

На правах рукописи



**ЛОПАТИН ОЛЕГ ПЕТРОВИЧ**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ  
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЕ**

Специальность 05.04.02 – тепловые двигатели

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск - 2019

Работа выполнена на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА).

<b>Научный консультант:</b>	<b>Лиханов Виталий Анатольевич</b> доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, г. Киров
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Ложкин Владимир Николаевич</b> доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», г. Санкт-Петербург <b>Салова Тамара Юрьевна</b> доктор технических наук, профессор, доцент кафедры механики и гидромеханики Военного института (военно-морского политехнического) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Санкт-Петербург, г. Пушкин <b>Сайкин Андрей Михайлович</b> доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник управления специальных программ центра «Спецавтомобили» Государственного научного центра Российской Федерации ФГУП «НАМИ», г. Москва
<b>Ведущая организация:</b>	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа

Защита состоится 25 марта 2020 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», расположенного по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, аудитория 1001. Тел/факс: (351)267-91-23, e-mail: D 212.298.09@mail.ru.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на его официальном сайте (<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229809/lopatin-oleg-petrovich>).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Лазарев Евгений Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Проблема охраны окружающей среды от загрязнения токсичными продуктами, содержащимися в отработавших газах (ОГ), является одной из наиболее актуальных в современном мире. В настоящее время в мировом энергетическом балансе на первом месте по выработке мощности стоят двигатели внутреннего сгорания (ДВС) транспортных и транспортно-технологических машин. Общее количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу автотракторной техникой, более чем в три раза превосходит выбросы промышленных предприятий. При этом подавляющее большинство колёсных и гусеничных машин комплектуются дизелями, превосходящими бензиновые двигатели по суммарному выбросу вредных веществ. С применением современных требований по токсичности для дизелей ужесточаются предельные нормы выбросов одного из наиболее токсичных компонентов ОГ – оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ).  $\text{NO}_x$  образуются в основном в результате диссоциации молекулярного кислорода на атомы с последующим окислением молекулы азота в зоне горения. Оксиды азота взаимодействуют с парами воды в воздухе и участвуют в образовании азотной кислоты, которая воздействует на легочную ткань человека, разрушает ее и вызывает многочисленные заболевания. Поэтому проблема снижения токсичности ОГ, в т.ч. снижение  $\text{NO}_x$ , с каждым днем становится всё более актуальной, а вопросы экологической безопасности топлив для тепловых двигателей приобретают все большую масштабность и востребованность.

С другой стороны, вследствие сокращения запасов нефтяных месторождений и волатильности цен на нефть и нефтепродукты все более остро ставится проблема дефицита моторного топлива нефтяного происхождения. Поиск новейших способов и перспективных технологий, направленных на улучшение экологических и энергетических показателей автотранспортных средств и изучение конкуренции различных видов топлива (дизельное топливо, природный газ, спирты, эмульсии и др.) по показателям экологической эффективности, может стать существенным шагом в активизации развития и применения альтернативных моторных топлив. Поэтому переход к альтернативным топливам, которые, в основном, не являются продуктами переработки нефти - перспективным направлением в борьбе за уменьшение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ тепловых двигателей. Из изложенного выше и согласно указу Президента РФ от 07.07.2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологии и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» исследования, направленные на улучшение экологических показателей дизелей путем снижения содержания оксидов азота в ОГ и экономии нефтяного моторного топлива являются приоритетными и актуальными, поскольку входят в «Приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: п.8. Энергоэффективность, энергосбережение...» и в «Перечень критических технологий Российской Федерации: п.15. Технологии новых и возобновляемых источников энергии... и п. 27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе».

**Степень разработанности.** Весомый вклад в исследования, направленные на применение альтернативных топлив не нефтяного происхождения с целью улучшения экологических показателей тепловых двигателей внесли А.А. Абрамзон, С.А. Абрамов, В.С. Азев, Ю.П. Алейников, Д.Г. Алексеев, Е.Е. Арсенов, Ю.Н. Васильев, А.Б. Виппер, А.И. Гайворонский, Ю.В. Галышев, К.И. Генкин, М.П. Гиринович, В.А. Гладких, Л.Н. Голубков, И.И. Гольдблат, А.Н. Гоц, Л.В. Грехов, А.А. Гуреев, С.В. Гусаков, С.Н. Гушин, А.М. Данилов, С.Н. Девянин, К.Е. Долганов, В.И. Ерохов, А.А. Ефанов, В.А. Звонов, А.А. Зенин, А.А. Зинченко, Л.С. Золоторевский, В.А. Иванов, Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе, В.Г. Камалтдинов, Г.М. Камфер, В.В. Карницкий, А.Н. Карташевич, А.П. Картошкин, А.В. Козлов, И.М. Коклин, Г.С. Корнилов, Н.В. Кострюкова, М.Н. Кочетков, В.А. Кудрявцев, А.С. Кулешов, Р.Ш. Кулиев, А.Р. Кульчицкий, В.Ф. Кутенев, С.Р. Лебедев, М.О. Лернер, В.А. Лиханов, В.М. Луканин, В.А. Лукшо, П.Д. Лупачев, В. Льотко, В.В. Макаров, Р.В. Малов, В.И. Мальчук, В.А. Марков, А.П. Марченко, Д.Д. Матиевский, В.З. Махов, В.П. Михеев, Т.Н. Митусова, К.А. Морозов, А.В. Николаенко, Н.В. Носенко, А.М. Обельницкий, С.Н. Онойченко, Ю.В. Панов, Н.Н. Патрахальцев, Н.Г. Певнев, М.Р. Петриченко, С.А. Плотников, Е.Г. Пономарев, В.М. Попов, А.А. Равкинд, М.Ю. Ратькова, П.А. Ребиндер, Г.С. Савельев, А.М. Сайкин, Г.И. Самоль, Ю.Б. Свиридов, А.Е. Свистула, В.Г. Семенов, С.М. Сивачёв, В.Ф. Смаль, А.С. Теренченко, Г.А. Терентьев, А.Е. Торопов, В.М. Тюков, А.П. Уханов, Т.Р. Филипосянц, В.М. Фомин, А.С. Хачиян, Е.В. Шатров, М.Г. Шатров, И.Г. Шишлов, В.А. Шишков, Б.А. Энглин, В.В. Эфрос, А. Al-Sarkhi, J. Chen, С.Е. Goering, W. Heinrich, M. Kamel, G.A. Karim, S.S. Kim, G. Knothe, J. Krahl, Lyford-Pike, Y.D. Mikalsen, R.H. Miller, T. Murayama, T. Myo, R.R. Raine, O. Ribeiro, A.R. Schroeder, H. Shimoda, S.C. Sorenson, M. Tsukahara, A. Tsunoda, K.S. Varde, R. Wang, Y.D. Wang, A. Witt, Y. Yoshimoto, G. Zhang, Y. Zhao и др.

Углубленный анализ результатов научных исследований показывает, что исследователями разработаны предпосылки, проведены глубокие экспериментальные работы по вопросам использования альтернативных топлив в тепловых двигателях. Вместе с тем необходимо отметить, что практически нет исследований, направленных на сравнительные испытания дизеля рабочим объемом до 5 литров, работающего на природном газе (ПГ), ПГ с различными степенями рециркуляции ОГ (РОГ) и спирто-топливных эмульсиях (СТЭ), проведенные с должным учетом взаимосвязи экологических и эксплуатационных показателей и определением объемного содержания и массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в цилиндре и ОГ.

Вопросам образования оксидов азота при горении посвящено большое число исследований, первенствующие из них – это работы А.И. Атрощенко, Р.Б. Ахмедова, В.И. Бабия, С.А. Батурина, Ю. Варнатца, С.И. Ганзы, А.Н. Гоца, О.И. Жегалина, В.А. Звонова, А.В. Зонова, Я.Б. Зельдовича, З.Р. Кавтарадзе, Р.З. Кавтарадзе, В.Ф. Копытова, А.Р. Кульчицкого, В.Ф. Кутенева, В.А. Лиханова, А.С. Лоскутова, Р.В. Малова, А.М. Маркевича, В.А. Маркова, В.З. Махова, А.А. Отса, В.В. Померанцева, Н.Ф. Разлейцева, Ю.П. Райзера, А.Д. Рослякова, Ю.И. Рябинина, П.Я. Садовникова, А.М. Сайкина, Т.Ю. Саловой, Н.Н. Семёнова, Я.И. Сигала, В.И. Смайлиса, Н.И. Тамма,

В.А. Туркина, Д.А. Франк-Каменецкого, В.В. Фурсы, R.L. Andrews, J.P. Appleton, F. Bachmaier, M.C. Branah, G. Desolte, K. Eberins, R.S. Elagan, P. Eyzat, C.P. Fenimore, S. Galant, G. Greeves, J.C. Guibet, G. Häfner, R.S. Harries, H.R. Hazard, B.S. Haynes, J.B. Heywood, J.B. Homer, A. Imamura, D. Iverach, T. Just, E. Kaizer, W.E. Kaskan, J.C. Keck, J.M. Khan, G.A. Lavoie, G.C. Lugas, P.C. Malte, J. Matsui, J.A. Miller, T. Miyanchi, J. Mori, M. Nasfall, T. Nomaguchi, K. Pattas, D.T. Pratt, J. Sataronis, S.C. Schidt, G.W. Siegmund, M.M. Sutton, D.W. Turner, K.S. Varde, C.H. Wang, A. Williams и др.

Анализ представленных физико-кинетических исследований образования оксидов азота не дает достаточно полную оценку о составе компонентов и радикалов, принимающих участие в образовании  $\text{NO}_x$  в цилиндре дизеля (ЦД), работающего на альтернативном топливе, что не позволяет без проведения дополнительных исследований достаточно подробно описать физико-химические процессы, происходящие в ЦД, и представить на их основании модель расчета  $\text{NO}_x$  в дизеле, работающем на ПГ, ПГ с различными степенями РОГ и СТЭ.

**Цель и задачи исследования.** Цель – улучшение экологических показателей автотракторного дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ и экономия нефтяного моторного топлива путем разработки теоретических основ процесса образования оксидов азота и их снижения, изменения конструктивных и регулировочных параметров при работе на природном газе и спирто-топливных эмульсиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- разработать математическую модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- провести теоретические исследования объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- разработать химизм процесса образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- разработать модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- провести экспериментальные исследования и оценить сравнительное воздействие применения ПГ, ПГ с РОГ, СТЭ и регулировочных параметров как методов снижения токсичности на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ;
- оценить влияние режимов работы дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ;
- определить оптимальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- оценить верификацию сочетания выполненных по разработанной модели теоретических расчетов объемного содержания оксидов азота с результатами экспериментальных исследований при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- оценить интегральную токсичность и дымность ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации;
- разработать рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива.

#### **Научную новизну представляют:**

- математическая модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- химизм процесса образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- результаты экспериментальных исследований влияния ПГ, ПГ с РОГ, СТЭ и регулировочных параметров на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ;
- экспериментальные зависимости влияния режимов работы дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ;
- оптимальные экспериментальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ дизеля при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- результаты исследований интегральной токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации;
- рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- представлены теоретические положения и результаты экспериментальных исследований новых научно обоснованных технических и технологических перспективных решений по улучшению экологических показателей автотракторного дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ и экономии нефтяного моторного топлива;
- экспериментально получены оптимальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с каме-

рой сгорания типа ЦНИДИ при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- предложены химизмы и разработана математическая модель, позволяющая теоретически без дорогостоящих экспериментальных исследований определять объемное содержание оксидов азота и оценивать их влияние на эффективные и экологические показатели дизеля в широком диапазоне его работы как на дизельном топливе, так и на альтернативном (ПГ, ПГ с различными степенями РОГ и СТЭ);

- представлены результаты исследований интегральной токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации доказывающие соответствие его требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97, ГОСТ 17.2.2.02-98 и Правилам ЕЭК ООН №96;

- разработаны рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива;

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

- по результатам проведенных исследований на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА создан макетный образец трактора МТЗ-80, переоборудованный для работы ПГ и СТЭ, который при работе на СТЭ прошел эксплуатационные испытания в ЗАО племзавод «Октябрьский» Кировской области;

- результаты исследований рассмотрены и рекомендованы:

- Министерством сельского хозяйства и продовольствия Кировской области к внедрению в предприятиях, занимающихся производством и переработкой продукции сельского хозяйства;

- ООО «Газпром межрегионгаз Киров» для использования при переводе техники для работы на природном газе;

- ОАО «КировПассажирАвтотранс» для использования в производстве при переводе действующего автотранспортного парка для работы на природном газе.

**Методология и методы исследования.** В теоретических исследованиях использовались законы термодинамики, горения, теплотехники, аэродинамики, электротехники и теоретической механики. При экспериментальных исследованиях применялись общеизвестные методики и разработанные на их базе частные, основанные на современных методах проведения стендовых испытаний дизелей с обработкой экспериментальных данных с помощью математической статистики с использованием передовых компьютерных программ.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- результаты экспериментальных исследований влияния ПГ, ПГ с РОГ, СТЭ и регулировочных параметров на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ;

- математическая модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- химизм процесса образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- экспериментальные зависимости влияния режимов работы дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ;

- оптимальные экспериментальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ дизеля при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- результаты исследований интегральной токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации;

- рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива.

### **Степень достоверности** полученных научных результатов обуславливается:

- использованием общепризнанных закономерностей теории горения и окисления азота при горении топлив;

- применением поверенных и аттестованных современных средств измерения и испытаний, действующих отечественных и международных стандартов, опытом проведения испытаний по оценке мощностных, экономических и экологических характеристик дизелей;

- согласованием полученных результатов с известными данными.

**Апробация результатов.** Основные результаты и материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийских научных конференциях Вятской ГСХА (Киров, Вятская ГСХА, 2004-2007 г.г.); I-X Международных научно-практических конференциях «Наука – Технология – Ресурсосбережение» (Киров, Вятская ГСХА, 2008-2019 г.г.); Международных научно-практических конференциях «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения» (Йошкар-Ола, Марийский ГУ, 2007, 2011, 2014-2016 г.г.); Международной научно-практической конференции «Со-



вершенствование технологий, средств механизации и технического обслуживания в АПК», (Чебоксары, Чувашская ГСХА, 2004 г.); Всероссийских научно-технических конференциях «Наука - производство - технологии - экология» (Киров, Вятский ГУ, 2004, 2005 г.г.); Международной научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский ГАУ, 2004 г.); X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы управления качеством производства и эксплуатации автотранспортных средств», (Владимир, Владимирский ГУ, 2004 г.); Международных молодежных научных конференциях «Туполевские чтения» (Казань, КГТУ им. А.Н.Туполева, 2004, 2005 г.г.); Inżynieria Systemow Bioagrotechnicznych, (Plock, 2005); X Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей», (Владимир, Владимирский ГУ, 2005 г.); IV Международной научно-практической конференции «Автомобиль и техносфера» (Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, 2005 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные тенденции развития автомобилестроения в России» (Тольятти, Тольяттинский ГУ, 2005 г.); Международной научно-практической конференции «Основные итоги и приоритеты научного обеспечения АПК Евро-Северо-Востока», (Киров, НИИСХ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 2005 г.); Международной научно-практической конференции «Роль молодых ученых в реализации национального проекта «Развитие АПК» (Москва, МСХА им. К.А. Тимирязева, 2007 г.); Международной научно-практической конференции молодых исследователей «Наука и молодежь: новые идеи и решения» (г. Волгоград, Волгоградская ГСХА, 2008 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Вклад молодых ученых в отраслевую науку с учетом современных тенденций развития АПК» (Москва, Российская академия кадрового обеспечения АПК, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский ГАУ, 2009 г.); VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Научное обеспечение развития сельских территорий» (Москва, ГУ по землеустройству, 2014 г.); Всероссийских ежегодных научно-практических конференциях «Общество, наука, инновации» (Киров, Вятский ГУ, 2014, 2015 г.г.); VII Всероссийской научно-практической конференции «Основные направления развития техники и технологий в АПК» (Княгинино, Нижегородский ГИЭУ, 2015 г.); VI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» (Ульяновск, Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина, 2015 г.); XVI Международной научной конференции «Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения» (Липецк, НП «Национальный фонд инноваций», 2015 г.); XIV Международной научной конференции «Наука в центральной России» (Липецк, ВНИИТиН, 2015 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние прикладной науки в области механики и энергетики» (Чебоксары, Чувашская ГСХА, 2016 г.); I Международной научно-

практической конференции «Динамика механических систем» (Казань, Казанский ГАУ, 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Мобильная энергетика в сельском хозяйстве: состояние и перспективы развития» (Чебоксары, Чувашская ГСХА, 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Prospects of development of agrarian sciences» (ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, г. Чебоксары, 2019 г.); Международной научной конференции «Applied Physics, Information and Engineering Technologies - APITECH – 2019» (г. Красноярск, 2019 г.).

Основные результаты и положения диссертационной работы опубликованы в 370 печатных работах, включая 5 монографий, 11 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, 50 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, патенты, работы на английском и польском языках.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования; представлена степень разработанности; сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; изложены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту; обусловлены степень достоверности и апробация полученных научных результатов.

**В первой главе** рассмотрены физико-химические процессы образования  $\text{NO}_x$  при горении углеводородных топлив, и представлен анализ результатов теоретических и экспериментальных научных исследований, направленных на снижение оксидов азота в дизелях. Так, для снижения  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля изменяют организацию и состав подачи топлива, рабочий процесс, регулируют топливную аппаратуру, подают водяной пар или воду в камеру сгорания (КС), используют водо-топливные эмульсии, применяют РОГ, межцилиндровый перепуск ОГ, абсорбционную и адсорбционную очистку ОГ, каталитическую нейтрализацию и др. Но из-за различных механизмов образования  $\text{NO}_x$  и продуктов, получающихся в результате неполноты сгорания топлива, а также из-за разного их в ОГ агрегатного состояния часть перечисленных методов нейтрализации  $\text{NO}_x$  экономически не целесообразна, другие методы применимы только для тепловых двигателей с малым литражом, третьи характерны для бензиновых ДВС, некоторые вызывают только селективное действие на вредные вещества, а если удастся в результате определенных эксплуатационно-конструктивных действий улучшить экологические показатели ОГ по одним веществам (например,  $\text{NO}_x$ ), то это неизбежно вызывает ухудшение по другим. Поэтому большинство рассмотренных способов, направленных на снижение  $\text{NO}_x$  в ОГ, не получили масштабного использования и требуют детального усовершенствования для конкретной модели дизеля. Кроме того обращение к альтернативным топливам как одной из основ перспективной мировой энергетики стало логичным результатом исторического развития и

осознания необходимости диверсификации используемых первичных источников энергии с целью повышения энергетической и экологической безопасности стран, регионов и конкретных потребителей энергии. Поэтому в последнее время в мире все больше средств и времени отводят на исследование, производство и применение альтернативных топлив. Основной целью такой деятельности является расширение сырьевой базы, поиск энергоэффективных топлив и методов их рационального применения. Использование альтернативных топлив ставит перед нами задачу предсказания физико-химических свойств новых топлив или стандартного нефтяного топлива при применении присадок и добавок. Исследования на эту тему слабо освещаются в литературе. Рассмотрение этой проблемы только с помощью химической кинетики не позволяет раскрыть некоторые вопросы, крайне важные с точки зрения организации рабочего процесса теплового двигателя и изготовления альтернативного топлива.

**Во второй главе** предложены теоретические предпосылки по снижению  $\text{NO}_x$  в дизеле путем применения ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ.

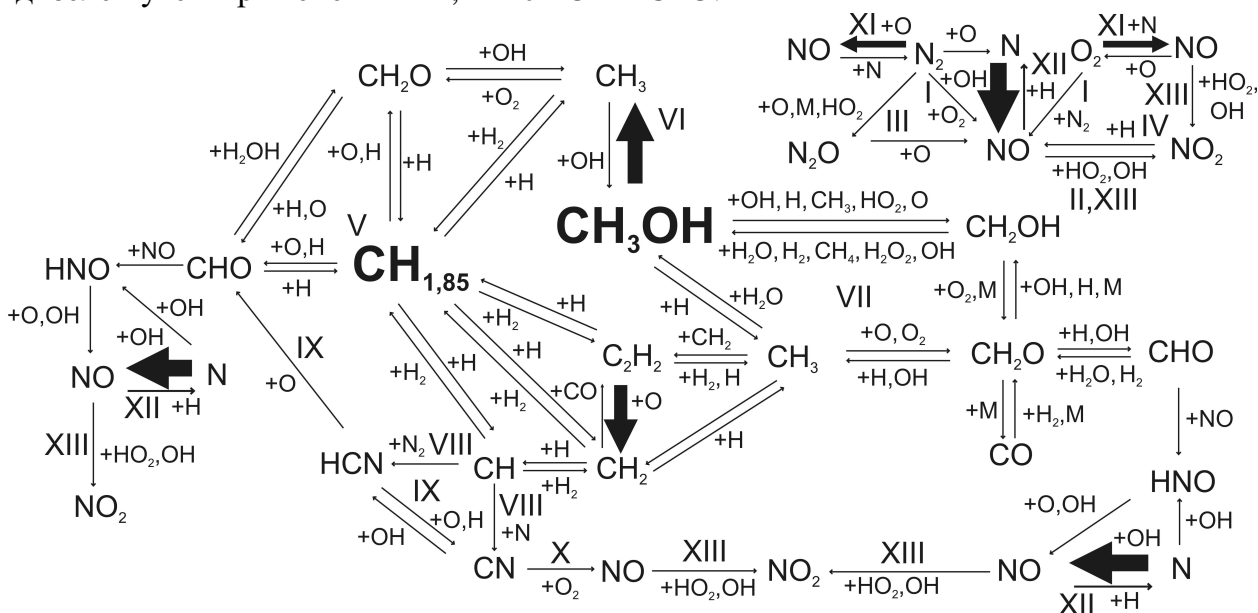


Рисунок 1 - Схема процесса образования  $\text{NO}_x$  в ЦД при работе на МТЭ:

- I – образование NO по бимолекулярной реакции; II – окисление NO до  $\text{NO}_2$  в предпламенной зоне; III – образование и разложение гемиоксида азота  $\text{N}_2\text{O}$ ;
- IV – образование NO за счет расхода  $\text{NO}_2$ ; V – горение дизельного топлива;
- VI – термическое разложение метанола; VII – процесс окисления метанола;
- VIII – взаимодействие молекулярного азота с углеводородными фрагментами;
- IX – превращение HCN в CN; X – образование быстрого NO; XI – образование термического NO по механизму Я.Б. Зельдовича; XII – образование термического NO через радикалы OH; XIII – окисление NO до  $\text{NO}_2$  в запламенной зоне

В связи со сложным химическим процессом предпламенных реакций в ЦД, связанных с зарождением и постоянным изменением высоких локальных концентраций активных центров тепловых реакций, для точных расчетов содержания и скорости образования  $\text{NO}_x$  в цилиндре рассмотрена сложная система химических уравнений, учитывающая не только зависимость теплоемкости от температуры, но и

возникающие диссоциативные изменения. Поскольку эти изменения происходят с достаточно большой скоростью, расчет содержания  $\text{NO}_x$  усложняется сдвигом равновесий диссоциации при изменении температур и давлений по объему КС. Исследуя механизмы реакций, которые приводят не к установлению стационарного состояния, а к периодическому изменению скорости реакции во времени, возможно провести достаточно точный расчет скорости образования  $\text{NO}_x$  в ЦД при работе как на штатном дизельном топливе, так и на различных комбинациях альтернативных топлив с дальнейшей возможностью воздействия на скорости развития и образования оксидов азота путем частичной или полной заменой элементарного состава базового топлива альтернативным.

Рассматривая суммарное образование и расходование компонентов во время процесса горения топлива в ЦД и выделяя доминирующие механизмы, дающие наиболее весомый вклад в общий процесс образования  $\text{NO}_x$ , представлены механизмы их образования в виде определенных последовательностей локальных анализов путей реакций при работе на ПГ, ПГ с РОГ, метанола-топливной эмульсии (МТЭ, рисунок 1) и этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ).

Основываясь на теории химической кинетики протекания реакции на вершине потенциального барьера, отвечающей за сближение реагирующих веществ, и в ее окрестностях происходит образование активированных комплексов.

Предполагая, что все комплексы, которые образуются, расходуются в направлении продуктов реакции, а у реакции число актов равняется числу расхода комплексов, поделенному на время их существования, выведено уравнение расчета скоростей реакций образования  $\text{NO}_x$ , позволяющее проводить расчеты значений предэкспоненциального множителя химических реакций и, следовательно, абсолютной скорости образования  $\text{NO}_x$  в ЦД:

$$k_i = P \wp \frac{\kappa T}{h} K^M, \quad (1)$$

где  $P$  – величина изменения скорости фактической реакции от идеальной (стерический фактор);  $\wp$  – трансмиссионный коэффициент, учитывающий количество действительно распавшихся и давших продукты реакции активированных комплексов;  $\kappa$ ,  $h$  – постоянные Больцмана и Планка;  $K^M = \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_0}{RT}}$  – константа равновесия между начальным и активированным состояниями;  $Z$  – вид реагирующих веществ.

Выражение  $\kappa T/h$  будет одинаковым для всех реакций и исходных веществ, следовательно, оно будет иметь размерность частоты и может представлять универсальную постоянную при каждой температуре, т.е. это выражение ( $\kappa T/h$ ) характеризует частоту прохождения активированным комплексом вершины параболы для данной температуры. С другой стороны, учитывая, что  $k_i \sim k$ , где  $k$  – константа

скорости реакции горения, необходимо знать и эту величину. Для этого рассмотрена схема горения капли дизельного топлива (СТЭ) в турбулентном потоке метано-воздушной смеси (воздушной смеси при работе на эмульсии) с избытком окислителя. Вокруг капли дизельного топлива (СТЭ) в процессе испарения происходит образование области паров горючего 2 с диффундирующим ей навстречу окислителем 5, что образует вокруг капли горючую смесь (рисунок 2). Содержание топлива в узком слое 3, в котором осуществляется горение полученной смеси, близко к стехиометрическому.

Толщина этого слоя, или фронта горения, равняется нескольким долям миллиметра. Образовавшиеся в зоне горения 3 продукты сгорания 6 и 7 проникают как в направлении области паров топлива 2, так и в направлении области догорания 4. Следовательно, занимаемый факелом объем можно разделить на две части: внешнюю (состоит из продуктов сгорания и проникающего им навстречу воздуха) и внутреннюю (состоит из паров топлива и продуктов горения, которые проникают из фронта горения в сторону капли). Вследствие пульсаций турбулентного потока, фронт пламени утрачивает контур своих границ, происходит его пульсация и разрывы. Проникающий вглубь фронта пламени кислород воздуха способствует процессу предварительного окисления паров топлива одновременно с их термическим разложением.

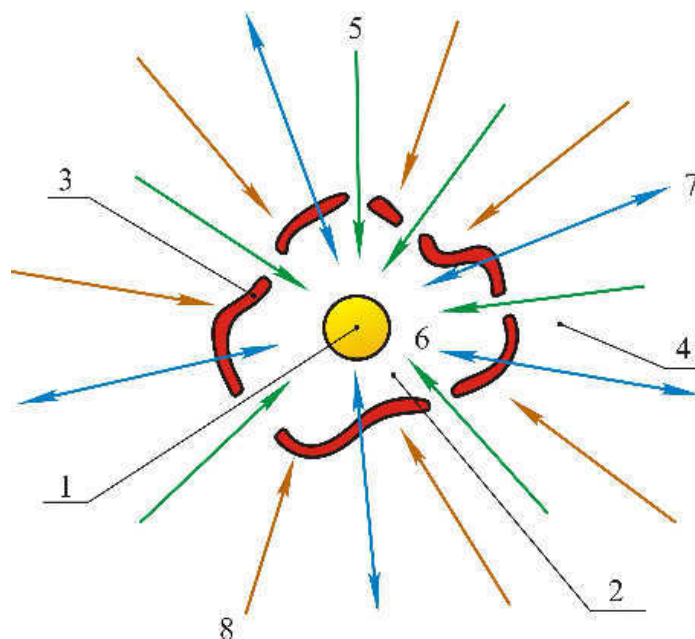


Рисунок 2 - Схема горения капли дизельного топлива (СТЭ) в ЦД: 1 – капля дизельного топлива (СТЭ); 2 – пары топлива; 3 – фронт горения; 4 – зона догорания; 5 – окислитель; 6,7 – продукты горения; 8 – турбулентный поток МВС (воздушной смеси при работе на СТЭ)

В зоне горения капли скорость диффузии топливо-воздушной смеси превышает скорость ее испарения. Следовательно, скорость горения капли ограничена продолжительностью испарения, а измельчение капель дизельного топлива (СТЭ) будет определяться силами трения, направленными касательно к капле, и скоростным напором, который действует на каплю. Вывод же уравнения для константы скорости горения выглядит следующим образом:

$$k = r_0^2 \frac{N_u \lambda (T_f - T_s)}{\rho [(T_k - T_0) c_c + \lambda_n]}, \quad (2)$$

где  $r_0$  – начальный радиус капли, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $T_f$ ,  $T_s$  – температуры в области теплообмена и поверхности капли, К;  $c_c$  –

средняя теплоемкость горючего, кДж/(кг·К);  $T_0$  и  $T_k$  – начальная температура и температура кипения дизельного топлива (СТЭ), °С;  $\lambda_{\text{п}}$  – теплота парообразования топлива, кДж/кг;  $N_u$  – критерий Нуссельта, определяемый по выражению:

$$N_u = 2 \left( 1 + c P_r^{1/3} \text{Re}^{1/2} \right) (1 - v_{\text{rs}}), \quad (3)$$

где  $P_r$  – число Прандтля (в данной задаче  $P_r = 0,7$ );  $0,27 < c < 0,37$ ;  $v_{\text{rs}}$  – концентрация паров горючего на поверхности капли дизельного топлива (СТЭ).

Определяется число Рейнольдса, влияющее на силы трения,

$$R_e = \frac{a u \rho}{\mu}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – вязкость используемого топлива.

А интенсивность скоростного напора, действующего на каплю дизельного топлива (СТЭ), определяется с помощью числа Вебера:

$$W_e = \frac{\rho(u - v)^2 a}{\sigma}, \quad (5)$$

где  $u$ ,  $\rho$  – скорость и плотность сгораемого топлива;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения дизельного топлива (СТЭ);  $a$ ,  $v$  – диаметр и скорость капли. Дробление капель дизельного топлива (СТЭ) происходит не сразу после достижения числом Вебера критического значения  $W_e^*$ . Капля первоначально подвергается процессу деформации. Эмпирическая зависимость, описывающая время деформации капли, предшествующее делению, в зависимости от характеристик процесса характеризуется выражением:

$$\tau_d = k \frac{a}{|u - v|} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho}}, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий форму КС;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой фазы;  $\tau_d$  – время деформации.

Как только критерии деления достигают критических значений, происходит деление капли дизельного топлива (СТЭ) в координате сечения, при этом критический параметр числа Вебера определяется следующим условием:

$$W_e^* = \frac{\rho(l, t) [u(l, t) - v(l, t)]^2 a(l, t)}{\sigma(l, t)}, \quad (7)$$

где  $l$  – координата сечения, в которой происходит деление (дробление) капли.

С целью уточнения констант скоростей реакций с действительными параметрами рабочего процесса в КС дизеля выведено следующее уравнение:

$$k_i' = k_i \frac{RT}{10^3 p}, \quad (8)$$

где  $T$ ,  $p$  – текущие значения температуры и давления в ЦД.

По результатам разработанных химизмов образования оксидов азота выделены реакции, дающие наиболее весомый вклад в общий процесс образования  $\text{NO}_x$  и рас-

считаны константы их скоростей, что позволяет провести достаточно точное математическое моделирование объемного содержания  $\text{NO}_x$  в цилиндре и ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ. Поскольку в продуктах сгорания содержатся различные  $\text{NO}_x$ , по термодинамической устойчивости (по убыванию) которые располагаются следующим образом:  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ , а одной из характерной особенности процесса образования  $\text{NO}_x$  в ЦД является преобладание оксида азота  $\text{NO}$ , содержание которого на несколько порядков выше всех остальных, образующихся в процессе горения  $\text{NO}_x$ , то разработка математической модели расчета содержания оксида азота  $\text{NO}$  позволит достаточно точно прогнозировать содержание  $\text{NO}_x$  в цилиндре и ОГ дизеля, в т.ч. при применении различных видов альтернативных топлив.

$$r_{\text{NO}2} = r_{\text{NO}1} + \frac{10^3 p_2 \Delta\varphi}{C_1 6nRT_2} - \left( C_2 (\ln r_{\text{NO}2} - \ln r_{\text{NO}1}) + \frac{C_3}{2} (r_{\text{NO}2}^2 - r_{\text{NO}1}^2) + \frac{C_4}{3} (r_{\text{NO}2}^3 - r_{\text{NO}1}^3) + \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}2}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}2}} + C_7} / C_5 C_8 - \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}1}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}1}} + C_7} / C_5 C_8 + \frac{C_6}{2C_8 \sqrt{C_5^3}} \ln \left( \frac{2C_5}{r_{\text{NO}1}} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}1}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}1}} + C_7} \right) - \frac{C_6}{2C_8 \sqrt{C_5^3}} \ln \left( \frac{2C_5}{r_{\text{NO}2}} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}2}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}2}} + C_7} \right) + \frac{1}{C_{10}} \left( \sqrt{C_5 r_{\text{NO}2}^2 + C_6 r_{\text{NO}2} + C_7} - \sqrt{C_5 r_{\text{NO}1}^2 + C_6 r_{\text{NO}1} + C_7} \right) + \ln \left( 2C_5 r_{\text{NO}2} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{C_5 r_{\text{NO}2}^2 + C_6 r_{\text{NO}2} + C_7} \right) * \left( \frac{1}{C_9 \sqrt{C_5}} - \frac{C_6}{2C_{10} \sqrt{C_5^3}} \right) + \left( \frac{C_6}{2C_{10} \sqrt{C_5^3}} - \frac{1}{C_9 \sqrt{C_5}} \right) * * \ln \left( 2C_5 r_{\text{NO}1} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{C_5 r_{\text{NO}1}^2 + C_6 r_{\text{NO}1} + C_7} \right) \right), \quad (9)$$

где  $\Delta\varphi$  – изменение угла п.к.в. на расчетном участке,  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ;  $C_i$  – постоянная для данного шага расчета величина.

При математическом моделировании образования  $\text{NO}$  в ЦД рассчитывались неизвестные параметры последовательно для каждого шага расчета  $\Delta\varphi$ . В результате исходя из определяющей системы уравнений химизма процесса образования оксидов азота выражение для расчета содержания  $\text{NO}$  в ЦД в конце участка расчета принимает вид уравнения (9), решение которого относительно  $r_{\text{NO}2}$  дает значения объемного содержания  $\text{NO}$  в конце участка расчета. Снижение (либо рост) содержания  $\text{NO}$ , образовавшегося ранее на участке расчета  $\Delta\varphi$ , в продуктах сгорания определяется следующим уравнением:

$$\Delta r_{NO} = r_{NO2} - r_{NO1} \quad (10)$$

На основании предложенных зависимостей осуществлены теоретические исследования объемного содержания  $NO_x$  в ОГ и цилиндре дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ (рисунки 3-5).

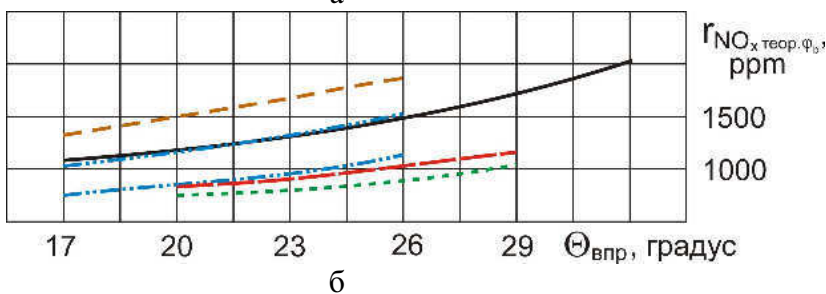
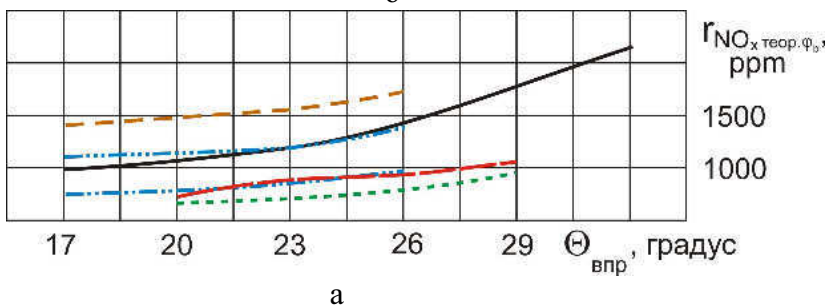
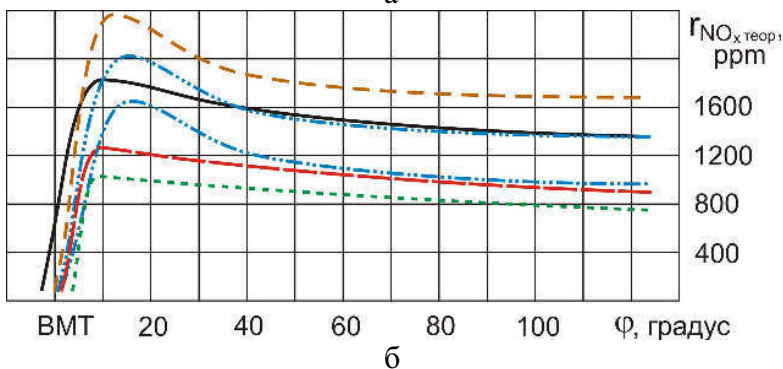
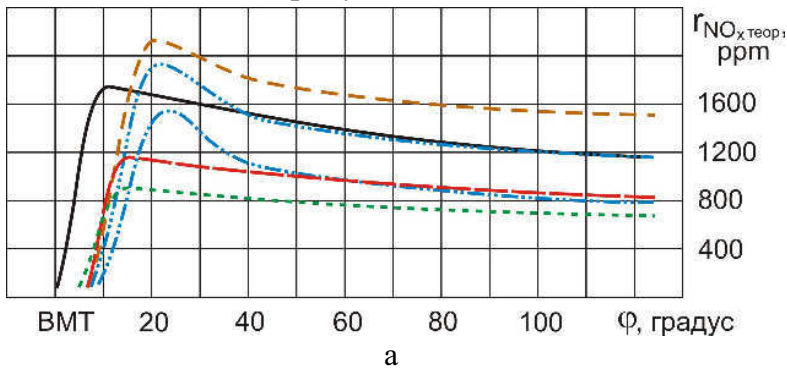


Рисунок 3 - Результаты теоретических исследований объемного содержания  $NO_x$  в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$ :  
а –  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ;

б –  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ;  
— - ДП;  
- - - ГДП;  
... ГД с РОГ 10%;  
- · - ГД с РОГ 20%;  
- - - ЭТЭ;  
- · - МТЭ

Рисунок 4 - Результаты теоретических исследований объемного содержания  $NO_x$  в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения  $\Theta_{впр}$ :

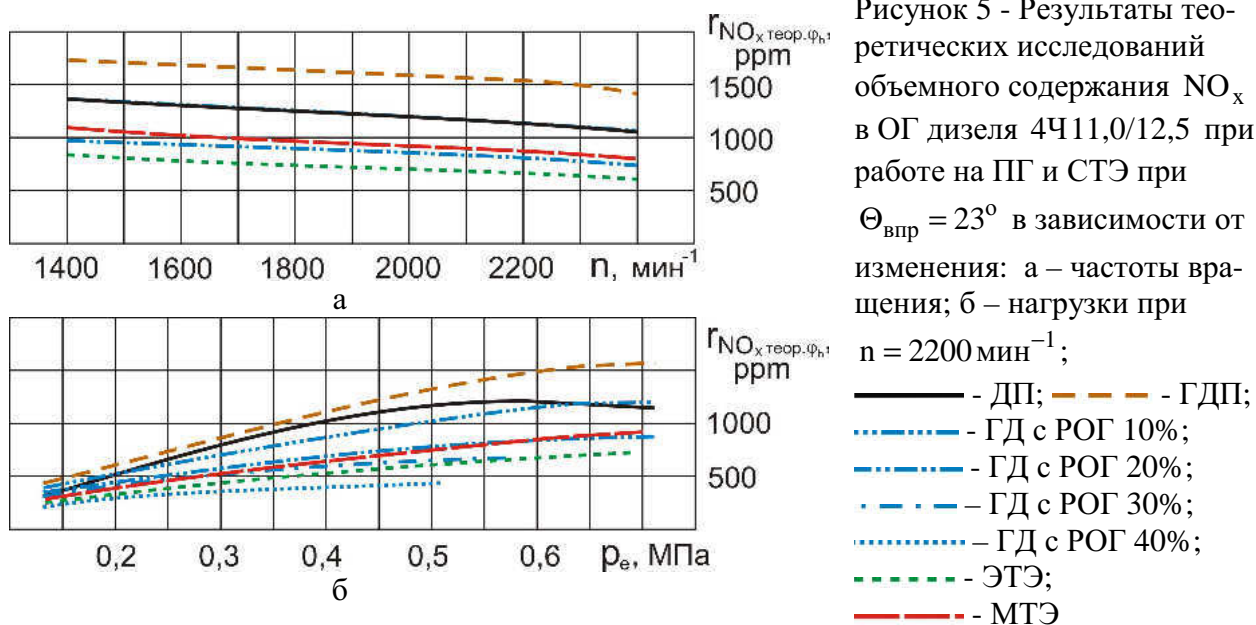
а –  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
б –  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ;  
— - ДП;  
- - - ГДП;  
... ГД с РОГ 10%;  
- · - ГД с РОГ 20%;  
- - - ЭТЭ;  
- · - МТЭ

Из графиков (рисунок 3) видно, что максимальные значения содержания  $r_{NO_x \text{ теор}}$  в ЦД значительно превышают значения при угле п.к.в., соответствующем открытию выпускного клапана ( $\phi_b = 124,0^\circ$ ). Так, при работе по газодизельному процессу (ГДП) максимум объемного содержания  $NO_x$  в цилиндре равняется 2230 ppm при угле п.к.в.  $\phi = 20,5^\circ$  после в.м.т. Объемное содержание  $r_{NO_x \text{ теор}}$  при  $\phi_b$  равняется 1530 ppm, что на 31,4% меньше максимального значения.

При теоретических исследованиях дизеля на МТЭ при  $n=2200 \text{ мин}^{-1}$  и  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  максимальное значение объемного содержания  $r_{NO_x \text{ теор}}$  в ЦД составляет 1160 ppm при



угле п.к.в.  $\varphi = 16,0^\circ$  после в.м.т. Объемное содержание  $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$  при  $\varphi_b$  равняется 815 ppm, что на 29,7% меньше максимума. При работе на ЭТЭ максимум  $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$  в ЦД составляет 920 ppm, при угле п.к.в.  $\varphi = 14,0^\circ$  после в.м.т. Объемное содержание  $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$  при  $\varphi_b$  составляет 690 ppm, что ниже на 25,0% максимального значения.



В третьей главе разработана научно-методическая программа и представлены особенности методик, используемых при экспериментальных исследованиях, а также созданные опытные установки, приборы и оборудование.



Рисунок 6 - Общий вид экспериментальной установки и применяемого оборудования

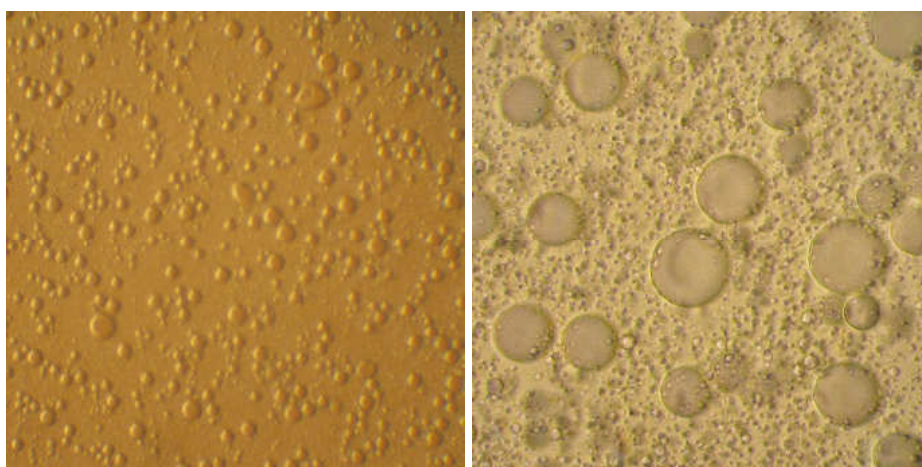
Экспериментальная установка состояла из электротормозного стенда SAK-N670 с балансирующим маятниковым механизмом, дизеля 4Ч 11,0/12,5 (рисунок 6), измерительной аппаратуры, газобаллонного оборудования.

Исследования стабильности СТЭ осуществлялись по методике НПО «Синтез

ПАВ» с учетом классических методик. Исследования дизеля проводились с использованием дизельного топлива марки Л (ГОСТ 305-2013), моторного масла М-10-Г<sub>2</sub> (ГОСТ 17479.1-85), метилового спирта (ГОСТ 2222-95), этилового спирта (ГОСТ Р 5962-2013). При проведении экспериментальных исследований, монтаже приборов и оборудования так же учитывались требования следующих ГОСТов ГОСТ 18509-88; ГОСТ 10578-96; ГОСТ 10579-88; ГОСТ 15888-90; ГОСТ ISO 8178-4-2013; ГОСТ Р 41.49-2003; ГОСТ Р 41.24-2003; ГОСТ Р 41.96-2011; ГОСТ 17.2.2.05-97; ГОСТ 17.2.2.02-98.

Обработку индикаторных диаграмм проводили с помощью компьютерной программы ЦНИДИ-ЦНИИМ, забор и анализ ОГ осуществляли с помощью автоматической системы газового анализа АСГА-Т, дымность ОГ с помощью дымомера Bosch EFAW-68А. При исследованиях дизеля на ПГ использовался передвижной заправочный блок (16 баллонов) газобаллонного оборудования автомобиля ЗИЛ-138А на базе прицепа 2ПТС-4. Приготовление эмульсий осуществлялось гомогенизатором MPW-302 при частоте вращения вала 2000 мин<sup>-1</sup>.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ, содержащих различные количества дизельного топлива (ДТ), спирта и присадки. Концентрация спирта изменялась от 10 до 50% по массе с шагом 10% до получения оптимального диапазона, определяемого показателями работы дизеля и физико-химическими свойствами топлива.



а

б

Рисунок 7 – Снимок микрофотографирования ЭТЭ:

а - сразу после приготовления; б - в начале процесса флуккулации

После получения оптимального диапазона концентрации спирта, величина которой составила от 20 до 30% было принято решение о необходимости проведения исследований с шагом 5% в указанном диапазоне для определения более точной концентрации спирта в составе эмульсии. Концентрация же присадки варьировалась от 0,5 до 2% с шагом 0,5%. Также было проведено микрофотографирование приготовленных проб эмульсий и проб с начавшимся процессом флуккулации. Как видно из рисунка 7,а проба имеет однородный состав по размерам частиц, а с течением времени происходит объединение частиц в более крупные «агрегаты», что определяет процесс флуккулации (рисунок 7,б). Первоначально за показатель стабильности было принято время, в результате которого наблюдались изменения приготовленной СТЭ в виде осадка или отстоя.

Из графиков (рисунок 8) видно, что стабильность эмульсий зависит не только от концентрации спирта, но и от концентрации присадки ( $K_{п}$ ). Так, при концентрации метанола 10% (см. рисунок 8,а) стабильность эмульсии снижается от 1,5 мин ( $K_{п} = 0,5\%$ ) до 1,4 мин ( $K_{п} = 1,0\%$ ), т.е. на 6,7%. При дальнейшем увеличении  $K_{п}$  до 2,0% стабильность повышается до 2,2 мин, т.е. на 57,1%. Стабильность эмульсии при введении в ее состав дистиллированной воды существенно повышается, достигая нескольких десятков часов. Так, при концентрации метанола 25% (см. рисунок 8,б) стабильность эмульсии повышается от 17,9 ч при  $K_{п} = 0,5\%$  до 34,6 ч при  $K_{п} = 2,0\%$ , т.е. на 93,3%. А стабильность ЭТЭ (см. рисунок 8, г) с концентрацией этилового спирта 50% возрастает с 16,3 ч ( $K_{п} = 0,5\%$ ) до 18,9 ч ( $K_{п} = 2,0\%$ ).

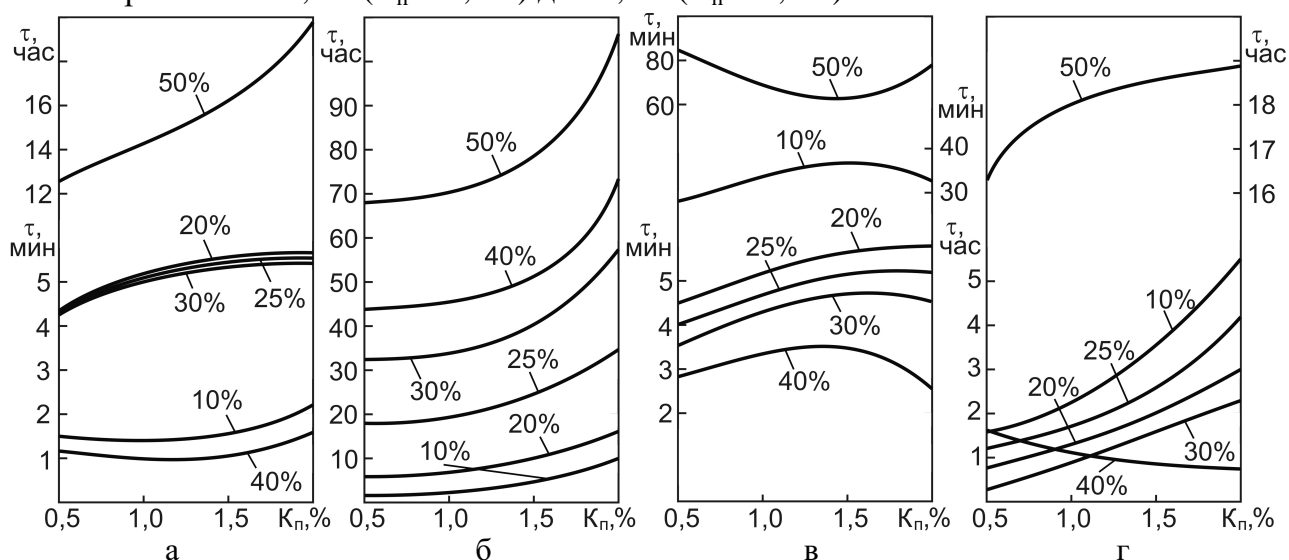


Рисунок 8 - Результаты исследований стабильности экологической смеси спиртов с дизельным топливом и присадкой сукцинимид С-5А:  $K_{п}$  - концентрация присадки сукцинимид С-5А; 10, 20, 30, 40, 50% - концентрация спирта; а – абсолютный метанол; б – метанол с содержанием воды (7% по массе); в – абсолютный этанол; г – этанол с содержанием воды (7% по массе)

Таким образом,готавливаемые СТЭ имели «запас прочности» в течение времени, пока шел процесс седиментации, поскольку при этом еще не происходило разделение эмульсии на две фазы. В этот период проба СТЭ может принять первоначальное состояние за счет легкого встряхивания (или вибрации двигателя). После завершения седиментации в пробе СТЭ наблюдался процесс флокуляции (образования капель составляющих ингредиентов). Дальнейшее увеличение объема капель и их слипание приводило к завершению процесса коалесценции, т.е. полному разделению дисперсионной среды на спиртовую и углеводородную фазы. Для исследованных МТЭ и ЭТЭ стабильность к коалесценции составила от 4 до 6 сут.

По результатам исследований был сделан вывод, что использование воды в составе эмульсии действительно многократно повышает стабильность СТЭ. Сукцинимид С-5А является эффективным эмульгатором для эмульсий обратного типа. Добавление воды в сочетании с этой присадкой приводит к еще более значительному повышению стабильности эмульсий (от 1–6 мин до 1,5–100 ч). Полученные данные позволяют говорить о возможности применения сукцинимида, в сочетании с водой в ка-

честве эмульгатора для приготовления СТЭ вне топливной системы дизеля. Согласно результатам исследований стабильности СТЭ, 50%-ная концентрация спирта (как метанола, так и этанола) делает их оптимальными по устойчивости к процессам разрушения. Это свидетельствует о повышении предельной концентрации спирта в эмульсии, в результате чего возрастает роль «обратной» реакции по отношению к «прямой», что приводит к пропускам воспламенения в КС дизеля при работе на такой эмульсии. Подтверждение этому было получено после первичных испытаний дизеля. Таким образом, по результатам проведенных исследований СТЭ использование их в дизеле с большим содержанием спирта (метанола, этанола) практически затруднено вследствие с возникающими пропусками воспламенения и повышенной жесткостью процесса сгорания.

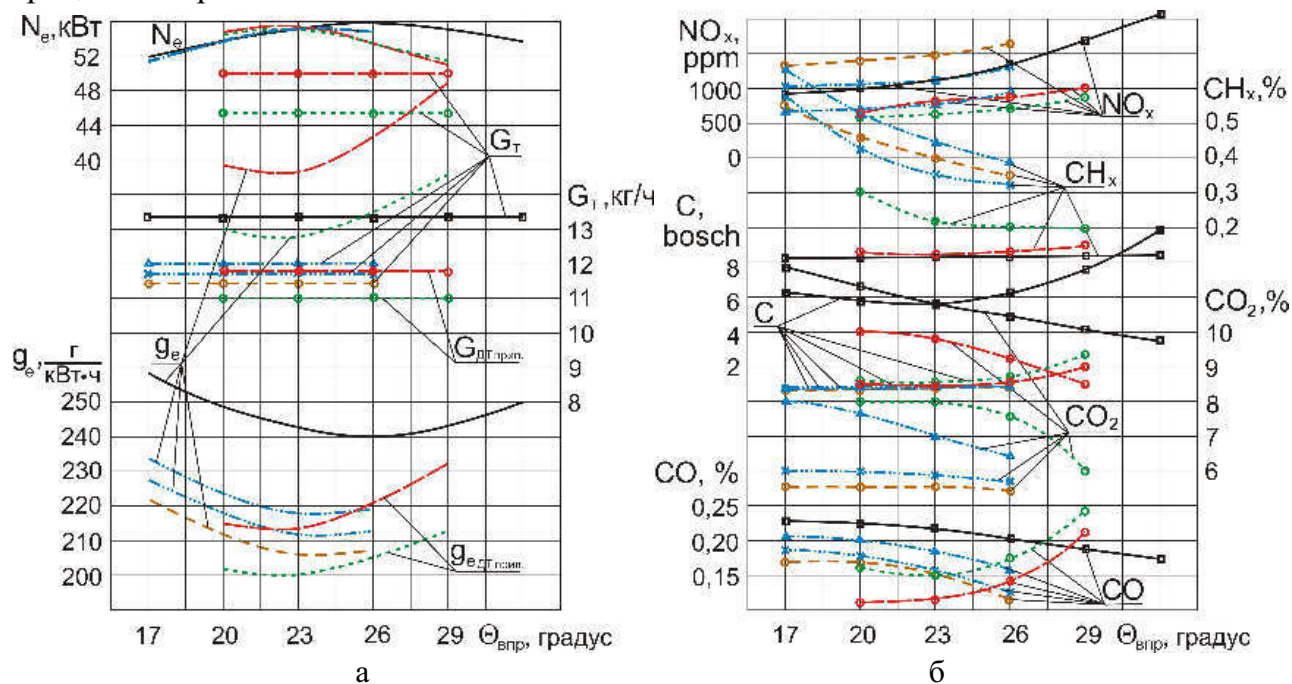


Рисунок 9 – Зависимости эффективных и токсических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения  $\Theta_{впр}$  при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ : ———— – ДП; - - - - - ГДП; ..... - ГД с РОГ 10%; - · - · - ГД с РОГ 20%; ..... - ЭТЭ; - · - · - МТЭ

В качестве оптимальных для дизеля 4Ч 11,0/12,5 по результатам проведенных исследований физико-химических свойств эмульсий, стабильности и первичных испытаний были приняты эмульсии, характеризующиеся следующим составом: спирт (метанол или этанол) - 25%, моющее-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5%, вода - 7%, дизельное топливо – 67,5%. Также экспериментальными исследованиями было установлено, что для получения экологического энергоносителя для дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ необходимо применять следующее соотношение: газа – 80%, запальной порции дизельного топлива – 20%. Все дальнейшие испытания дизеля проводились на альтернативных топливах вышеуказанного состава.

Анализ мощностных и экономических показателей в зависимости от  $\Theta_{впр}$  (рисунок 9,а) показывает, что, судя по минимальному удельному расходу топлива  $g_e$  для всех режимов работы дизеля оптимальный установочный угол опережения впрыскивания топлива (у.о.в.т.) при работе для дизельного процесса (ДП)

соответствует  $\Theta_{впр} = 26^\circ$ , а при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ -  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  (см. таблицу 1).

Таблица 1 - Результаты исследований мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ )

Топливо	Показатели				
	$N_e$ , кВт	$g_e$ , г/(кВт·ч)	$g_{e \text{ ДТ прив.}}$ , г/(кВт·ч)	$G_T$ , кг/ч	$G_{\text{ДТ прив.}}$ , кг/ч
Дизельное	55,2	243	-	13,4	-
ПГ	55,2 (соответствует ДП)	207 (снижение на 14,8%)	-	11,4 (снижение на 14,9%)	-
ПГ с РОГ 10%	55,2 (соответствует ДП)	212 (снижение на 12,8%)	-	11,7 (снижение на 12,7%)	-
ПГ с РОГ 20%	55,2 (соответствует ДП)	218 (снижение на 10,3%)	-	12,0 (снижение на 10,5%)	-
МТЭ	55,4 (увеличение на 0,4%)	316 (увеличение на 30,0%)	213 (снижение на 12,3%)	17,5 (увеличение на 30,6%)	11,8 (снижение на 11,9%)
ЭТЭ	55,0 (снижение на 0,4%)	297 (увеличение на 22,2%)	200 (снижение на 17,7%)	16,3 (увеличение на 21,6%)	11,0 (снижение на 17,9%)

Анализируя графики изменения показателей токсичности (рисунок 9,б) при работе на ПГ, можно отметить, что с увеличением  $\Theta_{впр}$  возрастает содержание в ОГ  $\text{NO}_x$  и незначительно сажи С, снижается содержание  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ , а также суммарных углеводородов  $\text{CH}_x$ .

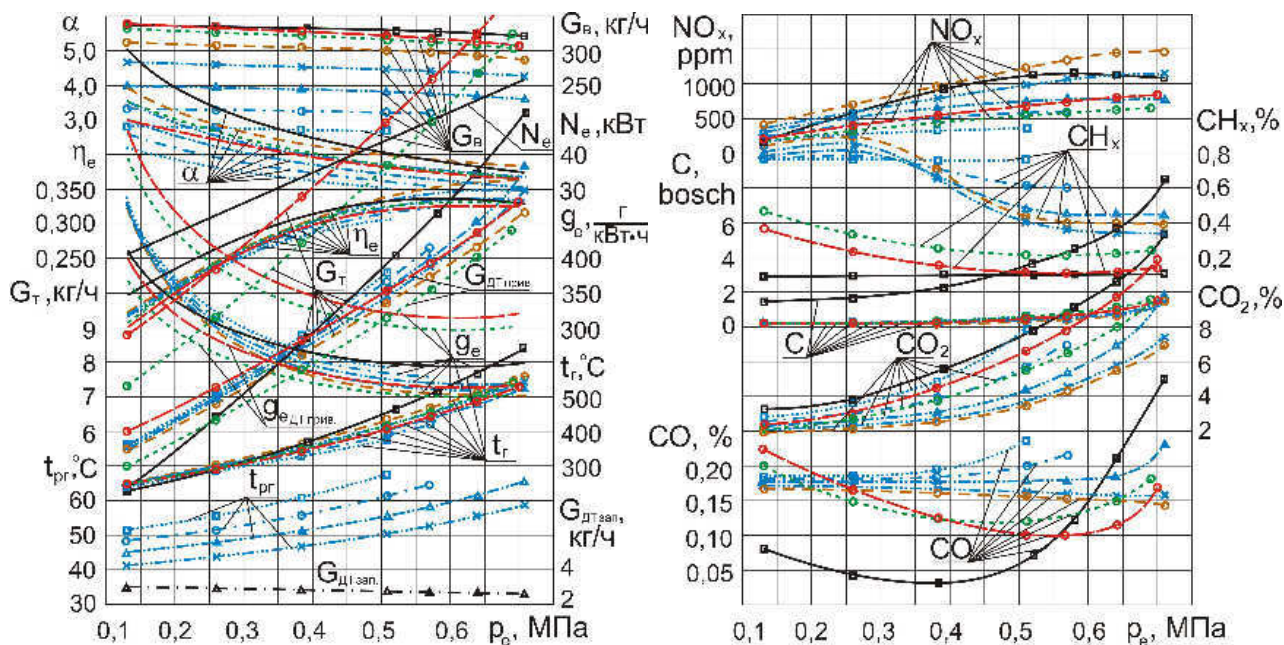


Рисунок 10 - Зависимости эффективных и токсических показателей дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения нагрузки при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  и  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ :

- — □ — ДП; ○ — ○ — ГДП; × — × — ГДП с РОГ 10%; ▲ — ▲ — ГДП с РОГ 20%;
- — ○ — ГДП с РОГ 30%; □ — □ — ГДП с РОГ 40%; ○ — ○ — ЭТЭ;
- — ○ — МТЭ; ▲ — ▲ — расход запального дизельного топлива

Таблица 2 – Результаты исследований показатели токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при оптимальных значениях  $\Theta_{впр}$  ( $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_c = 0,64 \text{ МПа}$ )

Топливо	Показатели			
	$\text{NO}_x$ , ppm	C, ед. по шкале Bosch	$\text{CO}_2$ , %	CO, %
Дизельное	1320	6,2	10,5	0,20
ПГ	1450 (увеличение на 9,9%)	0,9 (снижение в 6,9 раза)	5,6 (снижение на 46,7%)	0,15 (снижение на 25,0%)
ПГ с РОГ 10%	1100 (снижение на 16,7%)	1,0 (снижение в 6,2 раз)	5,9 (снижение на 43,8%)	0,16 (снижение на 20,0%)
ПГ с РОГ 20%	750 (снижение на 43,2%)	1,1 (снижение в 5,6 раза)	7,0 (снижение на 33,3%)	0,18 (снижение на 10,0%)
МТЭ	775 (снижение на 41,3%)	0,9 (снижение в 6,9 раза)	9,8 (снижение на 6,7%)	0,11 (снижение на 45,0%)
ЭТЭ	657 (снижение на 50,2%)	1,2 (снижение в 5,2 раза)	8,0 (снижение на 23,8%)	0,15 (снижение на 25,0%)

Применение же при ГДП РОГ не изменяет характер кривых относительно  $\Theta_{впр}$  и приводит к снижению содержания в ОГ оксидов азота и суммарных углеводородов (на установочных у.о.в.т. 20–26° при степени РОГ 10%), незначительному повышению содержания сажи C и увеличению содержания оксида CO и  $\text{CO}_2$ . Оценивая работу дизеля на СТЭ на различных установочных у.о.в.т. следует отметить, что значения показателей токсичности изменяются по сравнению с работой на дизельном топливе. Применение эмульсий позволяет снизить в ОГ содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$ , сажи C, оксида углерода CO (кроме  $\Theta_{впр} = 29^\circ$ ) и диоксида углерода  $\text{CO}_2$  (см. таблицу 2).

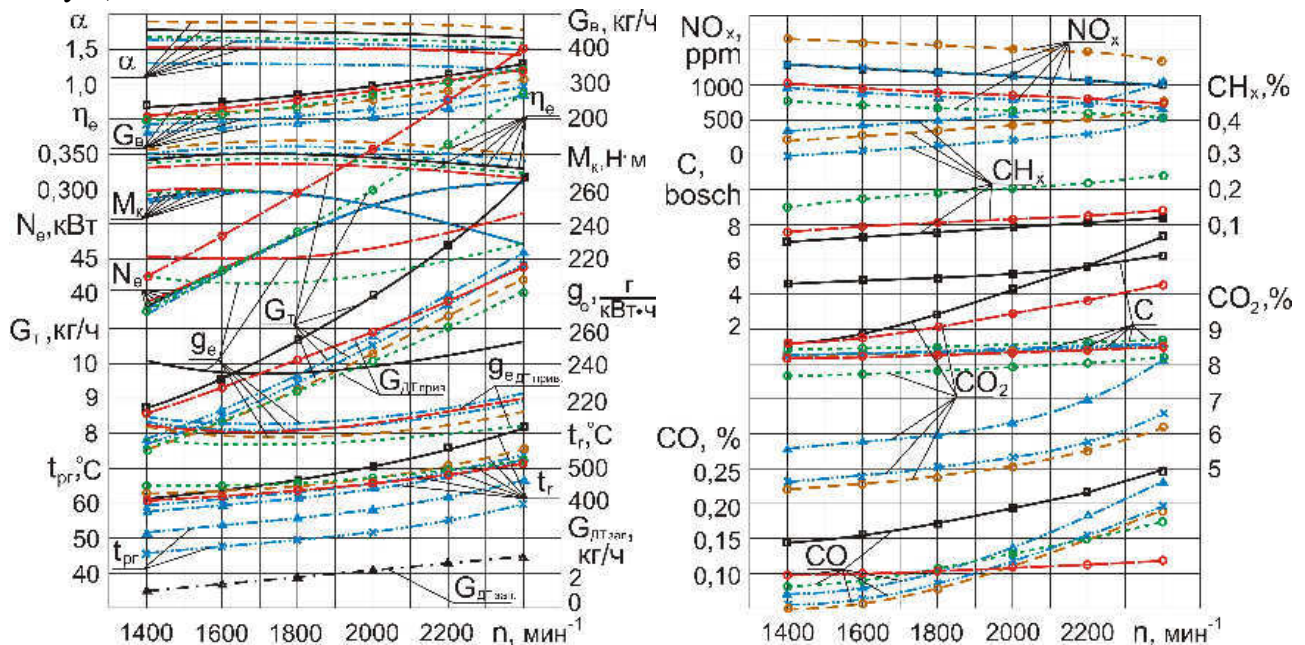


Рисунок 11 - Зависимости эффективных и токсических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения частоты вращения при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$ :

■ — ДП; ○ — ГДП; ✕ — ГДП с РОГ 10%; ▲ — ГДП с РОГ 20%;  
○ — ЭТЭ; ○ — МТЭ; ▲ — расход запального дизельного топлива

Зависимости эффективных и экологических параметров дизеля 4Ч 11,0/12,5 от изменения нагрузки и частоты вращения представлены на рисунках 10 и 11.

В пятой главе представлены результаты исследований процесса сгорания дизеля на ПГ и СТЭ. Представленные индикаторные диаграммы (рисунок 12) наглядно демонстрируют увеличение периода задержки воспламенения (ПЗВ) и максимального давления цикла  $p_z$  при работе на всех исследуемых альтернативных топливах.

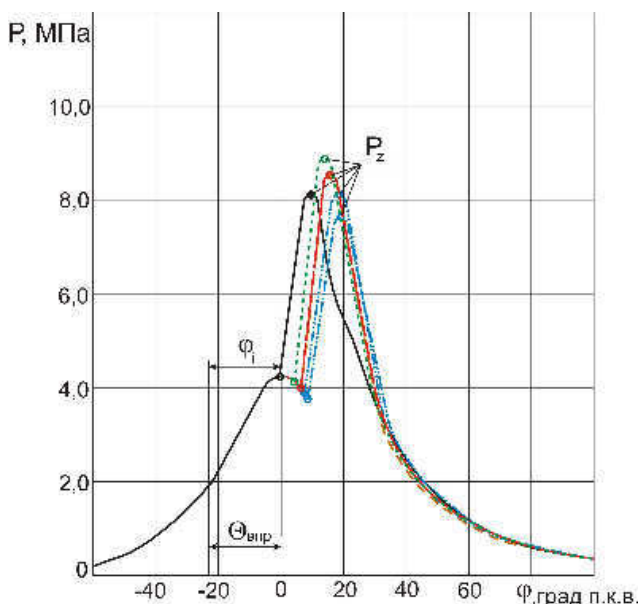


Рисунок 12 – Индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  и  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ :  
 — ДП; — ГДП; — ГД с РОГ 10%; — ГД с РОГ 20%;  
 - - - ЭТЭ; - - - МТЭ

Анализируя графики изменения показателей процесса сгорания (рисунок 13) при работе на ПГ с РОГ, можно отметить, что с увеличением частоты вращения снижаются максимальная осредненная температура газов в ЦД  $T_{max}$ , максимальное давление сгорания  $p_z$ , степень повышения давления  $\lambda$ , жесткость процесса сгорания  $(dp/d\phi)_{max}$  и увеличивается значение угла  $\phi_i$ , соответствующего ПЗВ.

Сравнивая графики работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на СТЭ и ДП, можно отметить, что применение СТЭ приводит к росту максимальной осредненной температуры газов в ЦД  $T_{max}$ , максимального давления сгорания  $p_z$ , степени повышения давления  $\lambda$ , жесткости процесса сгорания  $(dp/d\phi)_{max}$ , угла  $\phi_i$ , соответствующего ПЗВ на всех исследуемых скоростных режи-

мах.

Таким образом, на номинальном режиме работы и  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  применение ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ приводит к значениям показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5, указанным в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты исследований показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на рекомендуемых конструктивных и регулировочных параметрах и составах топлива ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ )

Топливо	Показатели				
	$T_{max}$ , К	$p_z$ , МПа	$\lambda$	$(dp/d\phi)_{max}$ , МПа/град	$\phi_i$ , градус
Дизельное	2190	8,1	1,90	0,59	22,5
ПГ с РОГ 20%	2680 (увеличение на 22,4%)	7,5 (снижение на 7,4%)	1,80 (снижение на 5,3%)	0,54 (снижение на 8,5%)	32,0 (увеличение на 42,2%)
МТЭ	2430 (увеличение на 11,0%)	8,5 (увеличение на 4,9%)	2,26 (увеличение на 19,0%)	1,25 (увеличение в 2,1 раза)	30,0 (увеличение на 33,3%)
ЭТЭ	2510 (увеличение на 14,6%)	8,9 (увеличение на 9,9%)	2,27 (увеличение на 19,5%)	1,01 (увеличение на 71,2%)	28,0 (увеличение на 24,4%)

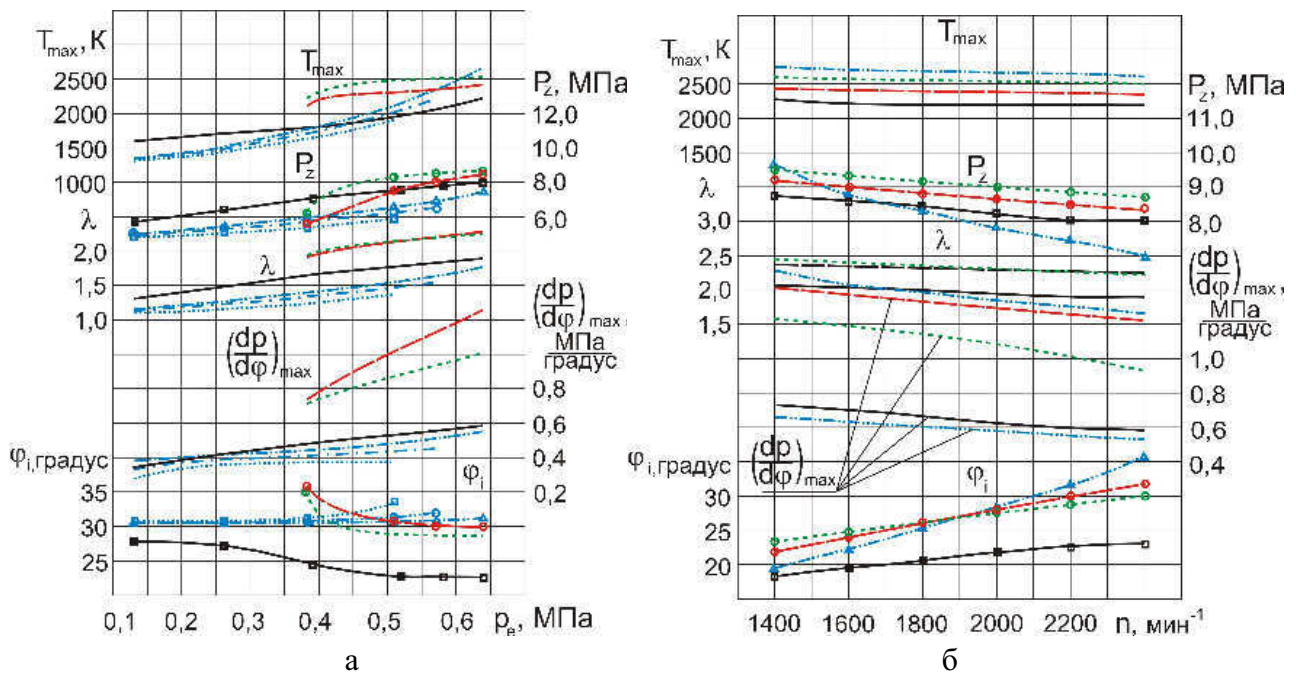


Рисунок 13 – Зависимости показателей процесса сгорания дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на рекомендуемых конструктивных и регулировочных параметрах и составах топлива при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  от изменения: а – нагрузки при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ; б – частоты вращения; — ДП; - - - ГД с РОГ 20%; - · - · ГД с РОГ 30%; · · · · ГД с РОГ 40%; - - - ЭТЭ; - · - · МТЭ

В шестой главе представлены результаты исследований тепловыделения и содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ.

Анализ графиков динамики тепловыделения (рисунок 14) показывает, что максимальные объемное содержание  $r_{NO_x, max}$  и массовая концентрация  $c_{NO_x, max}$  оксидов азота в ЦД соответствуют изменениям осредненной температуры цикла  $T$ : вследствие ведущей роли температуры в этом процессе и цикличности самого процесса следуют сразу за ее максимальным значением  $T_{max}$  и существенно превышают свои значения в момент открытия выпускного клапана ( $\phi_b = 124^\circ$ ). Так, при работе по ГДП с 20%-ной РОГ максимальное значение объемного содержания оксидов азота  $r_{NO_x, max}$  в ЦД составляет 1600 ppm, максимальная массовая концентрация  $c_{NO_x, max} = 2,26 \text{ г/м}^3$ . Объемное содержание оксидов азота в цилиндре при  $\phi_b = 124^\circ$  составляет 810 ppm, что на 49,4% ниже максимального значения.

При работе дизеля на МТЭ  $r_{NO_x, max}$  составляет 1200 ppm,  $c_{NO_x, max} = 1,73 \text{ г/м}^3$ . Объемное содержание оксидов азота  $r_{NO_x, \phi_b} = 840 \text{ ppm}$  при  $\phi_b$ , что на 30% ниже максимального значения. При работе на ЭТЭ  $r_{NO_x, max}$  составляет 950 ppm, максимальная массовая концентрация  $c_{NO_x, max} = 1,37 \text{ г/м}^3$ . Объемное содержание  $r_{NO_x, \phi_b}$  при  $\phi_b$  составляет 710 ppm, что на 25,3% ниже максимального значения. Следовательно, с уменьшением температуры происходит снижение эмиссии оксидов



азота в основном по механизму Я.Б. Зельдовича. Применение ПГ с РОГ увеличивает период задержки воспламенения, что приводит к смещению максимальных значений оксидов азота вправо от в.м.т. в область меньших температур, что позволяет снизить не только максимальные значения, но и значения во всем диапазоне исследования углов п.к.в.

Сравнение кривых полного выделения теплоты  $\chi$  и активного тепловыделения  $\chi_i$  позволяет заключить, что сгорание ПГ с РОГ и СТЭ начинается позднее, чем дизельного топлива, затем ускоряется и далее выравнивается. Так, ускорение хорошо заметно при значении угла п.к.в., соответствующего максимальной температуре цикла штатного дизеля ( $\varphi_{T_{max}} = 10,5^\circ$ ), при работе по ДП доля активного тепловыделения  $\chi_i$  от общего количества выделившейся теплоты  $\chi$  составляет 0,91; для ГДП с 20%-ной РОГ - 0,93; при работе на МТЭ - 0,97; при работе на ЭТЭ - 0,99.

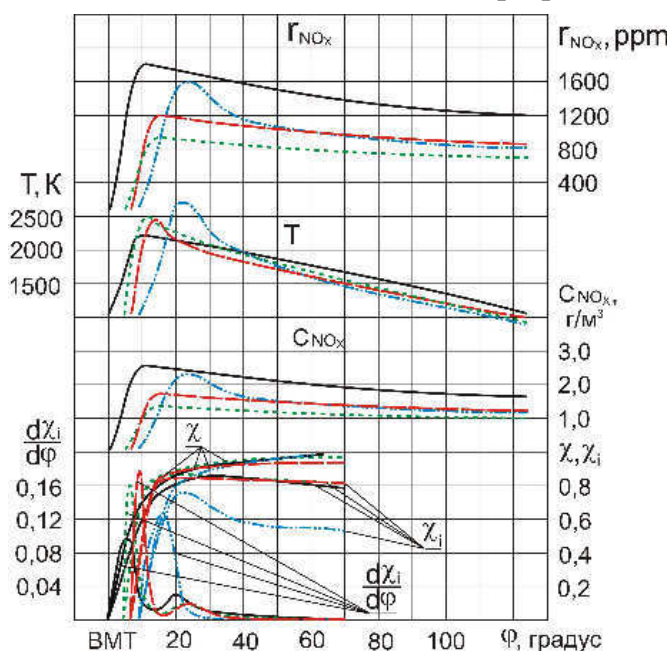


Рисунок 14 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации  $NO_x$  в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на рекомендуемых конструктивных и регулировочных параметрах и составах топлива при  $\Theta_{впр} = 23^\circ$  и  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  в зависимости от изменения угла п.к.в.:  
 — ДП; - - - ГД с РОГ 20%;  
 ···· ЭТЭ; - · - МТЭ

поршнем и головкой ЦД образуется зазор, в который засасывается рабочий заряд из КС.

Из графиков, приведенных на рисунке 15, видно, что максимальное объемное содержание оксидов азота  $\gamma_{NO_x, max}$  возрастает с увеличением  $\Theta_{впр}$ . При сравнении с ДП видно, что применение ПГ значительно увеличивает максимальное содержание оксидов азота  $\gamma_{NO_x, max}$  в ЦД. Организация РОГ позволяет устранить этот недостаток и

При дальнейшем увеличении угла п.к.в. доля активного тепловыделения  $\chi_i$  от общего количества выделившейся теплоты  $\chi$  уменьшается и при значении угла п.к.в.  $\varphi = 60^\circ$  после в.м.т. при работе по ДП составляет 0,82; для ГДП с 20%-ной РОГ - 0,58; при работе на МТЭ - 0,87; при работе на ЭТЭ - 0,85.

Применение РОГ хотя и вызывает уменьшение активного тепловыделения  $\chi_i$ , но приводит к «надежному» снижению возросших в результате применения ПГ  $NO_x$ . Также необходимо отметить, что наличие второго максимума на кривых скорости активного выделения тепла  $d\chi_i/d\varphi$ , при работе как по ДП, так и на СТЭ объясняется дополнительной турбулизацией рабочего заряда в камере сгорания дизеля в момент перемещения поршня от в.м.т. к н.м.т. Между

снизить содержание оксидов азота. Так, применение 20%-ной РОГ в диапазоне изменения  $\Theta_{впр}$  от 17 до 26° приводит к снижению объемного содержания оксидов азота  $r_{NO_x, max}$  с 35,0 до 28,9%. При работе по ДП, ГДП и ГДП с РОГ значения угла при максимальной температуре цикла  $\Phi_{T_{max}}$  и скорости активного тепловыделения  $d\chi_i/d\phi$  с увеличением  $\Theta_{впр}$  возрастают, а при работе на СТЭ – снижаются. Значения активных тепловыделений, соответствующих максимальной температуре цикла  $\chi_{i, Pz}$  и максимальному давлению,  $\chi_{i, P_{max}}$  повышаются во всем диапазоне изменения  $\Theta_{впр}$  при работе на всех исследуемых топливах.

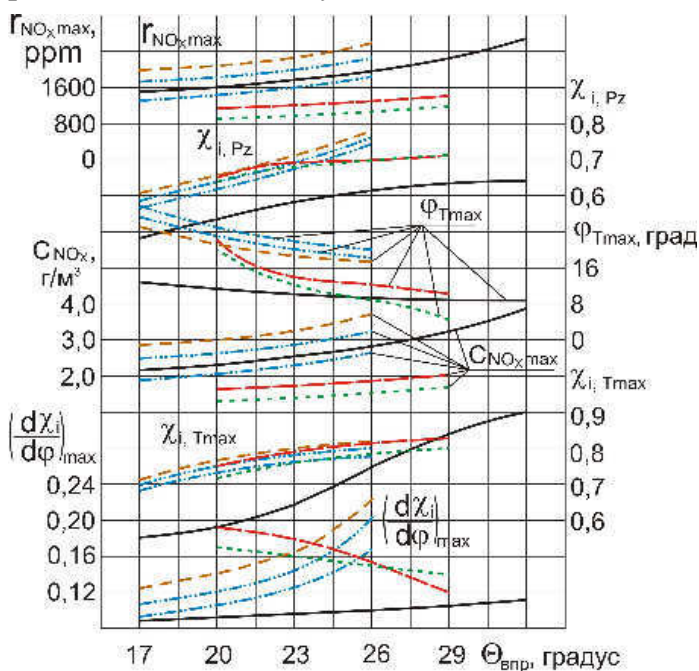


Рисунок 15 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации  $NO_x$  в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  в зависимости от изменения установочного  $\Theta_{впр}$ : — ДП; — — — ГДП; ····· ГД с РОГ 10%; - ····· ГД с РОГ 20%; - - - ЭТЭ; ····· МТЭ

указанного диапазона  $\Theta_{впр}$  изменяется от 0,61 до 0,78, что выше ДП на этом же режиме на 27,1 и 25,8% соответственно. Оценивая значения скорости активного тепловыделения  $d\chi_i/d\phi$  при работе дизеля на по ГДП с РОГ в диапазоне  $\Theta_{впр}$  от 17 до 26°, можно отметить, что применение 10%-ной РОГ приводит к снижению значений  $d\chi_i/d\phi$  с 14,4 до 8,9%, а 20%-ной РОГ – к уменьшению  $d\chi_i/d\phi$  с 25,6 до 24,4% по отношению к ГДП. При работе дизеля на МТЭ в диапазоне  $\Theta_{впр}$  от 20 до

Применение ПГ приводит к увеличению угла при максимальной температуре цикла  $\Phi_{T_{max}}$ , активных тепловыделений, соответствующих максимальной температуре цикла  $\chi_{i, T_{max}}$  и максимальному давлению,  $\chi_{i, P_{max}}$  и скорости активного тепловыделения  $d\chi_i/d\phi$ , а осуществление РОГ – к еще большему увеличению  $\Phi_{T_{max}}$ , но зато к снижению скорости активного тепловыделения  $d\chi_i/d\phi$ , а так же  $\chi_{i, T_{max}}$  и  $\chi_{i, P_{max}}$ . Так, при работе по ГДП в диапазоне  $\Theta_{впр}$  от 17 до 26° величина активного тепловыделения, соответствующего максимальной температуре цикла,  $\chi_{i, T_{max}}$  изменяется от 0,71 до 0,82, что выше ДП на этом же режиме на 29,1 и 9,3% соответственно. Значение  $\chi_{i, P_{max}}$  для

29°  $\Phi_{T_{\max}}$  снижается с 22,0° при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  до 10,0° при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ , что ниже ДП от 31,3 до 73,7%.

При работе на МТЭ происходит и снижение скорости активного выделения тепла  $d\chi_i/d\phi$ . Так, применение МТЭ приводит к снижению  $d\chi_i/d\phi$  с 0,19 при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  до 0,12 при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ , что, в свою очередь, выше ДП с 2,1 раза до 14,3%. Величина активного тепловыделения, соответствующая максимальной температуре цикла,  $\chi_{i, T_{\max}}$  с применением МТЭ растет с 0,75 при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  до 0,83 при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ , что на 29,3% выше при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  и на 1,2% ниже при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$  работы по ДП.

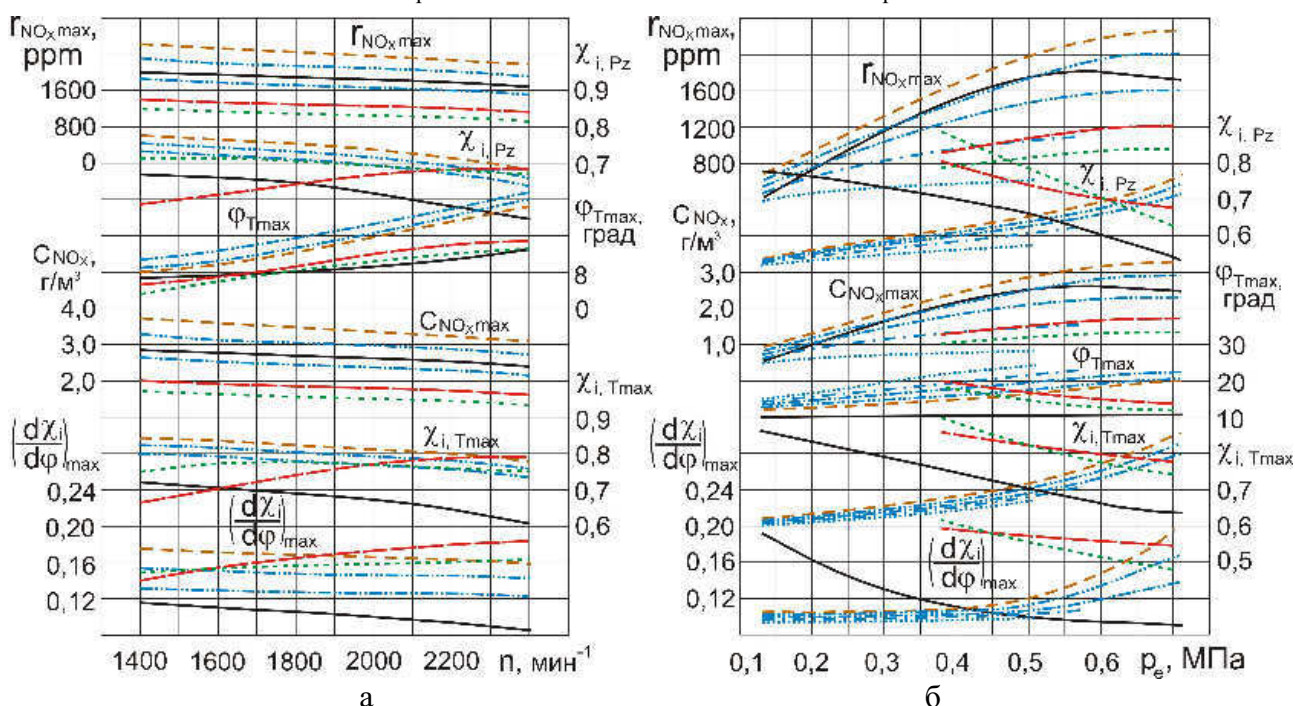


Рисунок 16 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при  $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$

в зависимости от изменения: а – частоты вращения; б – нагрузки при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ;

— ДП; - - - ГДП; ..... ГД с РОГ 10%; - · - · - ГД с РОГ 20%;  
 - - - - ГД с РОГ 30%; ······ ГД с РОГ 40%; ..... ЭТЭ; - · - · - МТЭ

Значение  $\chi_{i, P_{\max}}$  с применением МТЭ увеличивается с 0,65 при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  до 0,71 при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ , что выше ДП на 20,4 и 12,7% соответственно. При работе дизеля на ЭТЭ  $\Phi_{T_{\max}}$  снижается с 20,0° при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  до 5,0° при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ , что ниже ДП от 37,5% до 7,6 раза.

При работе на ЭТЭ происходит и снижение скорости активного выделения тепла  $d\chi_i/d\phi$ . Так, применение в дизеле ЭТЭ приводит к снижению  $d\chi_i/d\phi$  с 0,17 при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  до 0,14 при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ , что, в свою очередь, выше ДП с 88,9 до 33,3%. Величина активного тепловыделения, соответствующая максимальной температуре цикла,  $\chi_{i, T_{\max}}$  с применением ЭТЭ растет с 0,72 при  $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$  до 0,80 при  $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ ,

что на 24,1% выше при  $\Theta_{\text{впр}}=20^\circ$  и на 4,8% ниже при  $\Theta_{\text{впр}}=29^\circ$  работы ДП. Значение  $\chi_{i \text{ p}_{\text{max}}}$  с применением ЭТЭ увеличивается с 0,64 при  $\Theta_{\text{впр}}=20^\circ$  до 0,71 при  $\Theta_{\text{впр}}=29^\circ$ , что выше ДП на 18,5 и 12,7% соответственно.

Рассматривая объемное содержание, массовую концентрацию оксидов азота и характеристики тепловыделения в зависимости от изменения нагрузки (рисунок 16), необходимо отметить, что отсутствие значений показателей тепловыделения и  $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ max}}$  при среднем эффективном давлении  $p_e < 0,38$  МПа связано с нестабильностью горения и пропусками воспламенения.

**В седьмой главе** представлена оценка интегральной токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации.

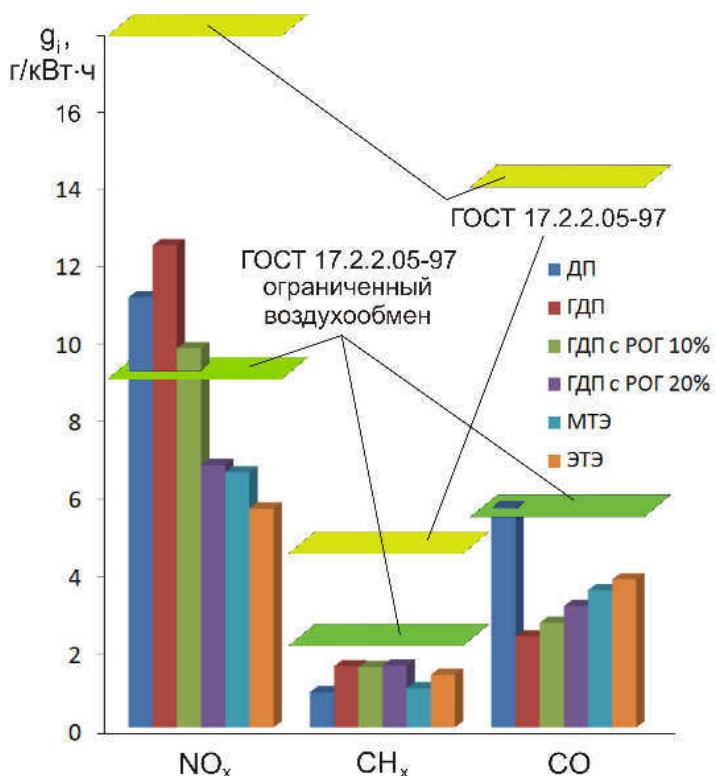


Рисунок 17 – Диаграмма удельных показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97

Таблица 4 – Результаты исследований токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97

Топливо	Удельные выбросы, г/кВт·ч		
	$g_{\text{NO}_x}$	$g_{\text{CH}_x}$	$g_{\text{CO}}$
Дизельное	11,10	0,91	5,68
ПГ	12,44	1,58	2,35
ПГ с РОГ 10%	9,78	1,56	2,70
ПГ с РОГ 20%	6,77	1,60	3,13
МТЭ	6,58	1,01	3,54
ЭТЭ	5,65	1,36	3,82

Результаты исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 сведены в таблицу 4.

Графическое изображение результатов исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 представлено в виде диаграммы на рисунке 17. Анализ графика удельных показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, представленного в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97, показывает, что при работе его на всех исследуемых альтернативных видах топлива (ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) происходит выброс вредных веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_x$  и  $\text{CO}$ ) в значениях, не превышающих требования рассматриваемого ГОСТа.

Кроме того, указанный дизель по значениям выбросов вредных веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_x$  и  $\text{CO}$ ) соответствует также и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

Таблица 5 – Результаты исследований токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии со стандартом ISO-8174-4

Топливо	Удельные выбросы, г/кВт·ч			
	$\xi_{NO_x}$	$\xi_{CH_x}$	$\xi_{CO}$	$\xi_{TЧ}$
Дизельное	11,68	0,86	5,94	0,620
ПГ	12,89	1,49	2,53	0,078
ПГ с РОГ 10%	10,02	1,47	2,92	0,089
ПГ с РОГ 20%	6,87	1,50	3,39	0,100
МТЭ	6,79	0,95	3,65	0,077
ЭТЭ	5,88	1,29	3,97	0,112

показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, представленного в соответствии со стандартом ISO-8174-4, показывает, что при работе его на МТЭ и ЭТЭ происходит выброс вредных веществ ( $NO_x$ ,  $CH_x$ ,  $CO$  и  $TЧ$ ) в значениях, не превышающих Правила ЕЭК ООН №96.

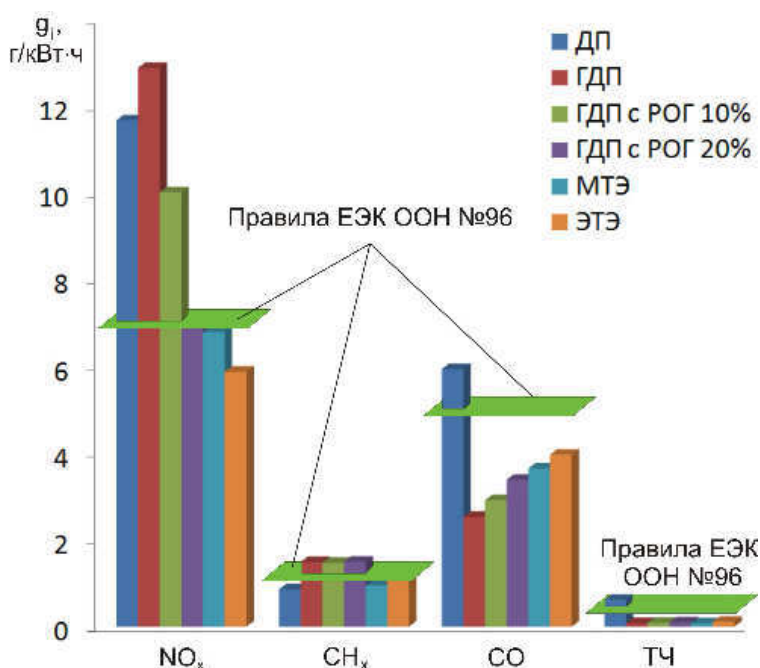


Рисунок 18 – Диаграмма удельных показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии со стандартом ISO-8174-4

на ПГ) требованиям Правил ЕЭК ООН №96. Результаты исследований дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, сведены в таблицу 6. Графическое изображение результатов исследований дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, и соответствие их требованиям ГОСТ ГОСТ 17.2.2.02-98 представлено в виде диаграммы на рисунке 19.

Анализ диаграммы дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, представленной в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98, показывает, что при работе его на всех

Результаты исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, в соответствии со стандартом ISO-8174-4 сведены в таблицу 5. Графическое изображение результатов исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, по стандарту ISO-8174-4 и соответствие их Правилам ЕЭК ООН №96 представлено в виде диаграммы на рисунке 18.

Анализ графика удельных

При работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ значения удельных выбросов вредных веществ для  $NO_x$ ,  $CO$  и  $TЧ$  соответствуют Правилам, но при этом отмечено незначительное превышение по суммарным углеводородам  $CH_x$ . Следовательно, дизель 4Ч 11,0/12,5, работающий на ПГ и СТЭ и используемый на внедорожном транспорте, сельскохозяйственных и лесных тракторах, самоходных сельскохозяйственных машинах, дорожно-строительных машинах и на другой промышленной технике, можно также считать соответствующим (кроме  $CH_x$  при работе

исследуемых альтернативных видах топлива (ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) дымность ОГ не превышает нормативы рассматриваемого ГОСТа.

Таблица 6 – Результаты исследований дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98

Топливо	Дымность ОГ, %
Дизельное	45,1
ПГ	5,2
ПГ с РОГ 10%	6,0
ПГ с РОГ 20%	7,3
МТЭ	5,3
ЭТЭ	8,7

Кроме того, указанный дизель по значениям дымности ОГ соответствует также и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.02-98 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин при работе его на ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ.

Кроме того, указанный дизель по значениям дымности ОГ соответствует также и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.02-98 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин при работе его на ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ.



Рисунок 19 – Диаграмма дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования и рекомендации.** Представленные теоретические положения и результаты экспериментальных исследований новых научно обоснованных технических и технологических перспективных решений по улучшению экологических показателей автотракторного дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ и экономии нефтяного моторного топлива путем разработки теоретических основ процесса образования оксидов азота и их снижения, изменения конструктивных и регулировочных параметров при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, позволили получить ряд новых результатов и сделать следующие выводы и рекомендации:

1. В результате рассмотрения современного состояния проблемы токсичности, способов снижения содержания оксидов азота, механизмов их образования, проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований дано перспективное решение улучшения экологических показателей дизелей путем применения природного газа и спирто-топливных эмульсий.

2. На основании исследования закономерностей формирования оксидов азота предложены механизмы их химических процессов образования при работе дизелей на природном газе, метанолю- и этанолю-топливных эмульсиях, и разработана математическая модель, позволяющая рассчитать объемное содержание оксидов азота в широком диапазоне режимов работы дизелей на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, что допускает без дорогостоящих экспериментальных исследований оценить влияние альтернативных топлив на их экологические характеристики.

3. Представлены результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на дизельном топливе, природном газе, природном газе с различными степенями рециркуляции, метанолю- и этанолю-топливных эмульсиях. При этом расхождения между теоретическими и экспериментальными данными не превышают 10%, что положительно характеризует верификацию сочетания выполненных, по разработанной модели, теоретических и экспериментальных данных.

4. Для снижения содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ на основании полученных результатов исследования предложены рекомендации по поддержанию следующих соотношений компонентов альтернативных топлив: газа – 80%, запальной порции дизельного топлива – 20% (при работе на природном газе); спирт (метанол или этанол) – 25%, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5%, вода – 7%, дизельное топливо – 67,5% (при работе на смеси со спиртами). При работе на природном газе с рециркуляцией установлена закономерность подачи рециркулируемых газов от 20 до 40% в зависимости от режима работы дизеля. Рекомендовано значение оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива равное 23 градусам. При этом установлена возможность сохранения мощностных показателей на уровне серийного дизеля.

5. Определены оптимальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ при работе дизеля на природном газе и спирто-топливных эмульсиях. Перевод указанного дизеля с нефтяного топлива на альтернативное позволил снизить содержание в отработавших газах при работе на природном газе с 20%-ной рециркуляцией (рециркуляция была применена для ликвидации возросших в результате использования природного газа оксидов азота) оксидов азота на 43,2%, сажи в 5,6 раза, диоксида углерода на 33,3%, оксида углерода на 10,0%; при работе на метанолю-топливной эмульсии – оксидов азота на 41,3%, сажи в 6,9 раза, диоксида углерода на 6,7%, оксида углерода на 45,0%;

при работе на этанола-топливной эмульсии – оксидов азота на 50,2%, сажи в 5,2 раза, диоксида углерода на 23,8%, оксида углерода на 25,0%.

6. Осуществлена оценка интегральной токсичности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, в условиях его эксплуатации в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97. При этом значения удельных показателей токсичности отработавших газов дизеля ( $g_{NO_x}$ ,  $g_{CH_x}$ ,  $g_{CO}$ ) не превышают требования рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель также соответствует и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

7. Осуществлена оценка интегральной токсичности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, в условиях его эксплуатации в соответствии со стандартом ISO-8174-4. При работе дизеля на спирто-топливных эмульсиях значения удельных показателей токсичности отработавших газов ( $g_{NO_x}$ ,  $g_{CH_x}$ ,  $g_{CO}$  и  $g_{TЧ}$ ) не превышают требования Правила ЕЭК ООН №96. При работе дизеля на природном газе с рециркуляцией значения удельных показателей токсичности отработавших газов ( $g_{NO_x}$ ,  $g_{CO}$  и  $g_{TЧ}$ ) не превышают требования Правила ЕЭК ООН №96. Следовательно, дизель 4Ч 11,0/12,5, работающий на природном газе и спирто-топливных эмульсиях и используемый на внедорожном транспорте, сельскохозяйственных и лесных тракторах, самоходных сельскохозяйственных машинах, дорожно-строительных машинах и на другой промышленной технике, соответствует (кроме  $CH_x$  при работе на ПГ) требованиям Правил ЕЭК ООН №96.

8. Осуществлена оценка интегральной дымности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, в условиях его эксплуатации в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98. При этом значения удельных показатели дымности отработавших газов дизеля не превышают требования рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель по дымности отработавших газов также соответствует и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.02-98 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

9. Результаты исследований рассмотрены:

- Министерством сельского хозяйства и продовольствия Кировской области и рекомендованы к внедрению в предприятиях, занимающихся производством и переработкой продукции сельского хозяйства;

- ООО «Газпром межрегионгаз Киров» и рекомендованы для использования при переводе техники для работы на природном газе;

- ОАО «КировПассажирАвтотранс» для использования в производстве при переводе действующего автотранспортного парка для работы на природном газе.



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

11. По результатам проведенных исследований на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА создан макетный образец трактора МТЗ-80, переоборудованный для работы ПГ и СТЭ, который при работе на ЭТЭ прошел эксплуатационные испытания в ЗАО племзавод «Октябрьский» Кировской области.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы:**

- дальнейшие исследования физико-химических процессов образования и методик расчета других токсичных компонентов при работе дизелей на природном газе и спирто-топливных эмульсиях;

- исследования применения дополнительных мероприятий (теоретических и экспериментальных), направленных на модернизацию рабочих процессов широкого спектра дизелей, с целью полного (100%), либо максимально близкого к полному замещению нефтяного топлива альтернативным (природный газ, метиловый, этиловый спирты и др. альтернативные топлива).

### **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Результаты диссертации отражены в 370 публикациях, основные из которых следующие.

#### **Монографии:**

1. Лопатин, О.П. Образование и нейтрализация оксидов азота в цилиндре газодизеля [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин - Киров: Вятская ГСХА, 2004. -106 с. (6,63 п.л. / 3,31 п.л.).

2. Исследование рабочих процессов в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5 [Текст]: монография / В.А. Лиханов, Р.Р. Деветьяров, О.П. Лопатин [и др.]. – Киров: Вятская ГСХА, 2004. – 330 с. (20,63 п.л. / 10,31 п.л.).

3. Лопатин, О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизелей путем применения альтернативных видов топлива [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин. – Киров: Вятская ГСХА, 2009. – 500 с. (31,25 п.л. / 15,63 п.л.).

4. Лопатин, О.П. Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения оксидов азота в дизеле [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин; под общ. ред. акад. РАТ, докт. техн. наук, проф. В.А. Лиханова. - Киров: Вятская ГСХА, 2017. – 408 с. (25,50 п.л. / 12,75 п.л.).

5. Лопатин, О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их

основе в дизельных двигателях [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин. - Киров: Вятская ГСХА, 2018. – 395 с. (24,69 п.л. / 12,34 п.л.).

**Статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science:**

6. Lopatin, O.P. Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Thermal Engineering. - 2017. - Vol.64. - №12. - P.935 - 944 (0,63 п.л. / 0,31 п.л.).

7. Lopatin, O.P. The Study of the Process of Combustion of the Alcohol-Fuel Emulsions and Natural Gas in a Diesel Engine [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // International Journal of Applied Engineering Research. - 2018. - V.13. - №3. - P.1703-1709 (0,44 п.л. / 0,22 п.л.).

8. Lopatin, O.P. Study of Loading Regimes of Diesel Engines Operating on Natural Gas [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // International Journal of Applied Engineering Research. - 2018. - V.13. - №5. - P.2936-2939 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

9. Lopatin, O.P. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas [Text] / V. Romanyuk, V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Теоретическая и прикладная экология. - 2018. - №3. - С.27-32 (0,38 п.л. / 0,13 п.л.).

10. Лопатин, О.П. Снижение токсичности отработавших газов автомобильного дизеля конвертацией на спирто-топливные эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Экология и промышленность России. - 2018. – Т.22. - №10. - С.54-59 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

11. Lopatin, O.P. Investigation of the speed regime of tractor diesel engine running on natural gas with recirculation [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // VII International Conference «Modern Technologies for Non-Destructive Testing». IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 457 (2018) 012011 (0,44 п.л. / 0,22 п.л.).

12. Лопатин, О.П. Оценка интегральной токсичности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе и спиртовых эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Экология и промышленность России. - 2019. – Т.23. - №9. - С.60-65 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

13. Lopatin, O.P. Alternative energy: methanol, ethanol and alcohol esters of rapeseed oil as eco-friendly biofuel [Text] / A. Marchuk, V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Теоретическая и прикладная экология. - 2019. - №3. - С.80-86 (0,44 п.л. / 0,15 п.л.).

14. Lopatin, O.P. Research of high-speed diesel engines of small dimension on biofuel [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Journal of Physics: Conference Series 1399 (2019) 055016 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

15. Lopatin, O.P. Improving the environmental performance of a natural gas and exhaust gas recirculation [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Journal of Physics: Conference Series 1399 (2019) 055020 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

16. Lopatin, O.P. Study of the effective performance of the diesel engine when working on methanol and methyl ether rapeseed oil [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin, A.S. Yurlov // Journal of Physics: Conference Series 1399 (2019) 055026 (0,31 п.л. / 0,11 п.л.).

**Статьи в отечественных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

17. Лопатин, О.П. Использование спиртов и топлив на их основе для дизелей [Текст] / О.П. Лопатин, В.А. Лиханов // Автомобильная промышленность. - 2019. - № 4. - С. 27–31 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

18. Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей мобильных теплоэнергетических установок при работе на альтернативных топливах [Текст] / Ю.С. Васильев, В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Вестник машиностроения - 2019. - №9. - С.80-84 (0,31 п.л. / 0,11 п.л.).

**Статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

19. Особенности химизма и феноменологии образования оксидов азота в цилиндре дизеля при работе на природном газе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, М.А. Олейник, В.Н. Дубинецкий // Тракторы и сельхозмашины. - 2006. - № 11. - С 13-16 (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).

20. Лопатин, О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля путем их рециркуляции [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, Е.А. Шишканов // Тракторы и сельхозмашины. - 2007. - № 9. - С. 8-9 (0,13 п.л. / 0,04 п.л.).

21. Лопатин, О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2012. - № 4 (28). - С. 70-73 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

22. Лопатин, О.П. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля Д-240 путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Научно-практический журнал Пермский аграрный вестник. - 2013. - № 1 (1). - С. 29-32 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

23. Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизеля путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2013. - № 2. - С. 6-7 (0,13 п.л. / 0,06 п.л.).

24. Лопатин, О.П. Улучшение эксплуатационных показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Известия Международной академии аграрного образования. - 2013. - Т.4. - №16. - С. 170-173 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

25. Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения природного газа и рециркуляции [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2014. - №4 (40). - С. 21-25 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

26. Лопатин, О.П. Применение природного газа и рециркуляции на тракторном

дизеле 4Ч 11,0/12,5 [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2014. - №6. - С. 7-9 (0,19 п.л. / 0,09 п.л.).

27. Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей тракторного дизеля путем применения природного газа и рециркуляции отработавших газов, метано- и этано-топливных эмульсий [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 3. - С. 3-6 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

28. Лопатин, О.П. Влияние применения природного газа и рециркуляции отработавших газов, метано- и этано-топливных эмульсий на содержание токсичных компонентов в ОГ [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2015. - №4 (46). - С. 42-47 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

29. Лопатин, О.П. Улучшение эффективных показателей тракторного дизеля путем применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов, метано- и этано-топливных эмульсий [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 7. - С. 12-15 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

30. Лопатин, О.П. Исследование показателей процесса сгорания в тракторном дизеле при применении природного газа и рециркуляции, метано- и этано-топливных эмульсий [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - №9. - С. 3-5 (0,19 п.л. / 0,09 п.л.).

31. Лопатин, О.П. Трактор с комплексной системой снижения токсичности [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2016. - №3. - С. 10-15 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

32. Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизеля при работе на природном газе с рециркуляцией [Электронный ресурс] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2016. - № 4 (52). - С. 9 (0,63 п.л. / 0,31 п.л.).

33. Лопатин, О.П. Исследование нагрузочных характеристик токсичности дизелей семейства ММЗ при работе на природном газе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2016. - №6. - С. 16-21 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

34. Лопатин, О.П. Моделирование эмиссии оксидов азота в цилиндре тракторного газодизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - №7. - С. 3-8 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

35. Сгорание и тепловыделение в цилиндре тракторного дизеля при работе на метано-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, С.А. Романов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - №11. - С. 14-19 (0,38 п.л. / 0,13 п.л.).

36. Лопатин, О.П. Исследование скоростного режима дизелей семейства ММЗ при работе на природном газе [Электронный ресурс] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2017. - №1 (61). - С. 12 (0,63 п.л. / 0,31 п.л.).

37. Моделирование процессов испарения и смесеобразования в цилиндре тракторного дизеля при работе на этано-топливной эмульсии [Текст] / В.А.

Лиханов, О.П. Лопатин, А.И. Чупраков [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ». - 2017. - № 1 (31). – С. 23-27 (0,31 п.л. / 0,10 п.л.).

38. Лопатин, О.П. Исследование нагрузочных режимов тракторного дизеля при работе на спиртовой эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.И. Чупраков // Строительные и дорожные машины. - 2017. - №2. - С. 39-43 (0,31 п.л. / 0,10 п.л.).

39. Лопатин, О.П. Рабочий процесс дизеля на природном газе с рециркуляцией [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Вестник транспорта Поволжья.- 2017.- №2 (62). – С. 105-112 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

40. Лопатин О.П. Исследование динамики процесса сгорания в цилиндре тракторного газодизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. 2017. №3. С. 45-49 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

41. Лопатин, О.П. Исследование процесса сгорания в тракторном дизеле, работающем на этанолю-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2017. - №5. - С. 11-18 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

42. Лопатин, О.П. Индицирование рабочего процесса тракторного дизеля на природном газе и спиртах [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2018. - №4. - С. 18-25 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

43. Лопатин, О.П. Экологичное топливо на основе спирта для тракторных дизелей [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2018. - №7. - С.25-29 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

44. Лопатин, О.П. Индицирование рабочего процесса дизеля на спирто-топливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2018. - №8. - С.42-47 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

45. Лопатин, О.П. Образование токсичных компонентов и процесс сгорания в тракторных дизелях при работе на биотопливе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2018. - №9. - С.46-50 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

46. Лопатин, О.П. Исследование токсичности дизелей, работающих на биотопливах на основе метилового спирта [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Известия МГТУ «МАМИ». - 2018. - №3 (37). - С.51-57 (0,44 п.л. / 0,22 п.л.).

47. Лопатин, О.П. Исследование скоростных режимов работы тракторного дизеля на спирто-топливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2018. - №5. - С.15-19 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

48. Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизельных двигателей применением биотоплива [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Двигателестроение. - 2018. - №4 (274). - С.13-17 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

49. Лопатин, О.П. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.Н. Козлов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2019. - Т. 25. - № 1. - С. 47–59 (0,81 п.л. / 0,27 п.л.).

50. Лопатин, О.П. Исследование токсичности биодизельного двигателя, работающего на спирте [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2019. - Т. 25. - №1. - С. 92–

100 (0,56 п.л. / 0,28 п.л.).

51. Лопатин, О.П. Тепловыделение в тракторных дизелях, работающих на биотопливе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2019. - №2. - С.3-9 (0,44 п.л. / 0,22 п.л.).

52. Лопатин, О.П. Сгорание и тепловыделение в дизеле, работающем на смесевом спиртовом топливе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Двигателестроение. - 2019. - № 2. - С. 26-31 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

**Патенты:**

53. Система регулирования газодизеля [Текст]: пат. 2257482 Рос. Федерация: МПК7 F02D 19/08 / Лиханов В.А., Шишканов Е.А., Деветьяров Р.Р., Вылегжанин П.Н., Лопатин О.П.; заявл. 01.04.2003; опубл. 20.10.2004, Бюл. №21.

54. Устройство для регулирования перепуска отработавших газов во впускной трубопровод двигателя внутреннего сгорания [Текст]: пат. 2260706 Рос. Федерация: МПК7 F02M 25/06 / F02D 21/08, 23/02 / Лиханов В.А., Лопатин О.П.; заявл. 05.04.2004; опубл. 20.09.2005, Бюл. №26.

Заказ № 355. Подписано к печати 17.12.2019 г.

Формат 60x84 1/16. Объем усл. печ. л. 2,0 Тираж 100 экз.

Бумага офсетная. Цена договорная. Отпечатано с оригинал-макета.

610017, Киров, Октябрьский проспект, 133.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2019 г.