

На правах рукописи

Нормуродов Акбаржон Анварович

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОТОПЛИВ  
НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ  
В АВТОМОБИЛЬНОМ ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Специальность 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва - 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

**Марков Владимир Анатольевич,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой комбинированных двигателей и альтернативных энергостановок МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

**Дунин Андрей Юрьевич,**  
доктор технических наук, доцент кафедры теплотехники и автотракторных двигателей ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

**Кульчицкий Алексей Рэмович,**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, заслуженный машиностроитель РФ, специалист по сертификации ООО «Оружейные Мастерские», Владимирская обл., г. Камешково

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет»

Защита диссертации состоится «18» июня 2024 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.17 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.17.

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.т.н.

Харитонов С.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность диссертационной работы** обусловлена необходимостью применения топлив из возобновляемого сырья с целью замещения нефтяных топлив и снижения токсичности отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей. Решение указанных проблем достигается применением топлив с добавлением растительного масла в формах смесей и эмульсий. Масла подсолнечника и рапса представляются наиболее перспективными для европейской части нашей страны. При рассмотрении возможности использования растительных масел в качестве моторного топлива важно отметить, что их физические и химические свойства отличаются свойствами нефтяного дизельного топлива. Компенсировать эти отличия отчасти можно, смешав растительное масло с нефтяным топливом. Обеспечение функционирование дизельного двигателя на топливах в форме эмульсии растительных масел со спиртом или водой является ещё одним важным способом применения биотоплив. Определить степень влияния свойств биотоплив с добавками растительных масел в формах смесей и эмульсий на показатели дизельного двигателя возможно путем проведения оптимизационных расчетно-экспериментальных исследований с целью поиска оптимального состава топлива, обеспечивающего лучшие экологические показатели двигателя. Результаты этих исследований позволяют обеспечить наибольшую эффективность использования растительных масел в форме смесевых и эмульгированных биотоплив для современных отечественных автомобильных дизельных двигателей.

**Цель работы:** достижение лучшей эффективности применения в качестве добавки в дизельное топливо (ДТ) масел из растительных сырьевых ресурсов в форме смесей и эмульсий в автомобильном дизельном двигателе.

**Методы исследований.** Применение теоретических методов исследований и экспериментов позволили достичь поставленной цели. Теоретическими расчетными методами выполнены исследования: течения топлива в распылителе, определения его параметров на выходе из распылителей форсунок, при работе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на нефтяном дизельном топливе, рапсовом масле (РМ) и эмульсии масла рапса с этиловым спиртом (ЭС). С использованием апробированных методов оптимизации определены оптимальные составы смесевых и эмульгированных топлив с добавками растительных масел. При этом были учтены такие показатели, как содержание в ОГ токсичных компонентов –  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH_x$  и т.д. Проведена оценка влияния состава смесевых и эмульгированных биотоплив с добавками растительных масел на нормируемые показатели токсичности ОГ дизеля. Экспериментальная часть диссертации была посвящена исследованию двигателя, работающего на нефтяном топливе с добавлением масла рапса.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработана методика подбора оптимального состава биотоплив в форме смесей и эмульсий, в основе которой лежит применение обобщенного критерия токсикологической значимости токсичных элементов (суммы содержания в ОГ

оксидов азота  $NO_x$  и их дымности  $K_x$  на двух основных режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ) – предельных мощности и крутящего момента);

- выполненные экспериментальные исследования дизельного двигателя показали, что на выбросы  $NO_x$  и дымность ОГ присутствие воды в многокомпонентном биотопливе на основе эмульсий оказывает заметно большее влияние, чем наличие в нем масла рапса;

- взаимосвязь дымности ОГ двигателя и массового содержания атомов кислорода в их молекулах при использовании биотоплив в форме смесей, подтверждена и выражена предложенкой аналитической зависимостью;

- на режимах ВСХ подтверждена взаимосвязь дымности ОГ двигателя с выбросами  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH_x$  при работе на биотопливах в форме смесей.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяются:

- применением современных программных комплексов для расчета показателей потока топлива в распылителе форсунки и использованием апробированных методов оптимизации состава смесевых и эмульгированных топлив с добавками растительных масел;

- сопоставлением полученных расчетов с данными проведенных автором экспериментов, а также с опубликованными экспериментальными данными.

**Практическая ценность** состоит в том, что:

- расчетные исследования течения топлива в распылителях позволили оценить кинетическую энергию турбулентности потока топлива на выходе из отверстия;

- сравнительные экспериментальные исследования двигателя, работающего на смесевых и эмульгированных биотопливах, подтвердили возможность улучшения его экологических показателей при использовании этих топлив;

- проведенные расчетные исследования позволили определить оптимальные составы смесевых и эмульгированных биотоплив с добавками РМ, обеспечивающие наилучшие экологические показатели двигателя;

- проведенная оценка возможностей снижения дымности ОГ путем введения биодобавок, получаемых из растительных масел, в нефтяное ДТ и предложенная аналитическая зависимость для описания взаимосвязи дымности ОГ и массового содержания атомов кислорода в молекулах исследуемых смесей позволили определить оптимальное значение этих биодобавок.

**Реализация результатов работы.** Работа выполнялась на кафедре комбинированных двигателей и альтернативных энергоустановок и в отделе ЭМ 2.1 НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана в соответствии с планами государственных бюджетных и хозяйствственно-договорных работ. Внедрение результатов выполненных в диссертационной работе исследований выполнено в ООО «Форант-Сервис» (г. Ногинск) и в «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов).

**Положения, выносимые на защиту:**

- расчетные результаты изучения показателей потока топлива в распылителе форсунок, полученные в программном комплексе (ПК) *Ansys Fluent* и расчетные результаты изучения потока топлива на выходе из распылителя форсунки;

- результаты экспериментов на дизеле при сравнении его работы на биотопливах в форме смесей или эмульсий, а также оценка влияния содержания масла

рапса и воды в многокомпонентном биотопливе в форме эмульсий на эмиссию  $NO_x$  и дымность ОГ;

- методика оптимизации состава биотоплив в форме смесей и эмульсий, основанная на обобщенном критерии значимости опасных компонентов ОГ с точки зрения их токсичности, и результаты исследований оптимального состава топлив в форме смесей и эмульсий, выполненные расчетным путем;
- результаты оценки возможностей снижения дымности ОГ путем введения биодобавок, получаемых из растительных масел, в нефтяное ДТ и полученная зависимость для описания взаимосвязи дымности ОГ и массового содержания атомов кислорода в молекулах исследуемых смесей.

**Личный вклад соискателя.** Теоретические разработки и экспериментальные исследования выполнены автором самостоятельно, они составили основу диссертации, методов и моделей, выносимых на защиту. Автор непосредственно принимал участие в проведении экспериментальных исследований дизельного двигателя, работающего на биотопливах в форме смесей и эмульсий. Автором разработаны методика расчета параметров течения топлива в проточной части распылителя и методика оптимизации состава биотоплив.

**Апробация работы:**

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

- на заседании кафедры комбинированных двигателей и альтернативных энергоустановок МГТУ имени Н.Э. Баумана (Москва, 2023 г.);
- на международной НТК «Луканинские чтения - 10. Проблемы и перспективы развития АТК» (Москва, МАДИ (ГТУ), 2023 г.);
- на заседаниях Всероссийской научно-технической конференции (ВНТК) им. профессор В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок при кафедре теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2020-2023 г.г.).

**Публикации.** По изучаемой в диссертации теме опубликовано 12 статей. Из них 7 – в журналах, рецензируемых ВАК РФ. Общий объем опубликованных работ – 1,3 п.л. По теме диссертации опубликовано 6 материалов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы 125 страниц, 106 страниц основного текста, 28 рисунков и 15 таблиц. Список литературы состоит из 153 источников информации, приведенных на 17 страницах. Информация о внедрении результатов работы размещена в Приложении на двух страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работ, посвященных анализу эффективности использования биотоплив в форме смесей и эмульсий в автомобильных дизельных двигателях, дана общая характеристика работы.

**В первой главе** рассмотрены средства и методы улучшения экологических показателей дизельных двигателей. Показано, что эффективное средство улучшения показателей - это использование биотоплив – смесей ДТ и растительных

масел. Показаны возможности улучшения экологических показателей двигателей путем применения водотопливных эмульсий. Проведен обзор работ, посвященных использованию смесевых и эмульгированных топлив. Перспективность работ по повышение эффективности использования этих топлив подтверждена отечественными учеными в трудах Л.В. Грехова, В.И. Ерохова, А.В. Козлова, В.А. Лиханова, В.Н. Ложкина, В.А. Маркова, С.А. Нагорнова, Н.Н. Патрахальцева, С.Н. Девянина, Г.С. Савельева, М.Г. Шатрова и ряда других. Проанализировав проблему, сформулированы цель и задачи исследования:

1. Выполнение расчетных исследований показателей потока топлива в проточной части распылителей при работе на биотопливах в форме смесей и эмульсий с добавками РМ.
2. Проведение сравнительных экспериментальных исследований двигателя, работающего на топливах в форме смесей и эмульсий.
3. Сравнительный анализ экологичности работы дизеля при использовании топлив в форме смесей и эмульсий с РМ.
4. Разработка методики выбора оптимального состава биотоплив в форме смесей и эмульсий, принимая во внимание экологические показатели ОГ.
5. Оценка возможностей снижения дымности ОГ путем введения биодобавок, получаемых из растительных масел, в нефтяное ДТ.
6. Подтверждение взаимосвязи дымности ОГ двигателя, работающего на смесях биотоплив, и массового содержания атомов кислорода в молекулах этих топлив и определение зависимости для описания этой взаимосвязи.
7. Подтверждение взаимосвязи дымности ОГ при работе на биотопливах в форме смесей на режимах ВСХ с эмиссией  $NO_x$ ,  $CO$  и  $CH_x$ .

**Вторая глава** посвящена исследованиям использования смесевых и эмульгированных биотоплив. С ПК *Ansys Fluent* проведены расчеты показателей потока топлива в проточной части распылителей дизеля ММЗ типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5). Исследованы ДТ марки Л по ГОСТ 305-2013, РМ и эмульсия 70% по массе РМ и 30% ЭС. Исследована форсунка ФДМ-22 с распылителем типа 171 АЗПИ. Рассмотрена симметричная геометрия элемента распылителя форсунки с одним отверстием (Рис. 1).

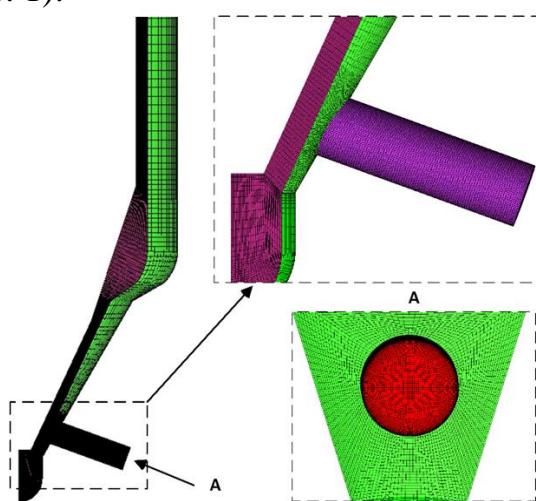


Рис. 1. Геометрия проточной части распылителя

Рассмотрено стационарное течение топлив в проточной части распылителя при максимальном подъеме иглы. Исследована смесь ЭС в РМ с каплями этанола диаметром 50 мкм. Принято допущение о несжимаемости топлива. При расчетах учитывалась разница плотностей компонентов рассматриваемой эмульсии и использована встроенная в ПК *Ansys Fluent* модель многофазного равновесия компонентов. Для смешанной фазы уравнение количества движения имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{u}_m) + \nabla(\rho_m \vec{u}_m \otimes \vec{u}_m) = -\nabla(p) + \nabla[(\mu_m + \mu_\tau)(\nabla \vec{u}_m + \nabla^T \vec{u}_m)] - \nabla(\sum_{q=1}^N a_q \rho_q \vec{u}_{dr,q} \vec{u}_{dr,q}),$$

где  $\rho_m$ ,  $\vec{u}_m$ ,  $\mu_m$  – соответственно плотность, скорость движения и динамическая вязкость смешанной фазы;  $\mu_\tau$  – ее турбулентная вязкость;  $N$  – количество фаз рассматриваемой эмульсии;  $a_q$ ,  $\rho_q$ ,  $\vec{u}_{dr,q}$  – соответственно объемная доля, плотность и скорость дрейфа  $q$ -той фазы. Плотность  $\rho_m$ , динамическая вязкость  $\mu_m$  и скорость движения  $\vec{u}_m$  смешанной фазы определялись с использованием следующих выражений:

$$\rho_m = \sum_{q=1}^N a_q \rho_q;$$

$$\mu_m = \sum_{q=1}^N a_q \rho_q \mu_q;$$

$$\vec{u}_m = \sum_{q=1}^N a_q \rho_q \vec{u}_q)$$

где  $\mu_q$  и  $\vec{u}_q$  – молекулярная вязкость и скорость движения фазы  $q$ . При моделировании течения эмульсии РМ и ЭС в качестве первичной фазы рассматривалась жидкая фаза масла рапса, а капли этанола и кавитационные пузырьки – вторичными фазами. При течении указанных топлив наблюдается кавитация. В этом процессе происходит массоперенос между указанными фазами. В этом случае уравнения сохранения массы для смешанной фазы и паровой фазы использованы в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m \vec{u}_m) = 0;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\alpha_\nu \rho_\nu) + \nabla(\alpha_\nu \rho_\nu \vec{u}_\nu) = R_\nu.$$

Скорость массопереноса вследствие кавитации  $R_\nu$  моделировалась с помощью модели кавитации Шнерра-Зауэра (Schnerr-Sauer). Эта модель является модификацией уравнения Рэлея-Плессета для одного пузырька, в которой пре-небрегается членами второго порядка. В результате выражения для скорости массопереноса вследствие кавитации  $R_\nu$  получают вид:

$$R_\nu = \frac{\rho_\nu \rho_l}{\rho_m} \left( \frac{4\pi}{3} n_b \alpha_\nu \right)^{1/3} (1 - \alpha_\nu)^{4/3} \left( \frac{2}{3} \left| \frac{p_\nu - p}{p_l} \right| \right)^{1/2}, \quad \text{для } p_\nu \leq p;$$

$$R_V = -C_{cond} \frac{\rho_V \rho_l}{\rho_m} \left( \frac{4\pi}{3} n_b \alpha_V \right)^{1/3} (1 - \alpha_V)^{4/3} \left( \frac{2}{3} \left| \frac{p_V - p}{p_l} \right| \right)^{1/2}, \quad \text{для } p_V > p,$$

где  $n_b$  – число, характеризующее плотность кавитационных пузырьков;  $C_{cond}$  – постоянная конденсации пузырьков;  $\rho_l$  – плотность исследуемой жидкости (ДТ или эмульсии РМ и ЭС). Уравнения сохранения массы фаз жидкости замыкались с помощью условия  $\sum_{q=1}^N a_q \rho_q = 1$ . Скорость  $\vec{u}_{dr,q}$  дрейфа  $q$ -той фазы вычислялась с учетом относительной скорости вторичных фаз  $q$ ,  $k$  к первичной фазе  $p$  –  $\vec{u}_{qp}$ ,  $\vec{u}_{kp}$  с использованием формулы:

$$\vec{u}_{dr,q} = \vec{u}_{qp} - \sum_{k=1}^N \alpha_k \rho_k \vec{u}_{kp} / \rho_m.$$

Относительная скорость движения вторичной фазы  $q$  по отношению к первичной фазе  $p$  определялась по следующей формуле:

$$\vec{u}_{dp} = \frac{\rho_q d_q^2}{18 \mu_q f_e} (1 - \frac{\rho_m}{\rho_q}) \vec{\alpha},$$

где  $d_q$  – размер частиц  $q$ -той фазы (диаметр капель этанола или диаметр кавитационного пузырька);  $f_e$  – функция сопротивления. Использована функция сопротивления модели Шиллера-Науманна (Schiller-Naumann):

$$f_e = 1 + 0,15 \text{Re}^{0,687} \quad \text{для } \text{Re} \leq 1000 \text{ и } f_e = 0,0183 \text{Re} \quad \text{для } \text{Re} > 1000.$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса, рассчитанное с учетом частиц фазы. Уравнения импульса потока топлива замыкались его турбулентной вязкостью. Она рассчитывалась с использованием значений кинетической энергии турбулентности и скорости турбулентной диссипации. Эти параметры моделировались с использованием турбулентной модели RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), включающей осредненные по Рейнольдсу уравнения движения вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса). При этом использована  $k-\epsilon$  модель турбулентности.

Проведено моделирование течения ДТ, РМ, эмульсии ДТ и ЭС при давлении 51,5 МПа на входе в область расчета, и двух противодавлениях – 0,1 и 8,9 МПа. При анализе параметров потока топлива использована система координат, исходная точка которой совпадает с центром входного сечения отверстия распылителя. От этой точки осуществлялся отсчет расстояния  $l_p$  до текущего поперечного сечения.  $l_p = 0$  мм соответствует входному сечению, а значение  $l_p = 1,1$  мм – выходному. В Таблице 1 представлены расчетные значения массового расхода топлива и коэффициента расхода, которые показывают, что при течении эмульсии РМ и ЭС расход топлива снижается по сравнению с РМ, что связано, в основном, пониженной плотностью эмульсии по отношению к РМ.

При расчетных исследованиях получены распределения параметров потока топлива – скорости его течения, объемной доли паров топлива, кинетической энергии турбулентности по поперечному сечению отверстия (Рис. 2), а также их значения в сечениях распыливающего отверстия (Рис. 3). Максимум кинетической энергии турбулентности потока на выходе из отверстия достигается при течении нефтяного ДТ. Она значительна и для эмульсии РМ и ЭС.

Таблица 1.

## Расчетные значения параметров потока топлива

Противодавление, МПа	Вид топлива	Расход, г/с	Коэффициент расхода
0,1	ДТ	14,42	0,52
	РМ	16,58	0,56
	Эмульсия РМ и ЭС	14,58	0,51
8,9	ДТ	14,39	0,57
	РМ	14,96	0,56
	Эмульсия РМ и ЭС	14,56	0,55

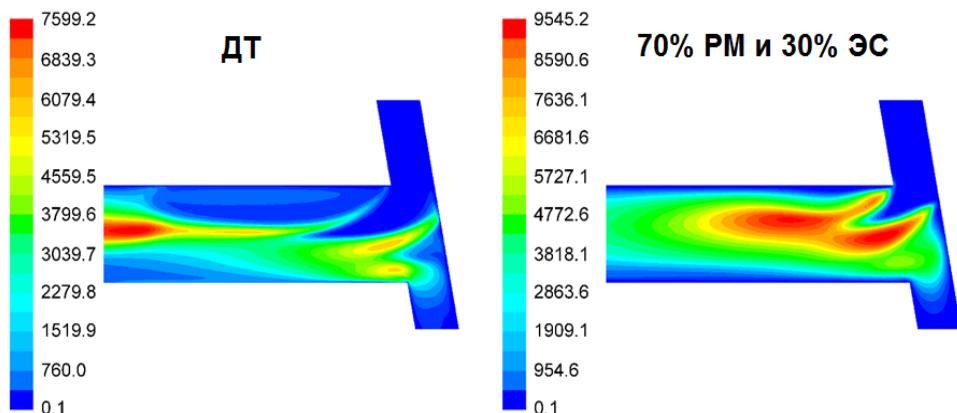


Рис. 2. Распределение значений кинетической энергии турбулентности ( $\text{м}^2/\text{s}^2$ ) при давлении на входе в область расчета равном 51,5 МПа, и противодавлении впрыскиванию 8,9 МПа (в)

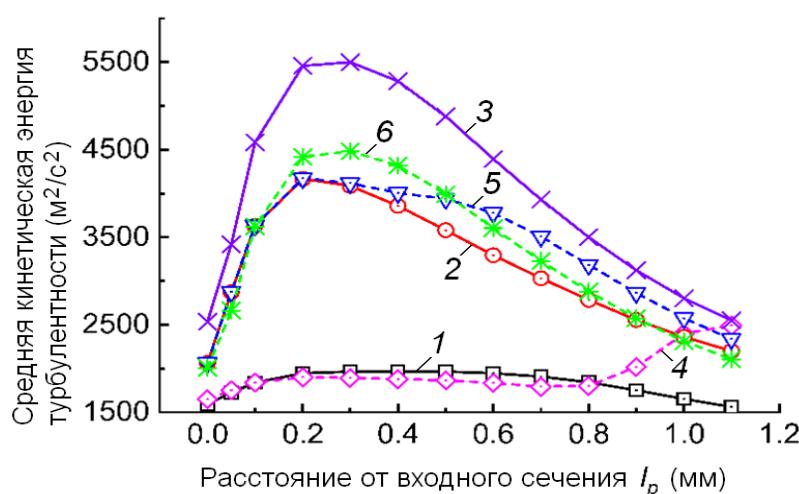


Рис. 3. Усредненные по поперечному сечению распыливающего отверстия значения кинетической энергии турбулентности для исследуемых топлив при различных противодавлениях [МПа]: 1 – ДТ; 0,1; 2 – эмульсия; 0,1; 3 – РМ; 0,1; 4 – ДТ; 8,9; 5 – эмульсия; 8,9; 6 – РМ; 8,9

Для оценки показателей двигателя использованы данные по результатам испытаний дизельного двигателя типа Д-245.12С, приведенные в Таблицах 2 и 3. Сравнительный анализ этих данных затруднен из-за различных условий экс-

перимента. В связи с этим двигатель был дополнительно испытан на нефтяном ДТ с добавкой 10, 20 и 30% (по объему) РМ. По результатам исследований был проведен сравнительный анализ данных, полученных для смесей традиционного ДТ с маслом рапса и для биотоплив на основе эмульсии (Таблица 4 и Рис. 4).

Определено, что добавление в нефтяное ДТ 30% масла рапса приводит к снижению эмиссии  $NO_x$  на 6,4% (с 6,610 до 6,186 г/(кВт·ч)), а перевод двигателя с этого дизельного топлива на эмульгированное топливо № 2 с 13% воды в своем составе ведет к снижению эмиссии  $NO_x$  на 16,0% (с 6,610 до 5,552 г/(кВт·ч)). Из чего можно сделать вывод, что наличие воды в многокомпонентном биотопливе на основе эмульсии оказывает на содержание  $NO_x$  в ОГ значительно более существенное влияние, чем наличие в нем масла рапса. Аналогичные вывод можно сделать о дымности ОГ. При работе на режиме максимальной мощности при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> перевод с ДТ на смесь 70% с 30% масла рапса приводит к снижению  $K_x$  на 25% (с 16 до 12%). Переход с ДТ на эмульсию № 2 на том же режиме ведет к сокращению дымности на 53,1% (с 16 до 7,5%).

Таблица 2.

Показатели двигателя Д-245.12С на разных топливах

Показатель	Вид топлива			
	100% ДТ	80% ДТ и 20% РМ	60% ДТ и 40% РМ	40% ДТ и 60% РМ
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч)	<u>249,0</u> 225,8	<u>255,1</u> 231,8	<u>258,1</u> 239,8	<u>265,1</u> 243,1
Эффективный КПД двигателя $\eta_e$	<u>0,340</u> 0,375	<u>0,340</u> 0,374	<u>0,345</u> 0,372	<u>0,345</u> 0,376
Дымность ОГ $K_x$ , % по шкале Хартиджа	<u>11,0</u> 25,0	<u>8,0</u> 16,5	<u>7,0</u> 13,0	<u>8,0</u> 11,0
Условный (средний) эффективный расход топлива на режимах 13-режимного цикла $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)	247,20	254,38	259,40	272,23
Средний эффективный КПД двигателя $\eta_{e\text{ усл}}$	0,343	0,341	0,343	0,336
Интегральный на режимах 13-режимного цикла удельный выброс оксидов азота $e_{NO_x}$ , г/(кВт·ч)	7,442	7,159	7,031	6,597
Интегральный удельный выбросmonoоксида углерода $e_{CO}$ , г/(кВт·ч)	3,482	3,814	3,880	3,772
Интегральный удельный выброс углеводородов $e_{CH_x}$ , г/(кВт·ч)	1,519	0,965	0,949	1,075

Примечание: в первых трех строках даны показатели дизеля на режимах ВСХ (числитель – режим максимальной мощности, знаменатель – режим максимального крутящего момента)

Таблица 3.

## Показатели двигателя Д-245.12С на разных топливах

Показатели дизеля	Вид топлива		
	ДТ	Эмульсия № 1 (67% ДТ, 23% РМ, 10% воды)	Эмульсия №2 (57% ДТ, 30 РМ, 13% воды)
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч)	<u>255,5</u> 219,7	<u>283,1</u> 233,9	<u>300,2</u> 246,3
Эффективный КПД двигателя $\eta_e$	<u>0,332</u> 0,386	<u>0,346</u> 0,419	<u>0,342</u> 0,417
Дымность ОГ $K_x$ , % по шкале Хартриджа	<u>16,0</u> 28,0	<u>10,0</u> 19,0	<u>7,5</u> 15,5
Средний на режимах 13-режимного цикла удельный эффективный расход топлива $g_{e\text{ усл}}$ , г/(кВт·ч)	248,12	260,79	273,82
Средний эффективный КПД двигателя $\eta_{e\text{ усл}}$	0,341	0,376	0,374
Интегральный удельный выброс оксидов азота $e_{NO_x}$ , г/(кВт·ч)	6,610	6,153	5,552
Интегральный удельный выброс монооксида углерода $e_{CO}$ , г/(кВт·ч)	3,612	2,988	3,316
Интегральный удельный выброс углеводородов $e_{CH_x}$ , г/(кВт·ч)	1,638	2,543	2,071

Таблица 4.

## Показатели токсичности ОГ двигателя Д-245.12С на разных топливах

Показатель	Вид топлива					
	ДТ	90% ДТ и 10% РМ	80% ДТ и 20% РМ	70% ДТ и 30% РМ	Эмульсия № 1 (67% ДТ, 23% РМ, 10% воды)	Эмульсия № 2 (57% ДТ, 30 РМ, 13% воды)
Дымность ОГ $K_x$ на режиме максимальной мощности при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ , % по шкале Хартриджа	16,0	15,0	13,5	12,0	10,0	7,5
Интегральные удельные выбросы оксиды азота $e_{NO_x}$ на режимах 13-режимного цикла, г/(кВт·ч)	6,610	6,505	6,357	6,168	6,153	5,552

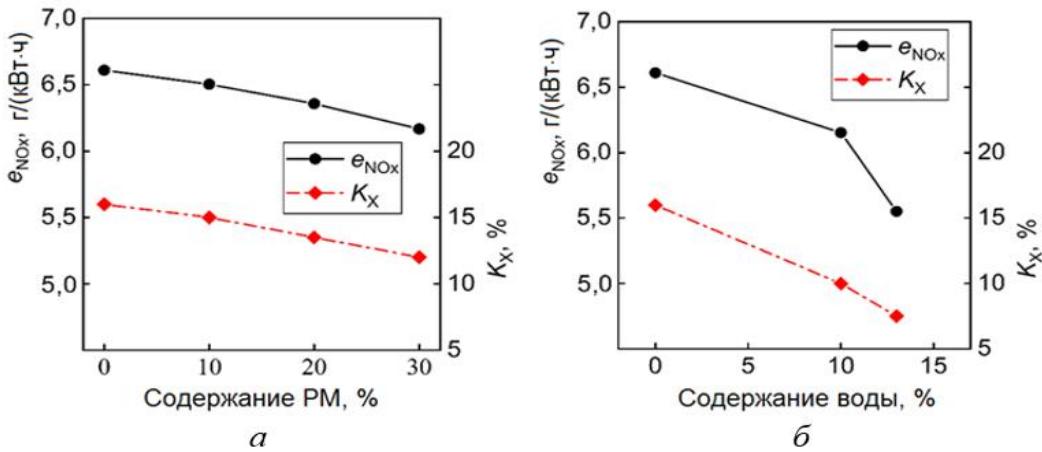


Рис. 4. Зависимость дымности выхлопа  $K_X$  на режиме предельной мощности и удельной эмиссии оксидов азота по массе  $e_{NO_x}$  на режимах цикла ЕСЕ R49 от состава применяемого топлив: *а* – на смесях ДТ с маслом рапса; *б* – на водных эмульсиях ДТ и масла рапса

**В третьей главе** проведена сравнительная оценка экологических показателей двигателя типа Д-245.12С на биотопливах с добавками РМ. Для оптимизации состава таких смесевых и эмульгированных биотоплив с учетом суммарной токсичности их ОГ использован метод свертки, в котором из четырех компонентов ОГ ( $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH_x$  и твердые частицы) учитываются два наиболее значимых –  $NO_x$  и твердые частицы (до 98% – сажа).

В большинстве испытательных циклов основными режимами являются режимы предельных мощности (10%) и крутящего момента (25%). В соответствии с ГОСТ 17.2.2.01–84 и нормами ЕСЕ R24 дымность ОГ также определяется только на указанных режимах ВСХ.

При оптимизации состава биотоплив с добавками РМ использован метод свертки. Частные критерии оптимальности, характеризующие концентрацию в ОГ оксидов азота  $J_{NO_x}$  и дымность  $J_{K_x}$ , сводятся к обобщенному критерию  $J_o$ , определяемому в виде их суммы:

$$J_o = J_{NO_x} + J_{K_x}. \quad (1)$$

В связи с тем, что основными режимами работы автомобильных двигателей являются режимы при  $N_{max}$  и  $M_{max}$ , формула (1) принимает вид

$$J_o = J_{NO_x N_{max}} + J_{NO_x M_{max}} + J_{K_x N_{max}} + J_{K_x M_{max}}, \quad (2)$$

В относительных величинах:

$$\begin{aligned} J_{NO_x N_{max}} &= C_{NO_x N_{max} i} / C_{NO_x N_{max} DT}; \\ J_{NO_x M_{max}} &= C_{NO_x M_{max} i} / C_{NO_x M_{max} DT}; \\ J_{K_x N_{max}} &= K_x N_{max} i / K_x N_{max} DT; \\ J_{K_x M_{max}} &= K_x M_{max} i / K_x M_{max} DT, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметры с индексом  $i$  соответствуют работе топливе  $i$ -го состава. Обобщенный критерий (2) с учетом выражений (3) в относительном виде:

$$\bar{J}_o = J_{o,i} / J_{o,DT}. \quad (4)$$

Для оценки суммарной токсичности ОГ двигателя предполагает формирование обобщенного аддитивного критерия в виде (2) или (4). Минимум этого

критерия соответствует наименьшей токсикологической агрессивности ОГ. Для оценки такой агрессивности ОГ использованы представленные выше данные по двигателю типа Д-245.12С (Таблицы 2 и 3). Результаты такой оценки приведены в Таблице 5.

По данным Таблицы 5 необходимо отметить, что все рассматриваемые биотоплива обладают лучшей экологичностью по сравнению ДТ. При росте содержания РМ и воды в смеси с ДТ значения обобщенного критерия  $\bar{J}_o$  монотонно уменьшаются. Оптимальное в соответствии с выражениями (2) и (4) содержание РМ в смесях с ДТ соответствует максимальному в рассматриваемом диапазоне содержанию РМ – для смеси 40% ДТ и 60% РМ обобщенный критерий принимает свое минимальное значение ( $\bar{J}_o=0,736$ ). Наилучшие результаты показывает использование 13% водной эмульсии № 2 с содержанием 57% ДТ и 30% масла рапса ( $\bar{J}_o=0,721$ ). На режиме  $N_{max}$  работа на указанной эмульсии сопровождается снижением дымности ОГ  $K_X$  с 16,0 до 7,5%. На режиме  $M_{max}$  – с 28,0 до 21,5%. При этом интегральные на режимах испытательного цикла удельные выбросы  $e_{NO_x}$  уменьшаются с 6,610 до 5,552 г/(кВт·ч),monoоксида углерода  $e_{CO}$  – с 3,612 до 3,316 г/(кВт·ч) и лишь выброс углеводородов  $e_{CH_4}$  несколько возрастает с 1,638 до 2,071 г/(кВт·ч).

Таблица 5.  
Оценка токсикологических свойств биотоплив для двигателя типа Д-245.12С

Вид топлива	Показатели дизеля									
	$C_{NO_x N_r}$ ppm	$J_{NO_x N_{max}}$	$C_{NO_x M_{max}}$ ppm	$J_{NO_x M_{max}}$	$K_{X N_{max}}$ %	$J_{X N_{max}}$	$K_{X M_{max}}$ , %	$J_{X M_{max}}$	$J_o$	$\bar{J}_o$
<i>Смеси нефтяного дизельного топлива с рапсовым маслом</i>										
ДТ	675	1,000	800	1,000	11,0	1,000	25,0	1,000	4,000	1,000
80% ДТ, 20% РМ	650	0,963	770	0,963	8,0	0,727	16,5	0,660	3,313	0,828
60% ДТ, 40% РМ	640	0,948	750	0,938	7,0	0,636	13,0	0,520	3,042	0,761
40% ДТ, 60% РМ	550	0,815	770	0,963	8,0	0,727	11,0	0,440	2,945	0,736
<i>Эмульсии нефтяного дизельного топлива, рапсового масла и воды</i>										
ДТ	495	1,000	750	1,000	16,0	1,000	28,0	1,000	4,000	1,000
Эмульсия №1 (67% ДТ, 23% РМ, 10% воды)	465	0,939	700	0,933	10,0	0,625	19,0	0,679	3,176	0,794
Эмульсия №2 (57% ДТ, 30% РМ, 13% воды)	425	0,859	590	0,787	7,5	0,469	21,5	0,768	2,883	0,721

**Четвертая глава** посвящена исследованию возможности снижения дымности ОГ двигателей введением биодобавок в топливо. Рассмотрены токсикологические свойства твердых частиц и сажи, содержащихся в ОГ. Отмечено, что эффективное уменьшение дымности ОГ достигается добавкой к ДТ кислородосодержащих компонентов (оксигенаторов) – спиртов, эфиров, растительных масел и др. В отличие от противодымных присадок количество добавляемого в топливо оксигената может составлять 5% и более. В качестве таких присадок рассмотрены РМ, подсолнечное масло (ПМ), метиловый эфир масла рапса (МЭРМ). Целью исследований было установление зависимости дымности ОГ от содержания кислорода в топливе. Еще одной целью исследования являлось установление взаимосвязи дымности ОГ с эмиссией  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH_x$  на режимах ВСХ. При проведении такого исследования использованы результаты испытаний двигателя Д-245.12С на смесях ДТ, РМ, ПМ и МЭРМ (Рис. 5).

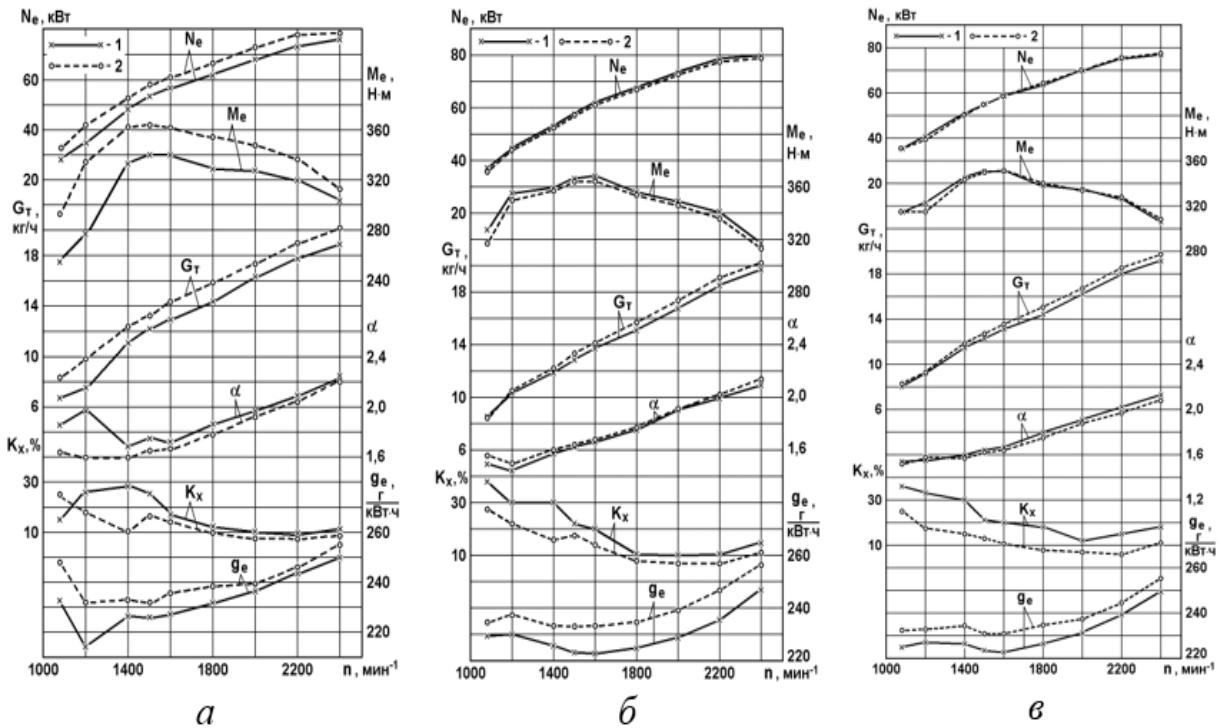


Рис. 5. Зависимости  $N_e$ ,  $M_e$ ,  $G_t$ ,  $\alpha$ ,  $K_x$  и  $g_e$  от  $n$  двигателя Д-245.12С на режимах ВСХ: *а* – ДТ (1) и смесь 80% ДТ и 20% масла рапса (2); *б* – ДТ (1) и смесь 80% ДТ и 20% масла подсолнечника (2); *в* – ДТ (1) и смесь 80% ДТ и 20% МЭРМ (2)

Анализ опубликованных данных показывает существенную зависимость дымности ОГ от содержания кислорода в топливе  $g_{O_2}$ . Характеристики дымности ОГ на Рис. 6 как функции  $g_{O_2}$  для двигателя, работающего на различных топливах на режимах ВСХ, подтверждают существенное влияние концентрация кислорода в топливе на дымность ОГ. Причем с увеличением  $n$  снижение дымности сокращается. Наблюдается двукратное уменьшение дымности: при частоте вращения  $n=1080 \text{ мин}^{-1}$  (характеристика 1 на Рис. 6) при увеличении доли кислорода с 0,4 до 7% дымность уменьшается с 31 до 14%, а при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  (характеристика 8 на Рис. 6) – с 14 до 7%.

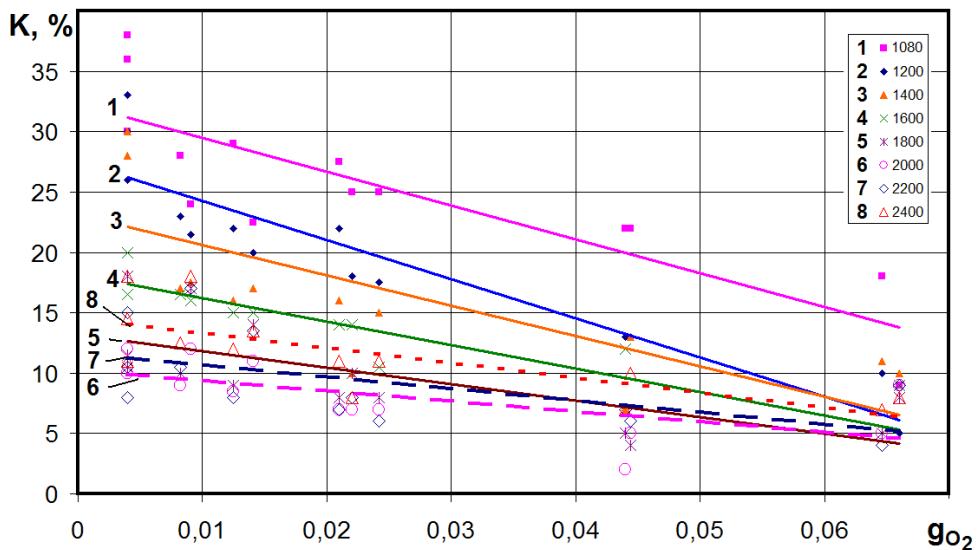


Рис. 6. Зависимость дымности ОГ двигателя типа Д-245.12С от доли кислорода в топливе на режимах ВСХ с различными частотами вращения [мин<sup>-1</sup>]: 1 – 1080; 2 – 1200; 3 – 1400; 4 – 1600; 5 – 1800; 6 – 2000; 7 – 2200; 8 – 2400

Приведенные на Рис. 6 данные свидетельствуют о том, что оксигенаты из растительных масел эффективно снижают дымность ОГ дизельных двигателей. Наиболее критичными по дымности ОГ являются режимы ВСХ с частотой вращения двигателя, меньшей частоты  $M_{max}$  ( $n < 1600$  мин<sup>-1</sup>) – прямые линии № 1-4 на Рис. 6. Для этих четырех характеристик эффект снижения дымности ОГ при росте  $g_{O_2}$  может быть описан зависимостью вида:

$$K_{x \text{ дт+бд}} = K_{x \text{ дт}} - 200g_{O_2},$$

где  $K_{x \text{ дт}}$  – дымность ОГ двигателя, работающего на ДТ;  $K_{x \text{ дт+бд}}$  – дымность ОГ двигателя, работающего на ДТ с одной из рассмотренных биодобавок. Для четырех рассматриваемых характеристик максимальная погрешность расчета дымности ОГ по представленной формуле составила 30-40%.

Анализ приведенных выше данных показывает, что за счет роста содержания РМ, ПМ и МЭРМ в смесевом топливе на 5-15% (с аналогичным увеличением коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ ) можно достичь повышения мощности на величину до 10%.

Опубликованные данные свидетельствуют о том, что эмиссии токсичных компонентов находятся в сложной, часто противоречивой зависимости. Для оценки характера взаимосвязи дымности ОГ с эмиссией  $NO_x$ ,  $CO$  и  $CH_x$  на режимах ВСХ двигателя использованы экспериментальные данные по двигателю Д-245.12, работающему на режимах  $N_{max}$  и  $M_{max}$  на ДТ и на его смесях с РМ, ПМ и МЭРМ с добавкой этих оксигенатов в количестве 20% по объему (Рис. 5 и 7). Наиболее выраженной является взаимосвязь эмиссии с ОГ угарного газа  $CO$  и дымности выхлопа  $K_x$ . Снижению  $K_x$  с 25 до 8% на режимах ВСХ соответствует 40...60% снижения эмиссии  $CO$ . Взаимосвязь эмиссии  $CH_x$  и его дымности  $K_x$  не так сильно выражена. Уменьшению  $K_x$  с 25 до 8% соответствует 30...50% уменьшение эмиссии  $CH_x$ . Взаимосвязь эмиссии  $NO_x$  и дымности выхлопа  $K_x$  наименее выражена. Уменьшению дымности выхлопа в приведенном диапазоне соответствует 15...25% уменьшение эмиссии  $NO_x$ .

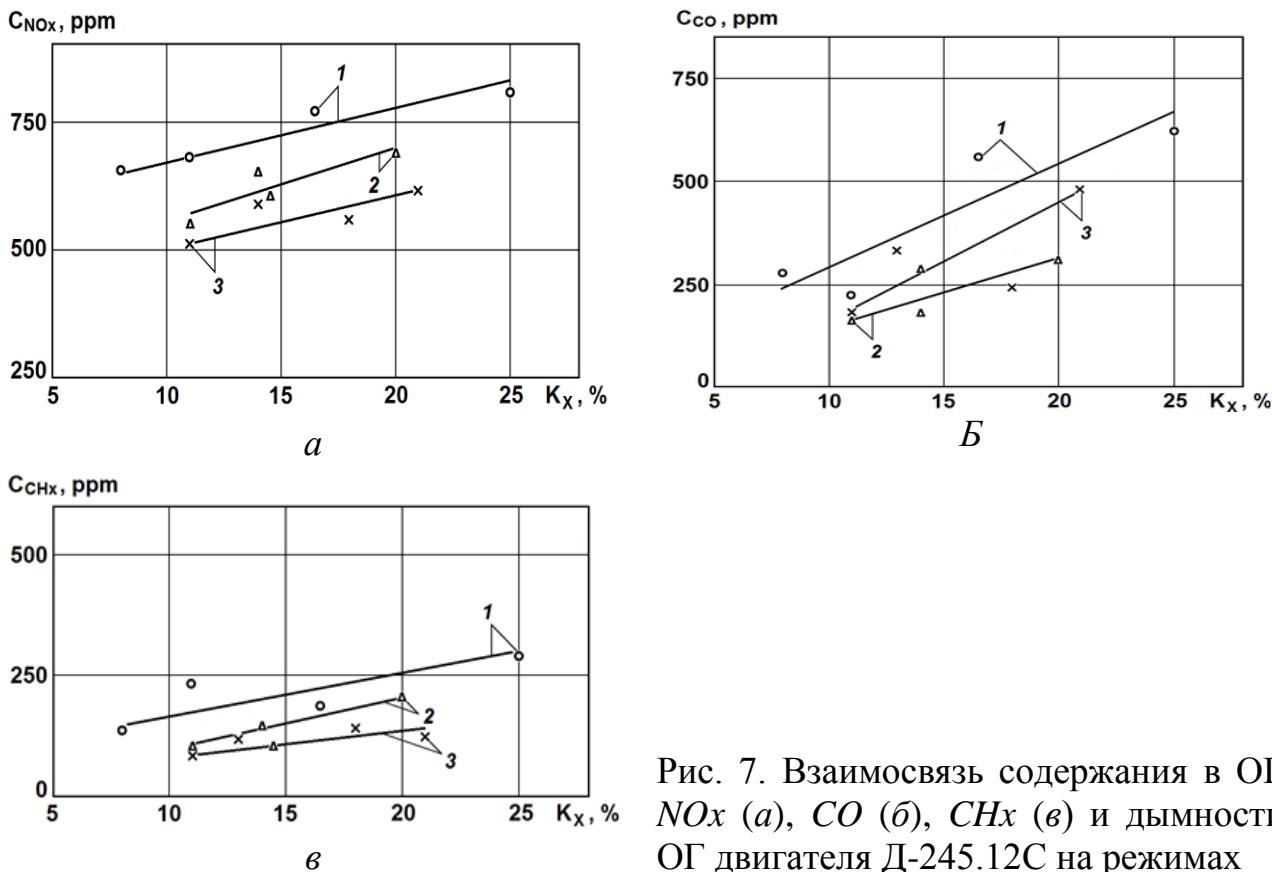


Рис. 7. Взаимосвязь содержания в ОГ  $NO_x$  (а),  $CO$  (б),  $CH_x$  (в) и дымности ОГ двигателя Д-245.12С на режимах

$N_{max}$  и  $M_{max}$  на ДТ и его смесях с РМ (1), ПМ (2) и МЭРМ (3) с объемным содержанием этих добавок, равным 20%

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. При помощи программного комплекса *Ansys Fluent* проведено моделирование стационарного течения дизельного топлива, масла рапса, эмульсии дизельного топлива и этилового спирта в проточной части распылителя. Выбраны различные противодавления впрыскиванию – 0,1 и 8,9 МПа, характерные для условий камеры сгорания, при одинаковом давлении на входе в область расчета, равном 51,5 МПа.

2. Эмульгирование масла рапса этанолом влияет на физико-химические свойства получаемого топлива. В результате изменяются параметры потока в распылителе форсунки. Проведение расчетных исследований в обоих случаях противодавления показало наибольшую скорость течения топлива на выходе из распылителя при использовании традиционного ДТ, среднюю скорость – топлива в форме эмульсий, наименьшую – масло рапса. Максимальная кинетическая энергия турбулентности потока, соответственно, характерна при использовании масла рапса, средняя – для топлива в форме эмульсий, наименьшая – для традиционного ДТ. Также наблюдается сильная зависимость кинетической энергии турбулентности потока от противодавления – наибольшее влияние на нее оказывает вид топлива при малом противодавлении (0,1 МПа), при большом противодавлении разница между рассмотренными видами соизмерима.

3. Для определения возможности использования различных видов топлива рассмотрены экспериментальные данные, полученные на дизеле типа Д-245.12С. Применены топлива: смесь ДТ и масла рапса от 0 до 60%, эмульсия – № 1 - 10%-я водная с 67% ДТ и 23% масла рапса и эмульсия № 2 - 13%-я водная с 57% ДТ и 30% масла рапса.

4. Проведение экспериментальных исследований позволило установить улучшение основных показателей токсичности выхлопа двигателя, к которым относятся эмиссия  $NO_x$ ,  $CH_x$  и дымность. При этом отмечена низкая зависимость эффективного КПД дизеля от вида применяемого топлива. Также оценено использование воды на токсические показатели ОГ и выявлено ее большее влияние, чем применение масла рапса.

5. За счет быстрого испарения воды, содержащейся в составе эмульсии, происходит дополнительная турбулизация струй топлива, что улучшает работу дизеля, повышает качество процессов распыливания и смесеобразования. Также решается проблема закоксовывания распыливающих отверстий и носков распылителей.

6. Для возможности оценки влияния биотоплив в форме смесей и эмульсий применен обобщенный критерий токсичности выхлопа в виде суммы концентраций в них оксидов азота и сажи (дымность). При этом рассмотрена работа двигателя на двух режимах ВСХ – режимах предельных мощности и крутящего момента.

7. Применение каждого вида исследуемого топлива позволило улучшить экологические показатели ОГ дизеля по сравнению с ДТ. При этом согласно обобщенному критерию, наилучшие результаты получены при использовании эмульсии № 2. В этом случае значение принятого обобщенного критерия токсичности отработавших газов является минимальным и равно 0,721.

8. Применение эмульсии № 2 позволило уменьшить дымность на режиме предельной мощности с 16,0 до 7,5%, а на режиме предельного крутящего момента с 28,0 до 21,5%. При этом интегральные удельные выбросы  $NO_x$  уменьшились с 6,610 до 5,552 г/(кВт·ч),  $CO$  – с 3,612 до 3,316 г/(кВт·ч). Интегральный удельный выброс  $CH_x$  возрос с 1,638 до 2,071 г/(кВт·ч).

9. Оценена способность добавок в традиционное дизельное топливо, изготовленных из растительных масел (масла рапса и подсолнечника, метиловый эфир масла рапса), снижать эмиссию твердых частиц в выхлопе дизеля. Для этого применялись экспериментальные данные по дизелю Д-245.12С, работающему на традиционном ДТ с добавками обозначенных биотоплив. Объемное содержание добавок варьировалось от 0 до 60%.

10. Выявлена зависимость дымности выхлопа от состава исследуемых топлив. В качестве аргумента определено содержание кислорода в топливе. При повышении данного показателя с 0,4% (чистое ДТ) до 7% (соответствует добавке 60% масла рапса) дымность выхлопа снижается в 2 - 2,5 раза. Предложена зависимость дымности выхлопа от содержания кислорода в молекулах биотоплив. На режимах ВСХ установлена связь дымности выхлопа с эмиссией в отработавших газах нормируемых вредных веществ  $CO$ ,  $CH_x$  и  $NO_x$ .

**Основные положения диссертации изложены в следующих работах:**

1. Улучшение показателей токсичности отработавших газов дизелей при подаче воды в цилиндры / А.А. Нормуродов [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. М., 2020. Т. 19, № 8. С. 354-363. (0,80 п.л./0,20 п.л.).
2. Характеристики впрыскивания дизельного топлива, рапсового масла и их смесей в дизелях различных типов / А.А. Нормуродов [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. М., 2021. Т. 20, № 4. С. 167-178. (1,00 п.л./0,20 п.л.).
3. Снижение дымности отработавших газов дизельных двигателей введением биодобавок растительного происхождения в топливо / А.А. Нормуродов [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. М., 2022. № 1. С. 47-59. (1,00 п.л./0,20 п.л.).
4. Производство биодизельного топлива из отходов деревообрабатывающей промышленности / А.А. Нормуродов [и др.] // Автомобильная промышленность. М., 2022. № 8. С. 29-37. (0,80 п.л./0,15 п.л.).
5. Анализ моторных свойств биотоплива, полученного из таллового масла / А.А. Нормуродов [и др.] // Грузовик. М., 2022. № 8. С. 24-30. (0,70 п.л./0,15 п.л.).
6. Исследование работы дизельного двигателя на смесевых и эмульгированных биотопливах с добавками рапсового масла / А.А. Нормуродов [и др.] // Двигателестроение. М., 2023. № 1. С. 70-90. (1,20 п.л./0,25 п.л.).
7. Расчетные исследования процесса топливоподачи дизельного двигателя при его питании дизельным топливом и биотопливом / А.А. Нормуродов [и др.] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. М., 2023. № 1. С. 1-7. (0,70 п.л./0,15 п.л.).