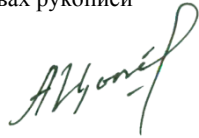


На правах рукописи



**ЦЫПЦИНА Анна Валерьевна**

**СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ  
ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ  
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИСАДОК К ТОПЛИВУ  
НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ДИЗЕЛЯ 4Ч 11/12,5)**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства  
технического обслуживания в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Саратов 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова».

Научный руководитель: **Истомин Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Стрельцов Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский ГАУ им. В.П. Горячкина», профессор кафедры «Материаловедение и технология машиностроения»

**Абрамов Сергей Викторович**, кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения и конструкционных материалов»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.»

Защита диссертации состоится 25 декабря 2013 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ».

Автореферат диссертации разослан «21» ноября 2013 г.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл. 1., Саратовский ГАУ учёному секретарю диссертационного совета, e-mail: [chekmarev.v.@yandex.ru](mailto:chekmarev.v.@yandex.ru).

Учёный секретарь  
диссертационного совета



**Василий Васильевич Чекмарев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** С каждым годом возрастает техногенное воздействие транспортных средств на окружающую среду. Около 40 % токсичных веществ и сажи поступает в атмосферу с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания. Ежегодный экологический ущерб от работы транспортных средств в Российской Федерации составляет более 900 млрд руб., или около 1,5 % валового национального продукта России.

В сельском хозяйстве РФ широко применяются мобильные сельскохозяйственные машины и тракторы (более 4 млн ед.), на которых в качестве силовых агрегатов используются дизели. Один из основных токсичных компонентов отработавших газов дизелей – сажа, содержащая канцерогенные вещества.

По сравнению с существующими методами снижения дымности ОГ дизелей (применение сажевых фильтров, систем рециркуляции ОГ, альтернативных видов топлива и др.) эффективным и малозатратным способом является добавление в дизельное топливо антидымных присадок.

В связи с этим актуальность исследования заключается в разработке и внедрении антидымных присадок к топливу на основе редкоземельных элементов. Такие присадки позволяют снизить выбросы вредных веществ с отработавшими газами без изменения конструкции дизелей и их систем питания.

Актуальность работы также подтверждается тем, что она выполнялась по приоритетному направлению развития ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ имени Н.И. Вавилова» № 01201151795 от 09.02.2011 г. «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» по теме: «Проведение научных исследований по повышению надежности и эффективности использования мобильной техники в сельском хозяйстве».

**Степень разработанности темы.** В настоящее время существуют антидымные присадки к топливу, снижающие содержание сажи в ОГ дизелей, однако их органические компоненты при сгорании образуют вредные вещества. Поэтому необходима разработка эффективных и экологически безопасных присадок, в частности на основе редкоземельных элементов.

**Цель работы** – улучшение экологических показателей тракторного дизеля 4Ч 11/12,5 применением антидымных присадок к топливу на основе редкоземельных элементов, обеспечивающих эффективное снижение вредных выбросов при его эксплуатации.

**Объект исследования** – рабочий процесс дизеля на топливе с антидымными присадками: декааква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана.

**Предмет исследования** – экологические показатели и характеристики дизеля с антидымной присадкой к топливу работающего на различных скоростных и нагрузочных режимах.

**Научную новизну работы** представляют:

скорректированная методика теплового расчёта рабочего цикла дизеля, работающего на топливе с антидымными присадками на основе редкоземельных элементов;

математическая модель процесса тепловыделения при термическом разложении антидымной присадки;

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

комплексная оценка эффективных и токсических характеристик дизеля, работающего на топливе с антидымными присадками на основе редкоземельных элементов.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработаны математические модели процессов тепловыделения и образования сажи в цилиндре дизеля, работающего на топливе с антидымными присадками на основе редкоземельных элементов. Синтезированы и исследованы антидымные присадки декаква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана, добавляемые в дизельное топливо и обеспечивающие эффективное снижение продуктов неполного сгорания (СО, СН и сажи). Новизна химических соединений антидымных присадок подтверждена двумя патентами РФ на изобретения.

**Методология и методы исследований.** Методологической основой для выполнения работы являлись современные методы теоретических и экспериментальных исследований антидымных присадок. Теоретические исследования включали в себя типовые апробированные методики: тепловой расчёт дизеля; построение регрессионных зависимостей по данным эксперимента; математическое моделирование процессов тепловыделения в цилиндре двигателя и образования сажи при сгорании топлива; идентификацию параметров математических моделей по данным экспериментов. Основу экспериментальных исследований составили лабораторные (химические), стендовые и эксплуатационные испытания.

**Научные положения,** выносимые на защиту:

1. Методика теплового расчёта рабочего цикла дизеля, работающего на топливе с антидымными присадками на основе редкоземельных элементов.

2. Математические модели процессов тепловыделения и образования сажи в цилиндре дизеля, работающего на топливе с присадками декаква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния антидымных присадок на основе редкоземельных элементов к дизельному топливу на процессы, протекающие в цилиндре дизеля.

4. Результаты экспериментальных исследований эффективных и токсических характеристик дизеля, работающего на топливе с антидымными присадками, технико-экономическая оценка их применения.

**Степень достоверности и апробация работы.** Степень достоверности подтверждена использованием современных методик исследования, применением оборудования и высокоточной измерительной аппаратуры, методами обработки экспериментальных данных с помощью методов математической статистики.

Основные положения и результаты работы доложены, обсуждены: на научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» (Саратов, 2010–2012 гг.); Международной научно-технической конференции «Обеспечение и контроль промышленной чистоты» (Саратов, 2010 г.); научно-практической конференции ПГСХА (Пенза, 2010 г.); научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства в области агроинженерии» (Москва, 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Вавиловские чтения» (Саратов, 2009–2011 гг.); учёных советах Поволжского межрегионального филиала ФГБУ «ВНИИ охраны и экономики труда» Минтруда России (Саратов, 2010–2012 гг.); на Международной научно-практической конференции «Михайловские чтения» (Саратов, 2011–2012 гг.); расширенном заседании кафедры «Отечественная и зарубежная мобильная энерготехника в АПК» (Саратов, 2010 г.); Всероссийской научно-практической конференции «2011 год – Международный год химии» (Саратов, 2012 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК. Общий объём публикаций – 4,94 печ. л., из которых 3,0 печ. л. принадлежит лично соискателю. Получено два патента РФ на изобретение.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Содержит 205 страниц печатного текста, 14 таблиц, 95 рисунков и 7 приложений. Список литературы включает в себя 126 наименований, из них 12 – на иностранном языке.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, дана общая характеристика работы, изложены основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

**В первом разделе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования»** приведен анализ данных о содержании в отработавших газах дизелей токсичных веществ, их нормировании, методах и средствах очистки ОГ, их эффективности.

Вопросам снижения токсичности и дымности отработавших газов дизелей посвящено множество отечественных и зарубежных научных работ.

Большой вклад в изучение вопросов, связанных с повышением экологической безопасности дизелей, внесли ученые: В.Л. Аксенов, И.С. Бреховских, В.В. Горбунов, В.Д. Дудышев, Р.И. Жегалин, В.А. Звонов, В.Ф. Кайзер, М.Г. Ладыгичев, 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. Пишингер, А.М. Сайкин, Т.Ю. Салова, В.И. Смайлис, В.А. Стрельников, В.И. Цыпцын, В.С. Швыдский, Г.Е. Эндрюс и др.

В целом анализ научных публикаций по рассматриваемой теме показал, что в настоящее время существует множество средств снижения токсичных веществ в ОГ дизелей автотракторной техники, которые дают различные качественные и количественные результаты. Наиболее эффективным и экономически целесообразным методом снижения токсичных веществ в ОГ дизелей является применение антидымных присадок к топливу. Данный способ имеет ряд преимуществ: не требует изменения конструкции двигателя, не снижает его мощностных показателей и практически не сказывается на топливной экономичности (в некоторых случаях улучшает ее). Кроме своего основного назначения, антидымные присадки могут служить для регенерации (очистки) сажевых фильтров, обеспечивая выгорание сажевых частиц даже при температурах ОГ, соответствующих малым нагрузкам дизеля. Поэтому большой интерес вызывают антидымные присадки на основе координационных соединений редкоземельных элементов – эрбия и лантана, которые являются более экологически безопасными по сравнению с присадками органического происхождения.

В соответствии с проведенным анализом и поставленной целью были определены следующие **задачи исследования**:

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

2. Разработать антидымные присадки к дизельному топливу на основе редкоземельных элементов.

3. Разработать математические модели тепловыделения и образования сажи в цилиндре дизеля, работающего на топливе с присадками, отражающие его работу на различных скоростных и нагрузочных режимах.

4. Теоретически и экспериментально установить основные закономерности изменения эффективных и токсических характеристик дизеля, работающего на топливе с присадками, от режимов его работы.

5. Оценить экономическую эффективность применения разработанных антидымных присадок к дизельному топливу на основе редкоземельных элементов.

**Во втором разделе «Общая методика исследований»** изложена программа и методика проведения теоретических и экспериментальных

исследований, рассмотрены применяемые измерительные приборы и оборудование.

Тепловой расчёт рабочего процесса дизеля выполняли с использованием известной методики Гриневецкого – Колчина посредством её коррекции – введения дополнительных регрессионных зависимостей, необходимых для вычисления нагрузочных характеристик дизеля.

Математические модели образования сажи при сгорании топлива в цилиндре дизеля разрабатывали на основе дифференциальных уравнений диффузии и химической кинетики процесса горения капли углеводородного дизельного топлива, образования и выгорания сажи. Влияние разработанной присадки декаква-2-сульфобензоат эрбия к дизельному топливу на процесс тепловыделения учитывали дополнительно разработанными математическими зависимостями изменения скорости химических реакций и коэффициента использования тепла при наличии каталитического эффекта от влияния редкоземельных металлов в веществе присадки как катализаторов.

Идентификацию параметров математических моделей тепловыделения и образования сажи в цилиндре дизеля по данным экспериментов производили с использованием авторегрессионных математических методов, а идентификационные математические модели представляли в форме системы линейных дифференциальных уравнений с обыкновенными производными.

Точность сформированных математических моделей подтверждалась сравнением результатов математического моделирования с данными эксперимента по показателям в виде статистических оценок и математических норм.

Основу экспериментальных исследований составили: рентгенографический анализ и термогравиметрический анализ веществ присадок, исследование поверхностного натяжения чистого топлива и топлива с присадкой, исследование показателей токсичности, эффективности и экономичности полноразмерного дизеля, работающего на различных нагрузочных и скоростных режимах на чистом топливе и топливе с присадкой.

С целью изучения особенностей протекания экзотермических реакций при термическом разложении разработанных присадок к топливу были проведены их лабораторно-химические исследования.

Элементный анализ химических соединений полученных присадок был выполнен рентгенографическим методом. Рентгенограмму получали с помощью дифрактометра ДРОН-3.

Для исследования фазовых превращений и химических реакций, сопровождающихся тепловыми эффектами, был проведен термограви-

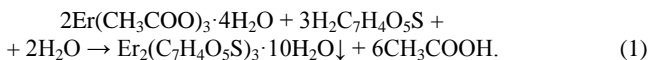
метрический анализ полученных соединений на дериватографе ОД-112.

Стендовые испытания дизеля 4Ч 11/12,5 на стандартном топливе и топливе с антидымными присадками осуществляли в лаборатории испытаний двигателей ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ имени Н.И. Вавилова» в соответствии с ГОСТ 18509–88 на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543 ГОСНИТИ.

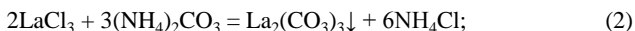
Для измерения концентрации основных токсичных компонентов (СО, СН, NO<sub>x</sub>) и дымности ОГ дизеля, работающего на топливе с различными антидымными присадками, применяли газоанализатор «МЕТА АВТО-ТЕСТ».

**В третьем разделе «Теоретические предпосылки снижения токсичности и дымности отработавших газов дизелей применением присадок к топливу»** представлены исследования двух антидымных присадок на основе редкоземельных элементов: декааква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана.

Синтез декааква-2-сульфобензоат эрбия осуществлялся посредством растворения сухого ацетата эрбия Er(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>·4H<sub>2</sub>O марки «х.ч.» в о-сульфобензойной кислоте:



Вторая комбинированная антидымная присадка представляет собой соединение карбоната лантана La<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и гидроксокарбоната лантана La(OH)CO<sub>3</sub> в мольном соотношении 1:2:



При термическом разложении в цилиндре дизеля каждой из присадок декааква-2-сульфобензоат эрбия Er<sub>2</sub>(C<sub>7</sub>H<sub>4</sub>O<sub>5</sub>S)<sub>3</sub>·10H<sub>2</sub>O и гидроксокарбонат лантана La<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·2La(OH)CO<sub>3</sub> наблюдаются два положительных эффекта от их действия на процессы испарения и сгорания капель дизельного топлива в цилиндре, существенно изменяющих эффективные и токсические показатели дизеля. Первый эффект состоит в выделении дополнительной порции тепловой энергии от экзотермической реакции при термическом разложении присадок в цилиндре дизеля, которая ускоряет процесс испаряемости капель топлива и способствует



улучшению процесса смесеобразования и воспламенения. Второй эффект заключается в каталитическом действии на процесс сгорания дизельного топлива в цилиндре, обусловленном наличием редкоземельного металла в веществах присадок.

Для аналитического описания эффектов действия разработанных присадок на процесс сгорания дизельного топлива в первом приближении можно использовать следующее выражение:

$$\xi = \xi_0 [1 + k_{p_1} m_p/g_c + k_{p_2} (m_p/g_c)^2 + 1/H_u [\Delta E(m_p, T(t))] dt], \quad (5)$$

где  $\xi_0$  – коэффициент использования тепла от сгорания топлива без присадки в цилиндре дизеля;  $k_{p_1}$ ,  $k_{p_2}$  – регрессионные коэффициенты;  $m_p/g_c$  – относительная доля массы  $m_p$ , г, исследуемой присадки в цикловой подаче  $g_c$  одного цилиндра дизеля;  $H_u$  – низшая теплота сгорания топлива, Дж;  $\Delta E$  – энергия активации экзотермических химических реакций при термическом разложении исследуемой присадки, Дж;  $T$  – температура в цилиндре дизеля, К;  $t$  – время, с.

В зависимости (5) первая часть выражения описывает эффект каталитического действия присадок, а вторая – относительное значение выделившейся энергии экзотермической реакции при термическом разложении присадок.

Учитывая результаты исследования механизма действия антидымных присадок, константы скоростей каждой  $i$ -й химической реакции при сгорании топлива с разработанной присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия вычисляли по выражению

$$K_i = A_i \cdot 10^m e^{[-E - \Delta E(m_p, T(t))]/RT(t)}, \quad (6)$$

где  $A_i$  – регрессионный коэффициент;  $m$  – константа, зависящая от вида топлива;  $E$  – энергия активации экзотермических химических реакций при сгорании топлива без присадки, Дж;  $R$  – газовая постоянная.

Тепловой расчёт рабочего процесса дизеля на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия необходим для оценки числовых значений начальных условий системы нелинейных дифференциальных уравнений в математической модели индикаторного процесса в цилиндре дизеля 4Ч 11/12,5 для сравнения основных показателей цикла, полученных моделированием, и для расчёта скоростных и нагрузочных характеристик дизеля.

В известную методику теплового расчёта Гриневецкого – Колчина введён ряд новых регрессионных зависимостей: молекулярных теплоёмко-

стей ( $mc_p$ , кДж/(кмоль·°C)) компонентов рабочего тела в цилиндре дизеля от температуры газов ( $T_r$ , °C); эффективной мощности ( $Ne$ , кВт), часового расхода топлива ( $G_r$ , кг/ч), температуры отработавших газов, коэффициента использования тепла от частоты вращения ( $n$ , мин<sup>-1</sup>); коэффициента избытка воздуха и степени повышения давления от среднего эффективного давления ( $p_e$ , МПа).

Уравнения регрессионных зависимостей молекулярных теплоемкостей компонентов рабочего тела в цилиндре дизеля от температуры и соответствующие им значения ошибок аппроксимации  $O_1 = \max(mc_p - mc_{p,r})$ , полученные при сравнении значений экспериментальных ( $mc_p$ ) и расчетных ( $mc_{p,r}$ ) теплоемкостей, следующие:

для диоксида углерода

$$\begin{aligned}
 mc_{p,CO_2} &= 5,0825 + 0,015923T_r - 1,1092 \cdot 10^{-5}T_r^2 + \\
 &+ 3,6231 \cdot 10^{-9}T_r^3 - 4,4331 \cdot 10^{-13}T_r^4, \\
 O_1 &= 0,27248;
 \end{aligned} \tag{7}$$

для азота

$$\begin{aligned}
 mc_{p,N_2} &= 6,7204 + 0,0002387T_r + 1,4853 \cdot 10^{-6}T_r^2 - \\
 &- 8,0276 \cdot 10^{-10}T_r^3 + 1,1908 \cdot 10^{-13}T_r^4, \\
 O_1 &= 0,10802;
 \end{aligned} \tag{8}$$

для оксида углерода

$$\begin{aligned}
 mc_{p,CO} &= 6,7462 + 0,00039518T_r + 1,3595 \cdot 10^{-6}T_r^2 - \\
 &- 7,5663 \cdot 10^{-10}T_r^3 + 1,1279 \cdot 10^{-13}T_r^4, \\
 O_1 &= 0,0921;
 \end{aligned} \tag{9}$$

для водорода

$$\begin{aligned}
 mc_{p,H_2} &= 6,7616 + 0,00012348T_r + 4,9205 \cdot 10^{-7}T_r^2 - \\
 &- 8,3381 \cdot 10^{-11}T_r^3 + 6,6332 \cdot 10^{-15}T_r^4, \\
 O_1 &= 0,099825;
 \end{aligned} \tag{10}$$

для кислорода

$$\begin{aligned}
 mc_{p,O_2} &= 6,2638 + 0,0029725T_r - 1,1319 \cdot 10^{-6}T_r^2 + \\
 &+ 1,9131 \cdot 10^{-10}T_r^3 - 8,0069 \cdot 10^{-15}T_r^4, \\
 O_1 &= 0,088766.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Скорость потерь тепловой энергии в процессе теплоотдачи от газов к стенкам цилиндра и камеры сгорания можно записать в виде выражения:

$$dQ_w/d\varphi = \alpha_i(T_r - T_{cr})F_x(\varphi)/(3600 \cdot 6n), \quad (12)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{cr}$  – средняя температура стенки цилиндра со стороны рабочего тела, К;  $F_x(\varphi)$  – текущая поверхность теплообмена между рабочим телом и стенкой цилиндра, м<sup>2</sup>,  $F_x(\varphi) = \pi D S_x(\varphi) \varepsilon / (\varepsilon - 1) + (f_k - f_p) \pi D^2 / 4$ ;  $D$  – диаметр цилиндра, м;  $S_x(\varphi)$  – текущий ход поршня, м;  $f_k, f_p$  – доли непосредственно охлаждаемых поверхностей крышки цилиндра и поршня.

Для одномерного температурного поля баланс тепла описывается дифференциальным уравнением с частными производными следующего вида:

$$\partial q_x / \partial x = c \rho \partial T_r / \partial t, \quad (13)$$

$$q_x = -\lambda \partial T_r / \partial x - T_{re} \partial q_x / \partial t, \quad (14)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $T_r$  – температура в локальной точке с координатой  $x$ , К;  $t$  – время, с;  $\lambda$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{re}$  – постоянная времени, с.

При постоянных значениях  $\lambda$  и  $T_{re}$  после объединения уравнений (13) и (14) получим:

$$T_{re} \partial^2 T_r / \partial t^2 + \partial T_r / \partial t - a \partial^2 T_r / \partial x^2 = 0, \quad (15)$$

где  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с.

Обобщенную физико-химическую модель процесса результирующего образования токсичных компонентов в цилиндре дизеля, работающего на топливе с антидымной присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия, можно сформировать на основе математических моделей химической кинетики и моделей изменения температуры в форме уравнения (15).

Эффективность использования присадок к топливу при работе дизеля 4Ч 11/12,5 на скоростных и нагрузочных режимах определяли по показателям коэффициентов выхода.

Коэффициенты выхода  $j$ -го токсичного компонента с отработавшими газами дизеля, работающего на топливе без присадки и с  $i$ -й присадкой, рассчитывали по выражению:

$$K_{ij} = (C_j - C_{ij}) / C_j, \quad (16)$$

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

Токсические характеристики дизеля представлены как зависимости значений коэффициента выхода  $j$ -го токсичного компонента с отрабо-

тавшими газами дизеля от показателей скоростного и нагрузочного режимов его работы

$$K_{ij}(n, p_e) = (C_j(n, p_e) - C_{ij}(n, p_e)) / C_j(n, p_e), \quad (17)$$

где  $C_j(n, p_e)$ ,  $C_{ij}(n, p_e)$  – соответственно концентрации  $j$ -го токсичного компонента в отработавших газах дизеля, работающего на топливе без присадки и с  $i$ -й присадкой, ppm;  $n$  – частота вращения коленчатого вала дизеля,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $p_e$  – среднее эффективное давление в цилиндре дизеля, МПа.

**В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований»** представлены результаты лабораторных и стендовых испытаний. Полученные присадки растворяли в дизельном топливе в процентном соотношении 0,15 % по массе. Результаты экспериментального исследования дизеля 4Ч 11/12,5, работающего на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия и без присадки по нагрузочной характеристике с частотой вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ , представлены на рисунках 1 и 2.

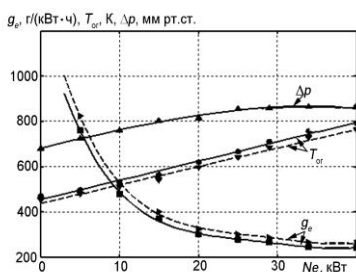


Рисунок 1 – Зависимости изменения удельного эффективного расхода  $g_e$ , температуры отработавших газов  $T_{ог}$ , перепада давления  $\Delta p$  от эффективной мощности  $Ne$  дизеля 4Ч 11/12,5 при работе с частотой вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :  
 ●, ▼, ▲, ■ – данные эксперимента;  
 —, ---- – данные теплового расчёта соответственно с присадкой и без присадки

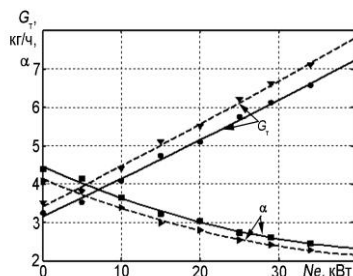


Рисунок 2 – Зависимости изменения часового расхода топлива  $G_r$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от эффективной мощности  $Ne$  дизеля 4Ч 11/12,5 при работе с частотой вращения  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :  
 ●, ▼, ▲, ■ – данные эксперимента;  
 —, ---- – данные теплового расчёта соответственно с присадкой и без присадки

При мощности  $Ne = 34 \text{ кВт}$  температура отработавших газов  $T_{ог}$  возрастает при работе дизеля на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия до 745 К, без присадки – до 727 К, коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  – соответственно до 2,27 и 2,45. Исследования на данном режиме также показали, что часовой расход топлива  $G_r$  с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия составил 6,57 кг/ч, без присадки

ки – 7,1 кг/ч; минимальный удельный эффективный расход топлива  $g_e$  – соответственно 238 и 258 г/(кВт·ч). Таким образом, топливная экономичность дизеля, работающего на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия, улучшилась на 8 %.

Токсические характеристики дизеля 4Ч 11/12,5 исследовали при его работе с частотой вращения коленчатого вала  $n = 1000 \dots 2200 \text{ мин}^{-1}$  и эффективным давлением  $p_e = 0 \dots 0,63 \text{ МПа}$ .

Экспериментальные зависимости концентрации токсичных компонентов: оксида углерода  $C_{CO}$ ; сажи  $C_c$ ; углеводородов  $C_{CH}$ ; оксидов азота  $C_{NOx}$  от среднего эффективного давления представлены на рисунке 3.

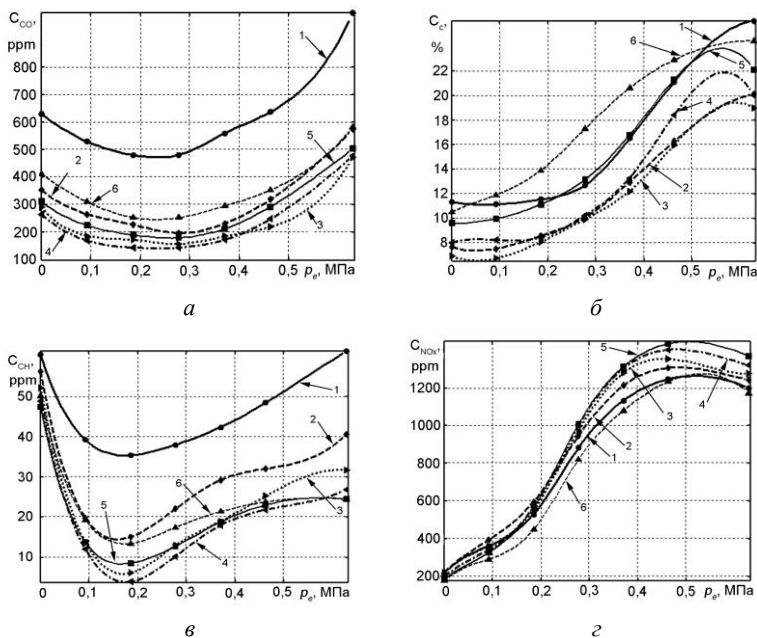


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости изменения концентраций:  
*a* – оксида углерода  $C_{CO}$ ; *б* – сажи  $C_c$ ; *в* – углеводородов  $C_{CH}$ ;  
*г* – оксидов азота  $C_{NOx}$  в отработавших газах дизеля 4Ч 11/12,5,  
 работающего на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия,  
 от изменения среднего эффективного давления  $p_e$  дизеля  
 при заданных значениях частоты вращения: 1 –  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 2 –  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ; 3 –  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ; 4 –  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 5 –  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ; 6 –  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$

Из рисунка 3, *a* видно, что с ростом среднего эффективного давления  $p_e$  концентрации оксида углерода вначале уменьшаются от  $C_{CO} =$

= 290...630 до  $C_{CO} = 144...475$  ppm (при  $p_e = 0,24$  МПа), а затем увеличиваются до  $C_{CO} = 472...989$  ppm (при  $p_e = 0,63$  МПа).

Концентрации сажи  $C_c$  на рисунке 3, б вначале увеличиваются от  $C_c = 6,3-11,3$  до  $C_c = 9-16$  % (при  $p_e = 0,24$  МПа), а затем уменьшаются от  $C_c = 19-26$  % при  $p_e = 0,63$  МПа.

Из рисунка 3, в видно, что кривые изменения концентраций углеводородов имеют форму вогнутых парабол, которые вначале резко снижаются от  $C_{CH} = 47,5...59$  до  $C_{CH} = 4...36$  ppm при  $p_e = 0,16...0,19$  МПа, затем увеличиваются до  $C_{CH} = 25...60$  ppm при  $p_e = 0,63$  МПа.

На рисунке 3, г концентрации оксидов азота вначале увеличиваются от  $C_{NOx} = 198...227$  до  $C_{NOx} = 370...494$  ppm (при  $p_e = 0,15$  МПа), затем наблюдается резкий рост концентраций до  $C_{NOx} = 1276...1420$  ppm (при  $p_e = 0,47...0,51$  МПа).

Зависимости коэффициентов выхода сажи и оксида углерода с отработавшими газами дизеля, работающего на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия, представлены на рисунке 4, а, б.

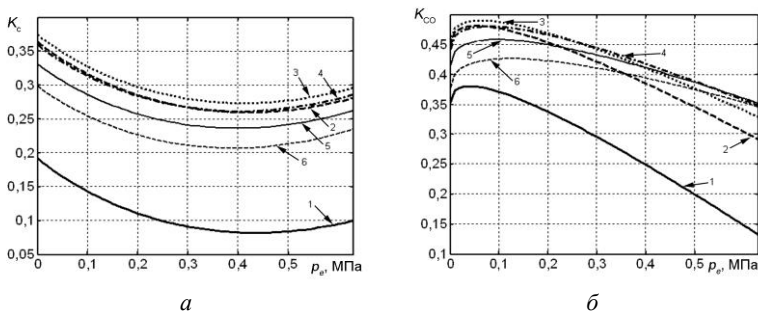


Рисунок 4 – Расчётные зависимости коэффициентов выхода: а – сажи  $K_c$ , б – оксида углерода  $K_{CO}$  с отработавшими газами дизеля 4Ч 11/12,5, работающего на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия, от среднего эффективного давления  $p_e$  при заданных значениях частоты вращения: 1 –  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>; 2 –  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup>; 3 –  $n = 1600$  мин<sup>-1</sup>; 4 –  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>; 5 –  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>; 6 –  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup>

На рисунке 4, а видно, что значения коэффициента выхода сажи вначале снижаются от  $K_c = 0,19...0,375$  до минимума  $K_c = 0,08...0,275$  при  $p_e = 0,4$  МПа, а затем возрастают до  $K_c = 0,1...0,3$  при  $p_e = 0,63$  МПа. Значения коэффициента выхода оксида углерода на рисунке 4, б сначала возрастают от  $K_{CO} = 0,35...0,5$  до максимума при нагрузке  $p_e = 0,04...0,05$  МПа, затем снижаются почти прямолинейно до  $K_{CO} = 0,13...0,35$  при  $p_e = 0,63$  МПа.

**В пятом разделе «Сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований»** приведены результаты анализов термического разложения веществ исследуемых присадок (рисунок 5), процессов тепловыделения (рисунки 6, 7) и образования сажи при сгорании (рисунок 8) в цилиндре дизельного топлива с исследуемой присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия на основе редкоземельных элементов. Также дан сравнительный анализ концентраций токсичных компонентов и сажи в отработавших газах дизеля, работающего на топливе без присадок и с антидымными присадками; коэффициентов выхода токсичных компонентов с ОГ дизеля при его работе на топливе с каждой антидымной присадкой: декаква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана.

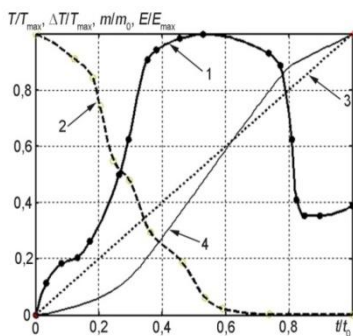


Рисунок 5 – Результаты термического разложения присадки декаква-2-сульфобензоат эрбия:

1 – разность относительных значений температур  $\Delta T/T_{\max}$  вещества присадки и температуры её окружающей среды;  
 2 – относительное значение массы  $m/m_0$  присадки в дизельном топливе;  
 3 – относительное значение температуры  $T/T_{\max}$  нагрева присадки;  
 4 – интегральная характеристика относительной тепловой энергии химической реакции  $E/E_{\max}$ ;  
 $t/t_0$  – относительное значение времени

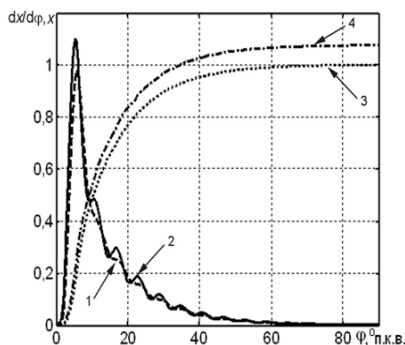


Рисунок 6 – Зависимость изменения моделируемых нормированных характеристик тепловыделения  $x$  (3, 4) и скорости тепловыделения  $dx/d\varphi$  (1, 2) в цилиндре дизеля 4Ч 11/12,5 от угла поворота коленчатого вала  $\varphi$ :  
 1, 3 – без присадки в топливе;  
 2, 4 – с присадкой в топливе декаква-2-сульфобензоат эрбия

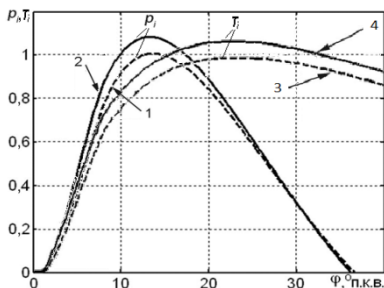


Рисунок 7 – Зависимости изменения нормированного давления рабочего тела  $p_i$  и нормированной индикаторной температуры  $T_i$  от угла поворота коленчатого вала в первом цилиндре дизеля 4Ч 11/12,5 (экспериментальные индикаторные диаграммы):  
 1, 3 – топливо без присадки;  
 2, 4 – топливо с присадкой декааква-2-сульфобензоат эрбия

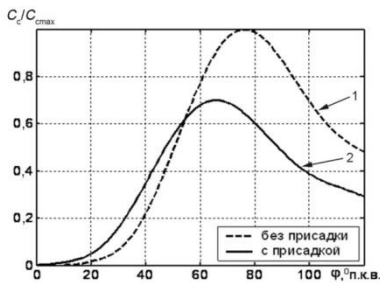


Рисунок 8 – Зависимость изменения моделируемых относительных значений концентрации сажи в цилиндре дизеля 4Ч 11/12,5 от угла поворота коленчатого вала при его работе на номинальном режиме:  
 1 – без присадки; 2 – с присадкой декааква-2-сульфобензоат эрбия

Анализ графиков на рисунке 5 показывает, что при термическом разложении присадки декааква-2-сульфобензоат эрбия в начальный момент времени наблюдается наибольшая скорость выделения тепловой энергии при экзотермической химической реакции разложения, затем к моменту времени  $t/t_0 = 0,1$  она замедляется. При относительном значении времени  $t/t_0 = 0,2 \dots 0,36$  скорость выделения тепловой энергии увеличивается, масса присадки составляет 0,41, относительное значение температуры нагрева  $T/T_{\max}$  изменяется от 0,2 до 0,35. Затем скорость роста тепловой энергии существенно замедляется и к моменту времени  $t/t_0 = 0,525$  масса присадки составляет  $m/m_0 = 0,9$ ,  $\Delta T/T_{\max}$  достигает максимума при  $T/T_{\max} = 0,53$ . При дальнейшем повышении температуры в интервале времени  $t/t_0 = 0,78 \dots 0,83$  скорость роста тепловой энергии существенно снижается, что объясняется малым количеством оставшейся массы  $m/m_0$  присадки при её разложении.

Результаты математического моделирования процессов сгорания в цилиндре дизеля показали достаточно высокую для инженерной практики точность разработанной математической модели процессов образования сажи в цилиндре дизеля 4Ч 11/12,5, работающего на топливе с присадкой декааква-2-сульфобензоат эрбия (см. рисунок 6). Точность используемого математического моделирования оценивали показателем среднего квадратичного отклонения данных расчета и эксперимента. Она составляет 95–97 % и обеспечивается моделями в форме дифференциальных уравнений с обыкновенными производными (4–6-го порядка для процессов сгорания):



$$a_4 d^4 C_c / d\varphi^4 + a_3 d^3 C_c / d\varphi^3 + a_2 d^2 C_c / d\varphi^2 + a_1 d C_c / d\varphi + a_0 = b_4 d g_c^4 / d\varphi^4 + b_3 d g_c^3 / d\varphi^3 + b_2 d g_c^2 / d\varphi^2 + b_0 d g_c / d\varphi + b_0, \quad (18)$$

где  $a_4, \dots, a_0, b_4, \dots, b_0, c_4, \dots, c_0$  – константы.

Добавление присадки декаква-2-сульфобензоат эрбия в дизельное топливо увеличивает максимальное нормированное значение тепловыделения  $\chi$  на 8 %.

Из рисунка 7 видно, что наличие присадки декаква-2-сульфобензоат эрбия в дизельном топливе повышает индикаторное давление в среднем на 9 %. Это можно объяснить каталитическим эффектом действия присадки на процесс сгорания, приводящего к интенсификации и увеличению скорости сгорания топлива. Превышение скорости роста индикаторной температуры на 8,5 % на участке сгорания в цилиндре дизеля объясняется увеличением количества тепловой энергии, переходящей в полезную работу при каталитическом действии присадки.

Результаты расчёта выделения сажи в цилиндре дизеля 4Ч 11/12,5 по разработанным математическим моделям приведены на рисунке 8. Максимальное значение концентрации сажи в цилиндре дизеля, работающего на топливе без присадки, наблюдается при угле поворота коленчатого вала  $\varphi = 77^\circ$ , с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия при  $\varphi = 67^\circ$ .

Результаты сравнительного анализа концентраций токсичных компонентов сажи в отработавших газах дизеля при работе на топливе без присадок и с антидымными присадками представлены на рисунках 9–10.

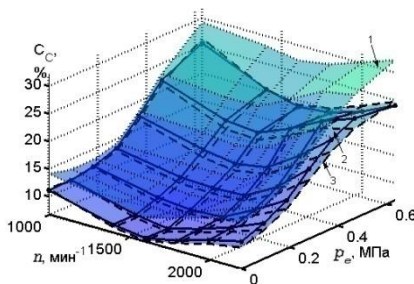


Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости концентрации сажи в ОГ от изменения частоты вращения  $n$  и среднего эффективного давления  $P_e$  дизеля 4Ч 11/12,5 при работе на топливе: 1 – без присадки; 2 – с присадкой гидроксокарбонат лантана; 3 – с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия

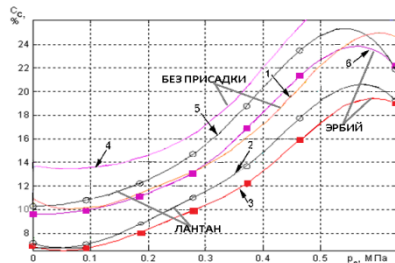


Рисунок 10 – Экспериментальные зависимости концентрации сажи в ОГ дизеля 4Ч 11/12,5, работающего на топливе без присадки, с присадками гидроксокарбонат лантана и декаква-2-сульфобензоат эрбия, от изменения среднего эффективного давления  $P_e$  при заданных значениях частоты вращения: 1, 2, 3 –  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ; 4, 5, 6 –  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

Из рисунков 9–10 видно, что присадка декаква-2-сульфобензоат эрбия эффективнее присадки гидроксокарбонат лантана. Наличие её в топливе снижает содержание сажи в отработавших газах дизеля при частоте вращения  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  в среднем на 14 %, при  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$  – на 10 %.

Сравнительный анализ коэффициентов выхода оксида углерода и сажи при добавлении в топливо каждой из присадок декаква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана приведен на рисунке 11 в форме трёхмерных графиков.

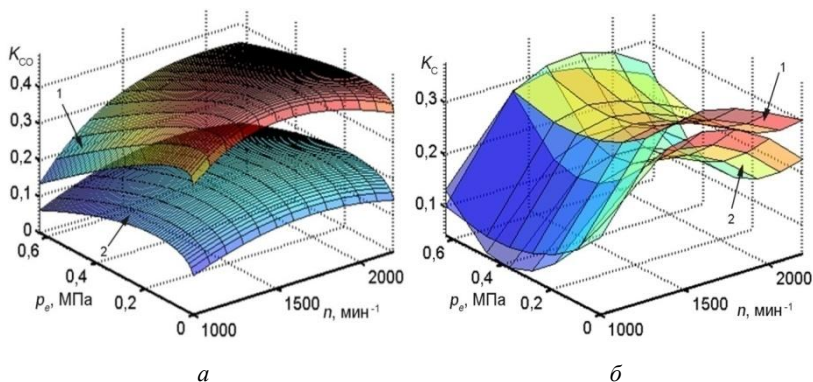


Рисунок 11 – Расчётные зависимости коэффициентов выхода:  
*а* – оксида углерода CO; *б* – сажи С с отработавшими газами  
от изменения частоты вращения  $n$   
и среднего эффективного давления  $p_e$  дизеля 4Ч 11/12,5  
при работе на топливе с присадками:  
1 – декаква-2-сульфобензоат эрбия; 2 – гидроксокарбонат лантана

Значения коэффициента выхода оксида углерода с ОГ дизеля при работе на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия на режиме частоты вращения  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  при всех нагрузках в 2,3–2,4 раза выше, чем при использовании присадки гидроксокарбонат лантана. Коэффициент выхода сажи при добавлении в топливо присадки на основе эрбия в 1,3 раза выше, чем при наличии присадки на основе лантана.

При сравнении действия присадок на снижение концентрации сажи и оксида углерода в отработавших газах дизеля установлено, что присадка декаква-2-сульфобензоат эрбия более эффективна, чем гидроксокарбонат лантана.

Эксплуатационные испытания универсально-пропашных тракторов (МТЗ-80/80.1), работающих на топливе с антидымными присадками, проводили в двух хозяйствах Саратовской области: ООО «Лада» Аркадакского района и СПК им. Панфилова, г. Петровск. Средняя наработка тракторов за период испытаний составила 800...850 мото-ч. В течение всего срока испытаний периодически производился контрольный осмотр топливной системы и замер дымности ОГ дизеля тракторов на режиме свободного ускорения.

**В шестом разделе «Экономическая оценка результатов исследования»** рассчитана годовая экономия денежных средств на один трактор МТЗ-80.1, которая при введении в топливо присадки декааква-2-сульфобензоат эрбия составила 8680,3 руб., гидроксокарбонат лантана – 3239,4 руб. Экономия получена за счёт уменьшения расхода топлива при использовании антидымных присадок без учёта снижения выброса вредных веществ, содержащихся в отработавших газах дизеля.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. Анализ существующих антидымных присадок к дизельному топливу показал, что они 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 безопасны – антидымные присадки на основе координационных соединений редкоземельных элементов.

2. Разработаны две новые антидымные присадки к дизельному топливу, не содержащие органических компонентов, классифицированные на основе химико-термического и рентгенографического анализов вещества присадок как декааква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана.

3. Скорректирована известная методика теплового расчёта рабочего цикла дизеля Гриневецкого – Колчина, которая позволяет определить параметры циклов дизеля, работающего на топливе с антидымными присадками декааква-2-сульфобензоат эрбия и гидроксокарбонат лантана; сравнить расчётные параметры циклов дизеля, работающего на топливе с присадками и без присадок.

4. Проведено моделирование динамики тепловыделения и сажеобразования в цилиндре дизеля, которое даёт возможность заключить, что динамика процессов удовлетворительно описывается предложенными математическими моделями в форме системы дифференциальных

уравнений с обыкновенными производными 8-го порядка, а идентификационными моделями – в форме уравнений 4–6-го порядка. Оценка разработанных математических моделей показала их достаточную точность для практики решения инженерных и научных задач (погрешность составляет не более 3–4 %). Получено математическое выражение для расчёта коэффициента использования тепла, учитывающее положительные эффекты от действия присадок на процессы испарения и сгорания капель дизельного топлива в цилиндре: выделение дополнительной порции тепловой энергии от экзотермической реакции при термическом разложении присадок в цилиндре дизеля и действие присадок как катализатора.

5. Стендовыми и эксплуатационными испытаниями подтверждена эффективность разработанных присадок на основе редкоземельных элементов: содержание в ОГ дизеля оксида углерода и углеводородов снизилось в среднем на 15–30 %, дымность уменьшилась на 30–45 %. При эксплуатационных испытаниях на тракторах МТЗ-80/80.1 дымность ОГ на режиме свободного ускорения при использовании присадки гидроксокарбонат лантана составила в среднем 45 %, декаква-2-сульфобензоат эрбия – 40 %, что соответственно в 1,3 и 1,5 раза меньше установленной нормы. При введении в топливо присадки на основе эрбия топливная экономичность дизеля 4Ч 11/12,5 улучшилась в среднем на 6,5 %, а с присадкой на основе лантана – на 5,7%.

6. Значения коэффициента выхода сажи с отработавшими газами дизеля при работе на топливе с присадкой декаква-2-сульфобензоат эрбия в среднем в 1,3 раза выше, чем при работе на топливе с присадкой гидроксокарбонат лантана. Однако последняя также рекомендуется к использованию вследствие более простой технологии приготовления в условиях сельскохозяйственного предприятия.

7. Годовой экономический эффект от применения антидымной присадки декаква-2-сульфобензоат эрбия в топливе на одном тракторе МТЗ-80.1 составляет 8680 руб., а присадки гидроксокарбонат лантана – 3239 руб.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Цыпцына, А. В. Синтез и исследование антидымной присадки на основе координационного соединения редкоземельных элементов / С. В. Истомина, А. В. Цыпцына // Научное обозрение. – 2012. – № 3. –

С. 131–136 (0,5/0,25 печ. л.).

2. *Цыпцына, А. В.* Снижение дымности отработавших газов дизеля путем введения в топливо присадки на основе соединения редкоземельных элементов / А. В. Цыпцына // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2012. – № 8. – С. 44–47 (0,625/0,625 печ. л.).

3. *Цыпцына, А. В.* Механизм действия и анализ показателей дымности дизеля при использовании присадок в топливо на основе соединений редкоземельных элементов / С. В. Истомин, А. В. Цыпцына // Научное обозрение. – 2013. – № 4. – С. 72–75 (0,5/0,25 печ. л.).

#### *Патенты*

4. Пат. 2472844 Российская Федерация, МПК С10L 1/18 С10L 1/10 С10L 1/30 С10L 10/02. Антидымная присадка / Захарова Т. В., Пожаров М. В., Цыпцына А. В., Истомин С. В. – № 2011139156/04 ; заявл. 23.09.2011 ; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.

5. Пат. 2472847 Российская Федерация, МПК С10L 1/02 С10L 1/10 С10L 1/30 С10L 10/12. Антидымная присадка / Захарова Т. В., Пожаров М. В., Цыпцына А. В., Истомин С. В. – № 2011139158/04 ; заявл. 23.09.2011 ; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.

#### *Публикации в других изданиях*

6. *Цыпцына, А. В.* Теоретические предпосылки к снижению вредных выбросов дизелей применением присадки в топливо / С. В. Истомин, А. В. Цыпцына // Вавиловские чтения – 2009 : материалы Международ. науч.-практ. конф., 25–26 нояб. 2009. – Саратов, 2009. – С. 256–258 (0,188/0,094 печ. л.).

7. *Цыпцына, А. В.* К проблеме применения присадок к топливу для улучшения экологических и ресурсных показателей автотракторных дизелей / А. В. Цыпцына // Вавиловские чтения – 2009 : материалы Международ. науч.-практ. конф., 25–26 нояб. 2009. – Саратов, 2009. – С. 388–389 (0,125/0,125 печ. л.).

8. *Цыпцына, А. В.* К проблеме применения экологических наноприсадок в топливо. Теория и практика / С. В. Истомин, А. В. Цыпцына // Вавиловские чтения – 2010 : материалы Международ. науч.-практ. конф., 25–26 нояб. 2010 : в 3 т. – Саратов, 2010. – Т. 3. – С. 303–304 (0,188/0,094 печ. л.).

9. *Цыпцына, А. В.* Снижение токсичности отработавших газов дизелей как фактор повышения экологической безопасности / А. В. Цыпцына // Проблемы экономичности и эксплуатации ДВС : материалы Межгосуд.

науч.-техн. семинара. – Саратов, 2010. – С. 90–92 (0,188/0,188 печ. л.).

10. *Цыпцына, А. В.* Теоретические предпосылки снижения вредных выбросов отработавших газов дизелей и улучшение приработки трибосопряжений применением экологических наноприсадок в топливо / С. В. Истомин, А. В. Цыпцына // Научное обозрение. – 2010. – № 4. – С. 47–50 (0,375/0,188 печ. л.).

11. *Цыпцына, А. В.* К проблеме снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами мобильной техникой / А. В. Цыпцына // Научное обозрение. – 2010. – № 4. – С. 44–47 (0,313/0,313 печ. л.).

12. *Цыпцына, А. В.* К механизму действия металлоплакирующих присадок на основе координации соединений редкоземельных элементов / М. В. Цыпцын, А. О. Носов, А. В. Цыпцына, А. А. Ерышов // Научное обозрение. – 2010. – № 6. – С. 43–45 (0,188/0,063 печ. л.).

13. *Цыпцына, А. В.* Теоретическое обоснование механизма действия металлосодержащей антидымной присадки / С. В. Истомин, А. В. Цыпцына // Научное обозрение. – 2010. – № 5. – С. 40–44 (0,438/0,219 печ. л.).

14. *Цыпцына, А. В.* Разработка математических моделей статистических оценок эффективности средств снижения токсичных веществ на различных эксплуатационных режимах дизеля / С. В. Истомин, А. В. Цыпцына // Научное обозрение. – 2011. – № 2. – С. 9–13 (0,562/0,281 печ. л.).

15. *Цыпцына, А. В.* Выбор химического соединения для антидымной присадки и способ ее получения / С. В. Истомин, А. В. Цыпцына // Научное обозрение. – 2011. – № 3. – С. 4–7 (0,375/0,188 печ. л.).

16. *Цыпцына, А. В.* Снижение дымности дизеля путем введения в топливо присадки на основе соединения редкоземельных элементов / М. В. Пожаров, А. В. Цыпцына, Т. В. Захарова // Вопросы биологии, экологии, химии и методики обучения. – 2012. – № 14. – С. 94–98 (0,375/0,125 печ. л.).

Подписано в печать 20.11.2013 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.  
Печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ

---