымность на 30-70 %.

Исходя из этого, целью настоящей работы является улучшение экологических показателей тракторного двигателя Д 240 путем применения антидымной присадки к топливу на основе аминоксилола, обеспечивающего эффективное снижение вредных выбросов при его эксплуатации.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

1. Провести анализ использования присадки к топливу для снижения вредных веществ, содержащихся в отработавших газах дизелей.

2. Разработать математические модели тепловыделения и образования сажи в цилиндре двигателя, работающего на топливе с присадкой, отражающие его работу на различных скоростных и нагрузочных режимах.

3. Экспериментально установить основные закономерности изменения эффективных и токсических характеристик двигателя, работающего на топливе с присадками на основе аминоксилола и гидроксокарбоната лантана.

4. Оценить экономическую эффективность применения антидымной присадки на основе амино-ксилола к дизельному топливу.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Присадки для топлива

В процессе эксплуатации для улучшения качества топлива используются различные присадки.

Присадки для бензина и дизельного топлива

Для качественного улучшения работы автомобильного двигателя к топливам добавляются специальные вещества – присадки, которые улучшают свойства топлив по многим показателям. Ассортимент присадок к топливам насчитывает более 20 основных типов, а количество композиций, используемых на практике, исчисляется сотнями.

Присадки для бензинов различают следующих основных типов:

- очищающие двигатель от нагара и остатков сгоревшего топлива;
- дегидрационные, абсорбирующие воду из топливного бака и способствуют антиобледенению;
- присадки, повышающие октановое число бензина и его антидетонационную стойкость.

Присадки для дизельных топлив в свою очередь делятся на такие основные типы:

- депрессорные (антигелевые), понижающие температуру застывания и температуру предельной фильтруемости дизельных топлив;
- многофункциональные моющие пакеты присадок, позволяющие эффективно очищать системы двигателя и предотвращать образование отложений в них;
- присадки, повышающие цетановое число дизельного топлива.

2.2 Механизм действия антидымной присадки на основе аминоксилола

Предполагая, что некоторые углеводороды могут выступать в качестве катализаторов процесса сгорания углеводородных топлив, каталитическое действие их можно объяснить вызванным возбуждением электронов внешней оболочки ядра с верхних энергетических подуровней [42, 88].

По мере того, как эти электроны переходят на более низкие уровни, высвобождается количество энергии, достаточное для того, чтобы поддерживать энергию активации реакции горения даже при температуре ниже минимальной, требуемой для данного источника [11].

Это можно объяснить двумя причинами. Во-первых, хотя катализатор растворим в топливе и таким образом может считаться в этом состоянии гомогенным, в процессе сгорания топлива катализаторная смесь является гетерогенной. Во-вторых, он не уменьшает величину энергии активации реакции горения, а увеличивает её. Выявлено, что катализатор выделяет количество энергии, необходимое для поддержания энергии активации реакции в условиях воспламенения дизельного топлива при температурных режимах конца такта сжатия, что приводит к ускорению скорости химической реакции горения топлива и к более полному её протеканию. Вероятно, энергия, выделяемая катализатором в процессе перехода электронов на более низкие подуровни, компенсирует потерю энергии в результате продолжения реакции при сохранении энергии активации без катализатора [125].

Основные закономерности влияния применяемых присадок к дизельному топливу на процессы образования токсичных веществ и сажи в отработавших газах двигателя состоят в следующем. При добавлении каждой из присадок отдельно в дизельное топливо происходит их термическое разложение в цилиндре, в результате которого наблюдаются два положительных эффекта от действия присадок на процессы испарения и сгорания капель дизельного топлива в цилиндре, существенно

изменяющих эффективные и токсические показатели двигателя. Первый выявленный положительный эффект состоит в выделении дополнительной порции тепловой энергии от экзотермической реакции при термическом разложении присадок в цилиндре двигателя, которая ускоряет процесс испаряемости капель топлива и способствует улучшению процесса смесеобразования и воспламенения. Второй эффект заключается в каталитическом действии аминоксилола на процесс сгорания дизельного топлива в цилиндре. Действуя как катализатор, аминоксилон вызывает увеличение скорости цепных химических реакций процесса сгорания элементов молекул топлива в цилиндре двигателя, что приводит к сокращению времени сгорания и полного выделения тепла, а также к более полному сгоранию топлива в цилиндре. В свою очередь, сокращение времени от начала сгорания топлива до полного выделения тепла в цилиндре происходит при меньшем его объеме над поршнем и меньшей поверхности теплоотдачи в стенки цилиндра, что способствует лучшему использованию выделившегося от сгорания тепла, т.е. повышению значений энергетических показателей двигателя.

В первом приближении описанные эффекты действия присадки на процесс сгорания дизельного топлива можно описать количественно следующим выражением для коэффициента выделения тепла в цилиндре:

$$\xi = \xi_0 [1 + k_{p_1} m_p / g_c + k_{p_2} (m_p / g_c)^2] + 1 / H_u \int \Delta E(m_p, T(t)) dt, \quad (2.1)$$

где ξ - коэффициент использования тепла от сгорания топлива в цилиндре ξ_0

при работе двигателя на топливе без присадки;

k_{p_1}, k_{p_2} - коэффициенты, учитывающие эффективность действия присадок

m_p / g_c - относительная доля массы m_p , исследуемой присадки в цикловой подаче g_c одного цилиндра двигателя;

H_u - низшая теплота сгорания топлива, Дж;

ΔE - энергия активации экзотермических химических реакций при

термическом разложении исследуемой присадки, Дж;

T — температура в цилиндре двигателя, К;

t - время, с.

В зависимости (2.1) первый член суммирования описывает эффект действия присадки как катализатора, а второй - относительное значение выделившейся энергии экзотермической реакции при термическом разложении присадки.

Константы скоростей каждой i -й химической реакции при сгорании топлива с присадкой могут быть вычислены по следующему выражению:

$$K_i = A_i \cdot 10^m e^{[-E - \Delta E(m_p, T(t))]/RT(t)}, \quad (2.2)$$

где E и ΔE - энергии активации экзотермических химических реакций соответственно при сгорании топлива без присадки и при термическом разложении разработанной присадки, Дж;

T - константа, зависящая от вида топлива;

m_p - масса исследуемой присадки в цикловой подаче одного цилиндра двигателя, г;

t - время, с.

2.3 Математическая модель процесса тепловыделения в цилиндре двигателя при добавлении в топливо антидымной присадки

Основной задачей математического моделирования в теории ДВС является моделирование индикаторной диаграммы двигателя, которая определяет функциональную связь между давлением рабочего тела в цилиндре и перемещением поршня, позволяющую оценить количество выделяющейся и отводимой тепловой энергии, переменность массы рабочего тела. Как следует из постановки, эта задача решается применительно к ДВС с использованием первого начала термодинамики переменной массы [41, 82, 103]:

$$dQ \pm \sum_i^n i_j dM_j = d(Mu) + pdV, \quad (2.3)$$

где - подведенное к рабочему телу элементарное количество теплоты, Дж; dQ

$i_j dM_j$ - поток энтальпии, Дж, внесенный (+) и вынесенный (-) с элементарными массами dM_j , кг, из объема цилиндра V , м³;

M - масса рабочего тела в цилиндре, кг;

u - удельная внутренняя энергия рабочего тела, Дж/кг;

p - давление в цилиндре, Па.

В настоящем исследовании при моделировании процесс газообмена не рассматривается, так как присадка, введенная в топливо, влияет только на процесс сгорания, поэтому зависимостью изменения массы рабочего тела в цилиндре можно пренебречь. Для решения задачи достаточно рассмотреть следующие участки индикаторной диаграммы: конец процесса сжатия; начало процесса выделения тепла при сгорании и участок от начала расширения до окончания выделения тепла при сгорании.

Дифференциальное уравнение скорости изменения давления рабочего тела в цилиндре двигателя в процессе горения — расширения исходя из первого начала термодинамики переменной массы имеет вид [82]:

$$dQ_{\text{под}} + idM_T - idM_H = d(Mu) + pdV + dQ_w, \quad (2.4)$$

где $dQ_{\text{под}}$ - количество теплоты, выделяющееся при сгорании относительной массы топлива $g_{\text{ц}} dx$, Дж, $dQ_{\text{под}} = g_{\text{ц}} Q_{\text{ц}} dx$;

$Q_{\text{ц}}$ - низшее значение теплотворности топлива, Дж/кг;

idM_T - энтальпия газа, поступившего в цилиндр двигателя при сгорании относительной массы топлива $g_{\text{ц}} dx$, Дж, $idM_T = c_p T g_{\text{ц}} dx$;

idM_H - энтальпия заряда, теряемая из-за наличия плотностей сгорания, Дж.

Считая, что энтальпия $i = c_p T$, Дж, и внутренняя энергия $u = c_v T$, Дж, и предполагая, что в окрестности рассматриваемой точки теплоёмкости постоянны, т.е. $c_p = \text{const}$ и $c_v = \text{const}$, преобразуем

выражение (2.4), поделив все его члены на величину мгновенного запаса внутренней энергии в цилиндре двигатель :

$$g_u(Q_H + c_p T)dx / M_{c_v} T - k dM_H / M = dT / T + dM / M + (k - 1)dV / V + dQ_w / M_{c_v} T. \quad (2.5)$$

Сопоставив относительное изменение температуры dT/T с характеристическим уравнением $pV = MRT$, после несложных преобразований получаем следующий вид дифференциального уравнения скорости изменения давления в процессе горения - расширения в цилиндре двигатель:

$$dp / d\phi = p[g_u / M(Q_H / c_v T + k)dx / d\phi - k / M dM_H / d\phi - k d \ln V / d\phi - 1 / (M_{c_v} T) dQ_w / d\phi]. \quad (2.6)$$

В этом уравнении учтено многообразие факторов, которые влияют на скорость изменения давления в цилиндре двигатель. К ним относят: скорость выделения теплоты при сгорании топлива (); скорость изменения относительного объема $dp / d\phi$ цилиндра (); скорость отводимого тепла от рабочего тела $d \ln V / d\phi$ (). $dQ_w / d\phi$ Однако следует учитывать, что входящие в правую часть уравнения (2.6) величины - переменные (исключением являются постоянные $Q_H = \text{const}$ и $g_u = \text{const}$).

При определенных допущениях дифференциальное уравнение (2.6) можно упростить. Так, если не учитывать утечки рабочего тела через щели камеры сгорания, то $dM_H = 0$ и уравнение примет вид:

$$dp / d\phi = p[g_u / M(Q_H / c_v T + k)dx / d\phi - k d \ln V / d\phi - 1 / (M_{c_v} T) dQ_w / d\phi]. \quad (2.7)$$

В расчетах настоящего исследования не требуется очень высокой точности вычислений.

Величина члена уравнения $k/Q_H/c_v T$ составляет $1,3/[10^4/(0,22210 \cdot 10^{-3})] = 0,510 \cdot 10^{-7}$, т.е. значение показателя адиабаты k существенно меньше величины члена уравнения $Q_H/c_v T$.

Поэтому дифференциальное уравнение скорости изменения давления газа в цилиндре двигатель можно представить в следующем виде:

$$dp / d\phi = p(g_u Q_H / M_{c_v} T dp / d\phi - k d \ln V / d\phi - 1 / (M_{c_v} T) dQ_w / d\phi). \quad (2.8)$$

Для интегрирования дифференциального уравнения (2.8) необходимо

задаваться зависимостью изменения цикловой подачи $g_{ц}$ дизельного топлива в цилиндр двигатель во времени от угла поворота коленчатого вала.

Дифференциальное уравнение скорости изменения давления рабочего тела в цилиндре двигатель в процессе сжатия можно получить из уравнения (2.8). Для описания данного процесса исходными условиями будут аналогичные предпосылки, которые принимались при выводе уравнения для процесса горения - расширения. Подвод тепла от сгорания топлива отсутствует, т.к. нет процесса сгорания, поэтому в уравнении (2.8) значение первого члена в скобках равно нулю. Если считать, что потери массы рабочего тела через щели камеры сгорания $dM = M_{н}$, получим дифференциальное уравнение скорости изменения давления рабочего тела на участке сжатия индикаторной диаграммы:

$$dp / d\varphi = p(kd \ln M / d\varphi - kd \ln V / d\varphi + 1 / (M_{cv} T) dQ_w / d\varphi). \quad (2.9).$$

Если не учитывать потери массы рабочего тела через щели камеры сгорания (потери массы через щели замков поршневых колец, щели между клапанами и седлами), то дифференциальное уравнение (2.9) примет вид:

$$dp / d\varphi = -p(kd \ln V / d\varphi + 1 / (M_{cv} T) dQ_w / d\varphi). \quad (2.10)$$

Так же, как и при газообмене, в процессах наполнения цилиндра газом и вы пуска его в уравнениях (2.9) и (2.10) член $p / (M_{cv} T) dQ_w / d\varphi$ можно рассчитать по

формуле

$$2 / 3(k-1)D / 2 + H / DH\alpha(T - T_w) / n, \quad (2.11)$$

где D - диаметр цилиндра, м;

H - текущее положение поршня двигатель, м.

Так как в настоящем исследовании не ставилась задача изучить влияние работы кольцевого уплотнения с учетом утечек через камеры сгорания, то, естественно, целесообразно использовать дифференциальное уравнение, описывающее процесс сжатия газа в виде дифференциального уравнения (2.10), а процесс горения -расширения - в виде

дифференциального уравнения (2.8), в которых в явном виде устанавливается связь скорости изменения давления в цилиндре двигателя от изменения перечисленных ранее факторов.

Относительное изменение объёма цилиндра dV/V легко вычислить из уравнений, описывающих изменение мгновенного значения объёма цилиндра двигателя и его производной по углу поворота коленчатого вала.

Текущий объём цилиндра определили по формуле:

$$V = V_h / (\varepsilon - 1) + \pi D^2 S_x(\varphi) / 4 = V_h (1 / (\varepsilon - 1) + (1 - \cos(\varphi) + \lambda \sin(\varphi)^2 / 2) / 2), \quad (2.12)$$

где V_h - рабочий объём цилиндра, м³;

$S_x(\varphi)$ - текущий ход поршня для данного угла положения кривошипа коленчатого вала, °п.к.в., м; φ

κ - отношение радиуса R , м, кривошипа к длине шатуна L , м;

ε - степень сжатия.

После дифференцирования выражения (2.12) по углу поворота кривошипа коленчатого вала получили выражение производной [82]

$$dV / d\varphi = V_h (\sin(\varphi) + \lambda \sin(2\varphi) / 2) / 2. \quad (2.13)$$

На основании уравнений (2.12) и (2.13) выражение для отношения производной от объёма по углу φ к текущему объёму примет вид:

$$dV / (V d\varphi) = V_h [\sin(\varphi) + \lambda \sin(2\varphi) / 2] / (2 / (\varepsilon - 1) + (1 - \cos(\varphi) + \lambda \sin(\varphi)^2 / 2) / 2). \quad (2.14)$$

Положение поршня H рассчитывали по высоте камеры сгорания S_l и величине перемещения поршня:

$$H = S_l (1 / (\varepsilon - 1) + (1 - \cos(\varphi) + \lambda \sin(\varphi)^2 / 2) / 2). \quad (2.15)$$

В процессах сжатия и расширения при постоянном составе рабочего тела показатель теплоёмкости при постоянном давлении $c_v = c_v(T)$ и показатель адиабаты $k = k(T)$. При сгорании, как и при газообмене, меняется состав рабочего тела, поэтому показатели теплоёмкости и адиабаты в уравнениях являются функциями температуры и состава рабочего тела.

Коэффициент теплоотдачи от рабочего тела по текущей поверхности объёма при текущем положении поршня определяли из выражения [41, 103]

$$\alpha_r = 110 p^{0,8} w^{0,8} / (T_r D^{0,2}) + \varepsilon_r \sigma A ((T_r / 100)^4 - (T_{CT} / 100)^4) \cdot (T_r - T_{CT}), \quad (2.16)$$

где w - скорость в процессе сжатия, м/с, для процесса горения - расширения $w = 2,28 c_m + 3,1410 \cdot^{-3} V_s T_r (p - p_Q) / (p_1 V_1)$;

V_s - объём камеры сгорания, м³;

$p_1 V_1$ - соответственно давление и объём над поршнем, МПа, м³;

ε_r - степень черноты пламени;

σ - коэффициент излучения абсолютно черного тела;

T_{CT} - средняя температура стенки цилиндра со стороны рабочего тела, К.

Коэффициент A в уравнении (2.16) определяется по критериальному уравнению, связывающему число Нуссельта (Nu) и число Рейнольдса (Re) для процесса теплопередачи:

$$Nu = A Re^m, \quad (2.17)$$

где m - показатель степени, $m = 0,8$.

Скорость потерь тепловой энергии в процессе теплоотдачи от газов к стенкам цилиндра и камеры сгорания [82]:

$$dQ_w / d\varphi = \alpha_i (T_r - T_{CT}) F_x(\varphi) / (3600 \cdot 6n), \quad (2.18)$$

где α_i - коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К);

T_{CT} - средняя температура стенки цилиндра со стороны рабочего тела, К;

$F_x(\varphi)$ - текущая поверхность теплообмена между рабочим телом и стенкой цилиндра, м²; $F_x(\varphi) = \pi D S_x(\varphi) \varepsilon / (\varepsilon - 1) + (f_k - f_p) \pi D^2 / 4$;

D - диаметр цилиндра, м;

$S_x(\varphi)$ - текущий ход поршня, м;

f_k, f_p - доли непосредственно охлаждаемых поверхностей крышки цилиндра и поршня.

Мгновенные значения хода поршня для заданного значения угла поворота кривошипа коленчатого вала (φ) вычисляли по следующей формуле:

$$S_x(\varphi) = S / 2 (1 - \cos(\varphi) + \lambda \cos(2\varphi) / 4), \quad (2.19)$$

где S — ход поршня, м;

λ - отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Показатель адиабаты сжатия k можно вычислить по формуле [82]:

$$k = 1,43 - 0,03x / -0,05T_{\Gamma} / 1000, \quad (2.20)$$

где x - текущая степень тепловыделения;

α - коэффициент избытка воздуха;

T_{Γ} - температура рабочего тела, К.

Нестационарные высокоинтенсивные процессы переноса тепла описываются обобщенным законом Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид гиперболического уравнения с частными производными. Для одномерного температурного поля баланс тепла описывается дифференциальным уравнением с частными производными следующего вида:

$$\partial q_x / \partial x = c\rho \partial T_{\Gamma} / \partial t, \quad (2.21)$$

$$q_x = -\lambda \partial T_{\Gamma} / \partial x - T_{re} \partial q_x / \partial t, \quad (2.22)$$

где c - удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);

T_{Γ} - температура в локальной точке с координатой x , К;

t - время, с;

λ - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

T_{re} - постоянная времени или время релаксации, с.

При постоянных значениях λ и T_{re} после объединения уравнений (2.21) и (2.22) получим:

$$T_{re} \partial^2 T_{\Gamma} / \partial t^2 + \partial T_{\Gamma} / \partial t - a \partial^2 T_{\Gamma} / \partial x^2 = 0, \quad (2.23)$$

где a - температуропроводность, м²/с, $a = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}}$,

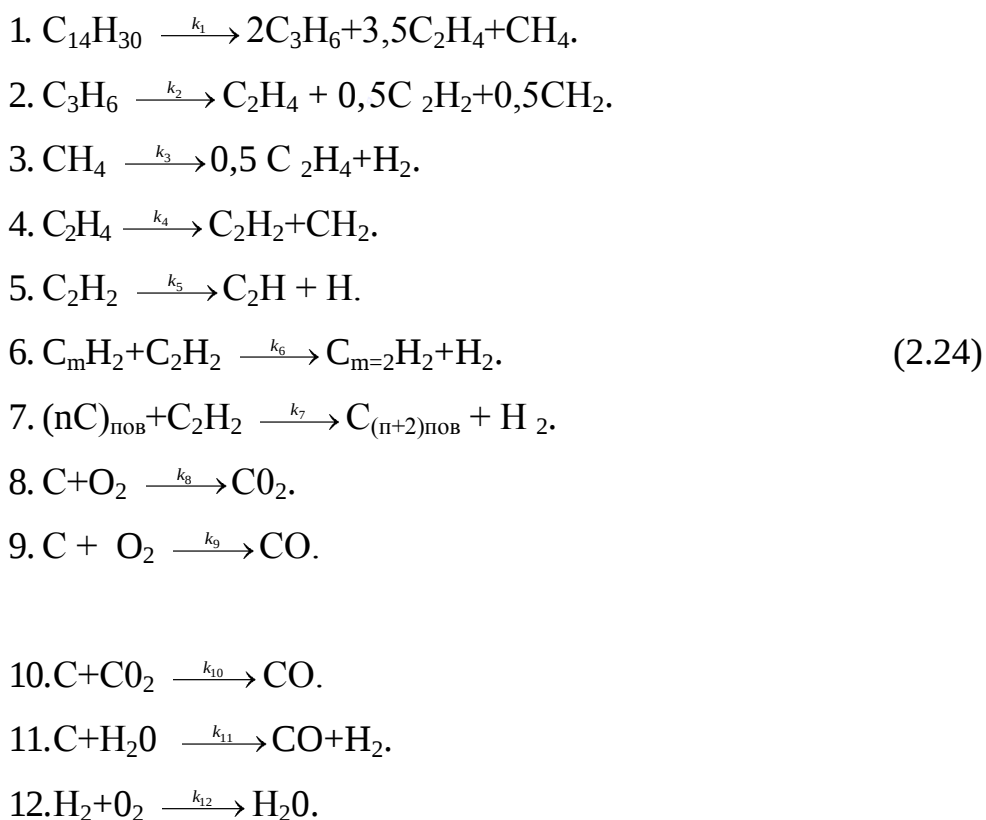
2.4 Математическая модель процесса образования сажи при горении в цилиндре двигателя топлива

с антидымной присадкой на основе аминоксилола

Обобщенную физико-химическую модель процесса результирующего образования токсичных компонентов в цилиндре двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой на основе аминоксилола, можно сформировать на основе математических моделей химической кинетики [36, 48, 82, 109] и моделей изменения температуры в форме уравнения (2.23).

При моделировании обычно принимают следующий состав продуктов первичного разложения дизельного топлива: C_3H_6 - 30,4 % к объёму, C_2H_4 - 54,4 %, CH_4 - 15,2 % к объёму [82, 109].

В первом приближении химизм процессов результирующего образования токсичных компонентов в цилиндре двигателя можно описать следующей системой эквимолекулярных уравнений брутто-реакций [82, 110]:



Химические уравнения 1-4 описывают процессы термохимического крекинга, уравнение 5 - образование химического радикала; уравнение 6 - формирование фазового перехода и образование физического зародыша; уравнения 8—12 - протекание условно изохорического процесса

гетерогенного горения частиц сажи.

Для формирования обобщенной системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы образования и выгорания сажи и образования токсичных компонентов, введены следующие условные обозначения компонентов реагирующей системы: M_1 - $C_{14}H_{30}$, M_2 - C_3H_6 , M_3 - CH_4 , M_4 - C_2H_2 , M_5 - H_2 , M_6 - C_2H_4 , M_7 - любая инертная молекула, не участвующая непосредственно в химическом реагировании [32, 57].

Так как физические механизмы образования токсичных компонентов, образования и выгорания частиц сажи рассматриваются независимо друг от друга, то система химических уравнений (2.24) не может отразить реальные взаимосвязи рабочего процесса двигателя и перечисленных ранее процессов термического крекинга между собой. Поэтому в первом приближении при математическом описании процесса изменения массы M_i при образовании i -го токсичного компонента можно использовать дифференциальное уравнение следующего вида

$$\frac{dM_i}{d\tau} = \left(\frac{dM_i}{d\tau}\right)_\sigma + \left(\frac{dM_i}{d\tau}\right)_k + \left(\frac{dM_i}{d\tau}\right)_x, \quad (2.25)$$

где $(dM_i/d\tau)_\sigma$ - описывает подвод $d\tau$ i -го вещества с учётом испарения топлива на линии его подачи;

$(dM_i/d\tau)_k$ - изменение концентрации i -го вещества вследствие первой фазы

предпламенных химических превращений топлива при пиролизе;

$(dM_i/d\tau)_x$ - изменение концентрации i -го вещества в процессе основной фазы горения.

Уравнение (2.25) связывает действительные физические процессы сгорания и смесеобразования с химической кинетикой образования токсичных компонентов. В правой части уравнения (2.25) отражена сумма факторов, определяющих скорость изменения концентрации i -го

компонента газовой смеси. Для твердой углеродной фазы обычно предполагается, что частицы сажи проходят через реакционную зону фронта пламени без газификации и окисляются в зоне продуктов сгорания [57, 114]. Тогда результирующее образование токсичных компонентов в цилиндре двигателя можно представить в виде алгебраической суммы двух членов:

$$\left(\frac{dN}{d\tau}\right)_{\Sigma} = \left(\frac{dN}{d\tau}\right)_{обр} - \left(\frac{dN}{d\tau}\right)_{выз}. \quad (2.26)$$

Используя принятые предпосылки, математическую модель процесса результирующего образования i -го токсичного компонента и выделения сажи в цилиндре двигателя можно представить в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_1}{d\varphi} &= \alpha_{CT} M_0 r_{1H} \frac{d\sigma}{d\varphi} - \frac{1}{6n} R_1 - M_1 A; \\ \frac{dM_2}{d\varphi} &= \frac{1}{6n} (-R_2 + 2R_1) - M_2 A; \\ \frac{dM_3}{d\varphi} &= \frac{1}{6n} (R_1 - R_3) - M_3 A; \\ \frac{dM_4}{d\varphi} &= \frac{1}{6n} (3,5R_1 + R_2 + 0,5R_3 - R_4) - M_4 A; \\ \frac{dM_5}{d\varphi} &= \alpha_{CT} M_0 r_{5H} \frac{d\sigma}{d\varphi} - \frac{1}{6n} (0,5R_2 + R_3 + R_4 + R_5) - M_5 A; \\ \frac{dM_6}{d\varphi} &= \frac{1}{6n} (0,5R_2 + R_2 + R_4 - R_5) - M_6 A; \\ \frac{dM_7}{d\varphi} &= \alpha_{CT} M_0 r_{7H} \frac{d\sigma}{d\varphi} - M_7 A; \\ \left(\frac{dN}{d\varphi}\right)_{обр} &= N_H \frac{\alpha_{CT}}{\alpha} \frac{d\sigma}{d\varphi} + \frac{B_1 N_T}{6n} - N_{обр} A; \\ \left(\frac{dN}{d\varphi}\right)_{обр} &= N_H \frac{\alpha - \alpha_{CT}}{\alpha} \frac{d\sigma}{d\varphi} - \frac{B_2}{6n} N_{выз} s_{y0} G_c + N_{обр} A; \\ \left(\frac{dN}{d\alpha}\right)_{\Sigma} &= \left(\frac{dN}{d\varphi}\right)_{обр} - \left(\frac{dN}{d\varphi}\right)_{выз}, \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

где α - локальный коэффициент избытка воздуха при сгорании; α_{CT}

M_0 - стехиометрическое количество воздуха, кмоль воздуха/кмоль топлива;

r_{1H}, r_{5H}, r_{7H} , - начальные концентрации топлива, воздуха и водорода, доля от M_0 ;

σ - относительная доля топлива, поданного в цилиндр;

$$A = (dx/d\varphi) / -\sigma x;$$

x - относительная доля выгоревшего топлива;

R_i - скорость реакции, мг/°п.к.в.;

π — частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

N_H - начальное содержание сажи в цилиндре, мг;

B_1, B_2 - эмпирические коэффициенты;

N_T - текущее содержание сажи, мг;

$N_{обр}$ - массовое количество сажи в реакционном объеме, мг;

α - суммарный коэффициент избытка воздуха;

- массовое количество сажи, выгоревшей в реакционном объеме, мг;

$N_{сж}$

$S_{уд}$ - удельная площадь поверхности частиц сажи, $s_{уд} = 10010 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$;

G_c - массовый поток углерода.

Определение значений ряда параметров в системе уравнений (2.27) требует использования дополнительной информации. Так, необходимо вычислить мгновенные локальные значения коэффициента избытка воздуха, которые ряд исследователей рекомендуют рассчитывать по полуэмпирическим зависимостям Н. Ф. Разлейцева [90, 114]:

$$\alpha_{сж} = \frac{\xi_B \alpha}{x};$$

$$h = \frac{0,707}{\varphi_{z \min}}; c_B = \frac{1 - \xi_{B \min}}{0,485}; \overline{\varphi_z} = \frac{\varphi_i}{\varphi_z}, \quad (2.28)$$

где ξ_B - степень эффективного использования заряда цилиндра для сгорания, $\xi_B = 0,4-0,55$; $\xi_{B \min}$

c_B - коэффициент пропорциональности; φ_i - i -й угол поворота коленчатого вала;

φ_z - действительная продолжительность процесса сгорания,

которая определяется по характеристике тепловыделения, $\varphi_z = 0,33 \cdot \varphi_{z \min}$

Скорости реакций при описании процессов термического разложения топлива в уравнениях 1-4 системы (3.46) рассчитываются как

произведения константы i -й скорости химической реакции K_i , на действующую концентрацию: $R_i = K_i M_i$ где $i=1,2,3,4$.

Константы скоростей химических реакций уравнений (2.27) вычисляли по формуле [81, 114]. $K_i = A_i (10^m) e^{-E/RT}$

Учитывая результаты исследования механизма действия антидымной присадки [72], константы скоростей каждой i -й химической реакции при сгорании топлива с разработанной присадкой на основе аминоксилола вычисляли по следующему выражению

$$K_i = A_i \cdot 10^m e^{(-E - \Delta E(m_p, T(t))) / RT}, \quad (2.29)$$

где E , ΔE — энергия активации экзотермических химических реакций соответственно при сгорании топлива без присадки и при термическом разложении разработанной присадки, Дж;

m_p — относительная доля исследуемой присадки в цикловой подаче g_c одного цилиндра двигателя, г;

T — температура в цилиндре, К;

t — время, с;

R — газовая постоянная.

Суммарная скорость реакций 5 и 6 системы (3.46)

$$R_p = k_p p r_B N_{обр} S_{yd} \cdot 10^7, \quad (2.30)$$

где p — давление газов в цилиндре, Па;

r_B — объёмная концентрация ацетилена,

$$r_B = M_B \sum_{i=1}^B M_i; \quad (2.31)$$

$N_{обр}$ — массовое количество сажи в реакционном объёме, мг.

Начальное содержание сажи в цилиндре двигателя определяли исходя из количества сажи в остаточных газах по формуле

$$N_n = \gamma_r G_B C_c, \quad (2.32)$$

где γ_r — коэффициент остаточных газов;

G_B — массовый расход воздуха на цикл при нормальных условиях, кг/ч;

C_c — концентрация сажи в отработавших газах, %.

Начальные концентрации реагирующих веществ принимали пропорциональными их объёмным концентрациям в исходной смеси и количеству топлива поданного в цилиндр двигатель к моменту времени, r_{1H} $\alpha_{CT}(\varphi_H)$

$$M_{1H} = \alpha_{CT}(\varphi_H) M_0 \sigma(\varphi_H) r_{1H}. \quad (2.33)$$

Величину вычисляли по закону подачи топлива, а значения начальных концентраций воздуха и топлива - соответственно по следующим выражениям: $\sigma(\varphi_H)$

$$r_{1H} = 1 / (1 + \alpha_{CT} M_0); r_{7H} = M_0 / (1 + \alpha_{CT} M_0). \quad (2.34)$$

Для остальных реагирующих веществ $r_{iH} = 0$ ($i = 2, 3, 4, 5, 6$). Значение M_0 (кмоль воздуха/кмоль топлива) находили по стехиометрическому уравнению процесса сгорания дизельного топлива в цилиндре двигатель

$$C_{14}H_{30} + 21,5O_2 = 14CO_2 + 15H_2O; M_0 = 21,5/0,21 = 102,4.$$

Для описания процесса сгорания топлива в цилиндре двигатель обычно принимали упрощенную трехзонную физическую математическую модель гомогенного реактора [72, 114]. В этой математической модели объём цилиндра условно делится на три зоны: 1 - зона чистого воздуха, 2 - зона образования токсичных компонентов и сажи и 3 - зона выгорания сажи. В модели часто делается предположение об однородности температурных и концентрационных полей внутри каждой из перечисленных зон. Каждый из процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре двигатель соответственно представляется интегральным законом топливоподачи $a(\tau)$ и законом тепловыделения $x(\varphi)$. Расчёт количества сажи в процессе её образования производится в интервале времени с момента начала поступления топлива в цилиндр до момента его выгорания. Расчет количества выгоревшей сажи производится в интервале времени с момента начала активного тепловыделения до момента открытия выпускных органов. Значение определяющей температуры в процессе образования сажи находят из условия, что профиль температур в зоне пиролиза имеет

линейный характер [109]:

$$T_{обр} = \frac{T_1 + T_m}{2}. \quad (2.35)$$

где T_1 - температура в зоне чистого воздуха, К,

T_T - температура продуктов сгорания, К.

Решение системы (3.46) нелинейных дифференциальных уравнений с обыкновенными производными выполняли численными методами на ПЭВМ с применением прикладной программы, использующей численный метод Рунге - Кутты 4-го порядка [9].

2.5 Показатели эффективности использования антидымной присадки к топливу

Эффективность работы двигателя Д 240 на скоростных и нагрузочных режимах с присадкой в дизельном топливе определяли на основе расчета коэффициентов выхода токсичного компонента с отработавшими газами двигателя по концентрациям соответствующего токсичного компонента (оксида углерода CO, сажи - по показателю дымности D, оксидов азота NO_x , углеводородов CH).

Коэффициенты выхода токсичных компонентов с отработавшими газами двигателя, работающего на топливе с соответствующей i-й присадкой, рассчитывали на основе их концентраций:

оксидов углерода CO

$$K_{CO_i} = (C_{CO} - C_{CO_i}) / C_{CO}; \quad (2.36)$$

сажи (по показателю дымности D)

$$K_{C_i} = (C_C - C_{C_i}) / C_C; \quad (2.37)$$

оксидов азота NO_x

$$K_{NO_{xi}} = (C_{NO_x} - C_{NO_{xi}}) / C_{NO_x}, \quad (2.38)$$

углеводородов CH

$$K_{CH_i} = (C_{CH} - C_{CH_i}) / C_{CH}, \quad (2.39)$$

где - концентрации оксидов углерода в отработавших газах двигателя, C_{CO}, C_{CO_i} работающего на топливе без присадки и с i -й присадкой;

C_c, C_{C_i} - концентрации сажи (по показателю дымности D) в отработавших газах двигателя, работающего на топливе без присадки и с i -й присадкой;

$C_{NO_x}, C_{NO_{xi}}$ - концентрации оксидов азота в отработавших газах двигателя, работающего на топливе без присадки и с i -й присадкой;

C_{CH}, C_{CH_i} - концентрации углеводородов в отработавших газах двигателя,

работающего на топливе без присадки и с i -й присадкой. Все перечисленные коэффициенты выхода j -го токсичного компонента с отработавшими газами двигателя, работающего на топливе без присадки и с присадкой, могут быть описаны более компактным выражением:

$$K_{ij} = (C_j - C_{ij}) / C_j, \quad (2.40)$$

где C_j, C_{ij} - соответственно концентрации j -го токсичного компонента в отработавших газах двигателя без присадки в дизельном топливе и с i -й присадкой.

В ряде источников [70, 71, 90] коэффициент выхода соответствующего j -го токсичного компонента с отработавшими газами двигателя, работающего на топливе с i -й присадкой, определяется по следующему выражению:

$$K_{vij} = C_{ij} / C_j. \quad (2.41)$$

Рассматривая два выражения (2.40) и (2.41), можно получить зависимость между показателями K_{ij} и K_{vij}

$$K_{vij} = 1 - K_{ij}, \quad (2.42)$$

что позволяет достаточно легко произвести перерасчет значений одного показателя в другой.

Токсические характеристики двигателя представлены как зависимости

значений коэффициента выхода j -го токсичного компонента с отработавшими газами двигатель от показателей скоростного и нагрузочного режимов его работы

$$K_{ij}(n, p_e) = (C_j(n, p_e) - C_{ij}(n, p_e)) / C_j(n, p_e), \quad (2.43)$$

где $C_j(n, p_e), C_{ij}(n, p_e)$ - соответственно концентрации j -го токсичного компонента в отработавших газах двигателя, работающего на топливе без присадки и с i -й присадкой;

n — частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹;

p_e - среднее эффективное давление в цилиндрах двигателя, МПа.

При фиксированных значениях частоты вращения коленчатого вала двигателя и переменных значениях среднего эффективного давления в цилиндрах двигателя определяли токсические характеристики на режимах нагрузки. А при фиксированных значениях среднего эффективного давления в цилиндрах двигателя и переменных значениях частоты вращения коленчатого вала определяли токсические характеристики на скоростных режимах.

Результаты исследования значений токсических показателей (оксида углерода CO , концентрации сажи C_s по показателю дымности D , оксидов азота NO_x , углеводородов CH) двигателя Д 240 при его работе на нагрузочных характеристиках.

Для сравнительного анализа перечисленных токсических характеристик двигателя Д 240 по результатам построены их графики, которые приведены в главе 4.

Разработаны регрессионные математические модели зависимостей коэффициентов выхода токсичных компонентов и сажи от частоты вращения и среднего эффективного давления двигателя, рассчитаны значения коэффициентов выхода токсичных компонентов (оксидов углерода, оксидов азота, углеводородов) и сажи с ОГ двигателя. Для сравнительного анализа перечисленных коэффициентов выхода токсичных компонентов с ОГ двигателя Д 240, работающего на топливе с

исследуемой присадкой .

2.6 Выводы по разработанным математическим моделям

1. Дополнена методика теплового расчёта рабочего цикла двигателя Гриневецкого - Колчина, которая позволила получить параметры цикла двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой на основе аминоксилола.

Теоретически установлены основные закономерности изменения эффективных и токсических показателей двигателя, работающего на нагрузочных характеристиках с присадкой на основе аминоксилола в дизельном топливе.

2. Разработаны математические модели процессов тепловыделения и образования сажи в цилиндре двигателя при использовании в топливе присадки на основе аминоксилола, отражающие особенности работы двигателя на различных скоростных и нагрузочных режимах.

Разработана методика идентификации параметров математических моделей индикаторного процесса в цилиндре двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой на основе аминоксилола по индикаторным характеристикам, полученным экспериментально.

3 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Методика экспериментальных исследований

Основу методик экспериментальных исследований антидымной присадки составляют типовые апробированные методики испытаний. Для объективного эксперимента были использованы типовые методики, обеспечивающие качественное сравнение полученных результатов, большую точность оценки выделенных закономерностей, исключение в анализе влияния неучтенных факторов.

К экспериментальным исследованиям относятся: исследование токсических и топливно-экономических характеристик полноразмерного двигателя, работающего на различных нагрузочных и скоростных режимах.

Для повышения эффективности и успешного решения задач экспериментальных исследований испытания двигателя, работающего на топливе с антидымной присадкой, должны быть комплексными, оснащены необходимым измерительным оборудованием и опираться на научно обоснованные методы. Систематические погрешности выявляли с помощью анализа метода измерения и проверки всех измерительных приборов. Систематические погрешности учитывались путем определения и указания предельных погрешностей приборов [14].

(2.1)

Для оценки точности измерений и расчетов основных величин были подсчитаны:

1. Максимальная ошибка для величин, зависящих от небольшого числа величин, ошибки измерения которых известны:

$$dy/y = d\alpha / \alpha + d\beta / \beta + \dots, \beta \quad (2.2)$$

где dy/y - относительная ошибка определяемой величины;

$d\alpha / \alpha$; $d\beta / \beta$...- относительные ошибки ранее определенных величин. β

2. Вероятная ошибка для величин, зависящих от большого числа ранее определенных величин:

$$dy / y = \sqrt{((d\alpha / \alpha)^2 + (d\beta / \beta)^2 + \dots)}. \quad (2.3)$$

Если выражение для расчёта каких-либо величин содержит величины первого и второго вариантов, то для них определяли наиболее вероятную ошибку. При этом для величин первого случая вычисляли максимальную ошибку, а для величин второго - вероятную.

В исследовании значения относительных максимальных погрешностей применяемых измерительных приборов составляли:

- n — 0,5 % - прибор для измерения частоты вращения коленчатого вала;
- P_T - 2,5 % - прибор для измерения усилия на весах тормоза;
- G_B - 0,5 % - расходомер для измерения часового расхода воздуха;
- G_T - 0,3 % - расходомер часового расхода топлива;
- $T_{ог}$ - 0,5 % — прибор для измерения температуры отработавших газов;
- C - 2,5 % - прибор для измерения дымности (концентрации сажи);
- CO - 0,2 % - прибор для измерения концентрации окиси углерода;
- NO_x - 0,4 % - прибор для измерения концентрации оксидов азота;
- C_{CH} - 0,5 % - прибор для измерения концентрации углеводородов;
- $t_B = 0,2 \text{ г} - 0,1 \%$ - прибор для измерения массы вещества присадки (200 мг);

3.2 Эксплуатационные испытания

Программа исследований включает в себя экспериментальные исследования, заключающиеся в проведении эксплуатационных испытаний, а также в математической обработке полученных результатов на компьютере.

В настоящее время для разработки эффективных антидымных присадок к дизельному топливу важное значение имеют методы определения достоверных показателей на основе повышения точности проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований и обработки их результатов.

Эксплуатационные испытания универсально-пропашных тракторов, работающих на топливе с антидымными присадками, проводили в КФХ «Просто молоко» Чистопольского района РТ. В качестве объектов исследований были выбраны тракторы тягового класса 1,4 МТЗ-82. Тракторы заправляли топливом с присадками на основе аминоксилола. Эксплуатационные испытания проходили в соответствии с ГОСТ 7057-2001.

Тракторы перед испытаниями прошли ТО-2 в соответствии с заводской инструкцией по эксплуатации и техническим требованиям. Тракторами был выполнен весь комплекс сельскохозяйственных работ согласно рабочему плану конкретного хозяйства, при этом программа исследований специально не задавалась. Данный подход позволяет оценить работу средств снижения токсичных веществ в реальных условиях эксплуатации. Средняя наработка тракторов за период испытаний составила 800...850 мото-ч.

В течение всего срока эксплуатационных исследований периодически с помощью газоанализатора «Инфракар 5н» производился контрольный замер дымности ОГ двигателя тракторов на режиме свободного ускорения. За основу была взята методика замера дымности в соответствии с ГОСТ 17.2.2.02-98 «Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности ОГ дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин». Данный стандарт предусматривает проведение замера дымности при максимальной частоте вращения коленчатого вала двигателя в режиме свободного ускорения без нагрузки.

За время эксплуатационных испытаний было выявлено, что дымность

отработавших газов двигатель на режиме свободного ускорения трактора при работе на топливе с присадкой на основе аминоксилола составила в среднем 40 %, что в 1,5 раза ниже установленной нормы, что в 1,3 раза ниже установленной нормы. Эффективность действия присадки оставалась стабильной в течение всего срока испытаний.

На основании проведенных замеров дымности и токсичности ОГ комиссией из числа специалистов хозяйства были составлены акты о проведении эксплуатационных испытаний.

3.3 Методика проведения измерений

Для измерения экологических показателей использовался переносной микропроцессорный газоанализатор прибор «Инфракар 5н с возможностью измерения дымности ОГ. Предназначен для контроля значений концентраций NO_x , CO, CH и дымности отработавших газов дизелей автотракторной техники с целью оценки качества работы их систем выпуска, питания топливом и смазки.

Прибор «Инфракар 5н »» состоит из управляющего модуля, анализатора, двух газоотборных зондов для контроля значений концентраций NO_x , CO, CH и дымности.



Рисунок 3.1 - Общий вид газоанализатора «Инфракар 5М»:

1 - датчик тахометра с кабелем

2 - газоотборный зонд для измерения концентраций оксида углерода (CO), углеводородов (CH) диоксида углерода (CO₂), кислорода (O₂) и оксидов азота (NO_x).

«Инфракар 5М»- переносной микропроцессорный газоанализатор предназначен для контроля значений концентраций оксида углерода (CO), углеводородов (CH) диоксида углерода (CO₂), кислорода (O₂) и оксидов азота (NO_x) отработавших газов дизелей автотракторной техники с целью оценки качества работы их систем выпуска, питания топливом и смазки. Дополнительно газоанализатор измеряет частоту вращения коленчатого вала двигателя и температуру масла в картере двигателя.

Прибор «Инфракар5М» состоит из управляющего модуля, фильтра, датчик тахометра с кабелем, датчика для измерения температуры масла, зонда для контроля значений концентраций оксида углерода (CO), углеводородов (CH) диоксида углерода (CO₂), кислорода (O₂), оксидов азота (NO_x).

Данный прибор позволяет производить измерения в:

диапазоне температуры окружающей среды: от 0 до 40 °С, при относительной влажности окружающей среды: до 95% при 30° С, в условиях атмосферного давления: от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.).

«Инфракар 5М» позволяет измерять параметры анализируемой газовой среды при температуре анализируемой смеси, не более: 200 °С, при чём состав и содержание анализируемой газовой смеси (основные компоненты) на входе газоанализатора, объемная доля, %, должны быть не более:

CO 7, Сумма углеводородов (по гексану) 0,3, CO₂ 16, O₂ 21, O 0,4, N₂ остальное. Расход газовой пробы, не менее, дм³/мин 1.0. Методика взятия проб и их анализ осуществляется в соответствии со стандартной

методикой.

4 ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Анализ концентрации оксида углерода в отработавших газах двигателя

Токсические характеристики двигателя Д 240 исследовали при его работе с частотой вращения коленчатого вала $n = 1100 \dots 2200 \text{ мин}^{-1}$ и эффективным давлением $p_e = 0 \dots 0,63 \text{ МПа}$ на топливе без присадок и присадкой на основе аминоксилола. Наиболее подробно были исследованы следующие характеристики: зависимости концентраций оксида углерода, сажи (показателя дымности), оксидов азота и углеводородов в отработавших газах при заданных значениях частоты вращения коленчатого вала двигателя ($n = 1000, 1400, 1600, 1800, 2000$ и 2200 мин^{-1}).

Наибольшие концентрации оксида углерода C_{CO} в отработавших газах наблюдаются на режимах холостого хода и полной нагрузки двигателя при минимальных и максимальных частотах вращения его коленчатого вала.

Из анализа рисунка 4.1 видно, что при возрастании частоты вращения коленчатого вала двигателя значения концентрации оксида углерода в отработавших газах вначале монотонно уменьшаются от $C_{CO} = 1150 \dots 706 \text{ ppm}$ (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$) до $C_{CO} = 703 \dots 265 \text{ ppm}$ (при $n = 1600 \dots 1800 \text{ мин}^{-1}$), а затем на режиме номинальной частоты вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ монотонно увеличиваются до $C_{CO} = 431 \dots 891 \text{ ppm}$.

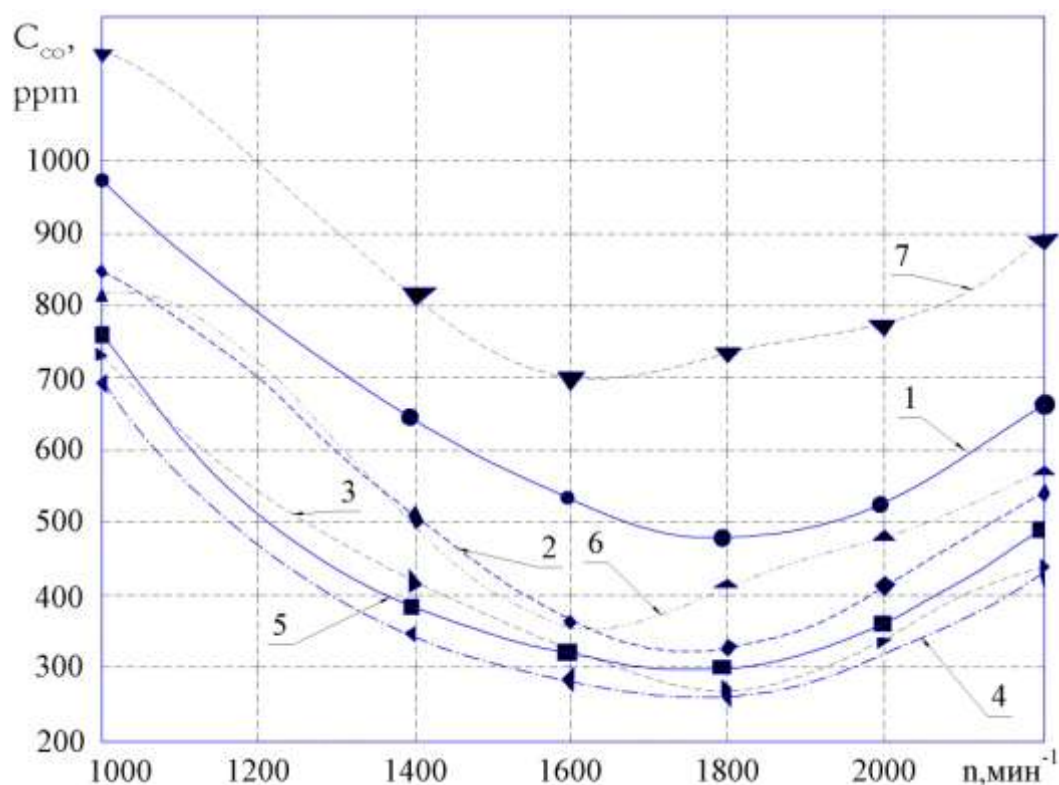


Рисунок 4.1- Экспериментальные зависимости концентрации оксида углерода C_{co} в отработавших газах двигателя Д240 работающего на топливе без присадки, от изменения частоты вращения n при фиксированной нагрузке двигатель: 1 - $p_e = 0$ МПа; 2 - $p_e = 0,093$ МПа; 3 - $p_e = 0,185$ МПа; 4 - $p_v = 0,278$ МПа; 5 - $p_r = 0,37$ МПа; 6 - $p_e = 0,46$ МПа; 7 - $p_e = 0,63$ МПа

Наименьшая концентрация оксида углерода $C_{co} = 265...280 \text{ ppm}$ в отработавших газах двигателя, работающего на топливе без присадки, наблюдается на нагрузочных режимах при $p_e = 0,25...0,278$ МПа и $n = 1700...1800 \text{ мин}^{-1}$.

Экспериментальная зависимость концентрации оксида углерода C_{co} в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, от изменения частоты вращения n приведена на рисунке 4.2. Наибольшие значения концентрации оксида углерода в отработавших газах двигателя наблюдаются на режимах холостого хода и полной нагрузки при минимальных и максимальных значениях частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Экспериментальные зависимости концентрации оксида углерода C_{co} в

отработавших газах двигатель Д 240, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола по нагрузочным характеристикам, при заданных значениях частоты вращения коленчатого вала двигателя ($n = 1000, 1400, 1600, 1800, 2000$ и 2200 мин^{-1}) представлены на рисунке 4.2.

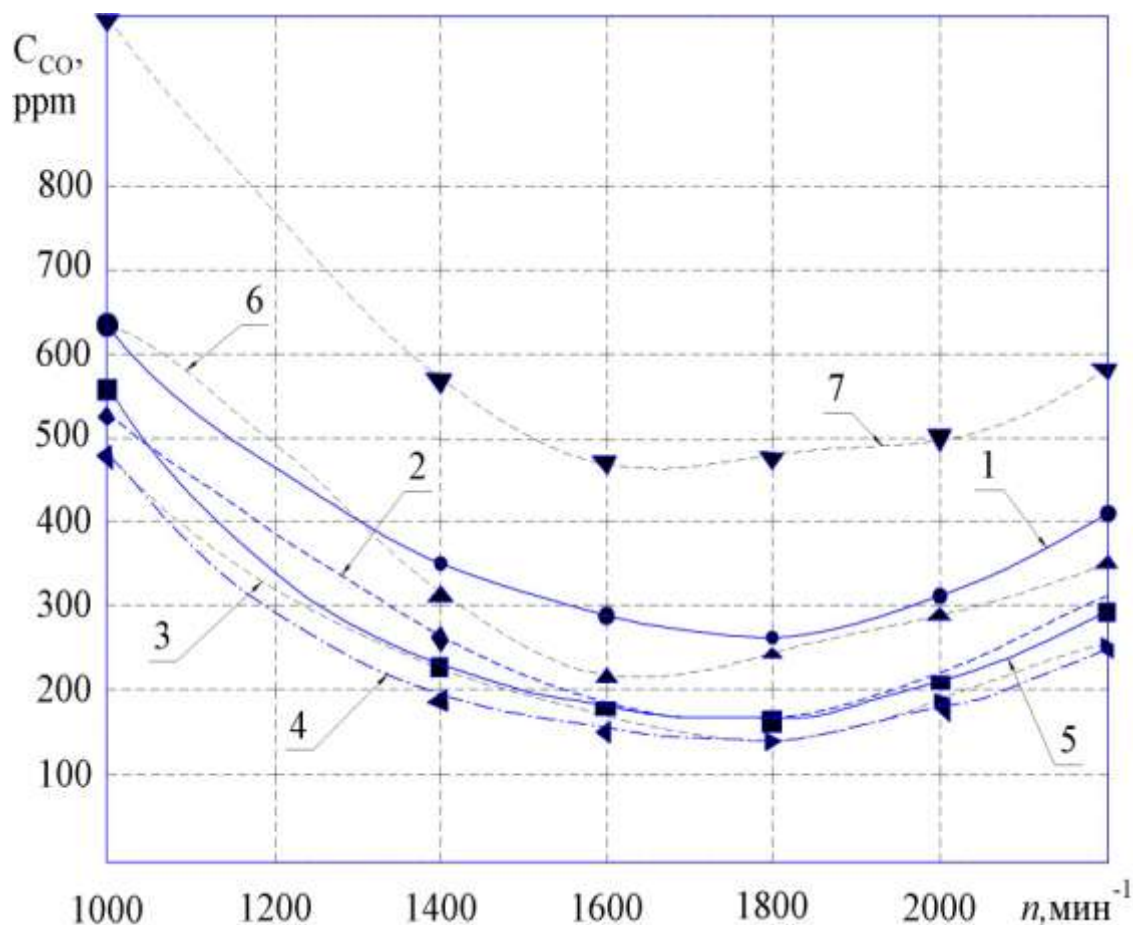


Рисунок 4.2 - Экспериментальные зависимости концентрации оксида углерода в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, от изменения частоты вращения n при заданных значениях нагрузки: 1 - $p_e = 0 \text{ МПа}$; 2 - $p_e = 0,093 \text{ МПа}$; 3 - $p_e = 0,185 \text{ МПа}$; 4 - $p_e = 0,278 \text{ МПа}$; 5 - $p_e = 0,37 \text{ МПа}$; 6 - $p_e = 0,46 \text{ МПа}$; 7 - $p_e = 0,63 \text{ МПа}$

Подобные закономерности изменения концентрации оксида углерода C_{CO} в отработавших газах двигателя наблюдаются при его работе на топливе с присадкой на основе аминоксилола на скоростных режимах. Зависимости на рисунке 4.2 имеют форму немного искривленной параболы (при разных режимах нагрузки).

Анализ графиков, приведённых на рисунке 4.2 показал, что с ростом частоты вращения коленчатого вала концентрация оксида углерода вначале монотонно (почти прямолинейно) уменьшается от $C_{CO} = 290...630$ ppm (при $n = 1000$ мин⁻¹) до $C_{CO} = 144...475$ ppm (при $n = 1600...1800$ мин⁻¹), а затем монотонно увеличиваются до $C_{CO} = 472...989$ ppm на режиме номинальной частоты вращения $n = 2200$ мин⁻¹. Наименьшая концентрация оксида углерода $C_{CO} = 143...150$ ppm в отработавших газах двигателя, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, наблюдается на нагрузочных режимах работы двигателя при $p_e = 0,25...0,26$ МПа и частоте вращения коленчатого вала $n = 1600...1800$ мин⁻¹.

4.2 Анализ концентрации сажи в отработавших газах двигателя

Экспериментальная зависимость концентрации сажи C_s в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе без присадки, от изменения частоты вращения n и среднего эффективного давления¹ приведена на рисунке 3.3.

С ростом частоты вращения концентрация C_s несколько увеличивается. Наибольшие значения концентрации сажи в отработавших газах наблюдаются на режимах полной нагрузки двигателя при максимальной частоте вращения коленчатого вала.

Экспериментальные зависимости концентрации сажи C_s в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе без присадки на нагрузочных режимах, на различных режимах (при заданных значениях частоты вращения $n = 1000, 1400, 1600, 1800, 2000$ и 2200 мин⁻¹) представлены на рисунке 4.3.

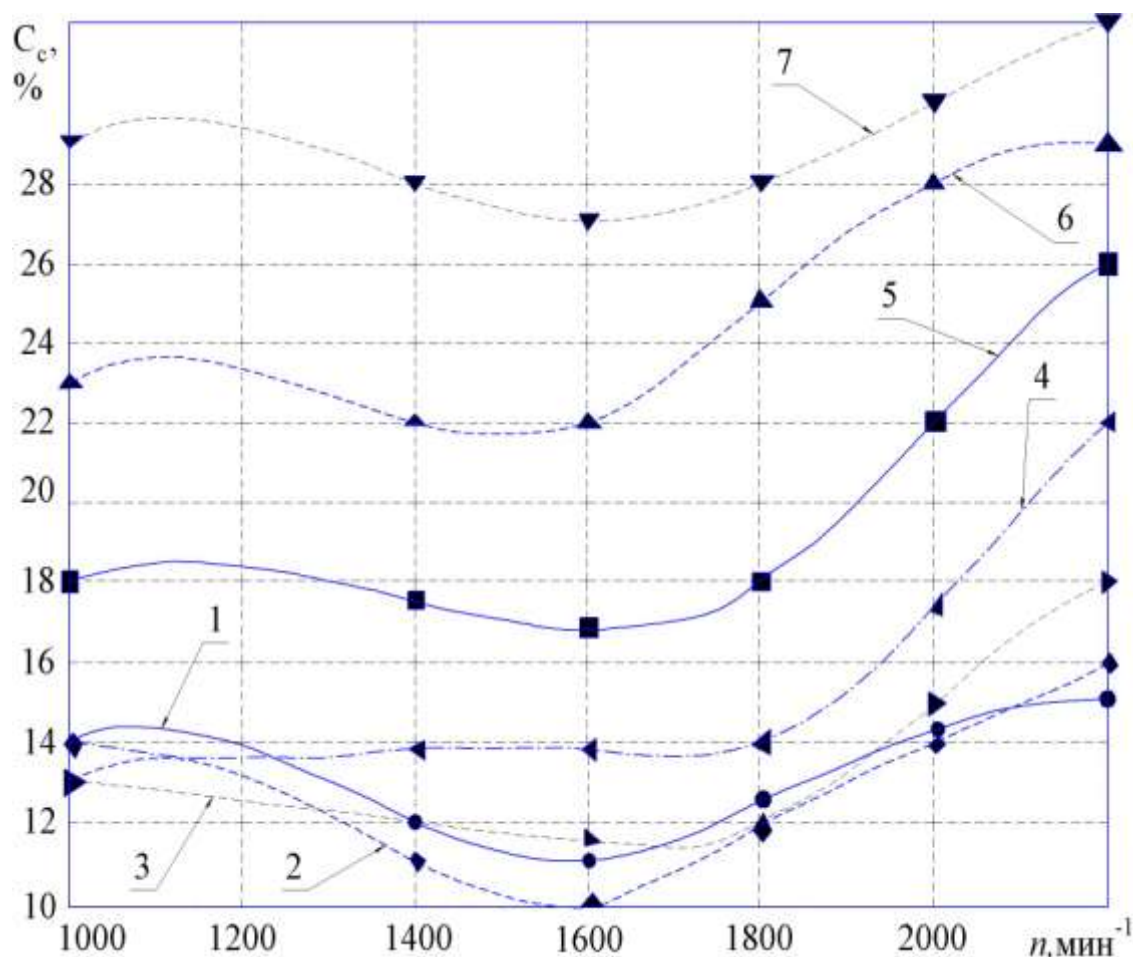


Рисунок 4.3 - Экспериментальные зависимости концентрации сажи в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе без присадки, от изменения частоты вращения n при заданных значениях нагрузки: 1- $p_e = 0$ МПа; 2- $p_e = 0,093$ МПа; 3- $p_e = 0,185$ МПа; 4- $p_e = 0,278$ МПа; 5- $p_e = 0,37$ МПа; 6- $p_e = 0,46$ МПа; 7- $p_e = 0,63$ МПа

Из графиков на рисунке 3.3 видно, что с ростом частоты вращения до $n = 1500... 1600 \text{ мин}^{-1}$ концентрации сажи вначале незначительно уменьшаются на 2-3 % от $C_c = 13-28,7 \%$ до $C_c = 10-27 \%$, а затем резко увеличиваются на 4,5-6 % при номинальной частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и составляют $C_c = 15-32 \%$.

Наименьшие значения концентрации сажи $C_c = 10-11 \%$ наблюдаются при работе двигателя на нагрузочных режимах при $p_e = 0,05...0,07$ МПа и частоте вращения коленчатого вала $n = 1550...1600 \text{ мин}^{-1}$.

Результаты исследования концентрации сажи C_c в отработавших газах

двигателя Д 240, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, от изменения частоты вращения n , показали, что наибольшее количество сажи в отработавших газах двигателя наблюдается на режимах полной нагрузки при минимальных и максимальных значениях частоты вращения коленчатого вала.

Экспериментальные зависимости равных значений концентрации сажи в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, от изменения частоты вращения n и среднего эффективного давления p_e в форме контурных графиков-линий приведены на рисунке 4.4

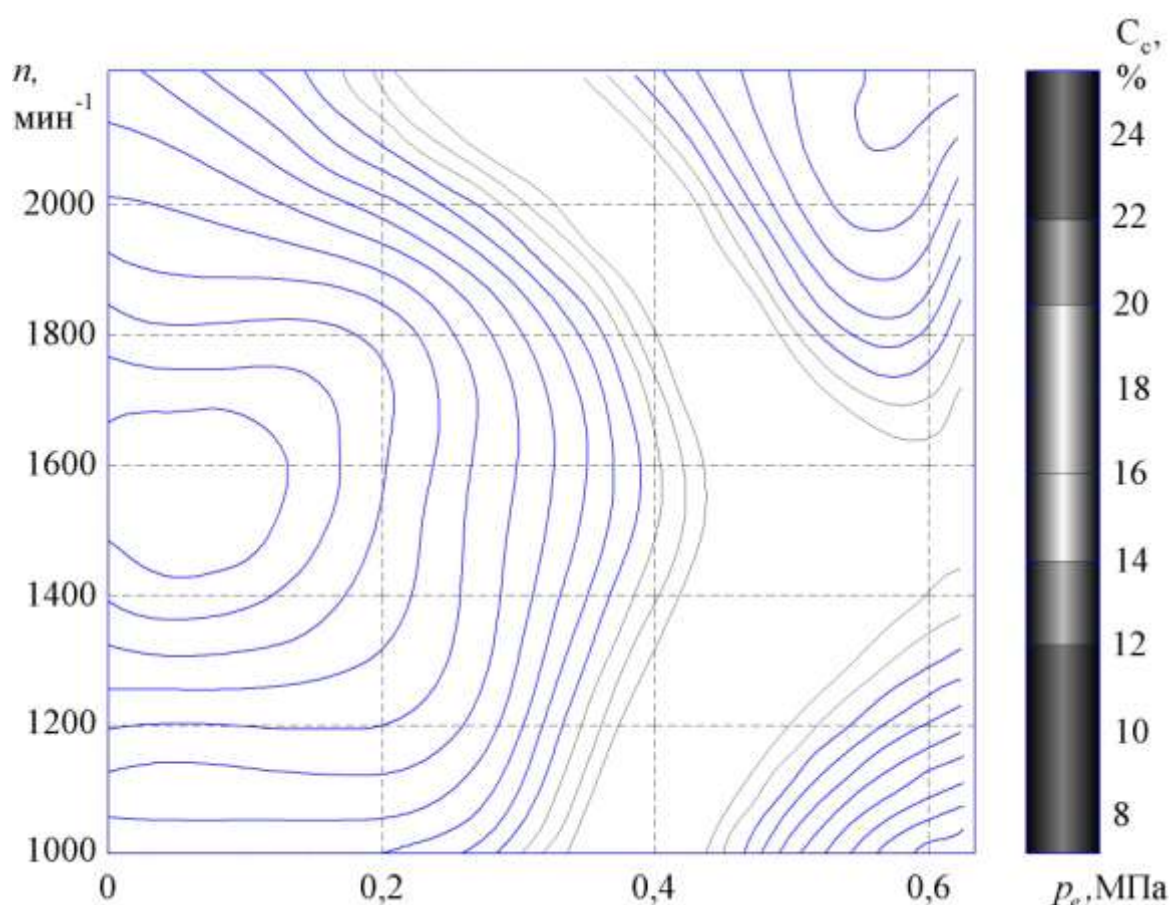


Рисунок 4.4 - Экспериментальные зависимости равных значений концентрации сажи в отработавших газах двигателя Д-240 работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, от изменения частоты вращения n и среднего эффективного давления p_e

Анализ зависимостей равных значений концентрации сажи в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе с

присадкой на основе аминоксилола, от изменения частоты вращения n и среднего эффективно го давления p_e (см. рисунок 3.4) позволил выявить режимы работы двигатель, на кото рых отработавшие газы имеют минимальную концентрацию сажи $C_c = 6,3 \%$ (при $n = 1560 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,05 \text{ МПа}$) и максимальную $C_c = 25 \%$ (при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,63 \text{ МПа}$).

4.3 Анализ концентрации оксидов азота в отработавших газах двигателя

Экспериментальные зависимости концентрации оксидов азота в отработавших газах двигателя Д 240 от изменения частоты вращения n при заданных значениях среднего эффективного давления $p_e = \text{const}$ приведен на рисунке 4.5

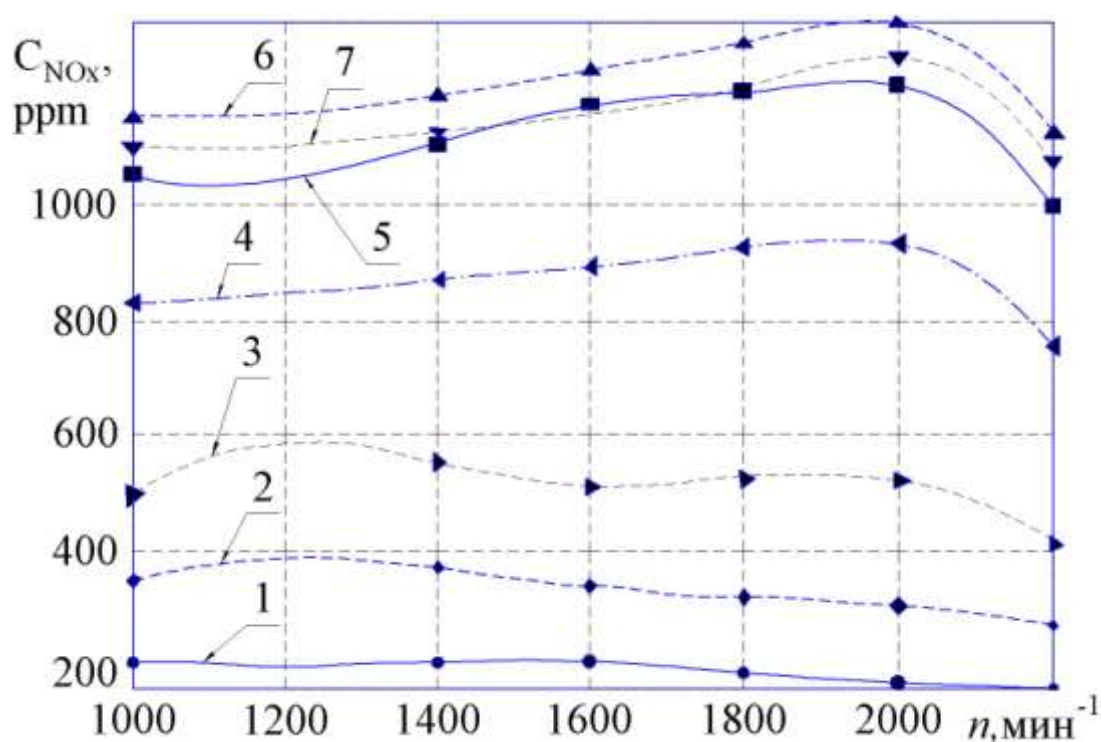


Рисунок 4.5 - Экспериментальные зависимости концентрации оксидов азота в отработавших газах двигатель Д 240, работающего на топливе без присадки, от изменения частоты вращения n при заданных значениях среднего эффективного давления p_e : 1 - $p_e = 0 \text{ МПа}$; 2 - $p_e = 0,093 \text{ МПа}$; 3

- $p_e = 0,185$ МПа; 4 - $p_e = 0,278$ МПа; 5 - $p_e = 0,37$ МПа; 6 - $p_e = 0,46$ МПа;
7 - $p_e = 0,63$ МПа

Анализ зависимостей на рисунке 3.5 позволил установить, что с ростом частоты вращения коленчатого вала концентрации оксидов азота в отработавших газах двигателя при работе на холостом ходу и малых нагрузках изменяются незначительно. В диапазоне средних и полных нагрузок концентрации оксидов азота вначале монотонно увеличиваются на 75... 100 ppm от $C_{NOx} = 828... 1194$ ppm (при $n = 1000$ мин⁻¹) до $C_{NOx} = 950...1382$ ppm (при $n = 1960...2000$ мин⁻¹). Затем они уменьшаются на 64... 73 ppm до $C_{NOx} = 760... 1180$ ppm (при $n = 2200$ мин⁻¹).

Несколько иначе концентрации оксидов азота изменяются в зависимости от частоты вращения при работе двигателя на холостом ходу и малых нагрузках. С ростом частоты вращения коленчатого вала при работе двигателя на малых нагрузках концентрации оксидов азота изменяются незначительно и остаются примерно постоянными по величине. На холостом ходу ($p_e = 0$ МПа) концентрация оксидов азота в отработавших газах двигателя снижается от $C_{NOx} = 235$ ppm при $n = 1000$ мин⁻¹ почти прямолинейно с интенсивностью 0,0318 ppm/мин⁻¹ до $C_{NOx} = 200$ ppm (при $n = 2200$ мин⁻¹).

Наименьшие значения концентрации оксидов азота $C_{NOx} = 200$ ppm в отработавших газах двигателя наблюдаются при его работе на топливе без присадки на холостом ходу при $n = 2200$ мин⁻¹.

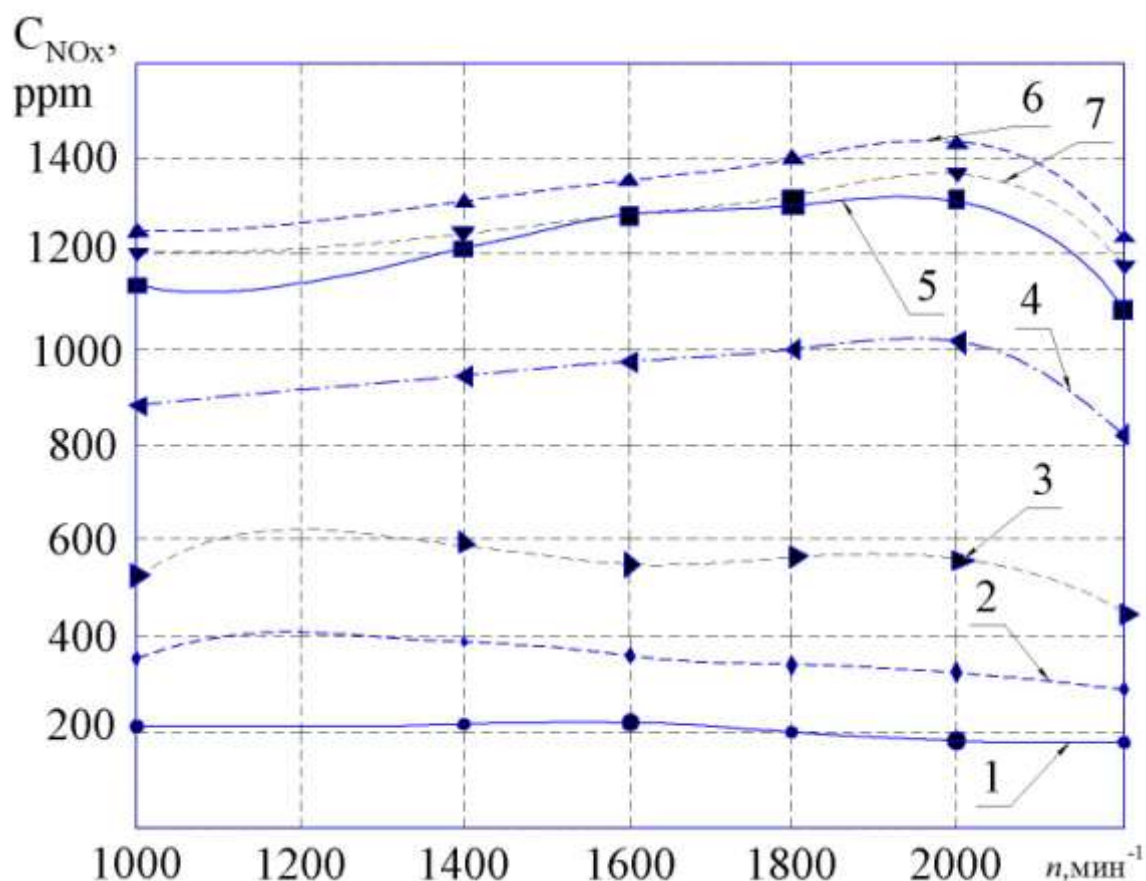


Рисунок 4.6 - Экспериментальные зависимости концентрации оксидов азота в отработавших газах двигателя Д 240, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, от изменения частоты вращения n при заданных значениях нагрузки: 1- $p_e = 0$ МПа; 2 - $p_e = 0,093$ МПа; 3 - $p_e = 0,185$ МПа; 4 - $p_e = 0,278$ МПа; 5 - $p_e = 0,37$ МПа; 6 - $p_e = 0,46$ МПа; 7 - $p_e = 0,63$ МПа

Из анализа рисунка 4.6 видно, что с ростом частоты вращения коленчатого вала концентрации оксидов азота в отработавших газах двигателя при его работе на холостом ходу и малых нагрузках изменяются незначительно. Вначале концентрация оксидов азота C_{NOx} монотонно увеличивается на 75...95 ppm и значения её остаются примерно постоянными (при $n = 1400...1700 \text{ мин}^{-1}$), а затем она монотонно уменьшается на 60...74 ppm при режиме номинальной частоты вращения (при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$).

Несколько иначе концентрации оксидов азота изменяются в

зависимости от частоты вращения двигателя, работающего на средних и полных нагрузках. С ростом частоты вращения коленчатого вала от $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 1900...2000 \text{ мин}^{-1}$ значения концентрации оксидов азота изменяются почти прямолинейно с интенсивностью 150 ppт, затем резко снижаются на 200...240 ppт при частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$.

Наименьшие значения концентрации оксидов азота $C_{\text{NOx}} = 200...223 \text{ ppт}$ в отработавших газах двигателя, работающего на топливе с присадкой на основе аминоксилола, наблюдаются на холостом ходу. p_e

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экономическую эффективность работы дизельного двигателя Д240 на топливе с антидымной присадкой определяли согласно ГОСТ Р 53056-2008.

5.1 Расчет годового экономического эффекта от применения антидымной присадки

Для расчета годового экономического эффекта от использования антидымных присадок проводили практические испытания дизельного двигателя Д240 трактора МТЗ-82.1. При расчете принято, что трактор работает на топливе с присадкой экономичнее, что было подтверждено исследованиями.

Часовой расход топлива с присадкой на основе аминоксилола был в среднем ниже на 6,5 %, чем при работе на дизельном топливе без присадки.

Годовой расход топлива W_T определяли по формуле:

$$W_T = G_T T_r K_3, \text{ кг}, \quad (5.1)$$

где G_T - часовой расход топлива, кг/ч; для МТЗ-82.1 $G_T = 15,02$ кг/ч;

T_r - нормативная годовая наработка трактора, ч, $T_r = 1095$ ч;

K_3 - коэффициент среднегодовой загрузки трактора, $K_3 = 0,65$.

Расход топлива при использовании присадки на основе аминоксилола снизился на 6,5 % и составил

$$G_{T.э.} = 15,02 - \frac{(15,02 \cdot 6,5)}{100} = 14,04 \text{ кг/ч.}$$

Годовой расход дизельного топлива составил

$$W_{д.т.} = 15,02 \cdot 1095 \cdot 0,65 = 10690,5 \text{ кг.} \dots$$

При работе на топливе с присадкой на основе аминоксилола:

$$W_э = 14,04 \cdot 1095 \cdot 0,65 = 9993 \text{ кг.} \dots$$

Затраты на топливо определяли по формуле

$$З_T = W_T Ц_T, \text{ руб.}, \quad (5.2)$$

где W_T - годовой расход топлива, кг; C_T - цена 1 кг топлива, руб.

Цену 1 кг минерального дизельного топлива принимали равной 45 руб.

Для приготовления топлива с присадкой на основе аминоксилола:

- стоимость соединения на основе амино-ксилола для 1 кг топлива - 0,9 руб.;

- стоимость 1 кг топлива с присадкой - 45,9 руб.

- на дизельное топливо

$$З_{Д.Т.} = 10690,5 \cdot 45 = 481072,5 \text{ руб.}; \cdot$$

- на топливо с присадкой на основе амино-ксилола

$$З_{Т.Э.} = 9993 \cdot 45,9 = 458678,7 \text{ руб.}; \cdot$$

-

Годовую экономию денежных затрат на один трактор вычисляли по формуле

$$\mathcal{E}_T = Z_{T1} - Z_{T2}, \text{руб.} \quad (5.3)$$

При работе на топливе с присадкой на основе аминоксилола:

$$\mathcal{E}_{Т.Э.} = 481072,5 - 458678,7 = 22393,8 \text{ руб.};$$

Выводы

Годовая экономия денежных средств на один трактор МТЗ-82.1 при введении в топливо присадки на основе аминоксилола составила 22393,8 руб. Такая экономия получена за счёт уменьшения расхода топлива при использовании антидымной присадки без учёта снижения выброса вредных веществ, содержащихся в отработавших газах двигателя.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ использования антидымной присадки к дизельному топливу показал, что использование присадок снижают дымность ОГ на 30...50%, содержание оксида углерода и углеводородов - на 10...30%, но при этом содержат органические компоненты, которые при сгорании дополнительно образуют вредные вещества. Более экологически безопасными являются антидымные присадки на основе координационных соединений.

2. Скорректирована известная методика Гриневецкого-Колчина теплового расчёта рабочего цикла двигателя, которая позволяет: производить оценку параметров цикла двигателя, работающего с антидымной присадкой на основе аминоксилола в дизельном топливе; сравнивать расчётные параметры циклов двигателя, работающего с присадкой и без присадки в топливе.

3. Проведено моделирование динамики тепловыделения и сажеобразования в цилиндре двигателя, позволившее заключить, что динамика процессов удовлетворительно описывается предложенными математическими моделями в форме системы дифференциальных уравнений с обыкновенными производными.

4. Подтверждена эффективность применения присадки на основе аминоксилола по результатам эксплуатационных испытаний: снижение оксида углерода и углеводородов составило в среднем 15...30%, дымности - 30...45%. При эксплуатационных испытаниях на тракторах МТЗ-82 дымность ОГ на режиме свободного ускорения при использовании присадки аминоксилола составила в среднем 45%, что в 1,3 раза меньше установленной нормы, при использовании присадки на основе аминоксилола - 40%, что в 1,5 раза меньше установленной нормы. При введении в топливо присадки на основе аминоксилола топливная экономичность двигателя Д-240 улучшилась в среднем на 6,5 %.

5. Годовой экономический эффект от применения (внедрения) антидымной присадки на основе аминоксилола в топливе на одном

тракторе МТЗ - 82 составляет 22393,8 руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аккумуляторная система впрыскивания топлива Common Rail // Анализ технического уровня и тенденций развития двигателей внутреннего сгорания / под ред. Р. И. Давтяна. - М.: Информцентр НИИД, 1998. - Вып. 25. - С. 46-68.
2. Аксёнов, И. Я. Транспорт и охрана окружающей среды / И. Я. Аксёнов, В. И. Аксёнов. - М.: Транспорт, 1986. - 176 с.
3. Ахметов, Л. Экологические аспекты автотранспорта / Л. Ахметов, В. Ерохов, А. Багдасаров. - Ташкент: Мехнат, 1988. - 170 с.
4. Баев, А. С. Региональное нормирование токсичности и дымности отработавших газов на основе природоохранной деятельности на автомобильном транспорте в современных условиях / А. С. Баев, В. Н. Ложкин, Н. С. Бужнин // Вопросы охраны атмосферы от загрязнений : информ. бюл. ГГО им. А. И. Воейкова. - СПб., 1997. - № 1. С. 16-29.
5. Батурин, С. А. Физические основы и математическое моделирование процессов сажевыделения и теплового излучения в двигателях : дис. ... д-ра техн. наук / Батурин С. А. - Л., 1982. - 560 с.
6. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 600 с.
10. Башкатова, С. Т. Присадки к дизельным топливам / С. Т. Башкатова. - М.: Химия, 1994. - 251 с.
11. Бесков, В. С. Моделирование и оптимизация каталитических процессов / В. С. Бесков, М. Г. Слинько // Сб. науч. тр. - М.: Наука, 1965. - С. 74.
12. Бурмистрова, Н. П. Комплексный термический анализ / Н. П. Бурмистрова, К. П. Прибылов, В. П. Савельев. - Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1961. - 76 с.
13. Бушуева, Е. М. Топлива и присадки к ним / Е. М. Бушуева, Н. В. Шевякова. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1990. - С. 15-17. - (Сб. науч. тр.

/ВНИИ НП; Вып. 61).

14. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных / Г. В. Веденяпин. - М.: Колос, 1973. - 200 с.

15. Вихерт, М. М. Влияние типа рабочего процесса и режимов работы быстроходных дизелей на свойства сажи и отработавших газов / М. М. Вихерт, А. П. Кратко // Автомобильная промышленность. - 1975. — № 10. - С. 8-11.

16. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. - М.: Экономика, 1986. - 96 с.

17. Галлямов Н.Ф., Матяшин А.В. Влияние технического состояния газораспределительного механизма на экологические показатели двигателя. Международная научно-практическая конференция «Научное сопровождение агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы. Казань-2019

18. Галлямов Н.Ф., Матяшин А.В. Технические решения по снижению токсичности отработавших газов дизельных двигателей. Международная научно-практическая конференция «Научное сопровождение агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы. Казань-2019

19. Гиллер, Я. Я. Таблицы межплоскостных расстояний / Я. Я. Гиллер. - М.: Недра, 1966.

20. Гладков, О. А. Антидымная присадка ИХП-706 - эффективное средство для сокращения выбросов сажи при испытаниях дизелей / О. А. Гладков, Э. Э. Алиев, Е. В. Бернштейн // Двигателестроение. - 1984. - № 7. - С. 51-52.

21. Гарбер, А. Пути снижения дымности дизелей / А. Гарбер, А. Френкель, Ю. Кунин // Автомобильный транспорт. - 1989. - № 7. - С. 32-33.

22.Гладков, О. А. Сравнительные испытания антидымных присадок с соединением различных металлов / О. А. Гладков, Е. В. Бернштейн // Двигателестроение. - 1989. - № 3. - С. 53-54.

23.Голубев, И. Р. Окружающая среда и транспорт / И. Р. Голубев, Ю. В. Новиков. - М. : Транспорт, 1987. - 207 с.

24.Горбунов, В. В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. В. Горбунов, Н. Н. Патрахальцев. - М. : Изд-во Российского университета дружбы народов, 1998.-214 с.

23.ГОСТ Р 52408-2005. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Измерения в условиях эксплуатации. - М. : Стандартинформ, 2006. 30 с.

24.ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1988. - 70 с.

25.ГОСТ 37.001.234-81. Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы измерений. - М. : Изд-во стандартов, 1981. - 5 с.

26.ГОСТ 17.2.2.01-84. Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработанных газов. Нормы и методы измерений. — М. : Изд-во стандартов, 1984.-6 с.

27.ГОСТ 17.2.2.05-97. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. - М., 1999.

28.ГОСТ 17.2.2.02-98. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. - М., 1999.

29.ГОСТ 41.96-2005. Правило ЕЭК ООН № 96. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения дизелей для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах в отношении выбросов этими двигателями загрязняющих веществ. - М.: Стандартинформ, 2006. - 6 с.

30.ГОСТ 17.0.04-90. Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов. Экономический паспорт промышленного предприятия. Основные положения. - М. : Госкомиздат СССР по охране природы, 1996. - 30 с.

31.Грехов, Л. В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail / Л. В. Грехов. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. - 64 с.

32.Грехов, Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. - М. : Легион-Автодата, 2004. - 344 с.

33.Громова, Н. Ю. Экологический контроль и аудит состояния агроэкосистем / Н. Ю. Громова, Т. Ю. Салова. - Тверь ; СПб. : Индикатор, 2000. - С. 75.

34.Гроп, Д. Методы идентификации систем : пер. с англ. / Д. Гроп ; под ред. Е. Н. Кринецкого. - М. : Мир, 1981. - 304 с.

35.Гусаков, С. В. Физико-химические основы процессов смесеобразования и сгорания в ДВС. Основы теории горения / С. В. Гусаков. - М. : Изд-во РУДН, 2001.-134 с.

36.Данилов, А. М. Применение присадок в топливах для автомобилей : справ. изд. / А. М. Данилов. - М. : Химия, 2000. - 232 с.

37.Данилов, А. М. Присадки и добавки. Улучшение экологических характеристик нефтяных топлив / А. М. Данилов. - М. : Химия, 1996. - 232 с.

38.Данилов, А. М. Присадки к дизельным топливам в России (ассортимент и назначение) / А. М. Данилов, Т. Н. Митусова, Ю. А. Микутенко // Двигателе-строение. - 2000. - № 1. - С. 21-22.

39.Данилов, А. М. Улучшение экологических характеристик топлив при помощи присадок / А. М. Данилов // Химия и технология топлив и масел. - 1990. -№6.-С. 31-33.

40.Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих

процессов : учеб. / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. - М. : Высш. шк., 1995. -368 с.

41.Денисов, Е. Т. Кинетика гомогенных химических реакций / Е. Т. Денисов. -2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1988. - 391 с.

42.Диденко, Е. А. Синтез и физико-химическое исследование соединений редкоземельных элементов с бензолсульфоновой и о-сульфобензойной кислотами / Е. А. Диденко. - Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1974. - 200 с.

45.Зарубежные топлива, масла и присадки / под. ред. И. В. Рожкова [и др.]. -М.-.Химия, 1971.-327 с.

46.Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с.

47.Зельдович, Я. Б. Химическая физика и гидродинамика : избр. тр. / Я. Б. Зельдович ; под. ред. Ю. Б. Харитона. -М.: Наука, 1984. - 374 с.

48.Испытания двигателей внутреннего сгорания / Б. С. Стефановский [и др.]. - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с.

49.Испытания двигателей ЯМЗ-240 при работе на топливе с антидымной присадкой ИХП-706 : отвердых частиц от НИР : 337/72. - Ярославль, 1972. - 77 с. - Инв. № 98085.

50.Исследование механизма действия присадок // Докл. 2-го Межд. симпоз. в Галле, ГДР. - Галле, 1976. - 450 с.

51.Истомин, С. В. Снижение вредных выбросов при эксплуатации дизелей путём воздействия на рабочий процесс двигателя и совершенствования средств очистки отработавших газов : дис. ... д-ра техн. наук / Истомин С. В. - Саратов, 2005. - 84 с.

52.Казанцева, Л. К. Современная экологическая ситуация в России / Л. К. Казанцева, Т. О. Тагаева // ЭКО. - 2005. - № 9. - С. 30^45.

53.Капустин, А. А. Токсичность отработавших газов дизелей и пути её уменьшения / А. А. Капустин, С. К. Корабельников // Улучшение эффективных экологических и ресурсных показателей энергетических

установок с.-х. тракторов и автомобилей : сб. - СПб., 1997. - С. 102-111.

54.Кибяков, Е. И. Совершенствование экологических показателей дизелей при одновременном использовании антидымных присадок в топливе и каталитической нейтрализации отработавших газов : дис. ... канд. техн. наук / Кибяков Е. И. -Барнаул, 2006.-189 с.

56.Кленин, В. И. Практикум по коллоидной химии : метод, пособие / В. И. Кленин. - М. : Соль, 2008. - 74 с.

57.Кнорле, В. А. Кинетика сажеобразования из газообразных углеводородов / В. А. Кнорле, Г. В. Минелис // Кинетика химических реакций : матер. VI Всесоюз. симп. по горению и взрыву. - Алма-Ата; М. : ОНХФ АН СССР, 1980. - С. 35-41.

58.Ковба, Л. М. Рентгенография в неорганической химии / Л. М. Ковба. - М. : Изд-во Моск. ун-та, 1991. - 256 с.

59.Колчин, А. И. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей / А. И. Колчин, В. П. Демидов. - 4-е изд., стер. - М. : Высш. шк., 2008. - 496 с : ил.

60.Коробкин, В. И. Экология / В. И. Коробкин. - М., 2006. - 465 с.

61.Костин, А. К. Работа дизелей в условиях эксплуатации / А. К. Костин, Б. П. Пу гачёв. - М. : ВИМ, 2002. - 52 с.

62.Костин, А. К. Эксплуатационные режимы транспортных дизелей / А. К. Костин, Г. Б. Ермекбаев. - Алма-Ата: Наука Каз ССР, 1988. - 189 с.

63.Кулиев, А. М. Химия и технология присадок к маслам и топливам / А. М. Кулиев. -Л. : Химия, 1985. - 358 с.

64.Лернер, М. О. Регулирование процесса горения в двигателях с искровым зажиганием / М. О. Лернер. - М. : Наука, 1972. - 240 с.

65.Лернер, М. О. Химические регуляторы горения моторных топлив / М. О. Лернер. - М.: Химия, 1979. - 222 с.

66.Лиханов, В. А. Снижение токсичности автотракторных дизелей / В. А. Лиханов, А. М. Сайкин. - М. : Агропромиздат, 1991. - 208 с.

67.Ложкин, В. Н. К методике оценки гигиенического воздействия

автотранс порта на население крупных городов / В. Н. Ложкин, В. Н. Зенцов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей тракторов и автомобилей : сб. науч. тр. / СПбГАУ. - СПб., 1999. - С. 65-84.

68.Лоошкин, В. Н. Проблемы природоохранного нормирования выбросов авто транспорта в России и пути их решения / В. Н. Ложкин, А. В. Николаенко // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей тракторов и автомобилей : сб. науч. тр. / СПбГАУ. - СПб., 2000. - С. 124-131.

69.Лосиков, Б. В. Применение присадок к топливу как средство борьбы с дым-ностью выхлопа / Б. В. Лосиков, К. Н. Голованов, И. А. Лившиц // Химия и технология топлив и масел. - 1970. - № 8. - С. ЪЪ-АА.

70.Льюинг, Л. Идентификация систем. Теория пользователя : пер. с англ. / Л. Льюинг ; под ред. Я. З. Цыпкина. - М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. -432 с.

71.Марков, В. А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов. - М. : МГТУ им. Баумана, 2002. - 362 с.

72.Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. - М. : Наука, 1980.-478 с.

73.Махов, В. З. Исследование влияния присадок к топливу на процесс образования и сгорания сажи в цилиндре двигателя / В. З. Махов, М. С. Ховах // Снижение загрязнения воздуха в городах выхлопными газами автомобилей : докл. 2-го сим- поз.СЭВ.-М. : НИИАВТОПРОМ, 1971.-С. 111-113.

74.Махов, В. З. О роли металла и строения некоторых антидымных присадок в механизме их действия / В. З. Махов // Защита окружающей среды в связи с развитием автомобилизации : сб. - М., 1980. - С 45-52.

75.Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий : ОНД-86 / Госкомгидромет СССР. - Л. : Гидрометеиздат, 1987. - С. 94.

76.Нечаев, В. К. Воздействие антидымных присадок к топливу на некоторые показатели рабочего процесса / В. К. Нечаев, А. Л. Новосёлов // Тр. Алтайского политех, ин-та. - 1972. - Вып. 22. - С. 78-83.

77.Новиков, Л. А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей / Л. А. Новиков // Двигателестроение. - 2008. - № 2. - С. 23-27. - №3.-С. 32-34.

78.Новиков, Л. А. Технические и экономические проблемы создания малотоксичных транспортных дизелей / Л. А. Новиков // Жизнь и безопасность. - 2000. - №3-4.-С. 154-177.

79.Новосёлов, А. Л. Применение антидымных присадок в топливо дизелей / А. Л. Новосёлов //Двигателестроение. - 1983. -№ 1. — С. 4-6.

80.Новосёлов, А. Л. Экспериментальное исследование влияния антидымных присадок в топливо на дымность, токсичность отработавших газов и эксплуатационные показатели тракторных двигателей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Новосёлов А. Л. - Новосибирск, 1974. - 17 с.

81.Основы практической теории горения / под ред. В. В. Померанцева. — Л. : Энергия, 1986.-264 с.

82.Петриченко, Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания / Р. М. Петриченко. - Л. : Изд-во Ленингр. унта, 1983.-244 с.

83.Петров, А. А. Снижение вредных выбросов тракторного двигателя 44 11/12,5 путём рециркуляции отработавших газов : дис. ... канд. техн. наук / Петров А. А. - Саратов, 2006. - 220 с.

84.Петрунин, В. В. Плата за негативное воздействие на окружающую среду в 2006 году / В. В. Петрунин // Финансы. - 2006. - № 4. - С. 25-30.

85.Померанцев, В. В. Основы практической теории горения / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахметов. - М.: Энергомаш, 1986. - 304 с.

86.Присадка к дизельному топливу : Пат. 2091443 Рос. Федерация : RU 95118359 A1 / Зерзева И. М. [и др.]. - № 95118359/04 ; заявл. 27.10.95 ; опубл. 27.12.97, Бюл. № 27.

87. Противодымная присадка к топливам : Пат. 2103327 Рос. Федерация : RU 2103327 C1 / Фазлиахметов Р. Г. [и др.]. - № 95114225/04 ; заявл. 07.08.95 ; опубл. 27.01.98, Бюл. № 3.

88.Протоdjаконов, И. О. Динамика процессов химической технологии / И. О. Протодьяконов. - Л.: Химия, 1984. - 304 с.

89.Райков, И. Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания : учебник для вузов / И. Я. Райков. - М.: Высш. шк., 1975. - 320 с.

90.Разлейцев, Н. Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в двигателях / Н. Ф. Разлейцев. — Харьков : Вища шк., 1980. - 169 с.

91. Родзевич, Н. Н. Экологическая глобализация / Н. Н. Родзевич // Наука и жизнь. - 2004. - № 7. - С. 32-36.

92.Саблина, З. А. Присадки к моторным топливам / З. А. Саблина, А. А. Гуреев. - М. : Химия, 1977. -280 с.

93.Салахеддин, М. А. Комбинированный метод очистки отработавших газов двигателя с использованием фильтра и присадки к дизельному топливу : дис. ... канд. техн. наук / Салахеддин М. А. - М., 1995. - 120 с.

94.Салова, Т. Ю. Экологический мониторинг окружающей среды при эксплуатации автотракторной техники / Т. Ю. Салова. - СПб. : Индикатор, 1998. - С. 75.

95.Самков, В. Нормирование экологической безопасности автотранспортных средств / В. Самков, Е. Черейский // Окружающая среда. - 2000. - № 6. - С. 68-70.

96.Сахаров, А. Г. Дизельная и топливная аппаратура тракторов / А. Г. Сахаров. - М. : Колос, 1977.-200 с.

97.Сборник законодательных, нормативных и методических документов для экспертизы воздухоохраных мероприятий. — Л. : Гидрометеиздат, 1986. -С. 320.

98.Смайлис, В. И. Современное состояние и новые проблемы экологии

дизеле-строения / В. И. Смайлис // Двигателестроение. - 1991. - № 1.

99.Стандарт ИСО 789/4-86. Сельскохозяйственные тракторы. Методы испытаний. Часть 4. Измерение дымности отработавших газов. - М. : Изд-во стандартов, 1986.-4 с.

100.Стадницкий, Г. В. Экология : учебник для вузов / Г. В. Стадницкий. - СПб.: Химиздат, 1999.-280 с.

101.Стенд обкаточно-тормозной КИ-5543 ГОСНИТИ : техн. описание и инструкция по эксплуатации. - М. : ГОСНИТИ, 1988. - 25 с.

102.Стрельников, В. А. Повышение экологической безопасности автотракторных дизелей путём разработки и совершенствования методов и технических средств очистки отработавших газов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Стрельников В. А. - Саратов, 2004. - 47 с.

103.Теория двигателей внутреннего сгорания / под. ред. проф., д-ра техн. наук Н. Х. Дьяченко. -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1974. - 552 с.

104.Термический анализ - вводное руководство к лабораторным и практическим работам : метод, пособие / В. В. Гусаков [и др.]; СПбГУ. - СПб, 2007. - 25 с.

105.Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер. - М.: Мир, 1980. -539 с.

106.Фомин, В. М. Эффективность металлсодержащих присадок к дизельному топливу / В. М. Фомин, А. А. Глембоцкий, И. В. Ермолович // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2000. - № 9. - С. 23-24.

107.Химия горения : пер. с англ. / У. Гардинер [и др.] ; под ред. У. Гардинера мл. - М. : Мир, 1988. - 464 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ