



БУЗИКОВ ШАМИЛЬ ВИКТОРОВИЧ

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ОПТИМИЗАЦИЕЙ СОСТАВОВ СМЕСЕВЫХ
ТОПЛИВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ТОПЛИВОПОДАЧИ**

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киров
2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вятский государственный университет»

Научный консультант: **Плотников Сергей Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный изобретатель Российской Федерации

Официальные оппоненты: **Матвеев Юрий Иванович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Эксплуатация судовых энергетических установок»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Волжский
государственный университет водного транспорта»,
г. Нижний Новгород.

Хакимов Рамиль Тагирович,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Автомобили, тракторы и технический сервис»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный аграрный университет», г. Санкт-
Петербург.

Хмелев Роман Николаевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Транспортно-технологические машины и процессы»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Тульский
государственный университет», г. Тула.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «11» февраля 2025 года в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета У.2.4.7.36 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете Петра Великого по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург ул. Политехническая, д. 29, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». <https://www.spbstu.ru/>

Автореферат диссертации разослан " ____ " _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
У.2.4.7.36, д.т.н.

В.В. Барсков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

На сегодняшний день альтернативные топлива (АТ), применяемые в тракторных дизелях (ТД), занимают особое место среди иных возобновляемых источников энергии. Своим вниманием они обязаны стабильной длительной положительной общемировой ценовой динамике дизельного топлива (ДТ) и ежегодно ужесточающимся экологическим требованиям, предъявляемым к ТД. Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 1734-р от 22.11.2008 г., одним из приоритетов развития указано снижение доли транспорта в загрязнении окружающей среды. С целью снижения негативного воздействия транспорта на окружающую среду предполагается разработка и применение механизмов государственного регулирования, мотивирующих перевод производителей и собственников транспортных средств на экологически чистые виды топлива. Во многих странах мира широко применяют различные виды АТ, как в чистом виде, так и с добавкой последних к ДТ с получением так называемых смесевых топлив (СТ).

Среди названных топлив выделяют достаточно обширные укрупнённые группы, классифицирующиеся по агрегатному состоянию, преимущественно, газообразные и жидкие. К первым, в основном, относят горючие газы: водород, метан, пропан, бутан и т.д. Ко второй группе – жидкие углеводороды: бензол, спирт, масла, эфиры, глицерин и т.д. Однако, применение тех или других видов АТ в чистом виде затруднено в связи с отличием их свойств от ДТ.

Всё больший научный интерес приобретает способ применения АТ совместно с ДТ. И здесь также выделяют несколько вариантов такого использования. Это - подача, как газообразного, так и жидкого АТ совместно с ДТ, подача жидкого АТ в смеси с ДТ, в виде СТ. Как у первого, так и у второго способа есть свои преимущества и недостатки. Одним из основных и бесспорных преимуществ применения жидкого СТ в ТД является отсутствие необходимости в глубокой модернизации или замене системы питания (СП).

Основываясь на сказанном следует, что применение жидкого СТ, состоящего из ДТ и АТ в качестве топлива для ТД, является актуальным. В связи с достаточно широкой номенклатурой применяемых видов и составов СТ для различных ТД остро встаёт вопрос, связанный с определением оптимального вида и состава СТ для конкретного ТД.

Степень разработанности темы.

В настоящее время целый ряд исследований процессов, протекающих в ТД, проведен в отношении АТ, что позволило определить степень решения научных проблем, связанных с видами и способами применения их в ТД. Анализируя данные отечественных научных исследований по применению СТ, видно, что учеными нашей страны в разное время проводились исследования в области их применения. Результаты этих исследований отражены в трудах Данилова А.М., Девянина С. Н., Маркова В.А., Грехова Л.В., Захарова Л. А., Камфера Г.М., Карташевича А.Н., Картошкина А.П., Митусовой Т.Н., Николаенко А.В., Плотникова С.А., Ложкина В.Н., Галышева Ю.В., Кавтарадзе Р.З., Патрахальцева Н.Н., Лиханова В.А., Уханова А.П. и многих других. Анализ полученных результатов показал, что ведущими российскими учеными, учеными стран ближнего и дальнего зарубежья проведены разносторонние теоретические и экспериментальные исследования применения тех или иных видов и составов СТ в ТД.

Разработаны теоретические предпосылки и проведены экспериментальные исследования по вопросам, связанным с улучшением эксплуатационных показателей ТД. Важное место в этих трудах занимают вопросы применения СТ, содержащих спирты, эфиры и растительные масла. Стоит отметить, что большая часть исследований проведена с целью определения зависимостей индикаторных, эффективных и экологических показателей работы ТД от тех или иных свойств СТ и конструктивно-технологических параметров самого ТД и его систем.

В связи с этим можно сделать вывод о недостатке работ, направленных на определение составов СТ, содержащих ДТ и АТ, применяя которые удалось бы решить компромиссную задачу, связанную с улучшением эффективных и экологических показателей работы ТД на разных режимах. Проведение таких исследований позволило бы определить оптимальную

номенклатуру видов и составов СТ, применение которые в ТД, в зависимости от режимов его работы, улучшало бы эксплуатационные показатели.

На основе вышеизложенного, научная проблема сформулирована как улучшение эксплуатационных показателей ТД на всех режимах работы путем оптимизации видов и составов СТ, подаваемых в цилиндры.

Цели и задачи.

Целью научных исследований является разработка теоретических основ улучшения эксплуатационных показателей ТД для всех режимов работы путем оптимизации видов и составов СТ, а также методов и средств их подачи в цилиндры.

Задачи, решаемые в диссертационной работе:

1. Разработка методов и средств для решения научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение - улучшение эксплуатационных показателей ТД на всех режимах работы путем оптимизации видов и составов СТ, подаваемых в цилиндры.
2. Разработка методологического подхода, определяющего области предельных составов СТ, применяемых в ТД.
3. Разработка критерия оценки оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД.
4. Разработка методологии расчётного определения значений показателей процесса сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД в зависимости от режимов работы, а также способов воздействия на данный процесс.
5. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение характеристик топливоподачи (ТП) и показателей работы линии низкого давления (ЛНД) СП ТД на оптимальных составах СТ.
6. Разработка математической модели рабочего процесса ТД при использовании оптимальных составов СТ на всех режимах работы.
7. Разработка конструктивно-технологических решений, обеспечивающих подачу и регулирование оптимальных составов СТ, и совершенствования методов и средств ТП.
8. Усовершенствование методик оценки энергетической и экологической эффективности оптимизации составов СТ и совершенствования методов и средств ТП.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые для определения области предельных составов СТ, в зависимости от их физико-химических свойств и конструктивно-технологических параметров ТД, разработан методологический подход.
2. Доказана целесообразность применения нового разработанного критерия оценки оптимального состава СТ, определяющего улучшение эксплуатационных показателей ТД для всех режимов работы.
3. Определены оптимальные составы СТ, содержащие рапсовое масло (РМ) и этанол (Э), позволяющие улучшить эксплуатационные показатели ТД на всех режимах работы.
4. Предложены математические выражения, определяющие показатели процесса сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД от режимов работы, конструктивно-технологических параметров и способов воздействия на данный процесс.
5. Разработаны математические выражения, определяющие технологические параметры работы ЛНД СП, характеристик ТП, условий впрыскивания и распыливания форсунками применяемых оптимальных составов СТ в зависимости от режимов работы и конструктивно-технологических параметров ТД.
6. Доказано, что разработанная математическая модель рабочего процесса ТД, при использовании оптимальных составов СТ, содержащих РМ и Э в зависимости от режимов работы и конструктивно-технологических параметров позволяет с достоверностями 97 % и 95 % прогнозировать параметры процесса сгорания и тепловыделения, соответственно.
7. Определены составы СТ, содержащие РМ и Э, применяемые в ТД, обеспечивающие наибольший энергетический эффект и наименьший уровень техногенного риска.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке научных положений, позволяющих определить зависимости оптимального состава СТ от конструктивно-технологических параметров ТД на всех режимах его работы, способов воздействия на характеристики протекания процесса сгорания, показателей работы ЛНД СП ТД, а также моделях рабочего процесса, сгорания и тепловыделения. Теоретические положения, методики расчета и результаты исследований диссертации были использованы в 2 НИР, выполненных в течение 2011-2020 гг. в филиале ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет» в г. Кирове и ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

Практическая значимость работы состоит во внедрении способов воздействия на характеристики протекания периодов процесса сгорания при использовании оптимальных составов СТ, программ для ЭВМ, осуществляющих расчёты показателей процесса сгорания и тепловыделения, индикаторных диаграмм и диаграмм тепловыделения ТД при использовании оптимальных составов СТ. Конструктивно-технологические решения, обеспечивающие подачу и регулирование, а также совершенствование методов и средств ТП, оптимальных составов СТ внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

Результаты научных исследований внедрены в работу на АО «Автотранспортное предприятие», ООО «Азимут» и ООО Транспортно-экспедиционное предприятие «Трансавто К».

Методология и методы исследования.

Объект исследований: четырехцилиндровый, рядный, четырехтактный ТД жидкостного охлаждения, с газотурбинным наддувом и промежуточным охлаждением надувочного воздуха, с неразделенной КС (ЦНИДИ) в поршне и непосредственным впрыскиванием топлива, размерностью 4ЧН 11,0/12,5.

Предмет исследований: термодинамические, механические, тепло-химические, гидрогазодинамические процессы, протекающие в ТД и его СП.

В процессе выполнения работы применялись аналитические, расчетно-аналитические и экспериментальные методы исследований. В работе использован системный подход. В диссертации использован опыт разработки и внедрения новых составов СТ, выполнен поиск, отбор и анализ лучших практик, примеры международных и российских успешных решений по данной тематике. Системный подход позволил одновременно увязывать взаимоисключающие требования всех элементов системы в целом, на основе целевых функций эксплуатационных показателей ТД. Достоверность разработанных методов, критериев и методик подтверждена экспериментально.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы и средства для решения научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение - улучшение эксплуатационных показателей ТД на всех режимах работы путем оптимизации видов и составов СТ, подаваемых в цилиндры.
2. Методологический подход к определению области предельных составов СТ, применяемых в ТД.
3. Критерий оценки оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД.
4. Методология расчётного определения значений показателей процесса сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД в зависимости от режимов работы.
5. Характеристики ТП и показатели работы ЛНД СП ТД на оптимальных составах СТ.
6. Математическая модель рабочего процесса ТД при использовании оптимальных составов СТ.
7. Конструктивно-технологические решения, обеспечивающие подачу и

регулирование оптимальных составов СТ, совершенствование методов и средств ТП, а также способов воздействия на характеристики протекания периодов процесса сгорания.

8. Методики оценки энергетической и экологической эффективности оптимизации составов СТ, а также совершенствования методов и средств ТП.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов работы подтверждена высокой степенью сходимости теоретических расчётов с экспериментальными данными, которая составила более 95 %. В процессе выполнения работы использованы современные апробированные и протестированные методики на основе накопленных экспериментальных данных. Результаты экспериментальных исследований получены на оборудовании, прошедшем государственную поверку, с применением современных измерительных средств. Обработка опытных данных проведена с использованием устойчивых методов статистического анализа.

Апробация основных результатов работы проведена на 20 семинарах и конференциях. По теме исследования опубликовано 87 работ, отражающих основные положения исследования, среди которых – 13 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по искомой специальности, 11 – публикаций в журналах, рекомендованных ВАК по смежным специальностям, 11 – работ в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Scopus и WoS, 2 – учебных пособия, получено 13 патентов РФ на изобретения и 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы улучшения эксплуатационных показателей ТД, сформулированы научная новизна, цель, задачи, практическая ценность работы, основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор отечественных и зарубежных научно-исследовательских работ, связанных с особенностями применения различных видов и составов СТ в ТД.

Установлено, что некоторые свойства СТ в значительной мере оказывают влияние на эксплуатационные показатели ТД в зависимости от режимов работы. Поэтому определение совокупности видов и составов СТ, которое не ухудшало бы основных показателей процесса сгорания, конкретно взятого ТД на сегодняшний день нет.

Рассмотрены механизмы образования токсичных веществ в камере сгорания (КС) ТД, работающих на различных видах и составах СТ. Установлено, что добавление АТ к ДТ в тех или иных концентрациях приводило к общему улучшению экологических показателей. Поэтому проблема количественного определения зависимости величины снижения эмиссии токсичных компонентов от содержания АТ в СТ стоит остро.

Проведенный анализ конструкций СП, ТП ТД, работающих на СТ, позволил сделать вывод о том, что в настоящее время практически полностью реализован процесс регулирования состава СТ в зависимости от величины цикловой подачи ДТ для всех режимов работы. Однако до сих пор не ясен вопрос, связанный с процессом подачи количества и состава СТ в зависимости от режима работы ТД, обеспечивающий наилучшие значения эксплуатационных показателей ТД.

Все это убедительно свидетельствует о том, что улучшение эксплуатационных показателей ТД путем оптимизации составов СТ и совершенствование методов и средств ТП является достаточно актуальной научной проблемой современности, имеющей важное народнохозяйственное значение и отмеченной Правительством Российской Федерации в ряде национальных проектов, программ и документов федерального уровня.

Во второй главе представлены теоретические исследования улучшения эксплуатационных показателей ТД оптимизацией составов СТ и совершенствованием методов и средств ТП.

Область предельных составов СТ, применяемых в ТД, определена согласно выражению:

$$\begin{cases} F(X) = \left[0, (M_{AT}^j)_{\max} \right], j \in [1, m] \\ X \in D \\ D = \{x; x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, i \in [1, n]\} \end{cases}, \quad (1)$$

где F - функция; X - вектор предельных числовых значений свойств СТ; $(M_{AT}^j)_{\max}$ - максимальное значение АТ в СТ; j - порядковая переменная числового значения содержания АТ в СТ; m - количество числовых областей содержания АТ в СТ; D - область определения; x , x_i^- , x_i^+ - текущее, минимальное, максимальное числовые значения свойств СТ; i - порядковая переменная свойств СТ; n - количество свойств СТ.

Результатом решения системы уравнений (1) стало числовое значение максимального содержания АТ в СТ, т.е. M_{AT}^j в зависимости от свойств СТ. Эти свойства изменялись в зависимости от состава СТ. Эта зависимость конкретного свойства СТ от содержания в нём АТ определена:

$$x = a(M_{AT}^j)^3 + b(M_{AT}^j)^2 + cM_{AT}^j + d, \quad (2)$$

где a , b , c , d - коэффициенты в уравнении регрессии.

В зависимости от конструктивно-технологических параметров ТД и СП определены области предельных значений свойств СТ, обеспечивающих условия работоспособности. В связи с этим установлены такие свойства СТ, которые в значительной степени оказывают влияние на процессы, протекающие в СП и камере сгорания (КС) ТД, а именно: кинематическая вязкость, коэффициенты сжимаемости, поверхностного натяжения и диффузии, плотность насыщенного пара, удельная теплоёмкость при постоянном давлении, критическая температура и давление, плотность, теплота сгорания горючей смеси (ГС), химический коэффициент молекулярного изменения ГС, скрытая теплота парообразования, энергия активации, цетановое число и температура разгонки 50 % фракции.

Области предельных значений, найдены:

- для кинематической вязкости СТ:

$$\nu_{CT} \geq \frac{25(R_a^n + R_a^c)^2 P_{\text{впр}}}{30\rho_m^{CT} d_n \pi n \frac{dh_n^n}{d\varphi}}, \quad (3)$$

где R_a^n , R_a^c - средняя шероховатость поверхности плунжера и гильзы, м; $P_{\text{впр}}$ - давление впрыскивания, МПа; ρ_m^{CT} - плотность СТ, кг/м³; d_n - диаметр плунжера, м; π - число Пи; n - частота вращения коленчатого вала ТД, мин⁻¹; h_n^n - полный ход плунжера, м; φ - угол пкв ТД, град пкв.

- для коэффициента сжимаемости СТ:

$$\beta_{CT} > \frac{9n^2}{l_m^2 \varphi_{\text{впр}}^2 \rho_m^{CT}}, \quad (4)$$

где l_m - длина топливопровода высокого давления ТНВД, м; $\varphi_{\text{впр}}$ - угол пкв ТД при котором происходит впрыскивание топлива в КС ТД, град, пкв.

- для коэффициента поверхностного натяжения СТ:

$$\sigma_{CT} < \sqrt[3]{\frac{0,083}{\pi} (\rho_m^{CT})^{0,024} d_c^{0,22} \nu_{CT}^{0,48}} \times \left(\frac{\mu_\phi p_k \varepsilon \left(1 - \mu_\phi (\beta^2 + \xi_{\text{вн}}) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2 \sqrt{1 + \lambda_k^2 n}}{120 f_{\text{вн}}} \right)^2}{2R_y T_k} \right)}{R_y \left(T_k + \frac{\Delta T_N}{110 - 0,0125 n_N} (110 - 0,0125 n) \right)} \right)^{0,244} \times \left(\mu_\phi \sqrt[3]{\frac{2}{\rho_m^{CT}} \left(P_{\text{впр}} - p_k \left(1 - \mu_\phi (\beta^2 + \xi_{\text{вн}}) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2 \sqrt{1 + \lambda_k^2 n}}{120 f_{\text{вн}}} \right)^2}{2R_y T_k} \right) \varepsilon \right)^{1 + \frac{R_y}{C_y}}} \right)^{0,489}, \quad (5)$$

где d_c - диаметр отверстия распылителя форсунки, м; μ_ϕ - динамическая вязкость воздуха, Па·с; p_k , T_k - давление и температура воздуха во впускном коллекторе, МПа, К; ε - геометрическая степень сжатия; β , $\xi_{\text{вн}}$, μ_ϕ - коэффициенты затухания скорости движения заряда в рассматриваемом сечении цилиндра, сопротивления впускной системы и расхода топлива

отверстием распылителя форсунки; R_k - радиус кривошипа, м; D_n - диаметр поршня, f_{en} - площадь наименьшего сечения впускной системы, м²; λ_k - кинематический показатель; R_y - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); ΔT_N - температура подогрева свежего заряда при номинальном режиме работы ТД, К; n_N - номинальная частота вращения коленчатого вала ТД, мин⁻¹; C_v - средняя молярная теплоёмкость воздуха при постоянном объёме, Дж/(моль·К).

- для плотности насыщенного пара СТ:

$$\rho_{nm}^{CT} > \frac{S d_c^{1,217} 1800 \mu_\phi^2 \left[p_{enp} - p_k \left(1 - \mu_\phi \left(\beta^2 + \xi_{en} \right) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2}{120 f_{en}} \sqrt{1 + \lambda_k^2 n} \right)^2}{2 R_y T_k} \right)^{1 + \frac{R_y}{C_v}} \right]}{r_{kc}^{2,217} \pi^2 D_n^2 n^2 \left(l_{m\phi}^\omega \right)^2}, \quad (6)$$

где S - смещение оси топливного факела, м; r_{kc} - радиус КС цилиндра ТД, м; $l_{m\phi}^\omega$ - дальнотойность топливного факела в вихревом потоке свежего заряда, м.

- для удельной теплоёмкости при постоянном давлении СТ:

$$c_p^{CT} \leq \frac{\lambda_m^{CT} q_u^{DT} c_p^{DT} \sigma_{CT}^{0,193} \nu_{CT}^{0,146} \left(\rho_m^{DT} \right)^{0,193}}{q_u^{CT} \lambda_m^{DT} \sigma_{DT}^{0,193} \nu_{DT}^{0,146} \left(\rho_m^{CT} \right)^{0,193}}, \quad (7)$$

где c_p^{CT} , c_p^{DT} - удельная теплоёмкость при постоянном давлении для СТ и ДТ, Дж/(кг·К); λ_m^{CT} , λ_m^{DT} - коэффициент теплопроводности для СТ и ДТ, Вт/(м·К); q_u^{CT} , q_u^{DT} - цикловая подача СТ и ДТ, кг/цикл; σ_{DT} - поверхностное натяжение ДТ, Н/м; ν_{DT} - кинематическая вязкость ДТ, м²/с; ρ_m^{DT} - плотность ДТ, кг/м³.

- для критической температуры и давления СТ:

$$T_{кр}^{CT} > T_k + \frac{\Delta T_N}{110 - 0,0125 n_N} \left(110 - 0,0125 n \right) \varepsilon^{\frac{R_y}{C_v}} \quad (8)$$

$$p_{кр}^{CT} > p_k \left(1 - \mu_\phi \left(\beta^2 + \xi_{en} \right) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2}{120 f_{en}} \sqrt{1 + \lambda_k^2 n} \right)^2}{2 R_y T_k} \right)^{1 + \frac{R_y}{C_v}} \quad (9)$$

- для коэффициента диффузии СТ:

$$D_c^{CT} \leq \frac{\left(\rho_m^{DT} \right)^{0,073} \sigma_{DT}^{0,193} \nu_{DT}^{0,146} D_c^{DT} \left(\rho_{nm}^{DT} - \rho_{атм}^{DT} \right) q_u^{CT}}{\left(\rho_m^{CT} \right)^{0,073} \sigma_{CT}^{0,193} \nu_{CT}^{0,146} \left(\rho_{nm}^{CT} - \rho_{атм}^{CT} \right) q_u^{DT}}, \quad (10)$$

где D_c^{DT} - коэффициент диффузии ДТ, м²/с; ρ_{nm}^{DT} , ρ_{nm}^{CT} , $\rho_{атм}^{DT}$, $\rho_{атм}^{CT}$ - плотности насыщенных паров ДТ и СТ при действительном и атмосферном давлении, кг/м³.

- для плотности СТ:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{DT} \geq -1, \quad \rho_m^{CT} \leq \left(\frac{114,7 \eta_\phi^2 \sigma_{CT}^{0,614} \rho_c^{0,532}}{g d_c^{1,322} \nu_{CT}^{0,292} \left(\nu_c^{CT} \right)^{0,936}} - \rho_{nm}^{CT} \right)^{0,318} \\ b_{DT} < -1, \quad \rho_m^{CT} > \left(\frac{114,7 \eta_\phi^2 \sigma_{CT}^{0,614} \rho_c^{0,532}}{g d_c^{1,322} \nu_{CT}^{0,292} \left(\nu_c^{CT} \right)^{0,936}} - \rho_{nm}^{CT} \right)^{0,318} \end{array} \right., \quad (11)$$

где b_{DT} - параметр смесеобразования; g - ускорение свободного падения, м/с²; η_ϕ - кинематическая вязкость воздуха, (Н·с)/м²; ρ_c - плотность свежего заряда в цилиндре ТД в конце такта сжатия, кг/м³; ν_c^{CT} - скорость истечения струи СТ из отверстия распылителя форсунки, м/с; ν_c^{DT} - скорость истечения струи ДТ из отверстия распылителя форсунки, м/с.

- для теплоты сгорания ГС:

$$H_{см}^{CT} \geq \frac{1}{\alpha} \frac{44,8 \left(C_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (C_{ДТ} - C_{АТ}) \right) + 113,9 \left(H_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (H_{ДТ} - H_{АТ}) \right) - 10,89}{15,94 \left(C_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (C_{ДТ} - C_{АТ}) \right) + 39,13 \left(H_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (H_{ДТ} - H_{АТ}) \right) - 4,35}, \quad (12)$$

где α - коэффициент избытка воздуха; $C_{ДТ}$, $C_{АТ}$, $H_{ДТ}$, $H_{АТ}$ - массовая доля углерода и водорода в 1 кг ДТ и АТ.

- для химического коэффициента молекулярного изменения ГС:

$$\mu_0^{CT} \geq 1 + \frac{\frac{H_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (H_{ДТ} - H_{АТ})}{4} + \frac{O_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (O_{ДТ} - O_{АТ})}{32}}{4,81\alpha \left(\frac{C_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (C_{ДТ} - C_{АТ})}{12} + \frac{H_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (H_{ДТ} - H_{АТ})}{4} - \frac{O_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (O_{ДТ} - O_{АТ})}{32} \right)}, \quad (13)$$

где $O_{ДТ}$, $O_{АТ}$ - массовая доля кислорода в 1 кг ДТ и АТ.

- для скрытой теплоты парообразования СТ:

$$r^{CT} \leq \left(T_k + \frac{\Delta T_N}{110 - 0,0125n_N} (110 - 0,0125n) \varepsilon_{C_v}^{\frac{R_y}{C_v}} - T_{сам}^{CT} \right) \times \left(C_v^{CT} + \alpha \left(15,94 \left(C_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (C_{ДТ} - C_{АТ}) \right) + 39,13 \left(H_{ДТ} - \frac{M_{АТ}}{100} (H_{ДТ} - H_{АТ}) \right) - 4,35 \right) \frac{C_v}{\mu_s} \right), \quad (14)$$

где $T_{сам}^{CT}$ - температура самовоспламенения СТ, К.

- для энергии активации СТ:

$$E^{CT} < \frac{R_y (T_{сам}^{CT})^2}{T_c - \frac{r^{CT}}{C_v^{CT} + \alpha l_0^{CT} \frac{C_v}{\mu_s}} - T_{сам}^{CT}}, \quad (15)$$

где C_v^{CT} - средняя молярная теплоёмкость СТ при постоянном объёме, Дж/(моль·К); l_0^{CT} - теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг СТ, кг возд./кг топл.

- для цетанового числа СТ:

$$ЦЧ_{СТ} \leq \frac{100}{\frac{q_{ц}^{CT} \varphi_{впр}}{q_{ц,исп.ПЗВ}^{CT} \sqrt[3]{\varphi_i^{ДТ}}} \sqrt{\left(\frac{0,6 K_T^{CT}}{6n \cdot 10^{-3} (p_z^{ДТ} - p_c)} \right)^3}}, \quad (16)$$

где $q_{ц,исп.ПЗВ}^{CT}$ - цикловая подача топлива, испарённая за период задержки воспламенения (ПЗВ), кг/цикл; $\varphi_i^{ДТ}$ - ПЗВ в ТД, работающего на ДТ, град пкв; K_T - характеристический фактор топлива; $p_z^{ДТ}$ - максимальное давление сгорания в ТД, работающего на ДТ, МПа; p_c - давление свежего заряда в цилиндре ТД в конце такта сжатия, МПа.

- для температуры разгонки 50 % фракции СТ:

$$T_{50}^{CT} \leq 555,41 \cdot 10^{-9} n^3 \frac{(p_z^{ДТ} - p_c)^3}{\varphi_i^{ДТ}} \left(\frac{100 q_{ц,исп.ПЗВ}^{CT}}{q_{ц}^{CT} \varphi_{впр} ЦЧ_{СТ}} \right)^2 \quad (17)$$

Результаты теоретических расчётов областей предельных значений видов и составов СТ для ТД марки Д-245.5S2, размерностью 4ЧН 11,0/12,5 представлены на рисунке 1 в виде диаграммы.

Анализ данных (рис. 1) показал, что среди растительных масел наибольшая область предельных значений содержания РМ в СТ составила от 0 % до 65 %. Среди эфиров растительных масел наибольшая область предельных значений содержания этилового эфира РМ в СТ составила от 0 % до 42 %. Среди низших спиртов – Э от 0 % до 45 %, соответственно.

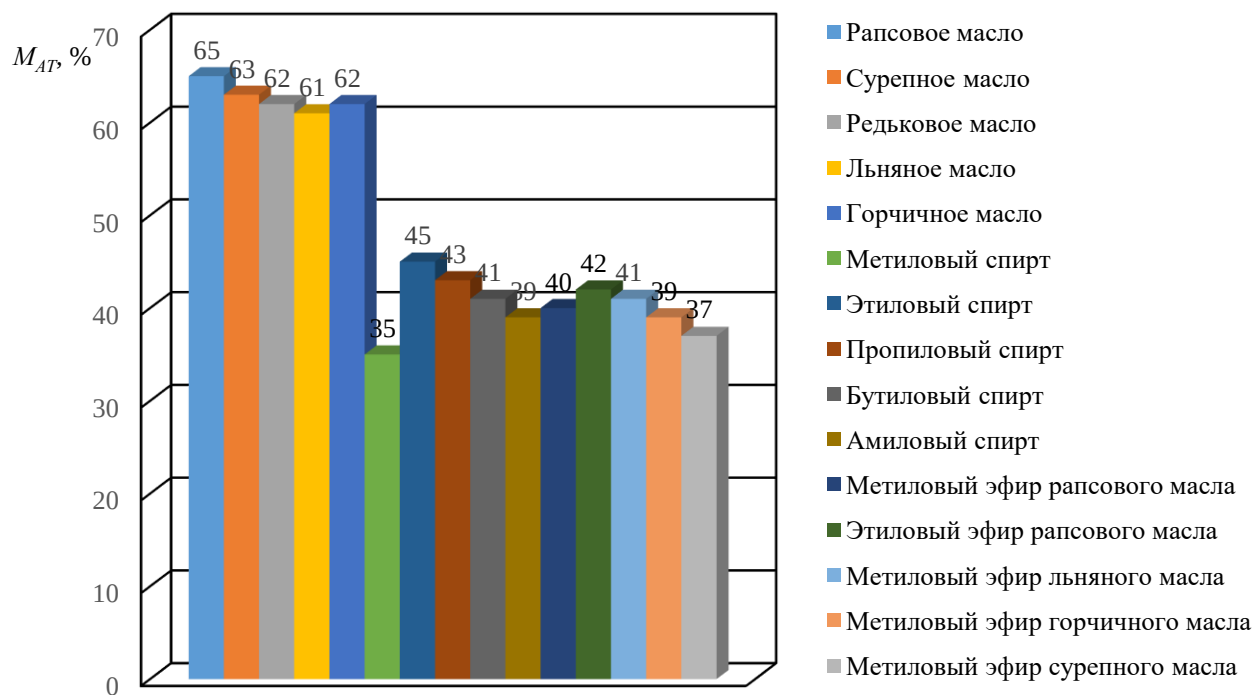


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости видов и составов СТ от содержания в них АТ для ТД марки Д-245.5S2 размерностью 4ЧН 11,0/12,5

Таким образом установлено, что разработанный методологический подход позволил определить области предельных составов СТ, в зависимости от их физико-химических свойств и конструктивно-технологических параметров ТД.

Для нахождения оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД разработан критерий оценки. Данный критерий позволил вычислить значение максимального улучшения эксплуатационных показателей ТД в зависимости от режимов работы и содержания АТ в СТ. Система выражений для определения численного значения критерия оценки оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД представлена следующим образом:

$$\begin{cases}
 P_n(p_e, n, M_{AT}) = f \left\{ 0,11(1) \left(\frac{\bar{p}_{мт} + \bar{\eta}_м + \bar{\eta}_e + \bar{g}_e + \bar{C} + \bar{C}\bar{O} + \bar{C}\bar{O}_2 + \bar{C}_x\bar{H}_y + \bar{N}\bar{O}_x}{+ \bar{C}\bar{O} + \bar{C}\bar{O}_2 + \bar{C}_x\bar{H}_y + \bar{N}\bar{O}_x} \right) \right\} \rightarrow \min, \\
 a_{mn}n^2 + b_{mn}n + c_{mn} \leq p_e \leq a_in^2 + b_in + c_i, \\
 n_{хх}^{\min} \leq n \leq n_{хх}^{\max} \\
 0 \leq M_{AT} \leq 100
 \end{cases}
 \begin{cases}
 n_{хх}^{\min} < n < n_{ндк}, & i = 1 \\
 n_{ндк} < n < n_{код}, & i = 2 \\
 n_{код} < n < n_{нор}, & i = 3 \\
 n_{нор} < n < n_{хх}^{\max}, & i = 4
 \end{cases}, \quad (18)$$

где P_n - критерий оценки оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД; p_e - среднее эффективное давление (нагрузка), МПа; f - функция эксплуатационных показателей; $\bar{p}_{мт}$, $\bar{\eta}_м$, $\bar{\eta}_e$, $\bar{g}_e$, $\bar{C}$, $\bar{C}\bar{O}$, $\bar{C}\bar{O}_2$, $\bar{C}_x\bar{H}_y$, $\bar{N}\bar{O}_x$ - относительное значение среднего давления механических потерь, механического КПД, эффективного КПД, эффективного удельного расхода топлива, содержания сажи в ОГ ТД, монооксида углерода в ОГ ТД, диоксида углерода в ОГ ТД, несгоревших углеводородов в ОГ ТД, оксидов азота в ОГ ТД; $\min$ - минимальное значение; i - текущий номер режима работы ТД; a_{mn} , b_{mn} , c_{mn} , a_i , b_i , c_i - коэффициенты в полиномах 2 степени; $n_{хх}$, $n_{ндк}$, $n_{код}$, $n_{нор}$ - частота вращения холостого хода, соответствующая началу действия корректора, соответствующая концу действия корректора, соответствующая началу действия регулятора КВ ТД, мин^{-1} .

Таким образом, поиск $P_n(p_e, n, M_{AT}) \rightarrow \min$ при варьировании $0 \leq M_{AT} \leq 100$ в СТ для всех заданных режимов работы ТД позволил найти оптимальный состав СТ. Для определения численного значения критерия оценки определены относительные значения эксплуатационных показателей ТД, работающего на предельных составах СТ.

Относительные значения найдены:

- для давления механических потерь ТД:

$$\bar{P}_{mn} = \frac{0,277 \left(\frac{\beta_{CT} \cdot 10^{-6} P_{впр} V_{ТНВД} \rho_m^{CT} + 0,12 n q_u (P_{впр} - P_{ТННД})}{\eta_o^{ТНВД} \eta_m^{ТНВД}} + \frac{\beta_{CT} \cdot 10^{-6} P_{впр} V_{ТНВД} \rho_m^{CT} + 0,12 n q_u (P_{ТННД} - P_{атм})}{\left(1 - \frac{\Delta_{n,к}}{100}\right) \eta_o^{ТННД} \eta_m^{ТННД}} \right)}{\frac{V_\lambda}{30\tau} \left(\frac{a_{mn} S_n^2 n^3}{9 \cdot 10^8} + \frac{b_{mn} S_n n^2}{3 \cdot 10^4} + c_{mn} n \right)}, \quad (19)$$

где $V_{ТНВД}$ - объёмный расход топлива ТНВД, м³/ч; $P_{ТННД}$, $P_{атм}$ - давление, создаваемое ТННД, атмосферное, МПа; $\Delta_{n,к}$ - доля топлива, сливающегося через перепускной клапан, %; $\eta_o^{ТННД}$, $\eta_m^{ТННД}$ - КПД ТННД объёмный и механический; V_λ - рабочий объём ТД, м³; τ - тактность ТД, S_n - ход поршня, м.

- для механического КПД ТД:

$$\bar{\eta}_m = \frac{\bar{P}_{mn} p_{mn}^{DT} + p_e}{p_e + p_{mn}^{DT}}, \quad (20)$$

где p_{mn}^{DT} - среднее давление механических потерь в ТД, работающем на ДТ, МПа.

- для эффективного КПД ТД:

$$\bar{\eta}_e = \frac{p_k^{DT} T_k^{CT} q_u^{CT} H_u^{CT}}{p_k^{CT} T_k^{DT} q_u^{DT} H_u^{DT}}, \quad (21)$$

где p_k^{DT} , p_k^{CT} , T_k^{DT} , T_k^{CT} - давление и температура во впускном коллекторе ТД, работающего на ДТ и СТ, МПа, К; H_u^{DT} , H_u^{CT} - низшая расчётная теплота сгорания ДТ и СТ, МДж/кг.

- для эффективного удельного расхода топлива ТД:

$$\bar{g}_e = \frac{T_k^{CT} q_u^{CT} p_k^{DT}}{T_k^{DT} q_u^{DT} p_k^{CT}} \quad (22)$$

- для содержания в ОГ ТД сажи, монооксида углерода, диоксида углерода, несгоревших углеводородов и оксидов азота:

$$\bar{C} + \bar{CO} + \bar{CO}_2 + \bar{C}_x \bar{H}_y + \bar{NO}_x = \frac{p_k^{CT} \rho_k^{CT} \eta_v^{CT} T_k^{DT}}{p_k^{DT} \rho_k^{DT} \eta_v^{DT} T_k^{CT}} - \frac{q_{mO_2}^{CT}}{q_{mO_2}^{DT}} + \frac{q_u^{CT} O^{CT}}{q_u^{DT} O^{DT}} + \frac{q_{mCH}^{CT}}{q_{mCH}^{DT}} - \frac{q_{mH_2O}^{CT}}{q_{mH_2O}^{DT}}, \quad (23)$$

где ρ_k^{CT} , ρ_k^{DT} - плотность свежего заряда во впускном коллекторе ТД, работающего на СТ и ДТ, кг/м³; η_v^{CT} , η_v^{DT} - коэффициент наполнения цилиндров ТД, работающего на СТ и ДТ; $q_{mO_2}^{CT}$, $q_{mO_2}^{DT}$ - часовой массовый расход кислорода, оставшегося после сгорания СТ и ДТ, кг/ч; O^{CT} , O^{DT} - массовая доля кислорода в 1 кг СТ и ДТ; q_{mCH}^{CT} , q_{mCH}^{DT} - часовой массовый расход несгоревших углеводородов в ОГ ТД, работающего на СТ и ДТ, кг/ч; $q_{mH_2O}^{CT}$, $q_{mH_2O}^{DT}$ - часовой массовый расход воды с воздухом ТД, работающего на СТ и ДТ, кг/ч.

Результаты теоретических расчётов критерия оценки оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД марки Д-245.5S2, размерностью 4ЧН 11,0/12,5 с учётом условий для двух видов СТ, а, именно, ДТ+РМ и ДТ+Э, представлены на рисунке 2. Анализ полученных расчётных данных показал целесообразность применения нового разработанного критерия оценки оптимального состава СТ, позволяющего определять улучшение эксплуатационных показателей ТД для всех режимов работы. Определены области режимов работы ТД и составов СТ, для которых $P_n < 1$, позволяющие улучшить эксплуатационные показатели.

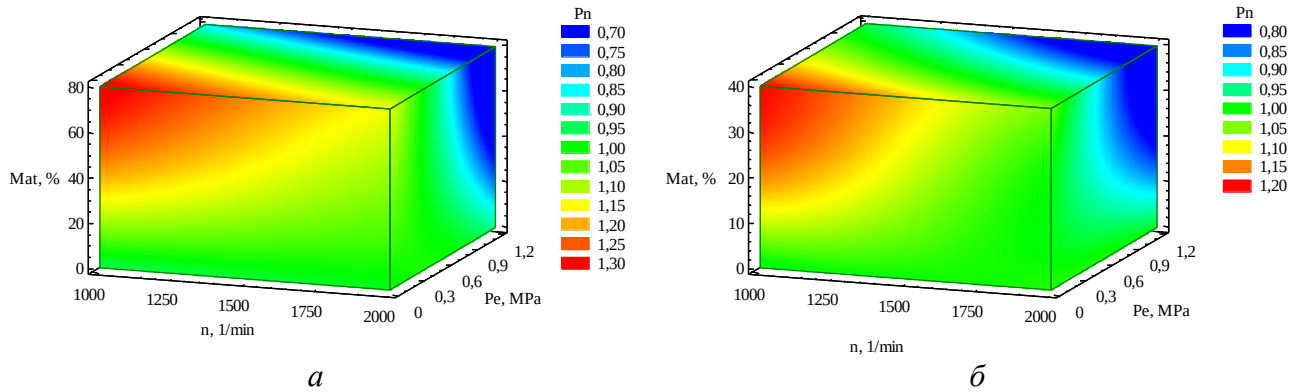


Рисунок 2 – Зависимость критерия оценки оптимального состава СТ P_n при использовании: a – ДТ и РМ; b – ДТ и Э для всех режимов работы ТД

Для ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 установлено, что применение оптимального состава СТ, содержащего РМ от 0 % до 60 % при нагрузке от 0,6 МПа до 1,2 МПа и частоте вращения коленчатого вала ТД от 1200 мин⁻¹ до 2000 мин⁻¹ улучшало эксплуатационные показатели до 27 % (рис. 2, a), а применение оптимального состава СТ, содержащего Э от 0 % до 40 % при нагрузке от 0,45 МПа до 1,2 МПа и частоте вращения коленчатого вала ТД от 1250 мин⁻¹ до 2000 мин⁻¹ улучшало эксплуатационные показатели до 19 % (рис. 2, b), соответственно.

Определены значения показателей процесса сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД в зависимости от режимов работы при помощи следующих выражений. В зависимости от конструктивно-технологических параметров ТД при его работе на различных режимах и оптимальных составах СТ:

Период задержки воспламенения (ПЗВ):

$$\varphi_i = \theta - \frac{n(h_n'' + h_k + h_k^0 + l_m + h_\phi + h_{nw})}{6a_{CT}} - \varphi_{впр} \left(1 - \frac{1,216 \sqrt{(T_{50}^{CT})^4 (\rho_m^{CT})^3}}{ЦЧ_{CT} T_{впр}^{CT}} \right)^2, \quad (24)$$

где θ - установочный угол опережения начала впрыскивания топлива в ТД, работающем на оптимальных составах СТ, град пкв; a_{CT} - скорость распространения волны давления в СТ, м/с; $\varphi_{впр}$ - угол впрыскивания, град пкв; $T_{впр}^{CT}$ - температура СТ во время впрыскивания, К.

Максимальное давление сгорания:

$$p_z = p_k^{CT} \left(1 - \mu_\epsilon (\beta^2 + \xi_{en}) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2}{120 f_{en}} \sqrt{1 + \lambda_k^2 n} \right)^2}{2R_y T_k^{CT}} \right) \epsilon^{1 + \frac{R_y}{C_v}} + \frac{5,39 \cdot 10^{-4} i_{усп.ПЗВ} \sqrt{q_{и}^{CT} q_{иПЗВ}^{CT}} \left(\frac{\varphi_{впр}}{\varphi_i} \right)^{0,35} K_t H_{см}^{CT} R_y}{V_{KC} C_v}, \quad (25)$$

где $i_{усп.ПЗВ}$ - относительная степень испарения топлива за ПЗВ; $q_{иПЗВ}^{CT}$ - цикловая подача СТ за ПЗВ, кг/цикл; V_{KC} - объём камеры сгорания, м³; K_t - поправочный коэффициент на изменение температуры и давления среды в результате сжатия и сгорания.

Давление в цилиндре ТД в конце такта сжатия:

$$p_c = p_k \left(1 - \mu_\epsilon (\beta^2 + \xi_{en}) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2}{120 f_{en}} \sqrt{1 + \lambda_k^2 n} \right)^2}{2R_y T_k} \right) \epsilon^{1 + \frac{R_y}{C_v}}, \quad (26)$$

Максимальная скорость нарастания давления в цилиндре ТД:

$$\left(\frac{dP}{d\varphi} \right)_{\max} \geq \frac{5,72 \cdot 10^{-5} n q_{и,усп.ПЗВ}^{CT} H_{см}^{CT} (n_1 - 1) \sqrt[3]{i_{усп.ПЗВ}^2} \int_0^{\varphi_i} \frac{dq_{и}^{CT}}{d\varphi} K_t^2}{V_{KC} \varphi_i^{0,683} \varphi_{впр}^{0,44} \sqrt[3]{T_{50}^{CT} q_{и}^{CT} ЦЧ_{CT}^2}}, \quad (27)$$

где n_1 - показатель среднего значения политропы сжатия.

Степень повышения давления в цилиндре ТД:

$$\lambda = 1 + \frac{5,39 \cdot 10^{-4} i_{\text{исп.ПЗВ}} \sqrt{q_{\text{ц}}^{\text{CT}} q_{\text{цПЗВ}}^{\text{CT}}} \left(\frac{\varphi_{\text{всп}}}{\varphi_i} \right)^{0,35} K_i H_{\text{см}}^{\text{CT}} R_y}{V_{\text{КС}} C_V p_k^{\text{CT}} \left[1 - \mu_{\text{в}} (\beta^2 + \xi_{\text{вн}}) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2}{120 f_{\text{вн}}} \sqrt{1 + \lambda_k^2 n} \right)^2}{2 R_y T_k^{\text{CT}}} \right] \varepsilon^{1 + \frac{R_y}{C_V}}}. \quad (28)$$

Давление начала видимого сгорания в цилиндре ТД:

$$p_{\text{зс}}^{\text{CT}} = \frac{R_y \left(T_c - \frac{r^{\text{CT}}}{C_V^{\text{CT}} + \alpha l_0^{\text{CT}} \frac{C_V}{\mu_{\text{в}}}} \right)}{V_{\text{КС}}}. \quad (29)$$

Средняя скорость нарастания давления в цилиндре ТД:

$$\frac{\Delta p}{\Delta \varphi} = \frac{100 i_{\text{исп.ПЗВ}} (p_z - p_{\text{зс}}^{\text{CT}})}{\rho_m^{\text{CT}} \text{ЦЧ}_{\text{CT}}}. \quad (30)$$

Определены условия работы ЛНД СП ТД на оптимальных составах СТ в зависимости от режимов работы ТД на основании следующих выражений.

Предельные значения противодействия и давления СТ, создаваемые ТННД перед ТНВД, обеспечивающие бесперебойную работу ЛНД СП ТД. Для линии всасывания:

$$P_{\text{ТННД}} \geq \frac{42,54 v_{\text{CT}} n q_{\text{ц}}^{\text{CT}} \left(\frac{l_{\text{вм1}}}{d_{\text{мб}}^4} + \frac{l_{\text{вм2}}}{d_{\text{тннд}}^4} + k_{\text{фзот}} \right)}{\pi \cdot 10^{10}} - (H_{\text{мб}} \rho_m^{\text{CT}} g - (h_{\text{мб}} - h_{\text{тннд}}) \rho_m^{\text{CT}} g) \cdot 10^{-6} - \frac{1,77 n^2 (q_{\text{ц}}^{\text{CT}})^2 \left(\frac{1}{d_{\text{мб}}^4} - \frac{1}{d_{\text{тннд}}^4} \right)}{\rho_m^{\text{CT}} \pi^2 \cdot 10^{14}} - P_{\text{атм}}, \quad (31)$$

где $l_{\text{вм1}}$, $l_{\text{вм2}}$ - длина всасывающего топливопровода до фильтра, всасывающего топливопровода после фильтра, м; $k_{\text{фзот}}$, $k_{\text{фзот}}$ - коэффициент потери напора в фильтре грубой очистки топлива, в фильтре тонкой очистки топлива, м⁻³; $d_{\text{мб}}$, $d_{\text{тннд}}$ - диаметр сечений топливопроводов топливного бака, перед и после ТННД, м; $H_{\text{мб}}$ - уровень топлива в топливном баке, м; $h_{\text{мб}}$, $h_{\text{тннд}}$ - высота расположения топливного бака, ТННД, м.

Для линии нагнетания:

$$P_{\text{ТНВД}} \leq P_{\text{ТННД}} + \frac{1,77 n^2 (q_{\text{ц}}^{\text{CT}})^2 \left(\frac{1}{d_{\text{мб}}^4} - \frac{1}{d_{\text{тннд}}^4} \right)}{\rho_m^{\text{CT}} \pi^2 \cdot 10^{14}} + (h_{\text{тннд}} - h_{\text{тннд}}) \rho_m^{\text{CT}} g \cdot 10^{-6} - \frac{42,54 v_{\text{CT}} n q_{\text{ц}}^{\text{CT}} \left(\frac{l_{\text{вм1}}}{d_{\text{мб}}^4} + \frac{l_{\text{вм2}}}{d_{\text{тннд}}^4} + k_{\text{фзот}} \right)}{\pi \cdot 10^{10}}, \quad (32)$$

где $h_{\text{тннд}}$ - высота расположения топливного бака, ТНВД, м.

Определены характеристики ТП СП ТД оптимальных составов СТ, исходя из соблюдения условий равенства ввода теплоты в цилиндры с $q_{\text{ц}}$ такой же, как и при работе на ДТ, а также значений параметров работы регулятора и корректора ТНВД:

$$q_{\text{ц}}^{\text{CT}} = q_{\text{ц}}^{\text{ДТ}} \frac{\alpha_{\text{ДТ}} l_0^{\text{ДТ}} \rho_k^{\text{ДТ}} \eta_v^{\text{ДТ}}}{\alpha_{\text{СТ}} l_0^{\text{СТ}} \rho_k^{\text{СТ}} \eta_v^{\text{СТ}}}, \quad (33)$$

где $\alpha_{\text{ДТ}}$, $\alpha_{\text{СТ}}$ - коэффициент избытка воздуха в ТД, работающем на ДТ и СТ; $l_0^{\text{ДТ}}$ - теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг ДТ, кг возд./кг топл.

Определены условия впрыскивания и распыливания форсунками СП ТД оптимальных составов СТ:

$$p_{впр} > \frac{\frac{4\sigma_{CT}}{d_c} + \mu_\phi^2 p_k \left(1 - \mu_\phi (\beta^2 + \xi_{вн}) \frac{\left(\frac{R_k \pi^2 D_n^2}{120 f_{вн}} \sqrt{1 + \lambda_k^2 n} \right)^2}{2R_y T_k} \right)}{\mu_\phi^2} \varepsilon^{1 + \frac{R_y}{C_v}}, \quad (34)$$

Определены значения установочного угла опережения начала впрыскивания оптимальных составов СТ при работе ТД:

$$\theta = \frac{n(h_n^n + h_k + h_k^0 + l_m + h_\phi + h_{ну})}{6a_{CT}} + \varphi_i + \varphi_{впр} \left(1 - \frac{1,216 \sqrt[3]{(T_{50}^{CT})^4} (\rho_m^{CT})^3}{ЦЧ_{CT} T_{впр}^{CT}} \right)^2, \quad (35)$$

где h_k - ход нагнетательного клапана, м; h_k^0 , h_ϕ , $h_{ну}$ - высота штуцера ТНВД при нулевом ходе плунжера, полости форсунки, полости иглы форсунки, м; a_{CT} - скорость распространения волн давления в топливе, м/с; $T_{впр}^{CT}$ - температура СТ во время впрыскивания, К.

Получена модель сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД в интегральной форме:

$$\begin{cases} M = \mu_0^{CT} L_0^{CT} q_u^{CT} \chi \\ U = H_u^{CT} q_u^{CT} \chi - \frac{7,8 \sqrt{PT}^3 \sqrt{\frac{2R_k n}{3 \cdot 10^4}} \left(S_{kc} + \pi D_n \left(R_k \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda_k}{4} (1 - \cos 2\varphi) - k \lambda_k \sin \varphi \right] \right) \right) (T - T_{KC}) \varphi}{6n} - P \Delta V, \\ P = \frac{M}{V} R_y T \left[1 + \sum_i^N B_i x_i \frac{M}{V} + \left(\sum_i^N b_i x_i \right)^2 \frac{M^2}{V^2} + \left(\sum_i^N b_i x_i \right)^3 \frac{M^3}{V^3} \right] \end{cases} \quad (36)$$

где M - количество вещества рабочего тела, моль; L_0^{CT} - теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг СТ, моль возд./кг топл; χ - относительное тепловыделение; U - внутренняя энергия рабочего тела, Дж; P , T , V - текущее значение давления, МПа, температуры, К, объёма, м³; R_k - радиус кривошипа ТД, м; S_{kc} - площадь камеры сгорания ТД, м²; k - величина относительного смещения дезаксиального кривошипно-шатунного механизма; T_{KC} - температура стенок КС, К; ΔV - изменение объёма рабочего тела в цилиндре ТД, м³; B_i , b_i - вириальные коэффициенты i -ого компонента рабочего тела в цилиндре, м³/моль; x_i - молярная доля i -ого компонента рабочего тела в цилиндре; N - общее количество компонентов рабочего тела.

При помощи системы уравнений (36) рассчитаны основные параметры процесса сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД в зависимости от режима работы.

В дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{d\varphi} &= \mu_0^{CT} L_0^{CT} \left(\chi \frac{dq_u^{CT}}{d\varphi} + q_u^{CT} \frac{d\chi}{d\varphi} \right) \\ \frac{dT}{d\varphi} &= \frac{1}{MC_v} \left(\frac{dQ_x}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} - P \frac{dV}{d\varphi} - \frac{1}{C_v} \frac{dC_v}{d\varphi} - \frac{T}{M} \frac{dM}{d\varphi} \right) \\ \frac{dP}{d\varphi} &= \frac{R_y}{V} \left(T \left(\frac{dM}{d\varphi} - \frac{M}{V} \frac{dV}{d\varphi} \right) + M \frac{dT}{d\varphi} + \frac{M}{V} \sum_i^N B_i x_i \left(2T \left(\frac{dM}{d\varphi} - \frac{M}{V} \frac{dV}{d\varphi} \right) + M \frac{dT}{d\varphi} \right) + \frac{\left(\sum_i^N b_i x_i \right)^2 M}{V} \times \left(3T \left(\frac{dM}{d\varphi} - \frac{M}{V} \frac{dV}{d\varphi} \right) + M \frac{dT}{d\varphi} \right) + \frac{\left(\sum_i^N b_i x_i \right)^3 M}{V} \times \left(4T \left(\frac{dM}{d\varphi} - \frac{M}{V} \frac{dV}{d\varphi} \right) + M \frac{dT}{d\varphi} \right) \right) \end{aligned} \quad (37)$$

При помощи системы уравнений (37) получены значения показателей процесса сгорания оптимальных составов СТ, состоящих из ДТ и РМ, в цилиндрах ТД в зависимости от режима работы.

Расчётные индикаторные диаграммы для номинального скоростного режима работы ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5, марки Д-245.5S2 на оптимальных составах СТ, состоящих из ДТ и РМ, ДТ и Э, представлены на рисунке 10.

В качестве модели тепловыделения в ТД, работающем на оптимальных составах СТ, использована так называемая “двугорбая” динамика тепловыделения, разработанная Б.П. Пугачевым.

В интегральной форме она представлена следующим образом:

$$\chi = \chi_1 \left[1 - e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_1^2}} \right] + \chi_2 \left[1 - e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_2^2}} \right], \quad (38)$$

где χ_1, χ_2 - относительные доли теплоты, выделившиеся в кинетической и диффузионной фазе процесса сгорания; φ_1, φ_2 - продолжительности сгорания от его начала до моментов достижения максимального значения скорости сгорания в кинетической и диффузионной фазах, соответственно, град пкв.

В дифференциальной форме:

$$\frac{d\chi}{d\varphi} = \frac{\chi_1}{\varphi_1^2} \varphi e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_1^2}} + \frac{\chi_2}{\varphi_2^2} \varphi e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_2^2}}, \quad (39)$$

Относительная доля теплоты, выделившаяся в кинетической фазе процесса сгорания, определена, как:

$$\chi_1 = \frac{V_y}{(\bar{k}_1 - 1) Q_y^{CT}} (p_y - p_{cy}), \quad (40)$$

где V_y - объём рабочего тела в цилиндре ТД в момент достижения $\left(\frac{dP}{d\varphi} \right)_{\max}$, м³; $\bar{k}_1$ - показатель среднего значения адиабаты за период кинетической фазы процесса сгорания; Q_y^{CT} - количество теплоты вносимой с цикловой подачей СТ в цилиндр ТД, Дж; p_y, p_{cy} - давление рабочего тела в цилиндре ТД в момент достижения $\left(\frac{dP}{d\varphi} \right)_{\max}$, на диаграмме чистого сжатия для момента, соответствующего положению точки $\left(\frac{dP}{d\varphi} \right)_{\max}$, МПа.

Относительная доля теплоты, выделившаяся в диффузионной фазе процесса сгорания:

$$\chi_2 = 1 - \sum_{i=1}^n m_i \frac{\alpha_{CT}^{CT} l_0^{CT} H_u^i}{\rho_m^{CT} H_u^{CT}} - \chi_1, \quad (41)$$

где m_i - масса продукта неполного сгорания топлива, кг/м³; H_u^i - низшая расчётная теплота сгорания продукта неполного сгорания топлива, МДж/кг; i - порядковый номер продукта неполного сгорания топлива, n - общее количество продуктов неполного сгорания топлива.

Продолжительность сгорания от его начала до момента достижения максимального значения скорости сгорания в кинетической фазе, найдена, как:

$$\varphi_1 = 6n \frac{r_{kc}}{v_{cz}}, \quad (42)$$

где r_{kc} - радиус КС цилиндра ТД, м; v_{cz} - нормальная скорость сгорания ГС, м/с.

Продолжительность сгорания от его начала до момента достижения максимального значения скорости сгорания в диффузионной фазе:

$$\varphi_2 = \frac{6nV_h}{0,208(\alpha_{CT} - 1) L_0^{CT} q_y^{CT} A_{ro} K_0 e^{-\frac{E^{CT}}{R_y \left(T_c - \frac{r^{CT} + H_{cm}^{CT}}{C_V^{CT} + \alpha l_0^{CT} C_V} \right)} (\varepsilon - 1)}}, \quad (43)$$

где A_o - молярная масса кислорода кг/моль; K_o - предэкспоненциальный множитель, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$; T_c - свежего заряда в цилиндре ТД в конце такта сжатия, К.

Расчётные диаграммы тепловыделения для номинального скоростного режима работы ТД размерностью, 4ЧН 11,0/12,5, марки Д-245.5S2 на оптимальных составах СТ, состоящих из ДТ и РМ, и ДТ и Э, представлены на рисунке 11.

В третьей главе изложены методики исследований. В исследованиях использован четырехцилиндровый, рядный, четырехтактный ТД с жидкостным охлаждением, газотурбинным наддувом и промежуточным охлаждением надувочного воздуха, с неразделенной КС типа (ЦНИДИ) в поршне и непосредственным впрыскиванием топлива, размерностью 4ЧН 11,0/12,5 марки Д-245.5S2. Исследования проведены на экспериментальных установках с полной комплектацией необходимого и сопутствующего оборудования, прошедшего техническую поверку и юстировку (рис. 3).

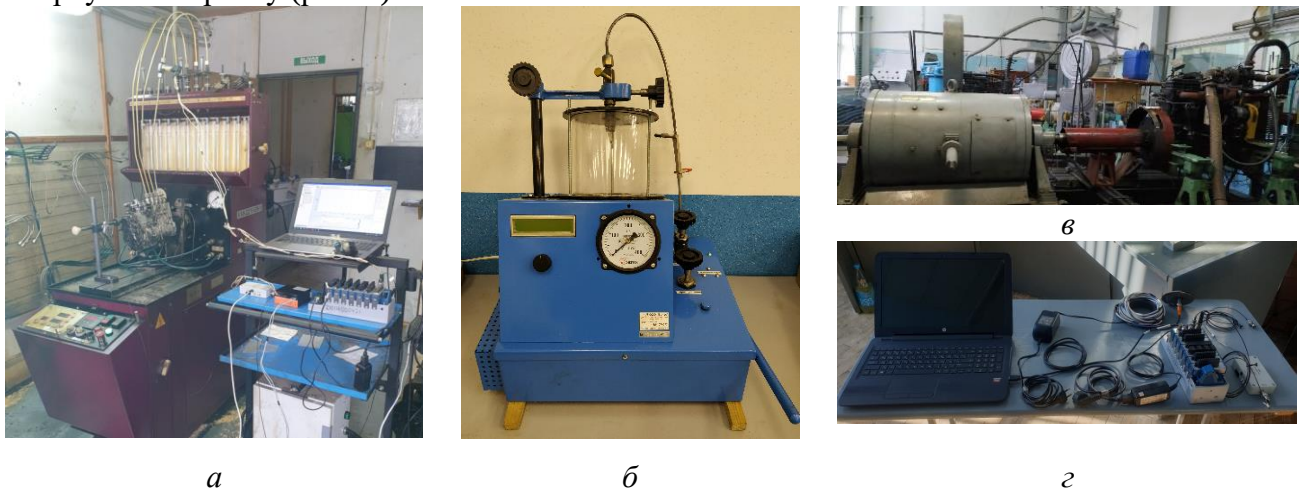


Рисунок 3 - Стенд для испытания и регулирования топливной аппаратуры ТД КИ-22210-02М-15 (а), стенд для испытания форсунки ТД М107 - CR (б), экспериментальная установка и нагрузочный электродвигательный стенд RAPIDO SAK N670 (в), комплекс для индирования (г)

Исследования и решения поставленных задач по достижению цели работы проведены в несколько этапов.

На первом этапе проведены сравнительные исследования работы штатной ЛНД СП ТД на СТ, содержащих АТ (РМ и Э) (рис. 3, а).

На втором этапе проведены сравнительные исследования работы ТПА ТД на СТ, состоящих из ДТ и РМ, а также ДТ и Э. При проведении исследований определены предельные содержания АТ (РМ и Э) в СТ, осуществляющие нормальную работу ТНВД (рис. 3, а).

На третьем этапе проведены сравнительные исследования процессов впрыскивания и распыливания форсункой модели ФД-22.455.1112010-50 с гидравлическим управлением подъема иглы на ДТ и СТ, состоящем из ДТ и РМ, а также ДТ и Э. При проведении исследований определены: предельные содержания АТ (РМ и Э) в СТ, обеспечивающие необходимые условия впрыскивания и распыливания (рис. 3, б), а также предельные содержания РМ и Э в СТ, осуществляющие бесперебойную работу ЛНД СП ТД.

На четвертом этапе проведены стендовые сравнительные исследования ТД, работающего на СТ, состоящих из ДТ и РМ, а также ДТ и Э. При проведении исследований определены оптимальные составы СТ, максимально улучшающие эффективные и экологические показатели ТД на всех режимах работы (рис. 3, в).

На пятом этапе проведены сравнительные исследования рабочего процесса ТД, работающего на СТ, состоящих из ДТ и РМ, а также ДТ и Э при помощи индирования. При проведении исследований определены оптимальные составы СТ, обеспечивающих оптимальные значения показателей процесса сгорания в ТД на всех режимах работы (рис. 3, г).

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований работы ЛНД СП ТД на различных составах СТ, содержащих РМ от 0 % до 80 %, а также Э от 0 % до 80 %. На основе полученных экспериментальных данных определены зависимости подачи $q_{\text{ТНВД}}$, максимального давления $P_{\text{ТНВД}}$ и разряжения на всасывании ТНВД $P_{\text{ТНВД}}$ от частоты циклов поршня $n_{\text{ци}}$ и состава СТ. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 4.

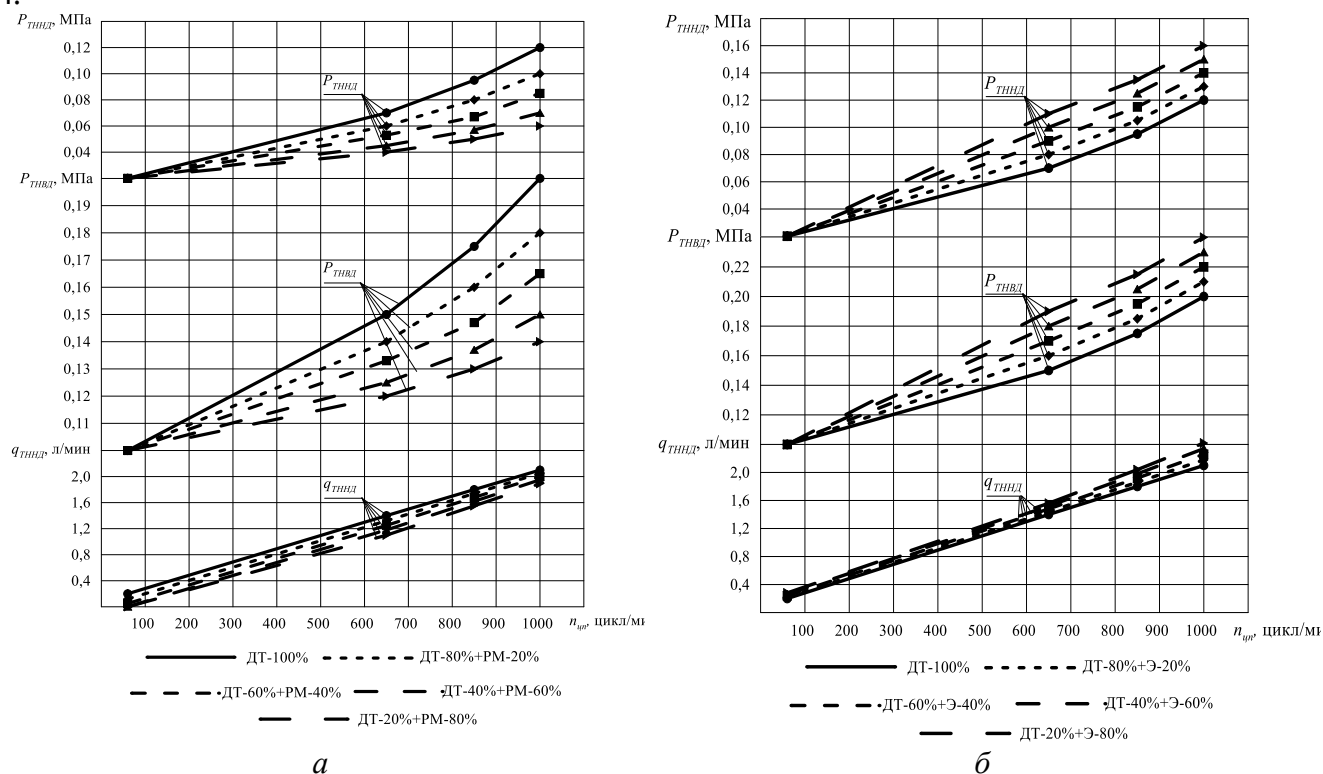


Рисунок 4 – Зависимости подачи $q_{\text{ТНВД}}$, максимального давления $P_{\text{ТНВД}}$ и разряжения на всасывании $P_{\text{ТНВД}}$ ТНВД 37.1106010-10 от частоты циклов поршня $n_{\text{ци}}$ и состава СТ, состоящего из: а – ДТ и РМ; б – ДТ и Э

Анализ полученных зависимостей (рис. 4) показал, что для обеспечения бесперебойной работы ЛНД СП ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 на оптимальных составах СТ, необходимо ограничить содержание в них РМ и Э не более 60 %, так как при больших значениях содержания РМ и Э максимальное давление $P_{\text{ТНВД}}$ и разряжение на всасывание $P_{\text{ТНВД}}$ не соответствует условиям перекачивания СТ. Данное обстоятельство подтвердило сделанные ранее теоретические предположения, представленные во 2 главе.

Результаты экспериментальных исследований работы ТНВД ЯЗДА (773-40.02) (773.1111005-40.02), представленных в виде частичных и предельных скоростных характеристик при разных положениях рычага управления всережимным регулятором, и составах СТ, состоящих из ДТ и РМ, а также ДТ и Э представлены на рисунке 5.

Анализ полученных зависимостей (рис. 5) показал, что обеспечение заданного режима работы ТД на оптимальных составах СТ достигается соблюдением таких условий как: равенство ввода теплоты в цилиндры ТД с цикловой подачей топлива такой же, как и при работе на ДТ, а также значений параметров работы регулятора и корректора ТНВД, таких же как и при работе на ДТ.

При работе ТНВД ЯЗДА (773-40.02) (773.1111005-40.02) на оптимальных составах СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % и Э от 0 % до 40 %, цикловая подача увеличилась на 7,64 % (рис. 5, а) и 12,68 % (рис. 5, б), соответственно. Полученные экспериментальные значения цикловой подачи подтвердили ранее сделанные теоретические расчёты.

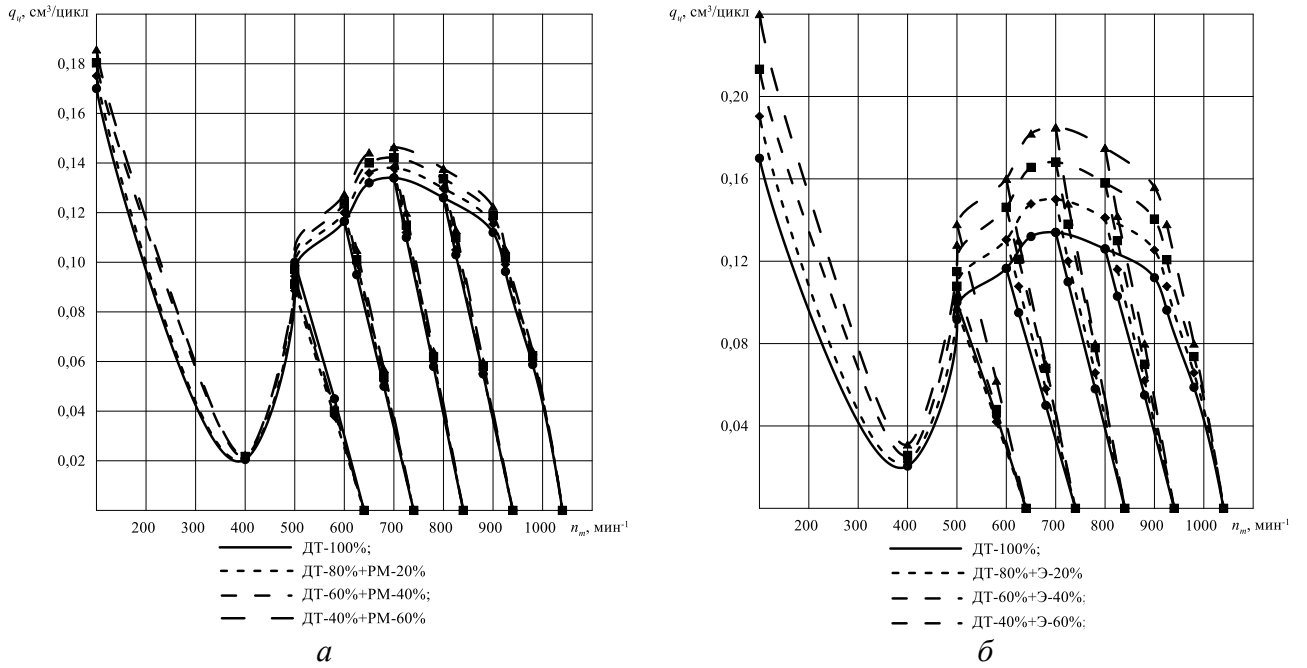


Рисунок 5– Скоростные характеристики ТНВД ЯЗДА (773-40.02) (773.1111005-40.02) при различных положениях рычага управления всережимным регулятором, работающего на СТ, состоящих из: *а* – ДТ и РМ; *б* – ДТ и Э

При этом значения углов наклона характеристик регулятора и корректора, а также частот вращения валика ТНВД, соответствующего началу и концу коррекции сопоставлены значениям при работе на ДТ.

На рисунке 6 представлены результаты экспериментальных исследований показателей работоспособности форсунки ФД-22.455.1112010-50, а, именно, давление начала впрыскивания $p_{впр}$, герметичность самой форсунки и её распылителя по запирающему конусу ϖ , гидроплотность распылителя ρ_g от содержания РМ и Э в СТ.

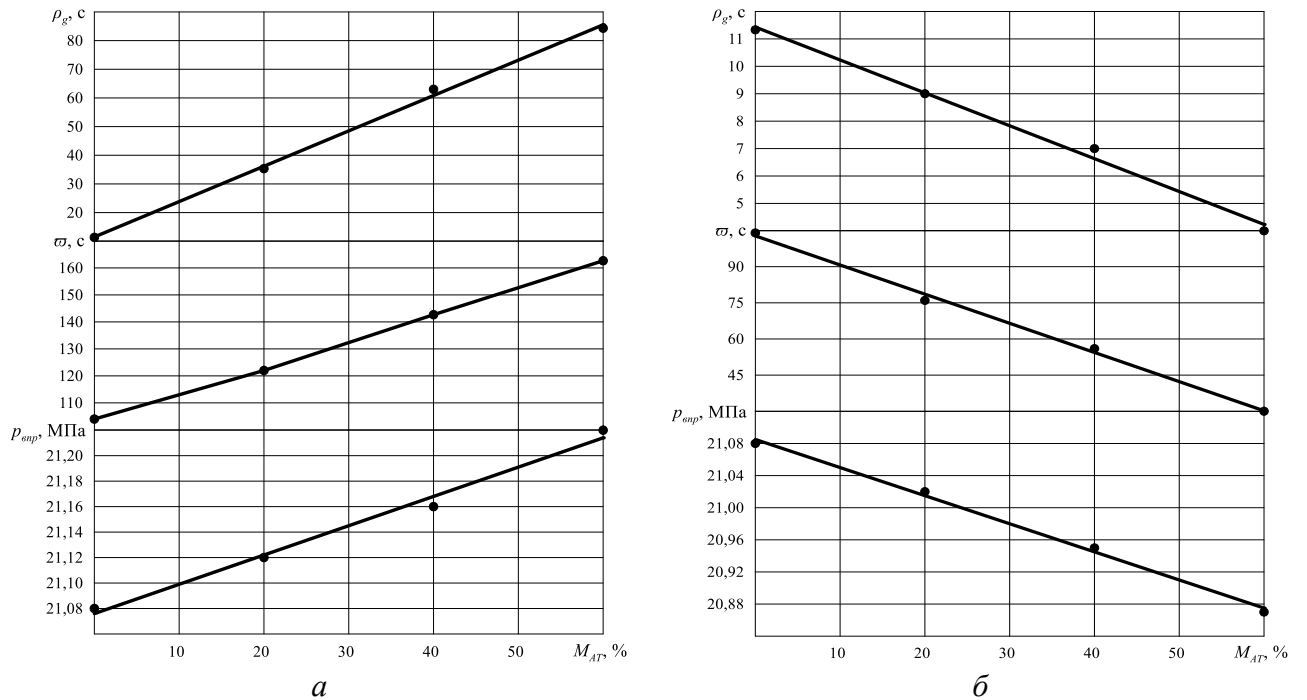


Рисунок 6 – Зависимости давления начала впрыскивания форсунки $p_{впр}$, герметичности форсунки и распылителя по запирающему конусу ϖ и гидроплотности распылителя ρ_g от содержания: *а* – РМ в СТ M_{AT} ; *б* – Э в СТ M_{AT}

Анализ зависимостей представленных на рисунке 6, *а* показал, что, увеличение содержания РМ в СТ от 0 % до 60 % повышало $p_{впр}$ от до 21,08 МПа до 21,22 МПа, ϖ от 104 с до 162 с, ρ_g от 11 с до 84 с, соответственно.

Анализ зависимостей (рис. 6, *б*) показал, что, увеличение содержания Э в СТ от 0 % до 60 % снижало $p_{впр}$ от 21,08 МПа до 20,87 МПа, ϖ от 104 с до 30 с, ρ_g от 11 с до 4 с, соответственно. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласовались с теоретическими расчётами.

Таким образом, для обеспечения условий впрыскивания и распыливания форсунками ФД-22.455.1112010-50 применяемые составы СТ должны содержать не более 60 % РМ и 40 % Э, соответственно, т.к. значение $p_{впр}$ снижалось ниже допустимого значения, обеспечивающего условия впрыскивания.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований определения оптимальных составов СТ для всех режимов работы ТД. Для определения угла опережения начала впрыскивания θ , обеспечивающего наилучшие показатели работы ТД, проведены экспериментальные исследования различных составов СТ, состоящих из ДТ и РМ, а также ДТ и Э. Оценка влияния вида и состава СТ на θ проведена на основе анализа регулировочных характеристик, представленных на рисунке 7.

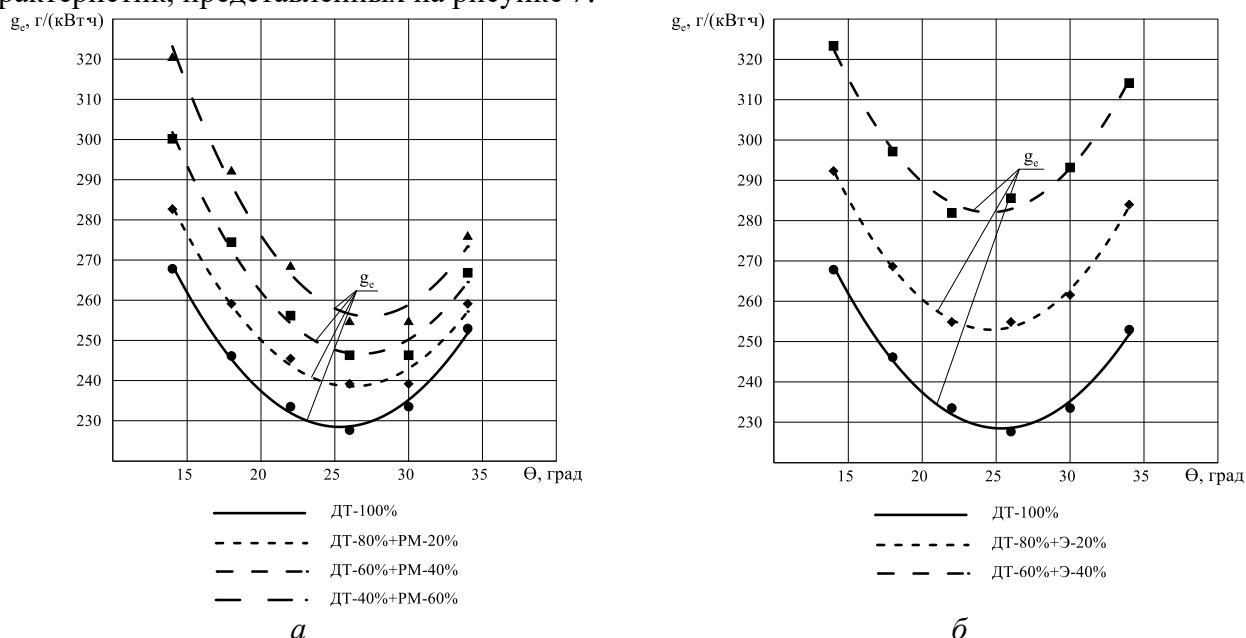


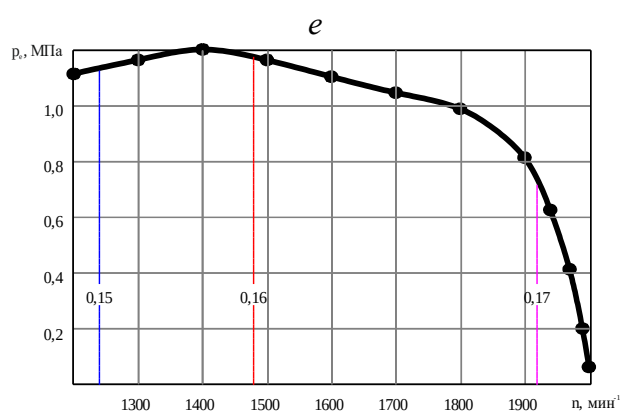
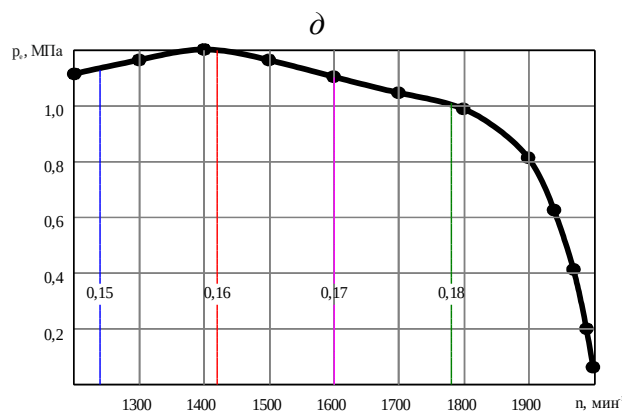
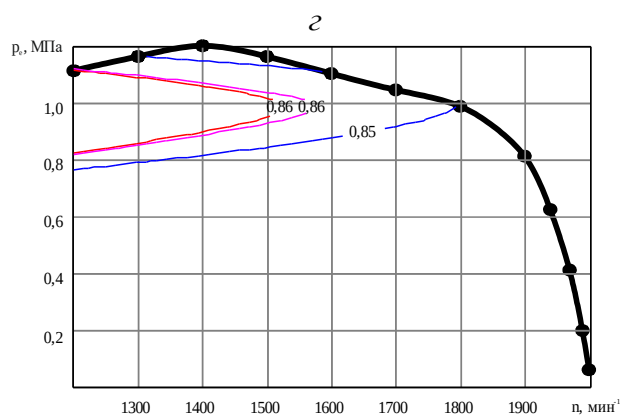
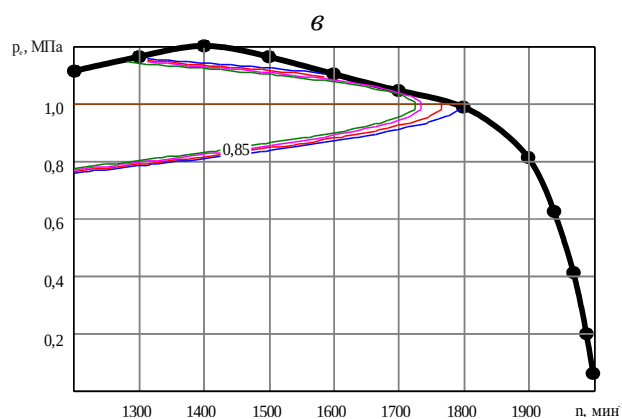
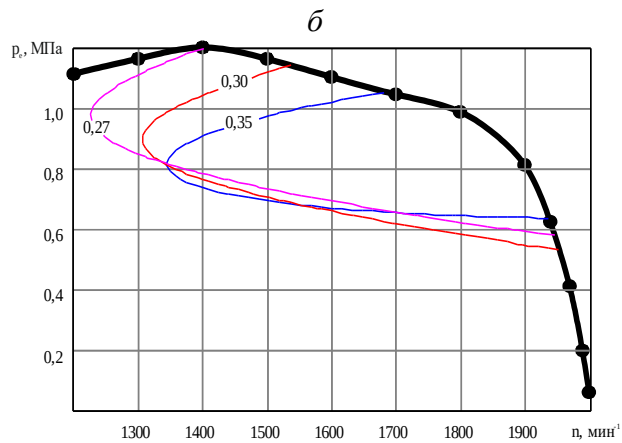
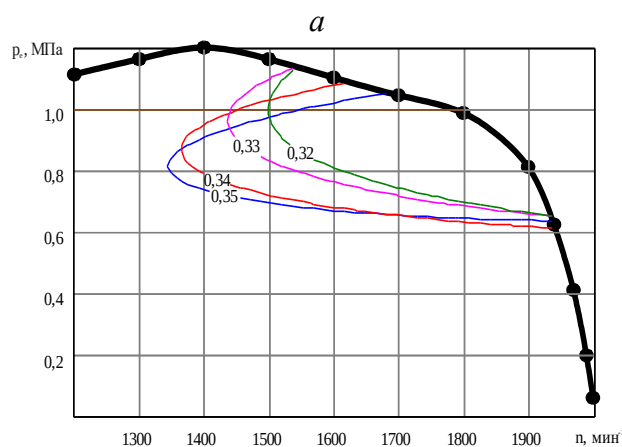
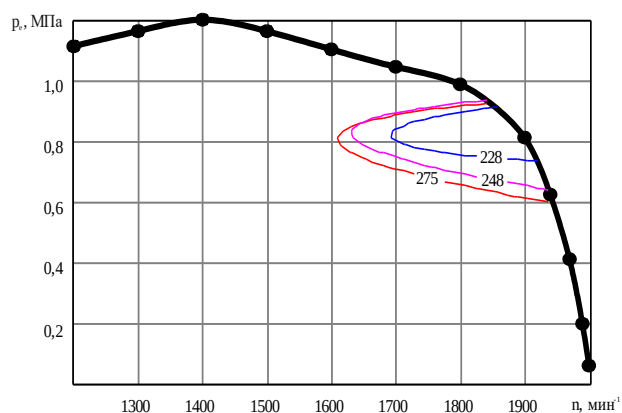
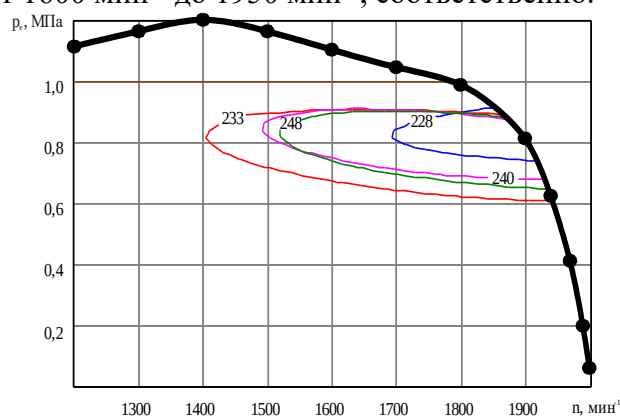
Рисунок 7 – Регулировочные характеристики ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800$ мин⁻¹ и работе на СТ, состоящем из: *а* – ДТ и РМ, *б* – ДТ и Э

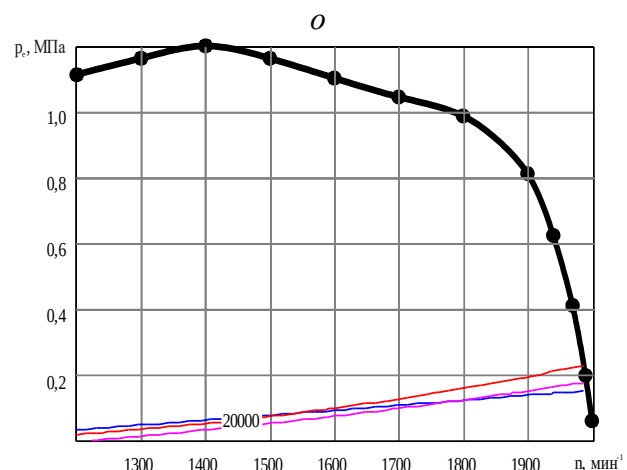
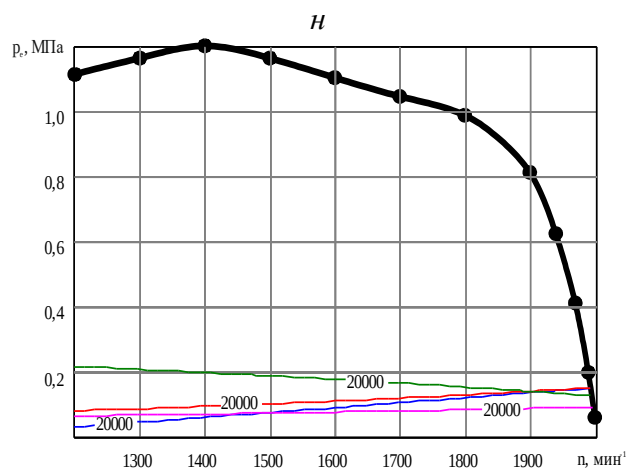
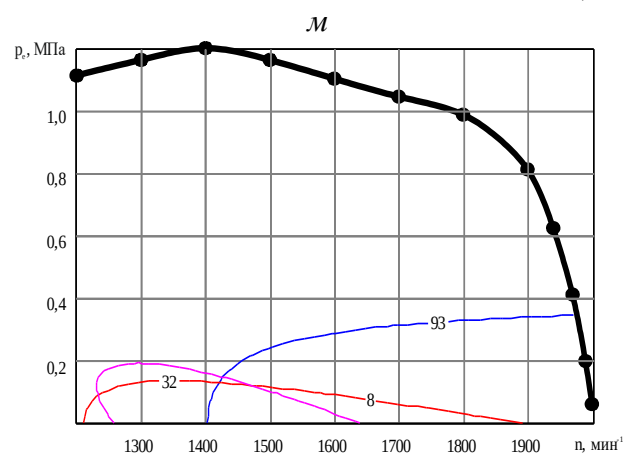
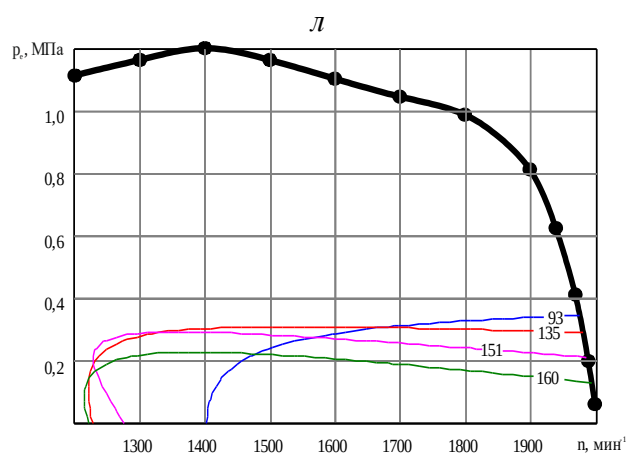
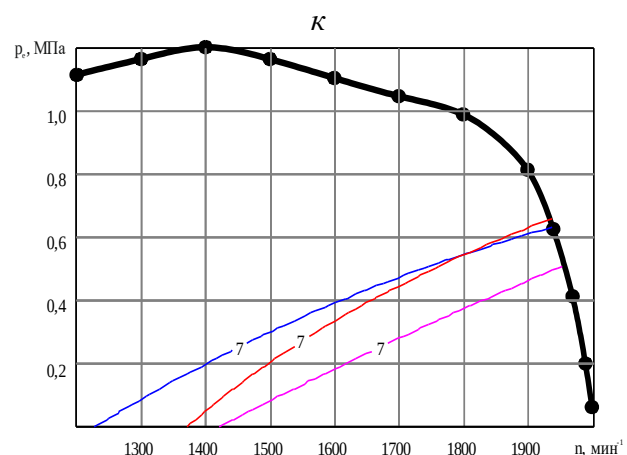
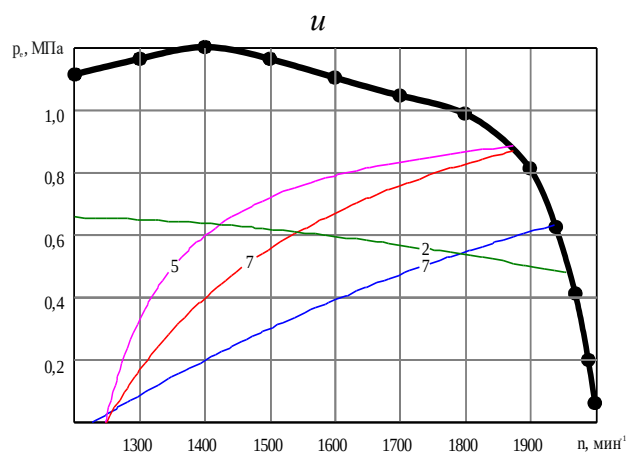
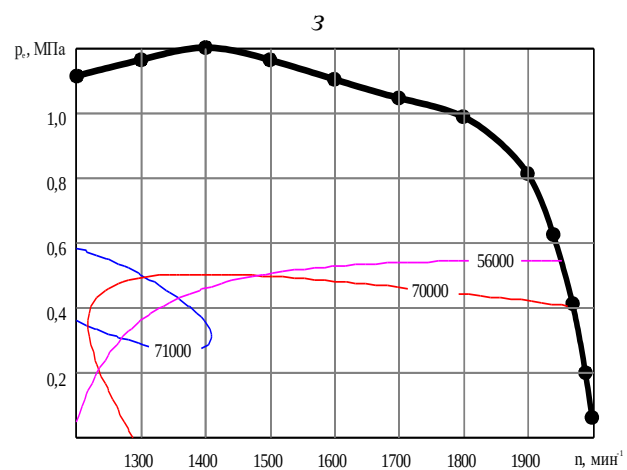
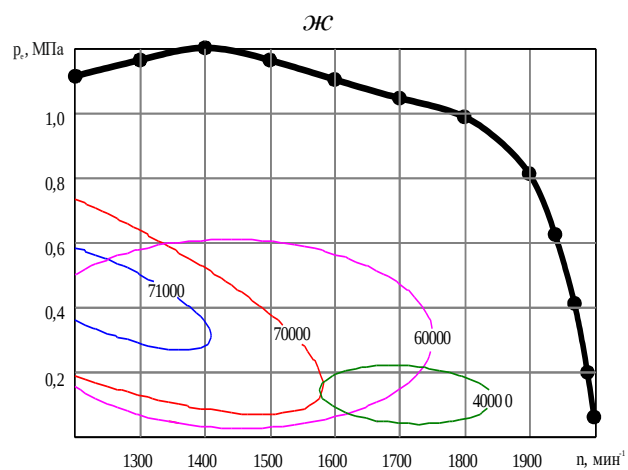
Таким образом, в результате проведенных исследований установлены значения $\theta = 26^\circ$ град ПКВ до ВМТ ТД, работающего на СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % и $\theta = 22^\circ$ град ПКВ до ВМТ ТД, работающего на СТ, содержащих Э от 0 % до 40 %, соответственно. Полученные экспериментальные значения установочного угла опережения начала впрыскивания СТ хорошо согласовались с расчётными данными.

Определение оценки оптимальных составов СТ для всех режимов работы ТД представлены на многопараметровых характеристиках эксплуатационных показателей ТД, работающего на СТ, содержащих РМ и Э (рис. 8).

Анализ представленных зависимостей (рис. 8, *а*, *б*) свидетельствовал о том, что при работе ТД на ДТ оптимальная зона, имеющая минимальное значение $g_e = 228$ г/(кВт·ч), находилась в диапазоне значений p_e от 0,75 МПа до 0,9 МПа и n , более 1700 мин⁻¹. При работе ТД на СТ, содержащих РМ 20 %, 40 % и 60 % (рис. 8, *а*), минимальные значения g_e составили 233 г/(кВт·ч), 240 г/(кВт·ч) и 248 г/(кВт·ч) в диапазоне p_e от 0,6 МПа до 0,9 МПа, от 0,7 МПа до 0,9 МПа и от

0,65 МПа до 0,9 МПа при n от 1400 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, от 1480 мин⁻¹ до 1920 мин⁻¹ и от 1520 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, соответственно. При работе ТД на СТ, содержащих Э 20 % и 40 % (рис. 8, б) минимальные значения g_e составили 248 г/(кВт·ч) и 275 г/(кВт·ч) в диапазоне p_e от 0,65 МПа до 0,9 МПа, от 0,6 МПа до 0,9 МПа и от 0,65 МПа до 0,9 МПа при n от 1650 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹ и от 1600 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, соответственно.



*n**p*

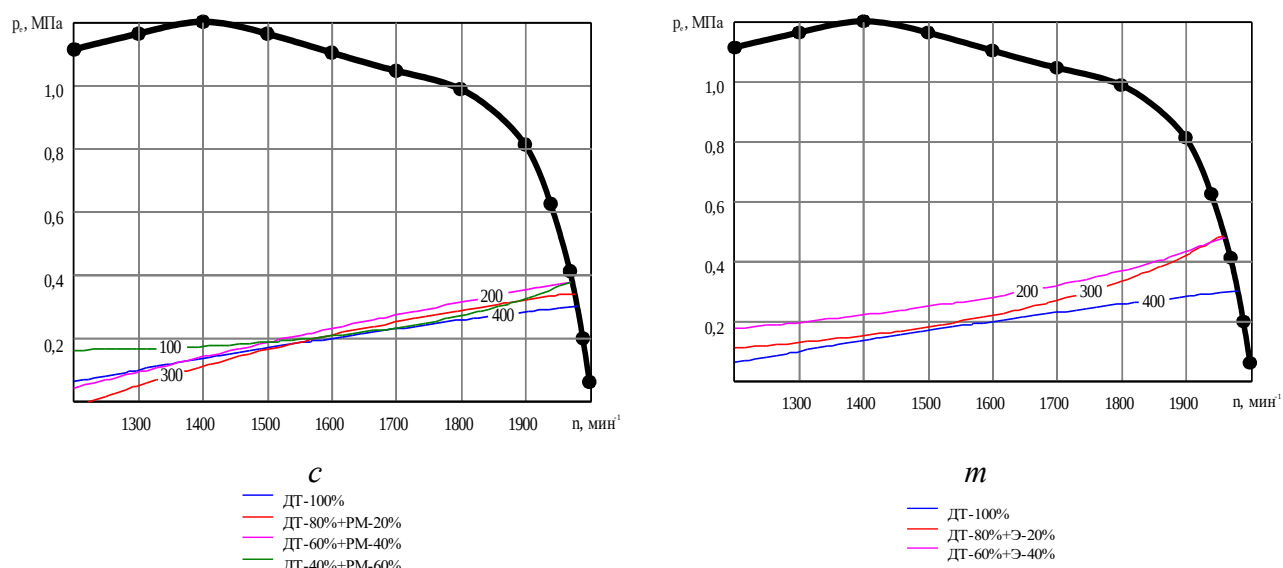


Рисунок 8 – Многопараметровые характеристики зависимости: $a, б$ – эффективного удельного расхода топлива ТД g_e ; $в, з$ – эффективного КПД ТД η_e ; $д, е$ – механического КПД ТД η_m ; $ж, з$ – среднего давления механических потерь ТД $p_{мн}$; $и, к$ – концентрации сажи C ; $л, м$ – концентрации несгоревших углеводородов C_xH_y ; $н, о$ – концентрации монооксида углерода CO ; $п, р$ – концентрации диоксида углерода CO_2 ; $с, т$ – концентрации оксидов азота NO_x от нагрузки p_e и частоты вращения коленчатого вала ТД n , размерностью 4ЧН 11,0/12,5 на РМ ($a, в, д, ж, и, л, н, п, с$) и Э ($б, з, е, з, к, м, о, р, т$)

Согласно анализу приведенных зависимостей (рис. 8, $в, з$), оптимальная зона работы ТД на ДТ, имеющая значение $\eta_e = 0,35$, находилась при значениях p_e от 0,6 МПа до 1,05 МПа и n от 1350 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, соответственно. При работе ТД на СТ, содержащих РМ 20 %, 40 % и 60 % (рис. 8, $в$), максимальные значения η_e составили 0,34, 0,33 и 0,32 в диапазоне p_e от 0,6 МПа до 1,1 МПа, от 0,6 МПа до 1,15 МПа и от 0,6 МПа до 1,15 МПа при n от 1350 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, от 1450 мин⁻¹ до 1920 мин⁻¹ и от 1500 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, соответственно. При работе ТД на СТ, содержащих Э 20 % и 40 % (рис. 8, $з$) минимальные значения η_e составили 0,30 г/(кВт·ч) и 0,30 г/(кВт·ч) в диапазоне p_e от 0,6 МПа до 1,15 МПа, от 0,6 МПа до 1,2 МПа и от 0,65 МПа до 0,9 МПа при n от 1300 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹ и от 1350 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, соответственно.

Согласно анализу полученных данных, оптимальным являлся диапазон p_e от 0,75 МПа до 1,15 МПа и n от 1200 мин⁻¹ до 1800 мин⁻¹, при котором значение η_m составляло 0,85 (рис. 8, $д, е$). С увеличением содержания РМ в СТ от 20 % до 60 % (рис. 8, $д$), максимальные значения η_m составляли 0,85 при n от 1200 мин⁻¹ до 1720 мин⁻¹ и p_e от 0,75 МПа до 1,15 МПа, соответственно. При работе ТД на СТ, содержащих Э 20 % и 40 % (рис. 8, $е$) максимальные значения η_m составили 0,86 при p_e от 0,85 МПа до 1,15 МПа при n от 1200 мин⁻¹ до 1500 мин⁻¹ и от 1200 мин⁻¹ до 1560 мин⁻¹, соответственно.

Работа ТД на ДТ характеризовалась значением $p_{мн} = 0,15$ МПа при n , менее 1300 мин⁻¹ (рис. 8, $ж, з$). Так, при работе ТД на СТ, содержащем РМ 20 % значение $p_{мн}$ составило 0,16 МПа при $n = 1300$ мин⁻¹, а при работе на СТ, содержащем РМ 40 % - 0,17 МПа и $n = 1600$ мин⁻¹. При работе ТД на СТ, содержащем РМ 60 % значение $p_{мн}$ составило 0,18 МПа при $n = 1800$ мин⁻¹. Работа ТД на СТ, содержащем Э 20 % характеризовалась значением $p_{мн} = 0,16$ МПа при n , менее 1500 мин⁻¹ (рис. 8, $з$). Эксплуатация ТД на СТ, содержащем Э 40 % соответствовала значению $p_{мн} = 0,17$ МПа и n , более 1900 мин⁻¹.

Из характеристик (рис. 8, $и, к$) видно, что минимальная эмиссия C находилась в диапазоне p_e от 0,3 МПа до 0,6 МПа при работе ТД в интервале n от 1200 мин⁻¹ до 1400 мин⁻¹. Работа ТД

на СТ (рис. 8, *u*), содержащем РМ 20 %, характеризовалась зоной эмиссии 70000 млн^{-1} в интервале p_e от 0,1 МПа до 0,7 МПа с ТД в диапазоне n до 1550 мин^{-1} . Минимальная эмиссия C при работе на СТ, содержащем РМ 40 %, находилась в диапазоне p_e от 0,05 МПа до 0,6 МПа при работе ТД в интервале n до 1750 мин^{-1} . Эмиссия C в данной зоне составила 60000 млн^{-1} . Минимальная эмиссия C , при работе ТД на СТ, содержащем РМ 60 %, находилась в диапазоне p_e от 0,05 МПа до 0,2 МПа при n от 1550 мин^{-1} до 1850 мин^{-1} . Эмиссия C в данной зоне составила 40000 млн^{-1} . Работа ТД на СТ (рис. 8, *к*), содержащем Э 20 %, характеризовалась увеличением зоны минимальной эмиссии 70000 млн^{-1} в интервале p_e до 0,5 МПа и всём интервале n . При эксплуатации ТД на СТ, содержащем Э 40 %, минимальная зона эмиссии C определялась параметрами p_e от 0,05 МПа до 0,5 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1400 мин^{-1} . Эмиссия C составила 56000 млн^{-1} .

Из анализа характеристик (рис. 8, *л, м*) – зона минимальной эмиссии C_xH_y работающего ТД на ДТ находилась в интервале p_e от 0 до 0,6 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1900 мин^{-1} . При этом эмиссия C_xH_y составила 7 млн^{-1} . Работа ТД на СТ, содержащих РМ 20 % и 40 % (рис. 8, *л*), характеризовалась минимальной эмиссией при p_e от 0 до 0,9 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1850 мин^{-1} . Эмиссия C_xH_y в данной зоне составила 7 млн^{-1} и 5 млн^{-1} при работе ТД на СТ, содержащих РМ 20 % и 40 %, соответственно. Минимальная эмиссия C_xH_y при работе ТД на СТ, содержащем РМ 40 %, находилась при значениях p_e от 0,5 МПа до 0,65 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1950 мин^{-1} . При этом эмиссия C_xH_y в данной зоне составила 2 млн^{-1} . Эксплуатация ТД на СТ, содержащем Э 20 % (рис. 8, *м*), определялась минимальной эмиссией в диапазоне p_e от 0 до 0,6 МПа и n от 1360 мин^{-1} до 1950 мин^{-1} . Минимальная эмиссия C_xH_y при работе ТД на СТ, содержащем Э 40 %, находилась в диапазоне p_e от 0 до 0,5 МПа и n от 1450 мин^{-1} до 1970 мин^{-1} . Эмиссия C_xH_y составила 7 млн^{-1} при работе ТД на СТ, содержащих Э 20 % и 40 %, соответственно.

На основании анализа многопараметровой характеристики (рис. 8, *н, о*) определена минимальная эмиссия CO , равная 93 млн^{-1} при работе ТД на ДТ в диапазоне p_e до 0,35 МПа и n от 1400 мин^{-1} до 1900 мин^{-1} . Работа ТД на СТ, содержащем РМ 20 %, характеризовалась минимальной эмиссией 135 млн^{-1} в интервале p_e до 0,3 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1900 мин^{-1} . Минимальная эмиссия CO при эксплуатации ТД на СТ, содержащем РМ 40 %, соответствовала p_e до 0,3 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1900 мин^{-1} . Эмиссия CO в данной зоне составила 151 млн^{-1} . Наименьшая эмиссия CO при работе ТД на СТ, содержащем РМ 60 %, составила 160 млн^{-1} и соответствовала $p_e = 0,25 \text{ МПа}$ в интервале n от 1200 мин^{-1} до 1900 мин^{-1} . Работа ТД на СТ, содержащем Э 20 %, характеризовалась минимальной эмиссией 32 млн^{-1} в интервале p_e до 0,2 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1650 мин^{-1} . Минимальная эмиссия CO при эксплуатации ТД на СТ, содержащем Э 40 %, определена параметрами p_e до 0,15 МПа и n от 1200 мин^{-1} до 1900 мин^{-1} . Эмиссия CO в данной зоне составила 8 млн^{-1} .

Из представленных зависимостей (рис. 8, *н, р*) видно, что минимальная эмиссия CO_2 составила 20000 млн^{-1} при работе ТД на ДТ и соответствовала p_e от 0,05 МПа до 0,15 МПа, а также n от 1200 мин^{-1} до 1975 мин^{-1} . Работа ТД на СТ, содержащих РМ от 20 % до 60 % (рис. 8, *н*), характеризовалась минимальной эмиссией $CO_2 = 20000 \text{ млн}^{-1}$. Минимальные эмиссии при работе ТД на СТ, содержащих РМ 20 %, 40 % и 60 %, находились в интервале p_e от 0,08 МПа до 0,15 МПа, от 0,06 МПа до 0,1 МПа и от 0,12 МПа до 0,22 МПа, а также интервале n от 1200 мин^{-1} до 1975 мин^{-1} (рис. 8, *н*). Работа ТД на СТ, содержащих Э от 20 % до 40 % (рис. 8, *р*), характеризовалась минимальными эмиссиями $CO_2 = 20000 \text{ млн}^{-1}$ для всех составов СТ. Минимальные эмиссии CO_2 при работе ТД на СТ, содержащих Э 20 % и 40 %, находились в интервале p_e от 0,02 МПа до 0,22 МПа и от 0,01 МПа до 0,1 МПа при n от 1200 мин^{-1} до 1975 мин^{-1} , соответственно (рис. 8, *р*).

Минимальная эмиссия $NO_x = 400 \text{ млн}^{-1}$ находилась в зоне p_e от 0,08 МПа до 0,3 МПа при работе ТД в интервале n от 1200 мин^{-1} до 1950 мин^{-1} (рис. 8, *с, т*). Работа ТД на СТ, содержащем

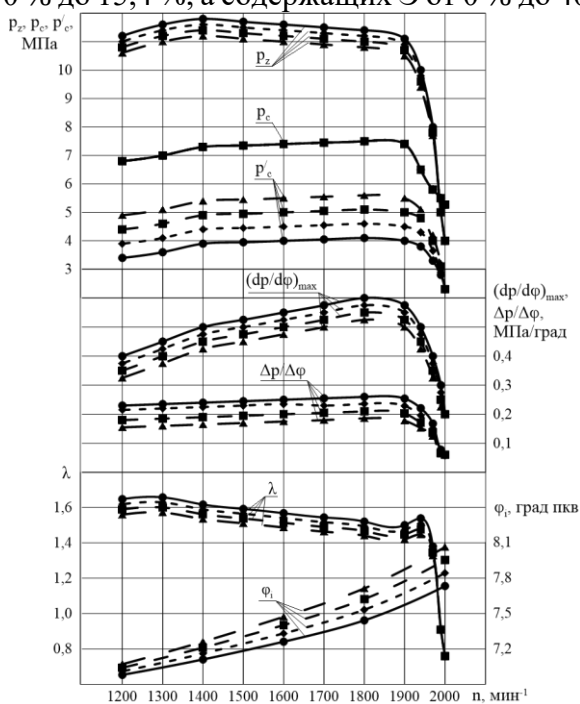
РМ 20 % (рис. 8, с), характеризовалась минимальной эмиссией, равной 300 млн⁻¹ в интервале p_e от 0 до 0,35 МПа и n от 1200 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹, соответственно. Минимальные эмиссии NO_x (рис. 8, с) характеризовались значениями p_e от 0,05 МПа до 0,38 МПа при работе ТД на СТ, содержащих РМ 40 % и 60 %, а также n от 1200 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹. Эмиссия NO_x в данной зоне составила 200 млн⁻¹ и 100 млн⁻¹, соответственно. Работа ТД на СТ (рис. 8, т), содержащих Э 20 % и 40 %, характеризовалась минимальными эмиссиями NO_x при значениях p_e от 0,1 МПа до 0,5 МПа и p_e от 0,18 МПа до 0,5 МПа, а также n от 1200 мин⁻¹ до 1950 мин⁻¹. Эмиссия NO_x в данной зоне составила 300 млн⁻¹ и 200 млн⁻¹, соответственно.

Таким образом, установлено, что оптимальный состав СТ, содержащий РМ от 0 % до 60 %, при нагрузке от 0,6 МПа до 1,2 МПа и частоте вращения коленчатого вала ТД от 1200 мин⁻¹ до 2000 мин⁻¹, улучшал эксплуатационные показатели до 27 %, оптимальный состав СТ, содержащий Э от 0 % до 40 % при нагрузке от 0,45 МПа до 1,2 МПа и частоте вращения коленчатого вала ТД от 1250 мин⁻¹ до 2000 мин⁻¹, улучшал эксплуатационные показатели до 19 %, соответственно. Полученные экспериментальные зависимости подтвердили теоретические предположения, сделанные во 2 Главе.

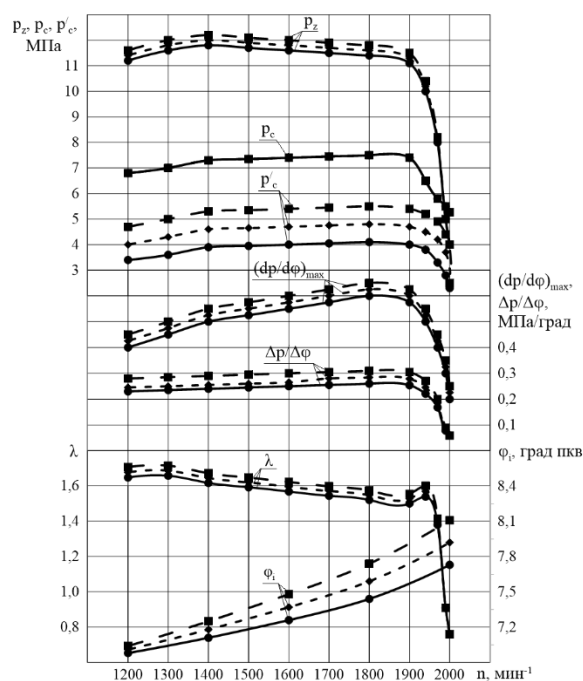
В шестой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса сгорания в цилиндрах ТД при использовании оптимальных составов СТ.

На рисунке 9 представлена характеристика основных параметров индикаторных диаграмм работы ТД на СТ, содержащих РМ и Э, в зависимости от n и p_e .

Установлено, что для нагрузочных режимов работы ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 увеличение содержания РМ в СТ от 0 до 60 % и Э от 0 до 40 % увеличивало φ_i от 5,6 % до 14,2 %, соответственно, а p_c оставалось неизменным. p_z для нагрузочных режимов работы при использовании СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % снижалось от 0 % до 11,4 %, а содержащих Э от 0 % до 40 % увеличивалось от 0 % до 5,6 %, соответственно. λ для нагрузочных режимов работы при использовании СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % снижалась от 0 % до 20,4 %, а содержащих Э от 0 % до 40 %, увеличивалась от 0 % до 25,6 %, соответственно. $(dp/d\varphi)_{\max}$ для нагрузочных режимов работы при использовании СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % снижалась от 0 % до 15,4 %, а содержащих Э от 0 % до 40 % увеличивалась от 0 % до 10,6 %, соответственно.



а



б

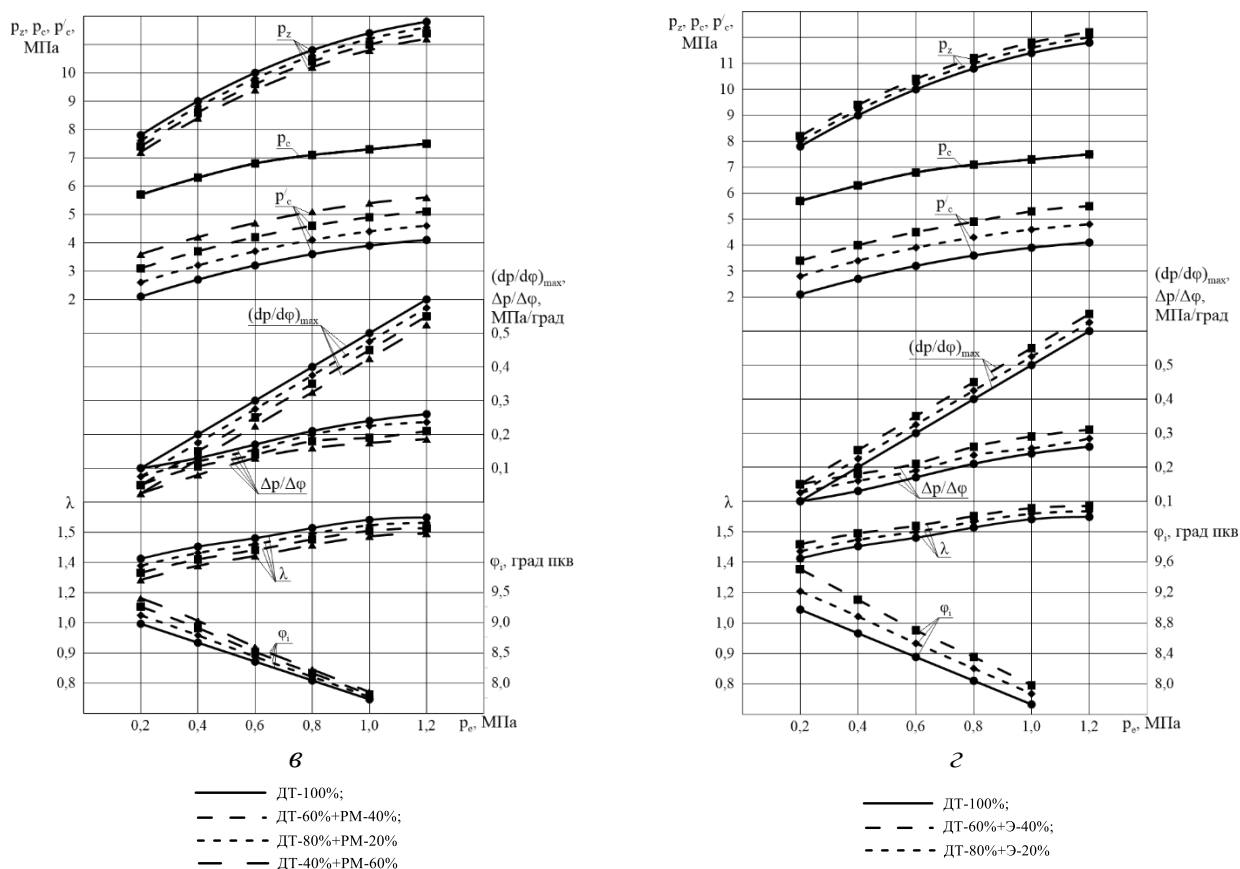


Рисунок 9 – Характеристики основных параметров индикаторных диаграмм ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5, работающего на СТ, содержащих: а, в – РМ; б, г – Э в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала n (а, б) и нагрузки p_e (в, г)

$(\Delta p/\Delta \phi)$ для скоростных режимов при использовании СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % снижалась от 0 % до 13,1 %, а содержащих Э от 0 % до 40 % увеличивалась от 0 % до 8,6 %, соответственно. Проведенный сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими расчётами, полученными по выражениям (24), (25), (26), (27), (28), (29), (30) свидетельствовал об их хорошей сходимости.

С целью определения характера зависимостей показателей рабочего процесса ТД, работающего на оптимальных составах СТ, проведено индицирование. На рисунке 10 представлены индикаторные диаграммы ТД. Анализ полученных индикаторных диаграмм показал, что ПЗВ в ТД, работающего на ДТ составлял - 4° пкв, а работающего на СТ, содержащих РМ от 20 % до 60 % - увеличивался от 6° до 10° град пкв, соответственно. Фаза быстрого горения (ФБГ) в ТД, работающем на ДТ составляла - 18° град пкв, а работающем на СТ, содержащих РМ от 20 % до 60 % - сокращалась от 14° до 6° град пкв, соответственно. Период управляемого горения (ПУГ) в ТД, работающем на ДТ составлял - 10° град пкв, а работающем на СТ, содержащих РМ от 20 % до 60 % - увеличивался от 14° до 22° град пкв, соответственно. Период основного горения (ПОГ) в ТД, работающем на ДТ составлял - 15° град пкв, а работающем на СТ, содержащих РМ от 20 % до 60 % - увеличивался от 17° до 22° град пкв, соответственно. Период замедленного горения (ПЗГ) в ТД, работающем на ДТ составлял - 25° град пкв, а работающем на СТ, содержащих РМ от 20 % до 60 % - сокращался от 23° до 19° град пкв, соответственно. Тогда, следовательно, ПЗВ в ТД, работающем на СТ, содержащих Э от 20 % до 40 % - увеличивался от 8° до 10° град пкв, соответственно. ФБГ в ТД, работающем на СТ, содержащих Э от 20 % до 40 % - сокращалась от 10° до 6° град пкв, соответственно. ПУГ в ТД, работающем на СТ, содержащих Э от 20 % до 40 % - увеличивался от 18° до 22° град пкв, соответственно. ПОГ в ТД, работающем на СТ, содержащих Э от 20 % до 40 % - увеличивался от 19° до 22° град пкв, соответственно. ПЗГ в ТД, работающем на СТ, содержащих Э от 20 % до

40 % - сокращался от 21° до 19° град пкв, соответственно. Проведенный анализ расчётных и экспериментальных индикаторных диаграмм свидетельствовал об их хорошей сходимости. Установлено что степень достоверности составляла 97 %.

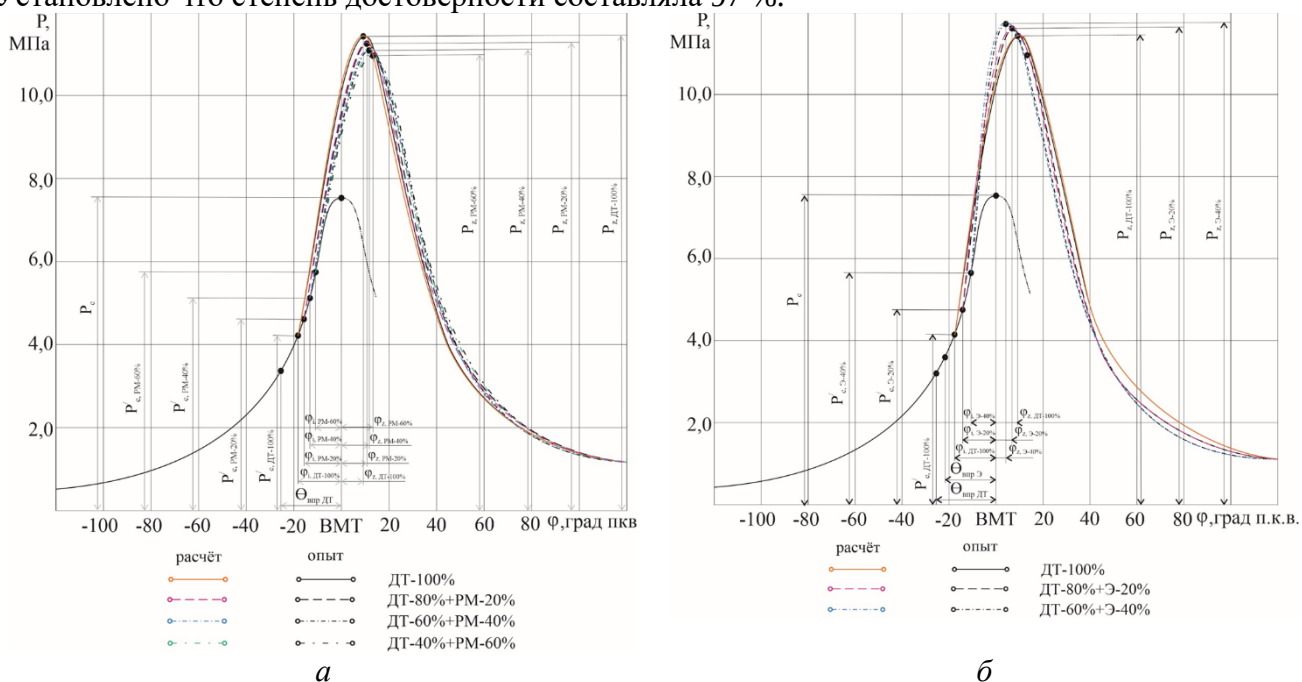


Рисунок 10 – Индикаторные диаграммы рабочего процесса ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5, работающего на СТ, содержащих: *а* – РМ; *б* – Э, $\theta = 26^\circ$ град пкв до ВМТ и $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

Для определения характера сгорания и тепловыделения в ТД, работающем на оптимальных составах СТ обработаны индикаторные диаграммы рабочего процесса по методике ЦНИДИ-ЦИАМ. Влияние применения СТ, содержащих РМ и Э на характеристики тепловыделения представлены на рисунке 11.

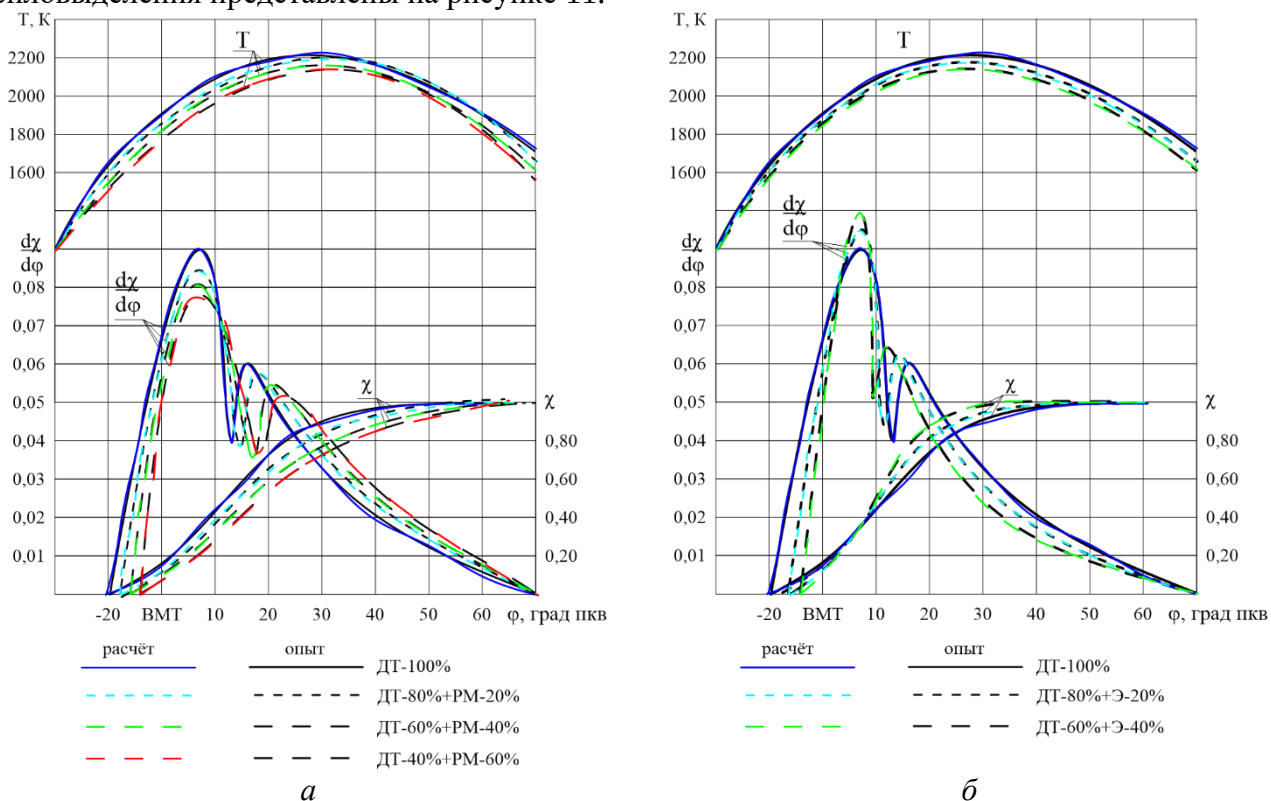


Рисунок 11 – Характеристики тепловыделения в ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5, работающем на СТ, содержащих: *а* – РМ; *б* – Э, $\theta = 26^\circ$ град пкв до ВМТ и $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

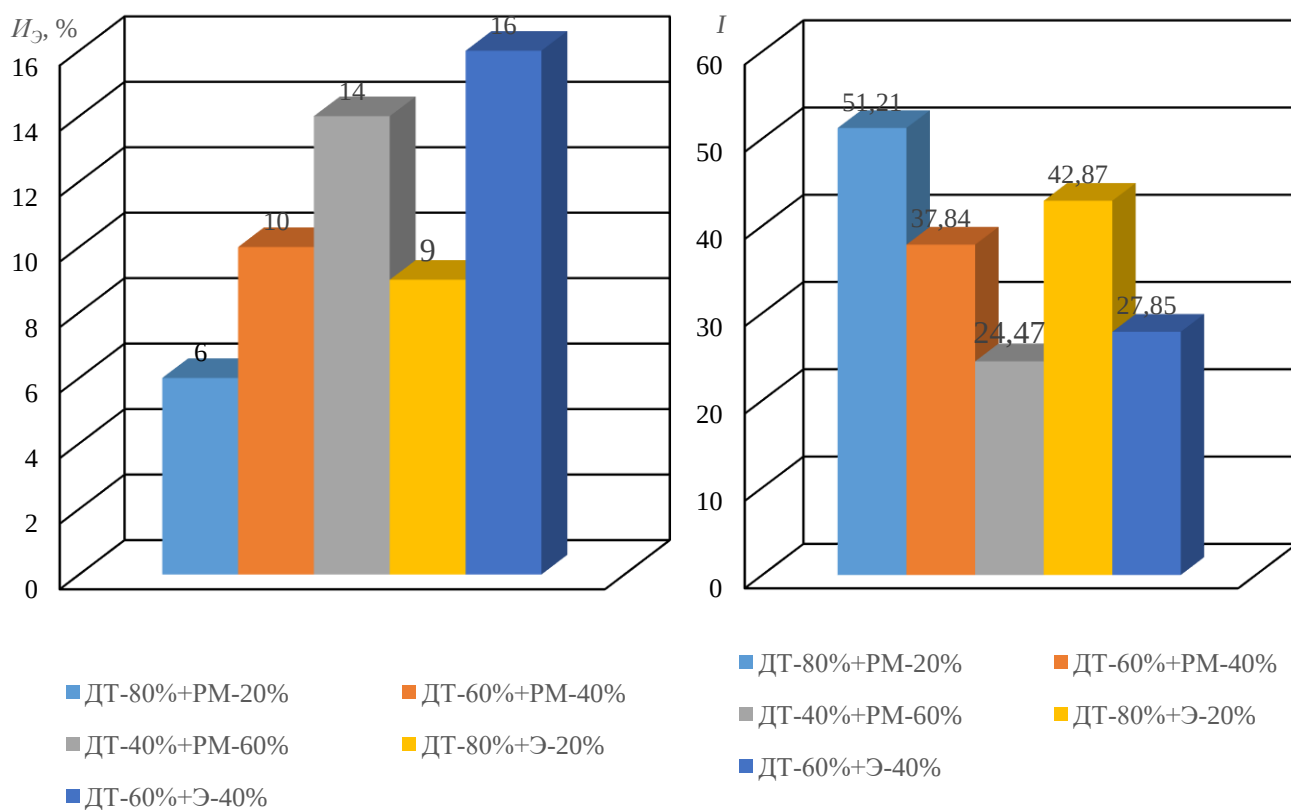
Проведенный анализ характеристик тепловыделения в ТД, работающем на СТ, содержащих РМ (рис. 11, а), показал что, увеличение содержания РМ в СТ от 0 % до 60 % снижало скорости тепловыделения в кинетической фазе процесса сгорания с 0,090 до 0,078 град⁻¹, а в диффузионной фазе с 0,060 до 0,055 град⁻¹, соответственно. Продолжительность фаз сгорания изменялась незначительно. Окончание χ смещалось в сторону более позднего угла пкв относительно ВМТ. Осреднённая температура цикла снижалась с 2200 до 2115 К.

Анализ характеристик тепловыделения в ТД, работающем на СТ, содержащих Э (рис. 11, б), показал что, увеличение содержания Э в СТ от 0 % до 40 % увеличивало тепловыделение в кинетической фазе процесса сгорания с 0,090 до 0,100 град⁻¹, а в диффузионной фазе с 0,060 до 0,065 град⁻¹, соответственно. Продолжительность фаз сгорания изменялась незначительно. Окончание χ смещалось в сторону более раннего угла пкв относительно ВМТ. Осреднённая температура цикла снижалась с 2200 до 2155 К.

Проведенный анализ расчётных и экспериментальных характеристик тепловыделения свидетельствовал об их хорошей сходимости. Установлено что степень достоверности составляла 95 %.

В седьмой главе представлены способы воздействия на процесс сгорания, создание оптимальных составов СТ и совершенствование методов и средств ТП. В результате проведенных исследований: разработаны новые конструктивно-технологические решения, обеспечивающие подачу и регулирование новых оптимальных составов СТ (патенты РФ №№ 2730833, 2554348), и совершенствование методов и средств ТП ТД (патенты РФ №№ 2687856, 2651021, 2688129, 2688131, 2763633). Патенты внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

В восьмой главе представлена оценка эффективности исследований. Данные расчёта энергетической и экологической эффективности оптимизации составов СТ и совершенствование методов и средств ТП представлены на диаграммах (рис. 12).



а

б

Рисунок 12 – Диаграмма: а – уровней интенсификации применения различных видов и составов СТ; б – значений комплексного суммарного индекса загрязнения атмосферного воздуха применением различных видов и составов СТ

Анализ зависимостей показал, что для ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5, марки Д-245.5S2 наиболее энергетически эффективным является применение составов СТ, содержащих РМ в диапазоне от 30 % до 60 % и содержащих Э в диапазоне от 20 % до 40 %, соответственно (рис. 12, а), а также определена область наиболее низкого уровня техногенного риска при использовании СТ, содержащих РМ в диапазоне от 40 % до 60 % и содержащих Э от 20 % до 40 %, соответственно (рис. 12, б).

Результаты оценки энергетической и экологической эффективности оптимизации составов СТ и совершенствования методов и средств ТП внедрены на таких предприятиях, как АО «Автотранспортное предприятие», ООО «Азимут», ООО Транспортно-экспедиционное предприятие «Трансавто К».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе разработанных методов и средств решена научно-техническая проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение - улучшение эксплуатационных показателей ТД на всех режимах работы путем оптимизации видов и составов СТ, подаваемых в цилиндры.

2. Разработан методологический подход к определению области предельных составов СТ, применяемых в ТД. Определены области предельных составов СТ для применения их в ТД, размерностью 4ЧН 11,0/12,5, содержащие РМ от 0 % до 65 %, а также Э от 0 % до 45 %, соответственно.

3. Разработан критерий оценки оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД. Для ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 установлено, что оптимальный состав СТ, содержащий РМ от 0 % до 60 % при нагрузке от 0,6 МПа до 1,2 МПа и частоте вращения коленчатого вала от 1200 мин⁻¹ до 2000 мин⁻¹, обеспечивает улучшение эксплуатационных показателей до 27 %, а также оптимальный состав СТ, содержащий Э от 0 % до 40 % при нагрузке от 0,45 МПа до 1,2 МПа и частоте вращения коленчатого вала от 1250 мин⁻¹ до 2000 мин⁻¹, обеспечивает улучшение эксплуатационных показателей до 19 %, соответственно.

4. Разработана методология расчётного определения значений показателей процесса сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД в зависимости от режимов работы, способы воздействия на характеристики протекания периодов процесса сгорания при использовании оптимальных составов СТ, обеспечивающие рациональные значения основных показателей процесса сгорания, для всех режимов работы ТД (патенты РФ №№ 2601665, 2755536, 2787830, 2783742), программы для ЭВМ, осуществляющие расчёт показателей процесса сгорания и тепловыделения при использовании оптимальных составов СТ (свидетельства об регистрации программ для ЭВМ №№ 2006612791, 2006612792, 2009612778, 2009612779, 2010610380, 2010610381, 2015660120, 2016660475). Расчётные программы и способы воздействия на характеристики протекания периодов процесса сгорания внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет». Установлено, что для всех режимов работы ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5, повышение содержания РМ от 0 % до 60 % и Э от 0 % до 40 % в СТ увеличивало период задержки воспламенения от 5,6 % до 14,2 %, соответственно. Давление свежего заряда в цилиндре в конце такта сжатия оставалось неизменным. Для всех режимов работы ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 при использовании СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % снижалось максимальное давление сгорания от 0 % до 11,4 %, степень повышения давления от 0 % до 20,4 %, максимальная скорость нарастания давления от 0 % до 15,4 %, соответственно, а при использовании СТ, содержащих Э от 0 % до 40 % повышалось максимальное давление сгорания от 0 % до 5,6 %, степень повышения давления в цилиндрах от 0 % до 25,6 %, максимальная скорость нарастания давления от 0 % до 10,6 %, соответственно.

5. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены характеристики ТП и показатели работы ЛНД СП ТД на оптимальных составах СТ. Установлено, что для обеспечения работы ЛНД СП ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5, используемые составы СТ должны содержать не более 60 % РМ и Э. Для обеспечения заданного режима работы ТД на оптимальных составах СТ необходимо соблюдение условий равенства ввода теплоты в цилиндры с цикловой подачей такой же, как и при работе на ДТ, а также значений параметров работы регулятора и корректора ТНВД. При работе ТНВД ЯЗДА (773-40.02) (773.1111005-40.02) на оптимальных

составах СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % и Э от 0 % до 40 %, цикловая подача увеличилась на 7,64 % и 12,68 %, соответственно. При этом значения углов наклона характеристик регулятора и корректора, а также частот вращения валика ТНВД, соответствующего началу и концу коррекции сопоставлены значениям при работе на ДТ. Значения установочного угла опережения начала впрыскивания ТД, размерностью 4ЧН 11,0/12,5, составили 26° и 22° пкв до ВМТ, обеспечивающие работу ТД на оптимальных составах СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % и Э от 0 % до 40 %, соответственно. Для обеспечения условий впрыскивания и распыливания форсунками ФД-22.455.1112010-50 применяемые составы СТ содержали не более 60 % РМ и 40 % Э.

6. Разработана математическая модель рабочего процесса ТД при использовании оптимальных составов СТ, программы для ЭВМ, осуществляющие расчёты показателей процесса сгорания и тепловыделения, индикаторных диаграмм и диаграмм тепловыделения ТД при использовании оптимальных составов СТ (свидетельства об регистрации программ для ЭВМ №№ 2015660120, 2016660475). Расчётные программы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет». Установлено, что при использовании оптимальных составов СТ, содержащих РМ от 0 % до 60 % и Э от 0 % до 40 % модель сгорания в ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 с достоверностью 97 % позволяет прогнозировать параметры процесса сгорания, модель тепловыделения с достоверностью 95 % позволяет прогнозировать параметры тепловыделения в ТД.

7. Разработаны новые конструктивно-технологические решения, обеспечивающие подачу и регулирование, а также совершенствование методов и средств ТП (патенты РФ №№ 2687856, 2651021, 2763633), оптимальных составов СТ (патенты РФ №№ 2730833, 2554348). Данные конструктивно-технологические решения, методы и средства ТП внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

8. Усовершенствованы методики оценки энергетической и экологической эффективности оптимизации составов СТ и совершенствования методов и средств ТП. Установлено, что для ТД размерностью 4ЧН 11,0/12,5 наиболее энергетически эффективным является применение составов СТ, содержащих РМ от 30 % до 60 % и Э от 20 % до 40 %, соответственно, также определена область наиболее низкого уровня техногенного риска при использовании СТ, содержащих РМ в от 40 % до 60 % и Э от 20 % до 40 %, соответственно. Результаты оценки энергетической и экологической эффективности оптимизации составов СТ и совершенствования методов и средств ТП внедрены на таких предприятиях как АО «Автотранспортное предприятие», ООО «Азимут», ООО Транспортно-экспедиционное предприятие «Трансавто К».

Рекомендации:

1. Полученные результаты улучшения эксплуатационных показателей ТД на всех режимах работы путем оптимизации видов и составов СТ, подаваемых в цилиндры, рекомендуются к использованию в качестве концепции по дальнейшему совершенствованию ТД.

2. Разработанный методологический подход для определения предельных составов СТ, критерий оценки оптимального состава СТ для всех режимов работы ТД, методология расчётного определения значений показателей процесса сгорания оптимальных составов СТ в цилиндрах ТД в зависимости от режимов работы, способы воздействия на характеристики протекания периодов процесса сгорания в ТД, математическая модель рабочего процесса ТД, при использовании оптимальных составов СТ, программы для ЭВМ, осуществляющие расчёты показателей процесса сгорания и тепловыделения, индикаторных диаграмм и диаграмм тепловыделения ТД при использовании оптимальных составов СТ, усовершенствованные методики оценки энергетической и экологической эффективности оптимизации составов СТ, рекомендуются для применения на других конструкциях и модификациях ТД, наддувных и атмосферных, с неразделенными КС и непосредственным впрыскиванием топлива разной размерности.

3. Предложенные конструкции ТПА ТД, обеспечивающие подачу и регулирование оптимальных составов СТ, а также совершенствование методов и средств ТП рекомендуются к использованию на тракторах в случае применения различных видов и составов СТ вместо ДТ.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

Дальнейшие исследования по улучшению эксплуатационных показателей ТД на всех режимах работы путем оптимизации видов и составов СТ, подаваемых в цилиндры целесообразно провести, учитывая показатели надёжности и долговечности, а также на других конструкциях и модификациях ТД.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях рецензируемых ВАК:

1. Исследование токсичности при работе тракторного дизеля на топливах с добавкой рапсового масла / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 1(152). – С. 29-40.
2. Улучшение низкотемпературных свойств топлив с добавкой рапсового масла для тракторных дизелей / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 7(146). – С. 32-43. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-7-32-43.
3. Бузиков, Ш. В. Анализ концепций исследования применения альтернативных топлив в дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников // Грузовик. – 2022. – № 2. – С. 10-16. – DOI 10.36652/1684-1298-2022-2-10-16.
4. Бузиков, Ш. В. Прогнозирование периода задержки воспламенения в дизеле при использовании смесевых топлив / Ш. В. Бузиков // Известия МГТУ МАМИ. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 209-218. – DOI 10.17816/2074-0530-109726.
5. Бузиков, Ш. В. Прогнозирование сажевыделения в дизеле при использовании смесевого топлива / Ш. В. Бузиков // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 4(94). – С. 90-99.
6. Бузиков, Ш. В. Анализ концепций исследования применения альтернативных топлив в дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников // Транспорт на альтернативном топливе. – 2022. – № 1(85). – С. 66-70.
7. Бузиков, Ш. В. Обоснование методов определения эффективности применения альтернативных топлив в автотракторных дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников // Известия МГТУ МАМИ. – 2021. – Т. 15, № 4. – С. 2-8. – DOI 10.31992/2074-0530-2021-50-4-2-8.
8. Бузиков, Ш. В. Определение предельной концентрации рапсового масла в смесевом топливе, применяемое в дизеле / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, И. С. Козлов // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 1(85). – С. 72-79.
9. Бузиков, Ш. В. Определение эффективности применения смесевого топлива в тракторных дизелях / Ш. В. Бузиков // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 5(89). – С. 57-62.
10. Бузиков, Ш. В. Оптимизация состава смесевого топлива для применения в тракторных дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, И. С. Козлов // Труды НАМИ. – 2021. – № 1(284). – С. 16-24. – DOI 10.51187/0135-3152-2021-1-16-24.
11. Бузиков, Ш. В. Оптимизация состава смесевого топлива для дизелей тракторов и сельскохозяйственных машин / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников // Транспорт на альтернативном топливе. – 2021. – № 3(81). – С. 64-69.
12. Бузиков, Ш. В. Оптимизация добавки рапсового масла в смесевом топливе, применяемом в тракторных дизелях / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, И. С. Козлов // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 5(83). – С. 72-77.
13. Плотников, С. А. Исследование работоспособности дизельной форсунки на смесевых топливах с недостаточными низкотемпературными свойствами / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 1. – С. 10-16. – DOI 10.31992/0321-4443-2020-1-10-16.
14. Плотников, С. А. Определение регулировочных параметров системы топливоподачи тракторного дизеля при работе на топливных композициях с добавками рапсового масла / С. А.

Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2018. – № 4(40). – С. 133-138.

15. Влияние добавки этанола к воздуху на эффективные показатели тракторного дизеля / А. Н. Карташевич, Г. Н. Гурков, С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков // Двигателестроение. – 2012. – № 1(247). – С. 44-47.

Статьи в изданиях входящих в Web of Science и Scopus:

16. Бузиков, Ш. В. Прогнозирование эмиссии оксидов азота с отработавшими газами дизеля при использовании смесового топлива / Ш. В. Бузиков // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – Т. 89, № 6. – С. 377-385. – DOI 10.17816/0321-4443-109533.

17. Плотников, С. А. Определение оптимального состава смесового топлива по экологическим показателям дизеля / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, И. С. Козлов // Тракторы и сельхозмашины. – 2021. – Т. 88, № 1. – С. 14-22. – DOI 10.31992/0321-4443-2021-1-14-22.

18. Бузиков, Ш. В. Исследование процесса впуска и газообмена дизеля при работе на смесовом топливе / Ш. В. Бузиков // Тракторы и сельхозмашины. – 2021. – Т. 88, № 5. – С. 6-12. – DOI 10.31992/0321-4443-2021-5-6-12.

19. Investigating working capacity of diesel burner on mixed fuels with insufficient low temperature properties tractors and farming / Plotnikov S A, Buzikov S V, Kozlov I S / Machines. 2020. № 1. С. 10.

20. Определение эксплуатационных показателей трактора "Беларус-922" при работе на смесовом топливе / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, В. С. Товстыка, П. Н. Черемисинов // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 445-459. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201803.445-459.

Патенты и свидетельства:

21. Патент № 2787830 С1 Российская Федерация, МПК F02M 43/00, F02D 19/08. Способ сокращения периода замедленного горения в дизеле: № 2021139033: заявл. 27.12.2021: опубл. 12.01.2023 / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет".

22. Патент № 2783742 С1 Российская Федерация, МПК F02D 19/08, F02M 43/00, F02M 25/00. Способ улучшения экологических показателей работы дизеля: № 2022105722: заявл. 03.03.2022: опубл. 16.11.2022 / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, Ш. В. Бузиков; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет".

23. Патент № 2755536 С1 Российская Федерация, МПК F02M 31/18, F02M 53/06. Способ увеличения периода управляемого горения в дизельном двигателе: № 2021110541: заявл. 15.04.2021: опубл. 17.09.2021 / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, А. Н. Карташевич; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет".

24. Патент № 2763633 С1 Российская Федерация, МПК F02D 1/04, F02D 1/10. Система регулирования смесового топлива дизеля: № 2021112026: заявл. 27.04.2021: опубл. 30.12.2021 / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, А. Н. Карташевич, И. С. Козлов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет".

25. Патент № 2730833 С1 Российская Федерация, МПК C10L 10/14, C10L 1/00, C10L 1/222. Низкотемпературная топливная композиция: № 2019116555: заявл. 29.05.2019: опубл. 26.08.2020 / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич, Ш. В. Бузиков [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (ВятГУ).

26. Патент № 2687856 С1 Российская Федерация, МПК F02M 43/00, F02M 31/18, F02M 23/00. Система подачи дополнительного топлива в дизель: № 2018127482: заявл. 25.07.2018: опубл. 16.05.2019 / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников, П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (ВятГУ).

27. Патент № 2651021 С1 Российская Федерация, МПК F02М 43/00, F02М 31/18, F02М 27/08. Система питания дизеля дополнительным топливом: № 2017120445: заявл. 09.06.2017: опубл. 18.04.2018 / Ш. В. Бузиков, С. А. Плотников; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет".

28. Патент № 2554348 С2 Российская Федерация, МПК С10L 1/32. топливная эмульсия: № 2012152235/04: заявл. 04.12.2012: опубл. 27.06.2015 / В. В. Загребин, С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Вятский государственный университет"(ФГБОУ ВПО "ВятГУ").

29. Свидетельство о официальной регистрации программы для ЭВМ №2006612791 Российская Федерация. Программа расчёта периода задержки воспламенения при работе дизеля на метанолю-топливных эмульсиях различного состава («ПЗВ-МТЭ»): №2006611871: заявл. 07.06.2006: опубл. 07.08.2006 / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, заявитель С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков.

30. Свидетельство о официальной регистрации программы для ЭВМ №2006612792 Российская Федерация. Программа расчёта параметров фазы быстрого горения топлива при работе дизеля на метанолю-топливных эмульсиях различного состава («ФБГ-МТЭ»): №2006611872: заявл. 07.06.2006: опубл. 07.08.2006 / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, заявитель С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010610381 Российская Федерация. Программа расчёта периода задержки воспламенения этанолсодержащего топлива в дизеле (ПЗВ-Этанол): №2009616457: заявл. 16.11.2009: опубл. 11.01.2010 / С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, А. Н. Карташевич, Г. Н. Гурков, заявитель С. А. Плотников, Ш. В. Бузиков, А. Н. Карташевич, Г. Н. Гурков.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660120 Российская Федерация. Расчет динамики тепловыделения в ДВС: № 2015613729: заявл. 06.05.2015: опубл. 22.09.2015 / С. А. Плотников, Ю. В. Ланских, Ш. В. Бузиков, А. Г. Симонов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»).

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660475 Российская Федерация. Расчет параметров ДВС при работе с добавками биотоплива-метанола "БТ-М": № 2016617917: заявл. 19.07.2016: опубл. 15.09.2016 / С. А. Плотников, Ю. В. Ланских, Ш. В. Бузиков, А. А. Князев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет» (ВятГУ).