

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Вятский государственный университет»

На правах рукописи



**Гневашев Павел Вячеславович**

**Определение рациональных составов альтернативных топлив для  
применения в сельскохозяйственной технике**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Сергей Александрович Плотников

Киров

2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	14
1.1. Общие вопросы надежности и долговечности энергетических установок транспортных средств.....	14
1.2. Методы и параметры оптимизации состава смесевых биотоплив в автотракторных дизелях.....	19
1.3. Анализ известных методов определения рационального состава смесевых биотоплив в автотракторных дизелях.....	23
1.4. Цель и задачи исследований.....	36
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СОСТАВОВ СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ.....	38
2.1. Разработка теоретических методов определения значения максимального давления цикла при работе дизеля.....	44
2.2. Разработка теоретических методов определения значения жёсткости процесса сгорания при работе дизеля.....	51
2.3 Теоретическое определение рациональных составов смесевых биотоплив.....	60
2.4 Выводы по главе 2.....	60
3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	62
3.1. Общая методика исследований.....	62
3.2. Общая методика проведения лабораторных исследований свойств дизельного топлива и альтернативного топлива.....	66
3.2.1. Методика проведения измерений плотности по пикнометру альтернативного топлива.....	66
3.2.2. Методика проведения измерений коэффициента преломления жидкого топлива.....	67
3.2.3. Методика проведения измерений электрических параметров жидкого топлива.....	68
3.2.4. Методика вычисления удельной рефракции и диэлектрической проницаемости жидкого топлива.....	69
3.3. Методики исследований рабочего процесса автотракторного дизеля Д-245.5S2 .....	71
3.4. Экспериментальные установки, приборы и оборудование.....	74
3.5. Погрешности, ошибки измерений.....	83
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ.....	87
4.1. Результаты лабораторных исследований.....	87
4.1.1. Результаты исследований по определению удельной рефракции топлив.....	87
4.1.2. Результаты исследований по определению диэлектрической проницаемости топлив.....	90

4.2. Результаты исследований влияния альтернативного топлива на рабочий процесс дизеля.....	95
4.2.1. Определение показателей процесса сгорания смеси ДТ с этанолом в цилиндре дизеля.....	96
4.2.2. Определение показателей процесса сгорания смеси ДТ с рапсовым маслом в цилиндре дизеля.....	99
4.2.3. Определение показателей процесса сгорания смеси ДТ с сурепным маслом в цилиндре дизеля.....	102
4.3. Результаты исследований влияния альтернативного топлива на эффективные и экологические показатели работы .....	105
4.4. Определение показателей рабочего процесса дизеля Д-245.5S2 на основе физико-химических свойств топлив.....	112
4.5. Верификация теоретических и экспериментальных данных показателей рабочего процесса дизеля Д-245.5S2. Определение рациональных составов смесевых биотоплив.....	116
4.6. Выводы по главе 4.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	120
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Договор о научно-техническом сотрудничестве .....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Дипломы и сертификаты.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты внедрения.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	155

## ВВЕДЕНИЕ

Указом Президента России от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» (далее – Указ № 474), определено, что научное и технологическое обеспечение прорывного развития России - одна из основных целей государственной политики нашей страны, подразумевающая, в том числе, развитие агропромышленного комплекса страны. [1].

Ключевым документом реализации научно-технологической политики является Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (далее – СНТР) [2], задача которой – обеспечение независимости и конкурентоспособности РФ за счет создания эффективной системы наращивания и наиболее полного использования интеллектуального потенциала нации. Основным инструментом реализации СНТР является государственная программа Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (далее – ГП НТР, госпрограмма), которая направлена в том числе на: научно-техническое и интеллектуальное обеспечение структурных изменений в экономике; эффективную организацию и технологическое обновление научной, научно-технической и инновационной (высокотехнологичной) деятельности; развитие интеллектуального потенциала нации [3].

В соответствии с Указом Президента России от 25 апреля 2022 г. № 231 в 2022 году в Российской Федерации объявлено Десятилетие науки и технологий (далее – Десятилетие, ДНТ). В этой связи, на основании обобщения различных научных решений и мыслей нужно развивать науку в сторону новых современных технологий. А в современных условиях геоэкономической и геополитической нестабильности обостряются проблемы обеспечения экономической безопасности страны и ее регионов. Одним из решений этих проблем является развитие своих импортозамещающих производств. Ориентир на импортозамещающую модель развития национальной экономики прослеживается и в сфере отечественного сельскохозяйственного машиностроения, которое, как материально-техническая база всего

агропромышленного комплекса, обеспечивает определенный уровень продовольственной безопасности России [4].

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 [5].

Основываясь на вышесказанном, можно утверждать, что наука будет развиваться, а с ней все остальные направления. На сегодняшнее время практически весь транспорт зависит от традиционного углеводородного топлива, производящегося из не возобновляемых природных ресурсов.

Постоянный рост потребления ограниченных энергетических ресурсов нефтегазовой промышленности может вызвать энергетический кризис в будущем. Эта проблема мотивирует ученых и инженеров исследовать и внедрять альтернативные и возобновляемые источники энергии, что поможет снизить негативное воздействие на окружающую среду.

В современных технических устройствах разнообразны как конструкция, так и механизм работы системы впрыска топлива. Это позволяет использовать как классические, так и более сложные, а порой индивидуальные методы подачи топлива. Расширение этого спектра методов влияет на возможности применения и изучения альтернативных видов топлива с определенными физико-химическими свойствами. Возможно, одно из таких топлив существенно улучшит эксплуатационные и экологические характеристики работы внутреннего сгорания дизельного двигателя.

Среди множества известных альтернативных источников энергии особую роль занимают биотоплива. Они производятся обычно из возобновляемых ресурсов растительного и животного происхождения, в связи с чем вызывают повышенный интерес исследователей. Ввиду того, что физико-химические свойства биотоплив существенно отличаются от свойств традиционного дизельного топлива (ДТ), необходима адаптация конструкции двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Замещение ДТ с меньшими изменениями условий рабочего процесса будет происходить при замене на АТ в жидком виде. Наиболее вероятными, к примеру, в Кировской области, исходя из распространенности, являются такие виды жидких АТ, как спирты и масла [6].

Применение растительных масел и этанола в дизельных двигателях представляет собой одно из самых актуальных направлений в развитии альтернативных источников энергии с целью снижения зависимости от нефти и сокращения вредных выбросов.

Исследования, посвященные данной научной проблеме, обладают огромным потенциалом, поскольку их результаты могут способствовать не только снижению воздействия вредных выбросов топливного процесса на окружающую среду, но также способствовать разнообразию рынка топлива, уменьшая потребление традиционных источников энергии. Таким образом, изучение использования альтернативных топлив в дизельных двигателях одновременно направлено на решение двух глобальных проблем: истощение энергетических ресурсов и загрязнение окружающей среды вредными выбросами их рабочих процессов.

Известно, что отработавшие газы дизелей, работающих на нефтяном топливе, содержат более 280 токсичных компонентов различной степени опасности. Наиболее опасным является несгоревший углерод, который выходит из камеры сгорания двигателя в виде частиц сажи. Эти частицы обладают активной поверхностью, на которую могут конденсироваться вредные вещества, образующиеся в процессе сгорания топлива. Среди них особую угрозу представляют молекулы полициклических ароматических углеводородов (ПАУ).

Одним из преимуществ использования растительных масел является то, что они являются возобновляемыми источником энергии. Это означает, что их можно производить снова и снова без ущерба для окружающей среды. Кроме того, растительные масла содержат меньше серы и других вредных веществ, чем традиционные виды топлива, такие как нефть или уголь.

Однако есть и некоторые недостатки использования растительных масел в дизельных двигателях. Например, масла имеют более низкую теплоту сгорания по

сравнению с другими видами топлива, что может привести к снижению эффективности работы двигателя. Так же проблемой использования растительных масел в дизельных двигателях является его высокая вязкость.

Растительные масла имеют высокую вязкость по сравнению с обычным дизельным топливом. Это создает несколько проблем. Во-первых, высокая вязкость затрудняет подачу масла в двигатель, что может привести к проблемам с запуском двигателя или его остановке. Во-вторых, высокая вязкость может вызвать проблемы с топливной аппаратурой и фильтрацией масла, поскольку фильтры могут забиваться быстрее.

Чтобы решить эту проблему, производители часто добавляют специальные присадки в растительные масла, чтобы снизить их вязкость. Эти присадки помогают улучшить текучесть масла и облегчить его подачу в двигатель. Однако добавление присадок может увеличить стоимость использования рапсового масла в качестве топлива.

Таким образом, высокая вязкость масел является одной из проблем, которую нужно учитывать при использовании его в дизельных двигателях.

Несмотря на эти проблемы, многие страны активно исследуют возможности использования растительных масел в качестве биотоплива для дизельных двигателей. Они надеются, что это поможет сократить зависимость от ископаемых видов топлива и уменьшить выбросы парниковых газов.

В качестве альтернативы дизельному топливу также можно использовать этанол, однако этот процесс сопряжён с рядом трудностей. Одна из них заключается в том, что этанол имеет низкое цетановое число (около 8), что затрудняет его воспламенение в цилиндрах дизельного двигателя. Для решения этой проблемы можно установить дополнительную свечу зажигания или накаливания. Альтернатива использованию чистого этанола – это смесь этанола с товарным дизельным топливом в различных пропорциях. Тогда возникают сложности, связанные со свойствами самого этанола: он плохо смешивается с нефтяным дизельным топливом, поэтому создание стабильных смесей этанола с дизельным топливом различного состава — непростая задача. Основная причина этого — наличие в этаноле, полученном путём

брожения биомассы, большого количества воды, которая очень плохо смешивается с нефтепродуктами. Единственный способ смешать этанол с нефтяным дизельным топливом — создать этанолотопливную эмульсию.

В целом, применение рапсового масла и этанола в дизельных двигателях представляет перспективное направление развития, которое может способствовать уменьшению зависимости от нефти, сокращению выбросов вредных веществ и развитию экологически чистых технологий.

Большинство работ по использованию растительных масел и этанола в смесях с дизельным топливом направлены на нахождение предельного содержания альтернативного топлива в смеси, а не на поиск оптимального их содержания в соответствии с надежностью и долговечностью двигателя.

Так как физико-химические свойства топлива влияют на работу двигателя, то их можно использовать для установления оптимальных концентраций в смесях. К тому же изучением таких показателей топлив, как диэлектрическая проницаемость, удельная рефракция и их взаимосвязей с различными показателями органических топлив занимаются учёные многих государств: Германия, Бразилия, США, Великобритания, Малайзия, Испания, Румыния, Нидерланды, Турция, Аргентина, Танзания, Индия и др. [94...119].

В нашей стране теоретические методы определения показателей работы двигателя только ещё набирают обороты по изучению. Данными исследованиями занимаются такие институты как: «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»; «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»; «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»; «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и др.

Проводя выборку учёных, занимающихся теоретическими методами оценки показателей работы двигателя, можно сказать, что данный круг очень узок. Вопросы оценки отражены в трудах Камфера Г.М., Николаева В.Ф., Карташевича

А.Н., Картошкина А.П., Плотникова С.А., Смольникова М.В., Пляго А.В. и др. [7-27].

На основе вышеизложенного, **научная проблема** может быть поставлена как определение рациональных составов смесевых биотоплив для автотракторного дизеля на основе показателей процесса сгорания.

**Целью** научных исследований является определение рациональных составов альтернативных топлив для автотракторного дизеля на основе их химмотологических показателей

**Научная новизна работы:**

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден способ определения рациональных составов смесевых биотоплив для автотракторного дизеля на основе показателей процесса сгорания.

2. Уточнены теоретические зависимости определения максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на чистом дизельном топливе.

3. Впервые предложены теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе максимального давления цикла в цилиндре автотракторного дизеля.

4. Впервые предложены теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля.

5. Усовершенствована методика определения удельной рефракции и диэлектрической проницаемости жидких альтернативных топлив.

6. Экспериментально определены показатели процесса сгорания при работе автотракторного дизеля с добавками жидких альтернативных топлив. Верифицированы значения расчетных и экспериментальных данных. Определены рациональные составы смесевых биотоплив.

7. Разработаны программы расчета на ЭВМ максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на жидких топливах.

Новизна предложенных разработок подтверждена 1 патентом РФ на изобретение и 2 авторскими свидетельствами РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Практическая ценность работы** заключается в разработке методики, позволяющей на основе экспресс-анализа физико-химических свойств топлива (удельной рефракции и диэлектрической проницаемости) прогнозировать критические параметры работы дизеля — максимальное давление и жесткость цикла. Это дает производителям и сельхозпредприятиям конкретные рецептуры безопасных топливных смесей (до 50% растительных масел, до 30% этанола), сокращает затраты на моторные испытания и предоставляет инструмент для диагностики причин неисправностей, связанных с качеством топлива, напрямую в условиях эксплуатации.

Результаты проведенных исследований и научно-технические разработки, полученные при проведении исследований, позволяют сократить затраты времени и средств при диагностике технического состояния автотракторных дизелей. Полученные данные могут быть использованы при проведении дальнейших научных исследований применения альтернативных топлив в АПК страны.

**Методы исследований** - анализ свойств жидких моторных топлив, разработка теоретических методов оценки показателей процесса сгорания в цилиндре дизеля; получение данных лабораторных и стендовых испытаний, сравнение и анализ.

**Предмет исследований** – взаимосвязь физико-химических свойств жидких моторных топлив с показателями их процесса сгорания, определяющими надежность и долговечность автотракторного дизеля.

**Объекты исследований** - составы жидких моторных топлив на основе ДТ с добавками этанола, рапсового масла и сурепного масла, дизель Д-245.5.S2.

**Результаты научных исследований** по теоретическому и экспериментальному определению рациональных составов смесевых биотоплив для дизеля Д-245.5S2 на основе показателей процесса сгорания использованы в учебном процессе Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, Вятского государственного университета.

Материалы диссертации использованы в учебном процессе Вятского государственного университета, Удмуртского государственного аграрного университета.

Разработанные экспресс-методы определения показателей рабочего процесса дизелей использованы в филиале АО «Газпром газораспределение Киров» в г. Кирово-Чепецке при диагностировании неисправностей двигателей автотранспорта, в ООО «Промышленная группа ДИМЕТ» (г. Киров) при диагностике технического состояния ДВС автопарка.

**На защиту выносятся следующие положения.**

1. Способ определения рациональных составов альтернативных топлив для автотракторного дизеля на основе их химмотологических показателей.
2. Уточненные теоретические зависимости определения максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на чистом дизельном топливе.
3. Теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе максимального давления цикла в цилиндре автотракторного дизеля.
4. Теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля.
5. Усовершенствованная методика определения удельной рефракции и диэлектрической проницаемости жидких альтернативных топлив.
6. Показатели процесса сгорания при работе автотракторного дизеля с добавками жидких альтернативных топлив. Данные верификации расчетных и экспериментальных значений. Рациональные значения составов смесевых биотоплив.

7. Программы расчета на ЭВМ максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на жидких топливах.

#### **Личный вклад автора.**

Автор выполнял работу самостоятельно под руководством научного руководителя. Автор играл ключевую роль в планировании, подготовке и проведении экспериментов, а также анализе и обобщении полученных результатов. Им в соавторстве подготовлены и опубликованы в виде статей и тезисов докладов, материалы диссертационных исследований, а также предложены технические и технологические разработки, защищенные а.с. РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ и 1 патентом РФ на изобретения.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты и материалы диссертации докладывались и обсуждались:

– на Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» в 2021-2024 гг., (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева);

– на Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации» в 2022, 2024 гг., (г. Киров, ВятГУ);

- Международной научной конференции я студентов и магистрантов «Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства» в 2024 г., (Республика Беларусь, г. Горки, БГСХА);

– на Международной научно-практической конференции «Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства» 2021-2023 гг. (Республика Беларусь, г. Горки, БГСХА);

– на VI Международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения» в 2022 г. (Республика Беларусь, г. Гродно, ГрГУ им. Янки Купалы).

– на Международной научно-практической конференции «Автомобиле- и тракторостроение» в 2023 г., (Республика Беларусь, г. Минск, БНТУ).

**Публикации.**

Основные положения диссертации опубликованы в 20 печатных работах, а также защищены 2 А.с. РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Доклады.**

По основным положениям диссертации было выполнено 14 докладов на научных конференциях различного уровня.

**Благодарности.**

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства» Белорусской ГСХА, д.т.н., профессору, заслуженному работнику образования Республики Беларусь Карташевичу А. Н. и всему коллективу кафедры за помощь в организации проведения отдельных этапов экспериментальных исследований.

Автор благодарен канд. пед. наук, заведующему кафедрой «Физики и медицинской информатики» ФГБОУ ВО Кировский ГМУ, доценту Шишкину Г.П. за оказанную помощь в исследовании физико-химических свойств жидких топлив, а так же канд. физ-мат. наук, доценту кафедры «Физика и методика обучения физике» ФГБОУ ВО «ВятГУ», Кантору П. Я. за оказанные консультации при разработке специальных теоретических блоков.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 1.1. Общие вопросы надежности и долговечности энергетических установок транспортных средств

Техническая система (энергетическая установка) – это совокупность упорядоченно взаимодействующих между собой элементов, образующих единое техническое устройство, предназначенное для самостоятельного выполнения определенных функций. Практически любой объект, машина, агрегат, узел, представляющий собой функционально завершённое изделие, является технической системой.

Автомобиль, например, как сложная техническая система выполняет функции по перевозке грузов или пассажиров, карданная передача передает крутящий момент от одного механизма к другому, генератор преобразует механическую энергию, получаемую от двигателя, в электрическую. Техническая система включает в себя взаимосвязанные между собой элементы, которые в свою очередь в зависимости от степени функциональной завершенности могут выполнять свои заданные функции или же составлять ее элементарные неделимые в конструкторском плане части (детали). Двигатель, например, является элементом такой сложной технической системы, как автомобиль. С другой стороны, двигатель выполняет свои функции (преобразует тепловую энергию сгорающего в его цилиндрах топлива в механическую), поэтому он также является технической системой. Детали же двигателя (блок цилиндров, головка блока, коленчатый и распределительные валы, поршни, поршневые кольца) – его конструктивные элементы. Несмотря на огромное разнообразие технических систем по функциональному назначению, конструкторской и технологической завершенности, они обладают рядом общих свойств:

- 1) технические системы состоят из элементов (частей), то есть имеют структуру;
- 2) элементы (части) технической системы соединены между собой определенным образом;

3) технические системы созданы для выполнения определенных полезных функций.

Вместе с тем каждая техническая система обладает каким-либо своим, особым качеством, отличающим ее от других систем. В соответствии с ГОСТ 15467-79 под качеством изделия понимается совокупность свойств, обуславливающих его пригодность для выполнения им своего функционального назначения. Применительно к автомобилям основные свойства, характеризующие их качество, – надежность, безопасность, динамичность, долговечность, производительность, топливная экономичность и др. Каждое из этих свойств оценивается одним или несколькими выходными параметрами, которые в процессе эксплуатации принимают различные количественные значения, именуемые показателями.

Важнейшее свойство любого изделия, позволяющее количественно оценить изменение показателей качества во времени, – надёжность. Надёжность – это свойство любого изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002-89).

В современной технической литературе даны и более простые формулировки понятия надежности. Под надежностью энергетических установок транспортных средств, например, принято понимать его свойство выполнять работу, сохраняя во времени или по пробегу эксплуатационные показатели в требуемых пределах. Другими словами, качественно изготовленный и грамотно эксплуатируемый двигатель в течение всего ресурсного пробега должен выполнять работу без каких-либо простоев, кроме тех, которые необходимы для проведения в плановом порядке профилактических и ремонтных операций, обеспечивающих его работоспособное состояние. Научно-технический прогресс предъявляет все более высокие требования к надежности продукции машиностроения. Решение этой важнейшей задачи не только обеспечивает высокий уровень безотказности и долговечности машин, но и является одним из основных источников повышения эффективности их использования, экономии трудовых, материальных и энергетических ресурсов, повышения

конкурентоспособности. Особенность проблемы надёжности – её связь со всеми этапами проектирования, изготовления и эксплуатации двигателя, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея его создания, и заканчивая принятием решения о списании. Надёжность энергетической установки закладывается при ее проектировании и расчёте. На этом этапе она зависит от обоснованности выбора структуры (агрегата, узла, механизма), сопротивляемости физическим процессам разрушения, используемых материалов, методов защиты от различных вредных воздействий, системы смазки, приспособленности к выполнению операций ТО, ремонта и других особенностей конструирования. При производстве (изготовлении) двигателей показатели надёжности, заданные при конструировании, обеспечиваются. На этом этапе она зависит от качества изготовления деталей, используемых технологий их упрочнения, методов контроля выпускаемой продукции, возможности управления технологическими процессами производства, качества сборки, выполнения в полном объеме доводочных испытаний изделий по параметрам надёжности и других элементов процесса изготовления.

При эксплуатации ДВС заложенная при проектировании и производстве надёжность реализуется. Такие ее свойства, как безотказность, долговечность и ремонтпригодность проявляются только в процессе эксплуатации двигателя и зависят от принятой системы ТО и ремонта, условий и режимов работы, производственно-технической базы и других эксплуатационных факторов. Таким образом, проблема надёжности является комплексной проблемой, так как непосредственным образом связана со всеми стадиями жизненного цикла двигателя – конструированием, изготовлением и эксплуатацией. Поэтому для решения задач, стоящих перед нею, привлекаются различные отрасли знаний. В процессе эксплуатации под влиянием большого числа факторов происходит изменение свойств ДВС, определяющих их качество. Наука о надёжности изучает закономерности этих изменений и разрабатывает методы, обеспечивающие необходимый ресурс и безотказность работы машин при минимальных трудовых и материальных затратах. Вопросы, решаемые наукой о надёжности, имеют свои специфические особенности, которые отличают ее от других отраслей знаний. Эти особенности заключаются в том, что:

- закономерности изменения начальных параметров машины, возникновение в ней отказов исследуются в зависимости от наработки или во времени;
- прогнозирование уровня работоспособности машины, сохранение ее выходных параметров осуществляется в зависимости от реальных условий эксплуатации.

Основная проблема обеспечения надежности как раз и связана с прогнозированием поведения двигателя в зависимости от предполагаемых условий ее эксплуатации. При этом весьма важно оценивать (прогнозировать) параметры надежности уже на ранних стадиях создания энергетической установки (расчеты при проектировании и конструировании). Изменения показателей качества ДВС в процессе эксплуатации могут быть как абсолютными, так и относительными.

Надёжность является сложным (комплексным) свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения характеризуется сочетанием более простых свойств: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью. Безотказность характеризует свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Это свойство определяет непрерывную работу объекта без каких-либо вмешательств, направленных на поддержание его работоспособности, т.е. технических обслуживаний и ремонтов.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Таким образом, долговечность анализирует работу энергетической установки в течение всего периода эксплуатации и учитывает, что его длительная работа невозможна без проведения необходимых профилактических и ремонтных мероприятий. Ремонтпригодность – свойство объекта, определяющее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонта. Это свойство характеризует, с одной стороны, качество конструкторских решений по предупреждению и обнаружению возможных отказов и, с другой, какой ценой по трудозатратам обеспечивается требуемый уровень надёжности изделия. В технической

эксплуатации автомобилей под ремонтпригодностью (в узком значении) понимают просто приспособленность изделий к ремонту. Сохраняемость – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение и после срока хранения и (или) транспортирования. Сохраняемостью определяются целесообразные сроки хранения и консервации ДВС, а также допустимые расстояния транспортирования, после которых они остаются пригодными для дальнейшей эксплуатации без ремонта. Повышенные требования предъявляются к изделиям, которые должны эксплуатироваться в особых климатических условиях, в частности, северных или тропических или долго храниться. Это свойство зависит от качества изготовления, интенсивности протекания в элементах автомобиля процессов старения, а также таких внешних факторов, как температура и влажность воздуха, агрессивность окружающей среды и др.

Для оценки долговечности технических систем используют следующие основные показатели:

- средний ресурс;
- средний срок службы;
- гамма-процентный ресурс.

Под ресурсом понимается суммарная наработка двигателя от начала эксплуатации (или ее возобновления после капитального ремонта) до предельного состояния, оговоренного технической документацией. Срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации изделия от ее начала (или возобновление после КР) до наступления предельного состояния. Таким образом, понятие «ресурс» применяется при характеристике долговечности по наработке изделия, а «срок службы» – по календарному времени. Как ресурс, так и срок службы изделий зависят от большого числа факторов, обусловленных погрешностями производства и условиями эксплуатации. В связи с этим и ресурс, и срок службы являются случайными величинами.

## 1.2. Методы и параметры оптимизации состава смесевых биотоплив в авто-тракторных дизелях

Методами оптимизации составов смесевых биотоплив могут служить как натурные испытания (лабораторные и стендовые), так и моделирование процесса сгорания с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного для решения конкретных задач.

Поскольку решение прикладных задач не должно существенно растягиваться во времени и должно укладываться в разумные временные рамки, модели и программы, используемые для оптимизации составов топлив, должны обладать высоким быстродействием. Данное требование приобретает особую значимость в случаях, когда доводка двигателя и протекающих в нём процессов не поддаётся методам однофакторного численного эксперимента. В силу своей сложности и многозначности такие задачи требуют применения многомерной оптимизации с учётом большого числа влияющих факторов.

Как показывает практика решения оптимизационных задач, при поиске оптимального экстремума функции с 5–6 переменными количество вычислений целевой функции (сессий расчёта рабочего процесса ДВС) может достигать сотен итераций. В ходе численного исследования необходимо выполнять множественные оптимизационные расчёты с последующей проверкой полученных решений. Это существенно повышает требования к быстродействию программного обеспечения. Ситуация осложняется тем, что исследования требуется проводить на различных режимах работы ДВС. В результате проблема необходимого машинного времени для решения задачи может стать настолько острой, что сделает её решение практически невозможным. Аналогичные сложности возникают и при работе с пользовательским интерфейсом для ввода исходных данных. Если процесс задания входных параметров оказывается трудоёмким и не поддаётся автоматизации, проведение оптимизационных расчётов значительно усложняется. В ряде случаев это может сделать выполнение расчётов технически неосуществимым.

Учитывая, что разработка математических моделей и реализующих их программ – дело сложное и трудоемкое, программы должны быть универсальны и достаточно точны. Созданный единожды дорогостоящий инструмент должен быть с успехом применен к разным объектам. Понятия универсальности и точности математической модели взаимосвязаны, и предполагают описание физических процессов на основе фундаментальных физических законов и уравнений.

Подводя итог сказанному, можно сделать вывод о том, что для проведения оптимизационных расчетных исследований, направленных на снижение расхода топлива и вредных выбросов дизельными двигателями в настоящее время и в ближайшей перспективе наибольшую актуальность представляют термодинамические программы, реализующие феноменологические модели сгорания в дизеле. Однако эти модели должны позволять надежно рассчитывать процессы сгорания и образования вредных веществ в условиях, характерных для современных технологий, которые включают в себя:

- применение высокой рециркуляции отработавших газов (до 50 % и выше);
- использование многоразового впрыскивания, включая подачу пилотных порций с большим опережением (PCCI процесс: Premixed Charge Compression Ignition);
- использование топливной аппаратуры с высоким давлением впрыскивания и малым диаметром распыливающих отверстий;
- применение биотоплив и их смесей с дизельным топливом.

В тоже время, модель сгорания должна позволять точно описывать и классический процесс сгорания в дизеле, когда большая часть процесса развития струй топлива происходит в условиях контакта струи со стенками камеры сгорания и в условиях интенсивного воздушного вихря.

Модель должна быть универсальной, позволяя "плавно", без разрывов и с хорошей точностью описывать переход процесса сгорания от классического (имеющего место на режимах полной мощности), к сгоранию с многоразовым впрыскиванием и рециркуляцией ОГ.

Модель должна быть легко идентифицируемой и одинаково успешно применимой как к быстроходным двигателям с малым диаметром цилиндра, так и к малооборотным дизелям с большим диаметром цилиндра. Это позволит вывести оптимизационные расчеты из области искусства в область технологии, т.е. сделать их доступными для инженеров промышленных предприятий.

Задача оптимизации состава смесового биотоплива является многокритериальной оптимизационной задачей, поскольку при ее решении необходимо учитывать как показатели топливной экономичности, так и показатели токсичности ОГ. В качестве показателей топливной экономичности обычно используются удельный эффективный расход топлива  $g_e$  или эффективный КПД двигателя  $\eta_e$ . Оценку токсичности ОГ дизеля целесообразно проводить либо по концентрациям в ОГ нормируемых токсичных компонентов (оксидов азота, оксида углерода, несгоревших углеводородов, сажи или твердых частиц), либо по удельным массовым выбросам этих токсичных компонентов ОГ.

Многокритериальная задача оптимизации может быть сведена к однокритериальной при использовании метода свертки, в соответствии с которым формируется обобщенный критерий оптимизации  $J_0$  в виде суммы частных критериев:

$$J_0 = \sum_{i=1}^k a_i J_i, \quad (1.1)$$

где  $J_i$  – частные критерии оптимальности;  $a_i$  – весовые коэффициенты.

При решении задачи оптимизации состава смесового биотоплива в качестве частных критериев оптимальности выбираются эффективный КПД двигателя  $\eta_e$  и массовые выбросы нормируемых токсичных компонентов ОГ – оксидов азота  $NO_x$ , оксида углерода  $CO$ , несгоревших углеводородов  $CH_x$ , т.е.

$$J_0 = a_{\eta_e} J_{\eta_e} + a_{NO_x} J_{NO_x} + a_{CO} J_{CO} + a_{CH_x} J_{CH_x}. \quad (1.2)$$

Входящие в выражение (1.2) частные критерии оптимальности определялись по следующим зависимостям

$$J_{\eta_e} = \frac{\eta_{e0усл}}{\eta_{еусл}}, \quad J_{NO_x} = \frac{e_{NO_x}}{e_{NO_x0}}, \quad J_{CO} = \frac{e_{CO}}{e_{CO0}}, \quad J_{CH_x} = \frac{e_{CH_x}}{e_{CH_x0}}, \quad (1.3)$$

где  $\eta_{eysl}$  – условный эффективный КПД дизеля при его работе на смесевом топливе данного состава;

$\eta_{e0ysl}$  – условный эффективный КПД двигателя при его работе на чистом дизельном топливе;

$e_{NOx}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CHx}$  – удельные массовые выбросы оксидов азота, оксида углерода и углеводородов при работе дизеля на смесевом топливе данного состава, г/(кВт·ч);

$e_{NOx0}$ ,  $e_{CO0}$ ,  $e_{CHx0}$  – значения удельных массовых выбросов оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов при работе двигателя на чистом дизельном топливе, г/(кВт·ч).

Весовые коэффициенты в выражениях (1.1) и (1.2) отражают значимость того или иного частного критерия. При оптимизации состава смесевое биотоплива значимость частных критериев, характеризующих токсичность ОГ, определяется по соответствию исследуемого дизеля в базовом варианте (т.е. работающем на чистом дизельном топливе) действующим нормам на токсичность ОГ. С целью реализации такого принципа выбора весовых коэффициентов предлагается весовой коэффициент  $a_{\eta_e}$  принять равным единице, а весовые коэффициенты  $a_{NOx}$ ,  $a_{CO}$ ,  $a_{CHx}$  определять в виде отношения действительной эмиссии токсичных компонентов отработавших газов к предельным величинам эмиссии, лимитируемым нормами на токсичность, т.е.

$$a_{NOx} = \frac{e_{NOx}}{e_{NOxnp}}, \quad a_{CO} = \frac{e_{CO}}{e_{COnp}}, \quad a_{CHx} = \frac{e_{CHx}}{e_{CHxnp}}, \quad (1.4)$$

где  $e_{NOx}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CHx}$  – удельные массовые выбросы оксидов азота, оксида углерода и несгоревших углеводородов при работе двигателя на чистом дизельном топливе, г/(кВт·ч);

$e_{NOxnp}$ ,  $e_{COnp}$ ,  $e_{CHxnp}$  – предельные значения удельных выбросов оксидов азота, оксида углерода и несгоревших углеводородов, лимитируемые нормами EURO-2, г/(кВт·ч).

При этом значения весовых коэффициентов частных критериев оптимальности для всех режимов работы двигателя принимаются постоянными и не зависящим от вида используемого топлива.

Оптимизация состава биотоплив является многокритериальной задачей, требующей баланса между топливной экономичностью и экологическими показателями. Для её решения применяют комплексный подход, сочетающий натурные испытания и математическое моделирование. Ключевым методом является свёртка многокритериальной задачи в обобщённый показатель, объединяющий частные критерии (КПД, выбросы токсичных компонентов) с весовыми коэффициентами, отражающими их значимость.

Наиболее эффективны феноменологические модели, обеспечивающие оптимальное соотношение точности и вычислительной сложности. Они должны адекватно работать с современными технологиями и различными биотопливами. Такой подход позволяет целенаправленно определять рациональные составы топливных смесей, переводя процесс оптимизации из эмпирической в технологическую плоскость.

### **1.3. Анализ известных методов определения рационального состава смесевых биотоплив в автотракторных дизелях**

Для учёных, занимающихся проблемами ДВС и альтернативными топливами очень важен вопрос определения рационального состава смесевых биотоплив. Основными возможными вариантами оптимизации состава топлива, который удовлетворял бы запросы учёных работающих над созданием АТ, являются: по удельному расходу топлива  $g_e$ , по значениям показателей токсичных и вредных веществ, по надёжности и долговечности, с помощью компьютерного моделирования и т.д. Рассмотрим некоторые из них.

К примеру, исследования рабочего процесса дизеля на разных видах топлива и оптимизация составов топлив проводились в лаборатории кафедры «Транспорт-

ные средства и техносферная безопасность» Липецкого государственного технического университета на стенде КИ-5540М с установленным двигателем КАМАЗ-740 (рис.1.1).

Использовалось три вида топлива:

- 1) дизельное топливо;
- 2) водно-топливная эмульсия, содержащая 15 % воды и до 84,5 % дизельного топлива и 0,5 % эмульгатора (ВТЭ);
- 3) водно-био-топливная эмульсия, состоящая из 15 % воды, 45 % дизельного топлива, 39,5 % биодизельного топлива и 0,5 % эмульгатора (ВБТЭ).

Эмульгатор, который использовался для стабилизации ВБТЭ, должен был оказывать минимальное влияние на рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания, не давать нагар и быть относительно дешевым и доступным. При выборе ПАВ необходимо было учитывать следующее: во-первых, эмульгатора в эмульсии должно содержаться минимальное количество: уже 0,5 % ПАВ может вызвать усиленное нагарообразование, что приведет к перебоям в работе двигателя; во-вторых, компоненты ПАВ и продукты их распада не должны быть токсичными, и коррозионно-активными [44].



Рисунок 1.1 – Обкаточно-тормозной стенд КИ-5540М с двигателем КАМАЗ-740

Эти требования усложняли задачу создания эмульгированных топлив и подбор ПАВ. Испытания были проведены по методике, согласно которой после 50 моточасов работы дизельного двигателя КАМАЗ-740 на ВБТЭ с различным эмульгатором, двигатель разбирался, оценивалось количество и распределение образовавшегося нагара на днище поршня и распылителе форсунки [44].

Для измерения нагара применялся микрометр Digimatic 293-254-10, имеющий погрешность измерений  $\pm 3$  мкм. Установлено, что толщина основной массы нагара на головке блока цилиндров и днище поршня достигала 0,2 мм, при этом оба ПАВ оказывали схожий эффект. Существенное влияние на токсичность отработавших газов оказывали отложения на форсунке, причем эмульгированное топливо с ПАВ 1 давало на 360% меньший нагар на распылителе форсунки по отношению к ПАВ 2 (рис.1.2).

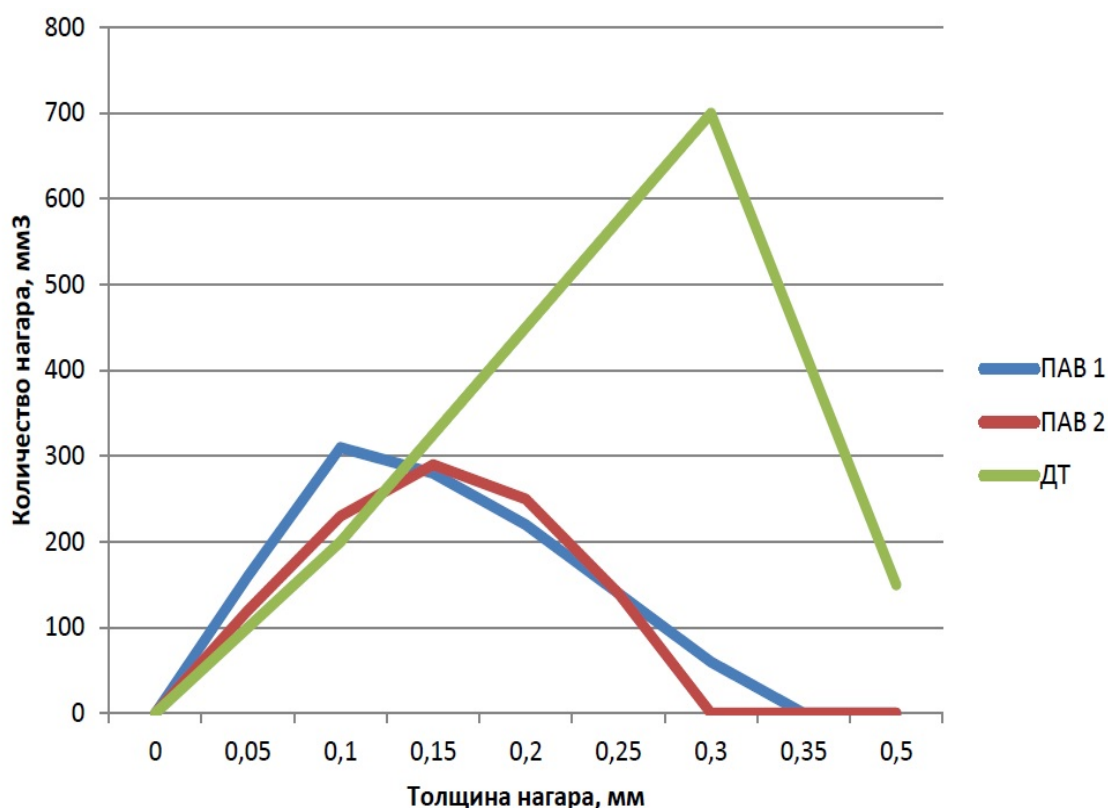


Рисунок 1.2 – Распределение нагара по толщине на днище поршня для сравнимых ПАВ и дизельного топлива класса Евро 3

Проведённые исследования позволили сделать вывод, что эмульгированные топлива позволяют значительно улучшить экологические показатели дизеля при

незначительном снижении эффективной мощности и ухудшении топливной экономичности. Применение водно-био-топливной эмульсии по сравнению с водно-топливной эмульсией способствует снижению процентного содержания токсичных компонентов в выхлопных газах, снижению дымности, а также повышает эффективную мощность и топливную экономичность двигателя [44]. В данном случае определяли рациональный состав по наличию нагарообразования.

Базой исследований применения альтернативных топлив и поиском рационального состава топлив являлась оригинальная комплексная лабораторная установка, созданная и размещенная в лаборатории кафедры ДВС Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Экспериментальная установка на базе одноцилиндрового отсека 1Ч 13/14 была оборудована необходимыми контрольно-измерительными приборами, датчиками, регистрирующей аппаратурой, приборами измерения токсичности отработавших газов [93]. Дополнительно, с помощью специальной аппаратуры, регистрировались по углу поворота кривошипа температура продуктов сгорания цветоразностным методом и текущее сажевыделение в цилиндре оптическим методом. Так как ДТ крайне плохо смешивается со спиртом, применялись растворители, позволяющие создавать нерасслаиваемые растворы. В качестве растворителей использовались многоатомные спирты: пропанол, изобутанол, октанол. Для топлив на основе выбранных растворителей было проведено расчетное исследование параметров рабочего процесса в зависимости от доли замещенного дизельного топлива. Доля растворителя при этом подбиралась из условия создания нерасслаиваемого раствора. При уменьшении цетанового числа композиционного топлива, снижении температуры заряда в цилиндре и повышении энергии активации для некоторых составов композиционных топлив наблюдалось невоспламенение цикловой порции. При проведении экспериментальных исследований это было зарегистрировано для композиционного топлива на основе пропанола, содержащего 40 % дизтоплива. Для прогнозирования экономических и экологических характеристик дизеля была разработана математическая модель процесса и образования токсичных веществ. За основу при разработке модели был принят алгоритм расчётов, предложенный Н.Ф. Разлейцевым

[44]. Модель была дополнена разработанными или модернизированными расчетными блоками:

а) учёта различий физико-химических свойств композиционных топлив и стандартного ДТ, зависящих от количества этанола (или метанола) в топливе, вида и количества третьего компонента;

б) расчёта периода задержки воспламенения для композиционных топлив и изменения кинетики сгорания топливо-воздушной смеси, связанных с различием физико-химических свойств;

в) расчёта образования сажи и оксидов азота при изменении состава рабочего тела и кинетики сгорания при работе на альтернативных спиртовых топливах.

Вышеизложенная методика позволяла оценить пригодность веществ и соединений в качестве растворителя для создания композиционных топлив и рекомендовать состав, наиболее приемлемый с точки зрения оптимальности рабочего процесса. При проведении моторных испытаний была отмечена следующая особенность рабочего процесса при применении композиционных топлив: экономичность при использовании смесей на основе пропанола (содержащих по 40 и 60 % ДТ) и изобутанола, содержащего 60 % ДТ, сохраняется в пределах прежнего уровня. Период задержки воспламенения для композиционных топлив на основе пропанола и изобутанола растет с увеличением нагрузки. Жесткость работы при использовании композиционных топлив увеличивается в 1,1-1,5 раза, максимальное давление цикла возрастает на 15-20 %, максимальная температура сгорания изменяется в пределах 3-7 %, причем для топлив, содержащих 60 % ДТ, она увеличивается, а для топлив, содержащих 40 % ДТ - уменьшается. В этих исследованиях рациональный состав топлива регулировали за счёт добавления растворителей [44].

Исследователи Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана работают над оптимизацией состава смесевых биотоплив для транспортного дизеля. Для решения такой оптимизационной задачи были проведены исследования дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) с камерой сгорания типа ЦНИДИ на чистом дизельном топливе и смесевых биотопливах, содержащих от

20% до 60% (по объему) рапсового масла. Некоторые результаты этих исследований представлены на рис. 1.3.

Полученные результаты подтвердили возможность оптимизации состава смесового биотоплива с учетом минимизации расхода топлива и выбросов токсичных компонентов ОГ. Но при этом целесообразно оценивать не только показатели токсичности ОГ дизеля, работающего на смесевых биотопливах, но и экологические качества самих топлив.

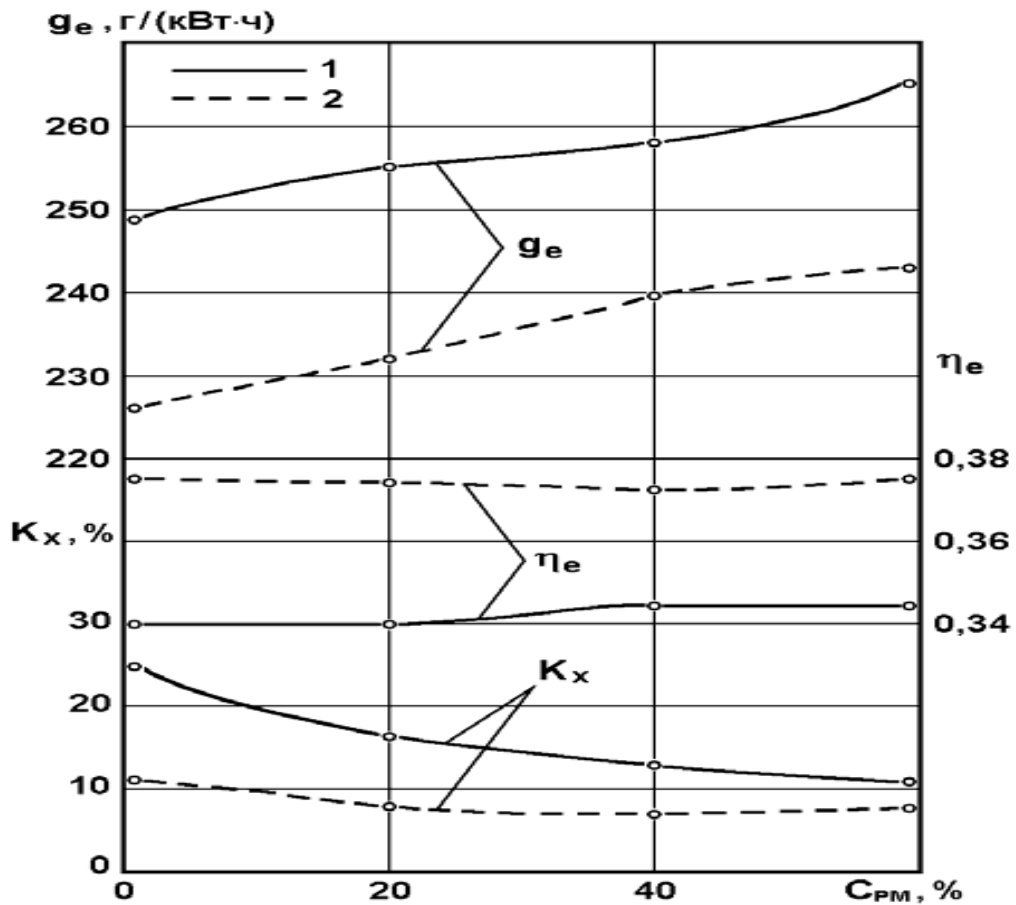


Рис. 1.3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД двигателя  $\eta_e$  и дымности ОГ  $K_x$  (б) от содержания рапсового масла  $C_{рм}$  в смесевом биотопливе на режимах внешней скоростной характеристики:  
1 - на режиме максимальной мощности при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup>; 2 - на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500$  мин<sup>-1</sup>.

Для оптимизации состава в данных исследованиях ключевую роль играли эффективные показатели, а, именно, удельный эффективный расход топлива.

Решением задач компьютерного моделирования процессов сгорания и оптимизации составов топлива в дизелях в настоящее время выступил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Их учёными разработаны и используются 3 основных класса математических моделей сгорания:

- 0-мерные, однозонные модели;
- квази-многомерные, многозонные модели (феноменологические);
- многомерные модели.

В 0-мерных моделях изменение параметров рассматривается только по времени  $\tau$ , т.е.  $dx / dt = f(t)$ - скорость тепловыделения есть функция только времени. Примерами таких моделей являются получившая наибольшую известность модель Вибе [3] и самая первая расчетная модель Гриневецкого - Мазинга [2]. В ряду известных нуль-мерных моделей следует также упомянуть модель Ватсона (Watson) [75], использующую для описания скорости тепловыделения алгебраические уравнения с эмпирическими коэффициентами, зависящими от режима работы двигателя; модель Остена и Линя (Austen & Lyn) [76], использующую скорость впрыскивания для расчета  $dx / dt$ ; методику Вошни (Woschni) [77], использующую для расчета индикаторной диаграммы так называемый фактор формы, представляющий собой относительную порцию топлива, впрыснутого в цилиндр за период задержки самовоспламенения; методики Шипинского (Shipinski) [78] и Вайтхауза – Вэя (Whitehouse & Way) [79], использующие закономерности испарения топлива для описания процесса сгорания. Недостатками однозонных моделей является невозможность учета важных влияющих факторов: формы КС, характеристики впрыскивания и т.д., а также необходимость идентификации по экспериментальным данным, которая должна выполняться перед тем, как выполнять расчетные исследования. Квази-многомерные, многозонные (феноменологические) модели занимают промежуточную в плане вычислительных ресурсов позицию, но обеспечивают максимальную точность, что делает их самыми перспективными для решения оптимизационных задач и параметрических исследований. Многомерные модели

позволяют максимально полно описать процесс, учитывая его нестационарность, 3-х мерность, турбулентность, диффузию и испарение, и т.п. Усилия были сосредоточены на разработке универсальной феноменологической модели сгорания в дизеле, которая, будучи внедрена в термодинамическую программу, позволяла бы решать актуальные задачи оптимизации ДВС. В последние годы были разработаны разные многозонные феноменологические модели сгорания в дизеле на основе модели топливной струи. Хотя между ними много общего, но они имеют и существенные отличия, затрудняющие их использование. Весьма новым направлением, представленным выше, у исследователей является программное моделирование оптимизации составов топлив.

Следующая работа, выполненная в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина (ФГБОУ ВПО МГАУ)», посвящена разработке методик сравнительного анализа эффективности использования альтернативных топлив в дизелях сельскохозяйственных машин и оптимизации состава многокомпонентных смесевых биотоплив. Рассмотрены особенности распределений режимов работы дизелей в условиях эксплуатации и испытательные циклы для оценки токсичности их ОГ.

Отмечено существенное различие в режимах работы машин различного назначения. Показано, что транспортные дизели в городских условиях большую часть времени эксплуатируются на режимах с не полными нагрузкой и частотой вращения. В частности, дизель типа Д-245.5S2 (4ЧН11/12,5) городского автобуса, созданного на базе автомобиля ЗиЛ-5301 «Бычок» на режиме номинальной мощности (при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ) работает только 1,2% времени. Основную долю режимов составляют режимы холостого хода (около 50%), причем, на режим холостого хода при минимальной частоте вращения ( $n_{\text{хх}} = 600 \text{ мин}^{-1}$ ) приходится 32,2% всего времени работы. Для сельскохозяйственных машин, выполняющих основные технологические операции (прямое комбайнирование, пахота и др.), более характерны режимы с большими нагрузкой и частотой вращения. Так, дизель комбайна Дон-

1500 в технологическом процессе уборки кукурузы работает, в основном, на режимах с большой частотой вращения со средней загрузкой 70-80% от максимальной. При этом доля режимов предельной регуляторной характеристики в этом технологическом процессе составляет около 50%. С использованием предложенного четырехрежимного цикла и экспериментальных данных по дизелю Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), работающему на многокомпонентных биотопливах, проведена оптимизация состава этих топлив. Рассмотрены многокомпонентные биотоплива с добавкой бензина - смесь 85% ДТ, 5% РМ и 10% бензина АИ-80, смесь 80% ДТ, 10% РМ и 10% бензина АИ-80, а также смесь 70% ДТ, 20% РМ и 10% бензина АИ-80. Оптимизация состава таких топлив проведена по методике, базирующейся на составлении обобщенного критерия оптимальности, в виде суммы частных критериев (рис. 1.4).

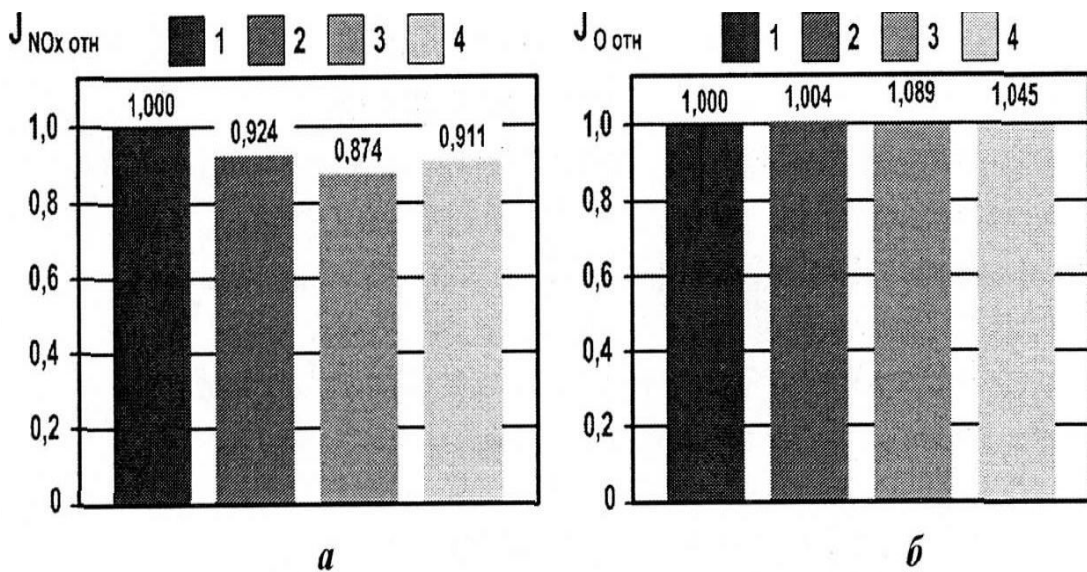


Рисунок 1.4 - Значения критериев оптимальности  $J_{NOx\ отн}$  (а) и  $J_{O\ отн}$  (б) и при работе дизеля Д-245С на различных топливах: 1 - ДТ; 2 - смесь 85% ДТ, 5% РМ и 10% бензина АИ-80; 3 - смесь 80% ДТ, 10% РМ и 10% бензина АИ-80; 4 - смесь 70% ДТ, 20% РМ и 10% бензина АИ-80

В качестве частного критерия топливной экономичности использовано отношение эффективных КПД дизеля, работающего на ДТ и смесевом биотопливе. Здесь оптимизация состава топлива производилась за счёт эффективных показателей работы дизеля и значений критериев оптимальности.

Научная школа в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА») занимается оценкой эксплуатационных показателей сельскохозяйственного трактора и при этом оптимизирует подаваемый состав топлива. Анализ результатов моторных исследований показывает, что в условиях регуляторной характеристики на режиме полной мощности с увеличением содержания сурепного масла в смесевом топливе действительный расход воздуха повышается, а теоретически необходимый – уменьшается. Вследствие этого коэффициент избытка воздуха при работе дизеля на смесевом топливе возрастает по сравнению с работой на минеральном ДТ. Так, например, на топливе 90:10 наблюдается увеличение коэффициента избытка воздуха с 1,472 до 1,526 (на 3,7 %). Увеличение коэффициента избытка воздуха ведет к снижению расчетных температур газов в конце процессов сгорания (с 1970 до 1951 К) и расширения (с 1331 до 1320 К), вследствие чего коэффициент наполнения повышается с 0,863 до 0,882 (на 2,2 %) за счет меньшего подогрева свежего заряда. При работе дизеля на всех видах ДСТ, по мере увеличения в них доли СурМ, максимальное давление цикла и средняя скорость нарастания давления газов в цилиндре снижаются, что означает более «мягкую» работу дизеля на ДСТ по сравнению с работой дизеля на минеральном ДТ.

Так, при работе дизеля в режиме полной мощности на смесевом топливе 90:10 максимальное давление цикла уменьшилось с 7,2 до 6,52 МПа (на 9,4 %), средняя скорость нарастания давления газов в цилиндре снизилась с 0,62 до 0,42 МПа/град (на 32,3 %). Максимальное снижение эффективной мощности с 61,0 до 56,9 кВт (на 6,7 %) отмечается при работе дизеля на смесевом топливе 90:10, а минимальное снижение – с 61,0 до 60,2 кВт (на 1,3%) на смесевом топливе 25:75 (рис. 1.5). В качестве частного критерия топливной экономичности использовано отношение эффективных КПД дизеля, работающего на ДТ и смесевом биотопливе. Здесь оптимизация состава топлива производилась за счёт эффективных показателей работы дизеля и значений критериев оптимальности.

Топливная экономичность дизеля на всех видах ДСТ ухудшается (рис. 1.6). Так, при работе на смесевом топливе 90:10 часовой и удельный эффективный расходы топлива возросли, соответственно, с 14,6 до 16,1 кг/ч (на 10,3%) и с 240,5 до 280,4 г/кВт·ч (на 16,7%).

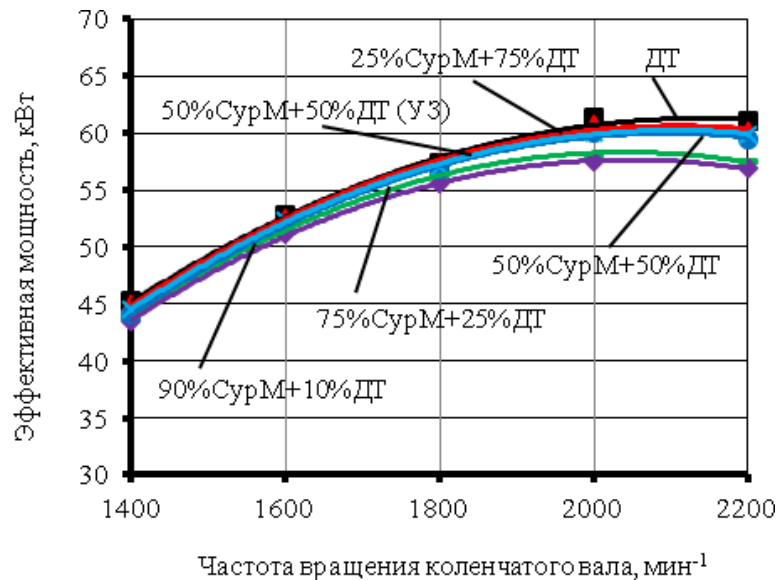


Рисунок 1.5 – Показатели дизеля Д-243-648 на корректорной ветви регуляторной характеристики (эффективная мощность  $N_e$ )

Минимальное увеличение данных показателей происходит при работе дизеля на смесевом топливе 25:75, при этом часовой и удельный эффективный расходы топлива увеличились соответственно с 14,6 до 15,4 кг/ч (на 5,4%) и с 240,5 до 251,4 г/кВт·ч (на 4,5%). Количественные оценки указанных показателей дизеля при работе на смесевом топливе 50:50 близки к аналогичным показателям дизеля при работе на смесевом топливе 25:75.

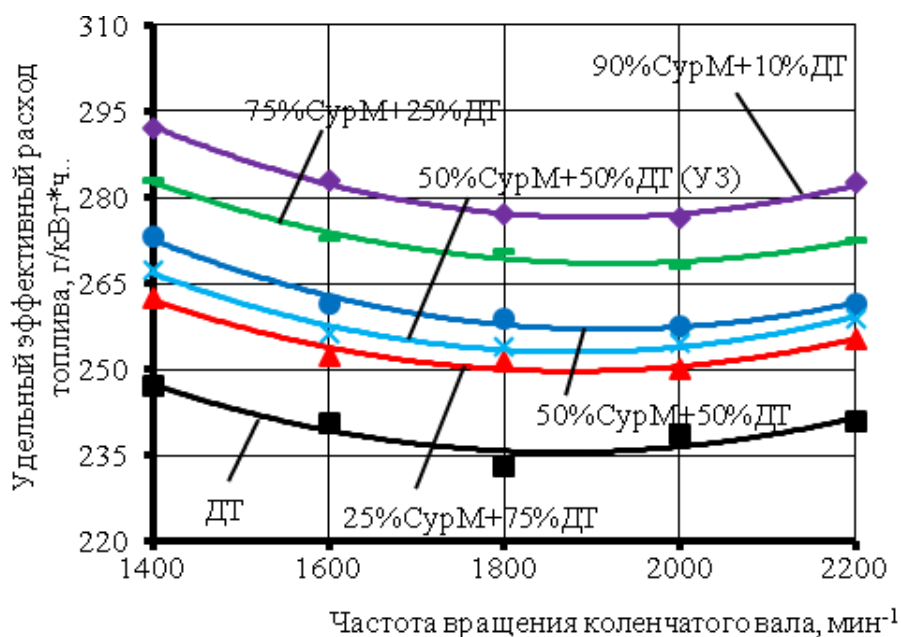


Рисунок 1.6 – Показатели дизеля Д-243-648 на корректорной ветви регуляторной характеристики (удельный эффективный расход топлива  $g_e$ )

Анализ дымности ОГ (рисунок 1.7) показывает, что при работе дизеля на смешанном топливе 50:50 дымность наименьшая и равна 27%. Дальнейшее увеличение СурМ в смешанном топливе до 90% ведет к увеличению дымности до 44%. При работе дизеля ( $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ) на смешанном сурепно-минеральном топливе 50:50, обработанном ультразвуком (УЗ), по сравнению с работой на минеральном ДТ, эффективная мощность снижается с 61,0 до 60,6 кВт (на 0,7%), удельный эффективный расход смешанного топлива возрастает с 239,3 до 255,7 г/кВт·ч (на 6,9%), дымность снижается с 40% до 26% (на 48%), тогда как на необработанном смешанном топливе снижение эффективной мощности происходит с 61,0 до 59,5 кВт (на 2,5%), удельный эффективный расход смешанного топлива увеличивается с 239,3 до 262,2 г/кВт·ч (на 9,6%).

Результаты исследований трактора на тормозном стенде с беговыми барабанами показывают, что при добавлении в минеральное ДТ сурепного масла происходит изменение тягово-экономических показателей трактора.

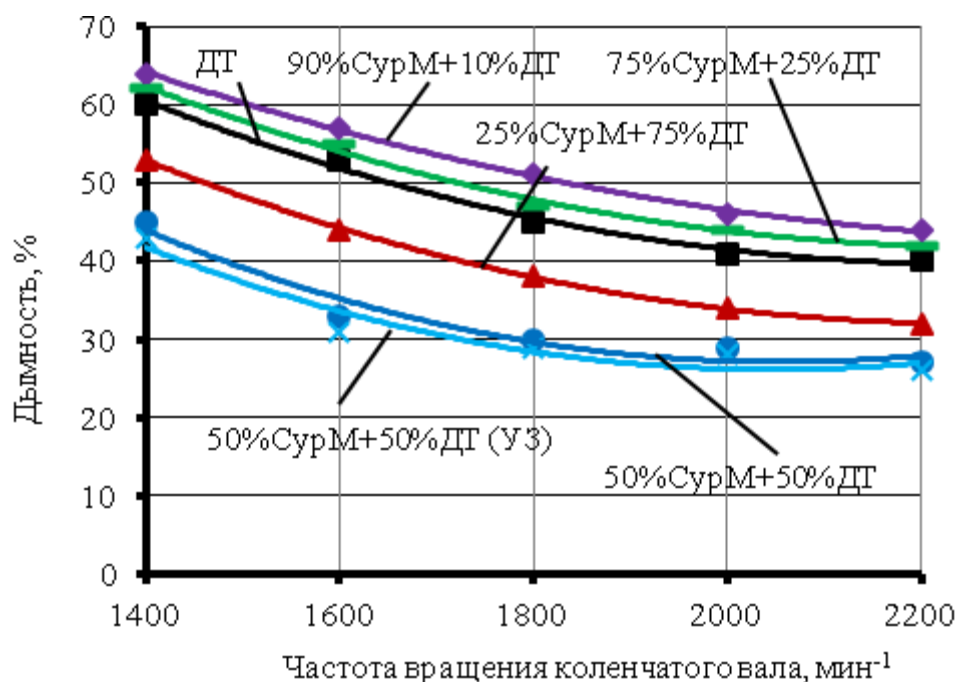


Рисунок 1.7 – Показатели дизеля Д-243-648 на корректорной ветви регуляторной характеристики (дымность)

Так, при увеличении доли сурепного масла в смесевом топливе до 50% тяговое усилие и тяговая мощность ( $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>) снижаются с 14,9 до 14,3 кН (на 4,1%) и с 39 до 37 кВт (на 5,1%), соответственно. Происходит увеличение часового и удельного расходов топлива, соответственно, с 11,8 до 12,5 кг/ч (на 5,9%) и с 295,9 до 337,8 г/кВт ч (на 14,1%). Минимальное изменение показателей наблюдается при работе трактора на смесевом топливе 25:75. Так, например, тяговое усилие и тяговая мощность ( $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>) снижаются с 14,9 до 14,5 кН (на 2,7%) и с 39 до 38 кВт (на 2,6%). Часовой и удельный расходы топлива увеличиваются с 11,8 до 12,0 кг/ч (на 1,7%) и с 295,9 до 315,8 г/кВт·ч (на 6,7%), соответственно. Таким образом, анализ полученных результатов по показателям физических и теплотворных свойств, показателям рабочего процесса, мощностным, топливно- экономическим и экологическим показателям дизеля, а так же по тягово- экономическим показателям трактора показывает, что наилучшим сурепно- минеральным топливом является смесевое топливо состава 25:75, близко к этому топливу по аналогичным показателям и смесевое топливо 50:50. Поэтому в летний период рекомендуется применять смесевое топливо с содержанием в нем до 50 % сурепного масла, в весенний

и осенний периоды – до 25 %. Результаты эксплуатационных исследований трактора в составе пахотного агрегата показывают, что при работе на смесевом топливе 25:75 по сравнению с работой на минеральном топливе погектарный расход топлива возрастает с 17,32 до 18,2 кг/ч (на 5,6 %), рабочая скорость и производительность МТА за час чистой работы на VI рабочей передаче снижаются незначительно с 11,4 до 11,1 км/ч (на 1,5 %) и с 0,834 до 0,817 га/ч (на 2,6 %) соответственно.

Учёные в данной работе попытались максимально исследовать выбранный состав топлива и оптимизировать его посредством эффективных и экологических показателей, а также проведением тяговых испытаний на тракторе.

#### **1.4. Цель и задачи исследования**

Все предложенные выше исследования позволяют определить оптимальный состав топлива различными способами. Однако работ по определению оптимального состава АТ на основе показателей процесса сгорания в двигателе (максимальное давление цикла и жесткость) практически нет. Представляет также научный интерес определение оптимального состава топлива для правильной работы дизеля с учетом физико-химических и электрических свойств жидкостей (удельную рефракцию и диэлектрическую проницаемость).

Исходя из изложенного целью настоящей диссертационной работы является определение рациональных составов альтернативных топлив для автотракторного дизеля на основе их химмотологических показателей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе было необходимо решить следующие задачи:

1. Теоретически обосновать и экспериментально подтвердить способ определения рациональных составов альтернативных топлив для автотракторного дизеля на основе их химмотологических показателей.

2. Уточнить теоретические зависимости определения максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на чистом дизельном топливе.

3. Предложить теоретические зависимости определения рациональных смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе максимального давления цикла в цилиндре автотракторного дизеля.

4. Предложить теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля.

5. Усовершенствовать методику определения удельной рефракции и диэлектрической проницаемости жидких альтернативных топлив.

6. Экспериментально определить показатели процесса сгорания при работе автотракторного дизеля с добавками жидких альтернативных топлив. Верифицировать значения расчетных и экспериментальных данных. Определить рациональные значения составов смесевых биотоплив.

7. Разработать программы расчета на ЭВМ максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на жидких топливах.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СОСТАВОВ СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ

Удельная рефракция представляет собой величину, характеризующую электронную поляризуемость единицы массы вещества в высокочастотном электромагнитном поле световой волны.

Дословно «рефракция» означает преломление, а рефрактометрия — известный метод исследования свойств веществ, основанный на определении показателя преломления и некоторых его функций. Рефрактометрия применяется для идентификации химических соединений, количественного и структурного анализа, определения физико-химических параметров веществ.

С помощью метода магнитного двулучепреломления разрабатываются эффективные экспресс-анализаторы нефтепродуктов, позволяющие через корреляционные соотношения прогнозировать целый комплекс эксплуатационных и потребительских свойств.

Огромное число данных по показателям преломления органических жидкостей и неорганических кристаллов (преимущественно минералов), полученных за последнее столетие, позволяет широко использовать рефрактометрию для установления идентичности исследуемых веществ с ранее описанными зависимостями, а также для оценки степени их чистоты. В настоящее время показатель преломления, наряду с температурами плавления и кипения, принадлежит к числу свойств, определение которых считается обязательным для характеристики жидких соединений, а для минералов измерение показателей преломления иммерсионным методом является важнейшим способом их идентификации [28].

Изменение плотности вещества всегда сопровождается изменением его показателя преломления. Обычно при увеличении плотности увеличивается и показатель преломления. Теоретические исследования связи между плотностью вещества и его показателем преломления, а также опытные данные приводят к прямо пропорциональной зависимости некоторой функции показателя преломления  $f(n)$  от плотности  $d$

$$f(n) = rd \quad (2.1)$$

Постоянный коэффициент  $r$ , характерный для данного вещества, называют удельной рефракцией, В отличие от  $n$  и  $d$ , удельная рефракция не зависит от внешних условий (температуры, давления) и агрегатного состояния вещества.

Ньютон, рассматривавший преломление света, как следствие притяжения световых частиц веществом, считал, что  $f(n) = n^2 - 1$ . Математический вывод этой функции был дан Лапласом, и формула удельной рефракции [28]:

$$r = \frac{n^2 - 1}{d} \quad (2.2)$$

называется формулой Ньютона – Лапласа. R

Произведенная в начале XIX в. проверка применимости формулы Ньютона Лапласа к газам дала вполне удовлетворительные результаты. Однако в 1863 г. Гладстон и Даль показали, что при нагревании жидкостей удельная рефракция Ньютона - Лапласа не остается вполне постоянной. Опытным данным гораздо лучше соответствовало простое уравнение [28]:

$$r = \frac{n - 1}{d} \quad (2.3)$$

которое получило распространение под названием формулы Гладстона-Даля.

В 1880 г. Г. А. Лорентц и несколько ранее Л. Лоренц независимо и совершенно различными путями пришли к заключению, что функция  $f(n)$  имеет вид  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$ , тогда коэффициент  $r$  получается:

$$r = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{1}{d} \quad (2.4)$$

При этом Лорентц исходил из электромагнитной теории Максвелла и рассматривал связь преломления с собственными частотами колебаний электронов в молекулах. Одновременно была указана возможность получения формулы (2.4) из теории электрической поляризации диэлектриков Клаузиуса - Мосотти. Благодаря своей теоретической обоснованности, формула Лорентц - Лоренца почти вытеснила из употребления другие формулы удельной рефракции. Вместе с тем она в ряде случаев хуже отвечала опытными данным, чем некоторые чисто эмпирические соотношения [28].

Ввиду большого значения, которое сохраняет формула (2.4) до нашего времени, рассмотрим подробнее ее обоснование. Если неполярный диэлектрик поместить в постоянное электрическое поле напряженностью  $E$ , то его молекулы поляризуются, приобретая дипольный момент  $\mu_\alpha$ . Величина  $\mu_\alpha$  будет пропорциональна напряженности действующего на молекулы внутри диэлектрика поля  $E_i$ :

$$\mu_\alpha = \alpha E_i \quad (2.5)$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$ , характеризующий деформируемость молекулы под действием электрического поля, называется поляризуемостью. Индуцированный дипольный момент  $\mu_\alpha$  вызывается, как смещением электронов относительно ядер атомов (электронная поляризация), так и смещением ядер атомов относительно друг друга (атомная поляризация). Поляризуемость  $\alpha$  в уравнении (2.5) представляет собой среднюю суммарную величину, включающую оба эти эффекта.

Диэлектрическая проницаемость это коэффициент, входящий в математическую запись закона Кулона для оценки силы взаимодействия точечных зарядов, находящихся в однородной изолирующей (диэлектрической) среде на минимальном расстоянии друг от друга.

Сумма индуцированных дипольных моментов в единице объема диэлектрика называется диэлектрической поляризацией  $P$ :

$$P = \sum \mu_\alpha = \sum_k N_k \alpha_k E_i \quad (2.6)$$

где  $N_k$  - число молекул вида  $k$  единице объема;

$\alpha_k$  - поляризуемость этих молекул;

$E_i$  - действующее на частицы внутреннее поле.

Диэлектрическая поляризация  $P$  численно равна поверхностной плотности индуцированных электрических зарядов диэлектрика в плоскости, перпендикулярной напряженности поля  $E$ . Согласно известным законам электростатики [28] в системе СГС:

$$P = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} E \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая постоянная (проницаемость).

Из (2.6) и (2.7) имеем:

$$\varepsilon - 1 = \frac{4\pi}{E} \sum_k N_k \alpha_k E_i \quad (2.8)$$

Напряженность внутреннего поля  $E_i$  зависит от среднего поля  $E$ , диэлектрической постоянной  $\varepsilon$  и структуры диэлектрика. Установление этой зависимости является сравнительно трудной задачей. При ее решении Лорентц допустил, что сила поля, действующая на молекулу, равна силе поля в центре шарообразной полости в диэлектрике, радиус которой значительно превышает размеры молекул. Для этого случая расчет дает величину:

$$E_i = \frac{\varepsilon+2}{3} E \quad (2.9)$$

Подставляя из (2.9) в (2.8), получим после необходимых преобразований:

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} = \frac{4\pi}{3} \sum_k N_k \alpha_k \quad (2.10)$$

Если диэлектрик состоит из молекул только одного вида (является индивидуальным химическим соединением), то вместо (2.10) можно написать:

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} = \frac{4\pi}{3} N_L \alpha \quad (2.11)$$

Число частиц в единице объема  $N_L$  пропорционально плотности  $d$ :

$$N_L = \frac{N_A}{M} d \quad (2.12)$$

где  $N_A$  - число Авогадро;

$M$  - молекулярная масса вещества.

Таким образом [28]:

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} \frac{1}{d} = \frac{4\pi}{3} \frac{N_A}{M} \alpha \quad (2.13)$$

Соотношение (2.13), называемое формулой Клаузиуса - Мосотти, было выведено исходя из представления о диэлектрике, как о совокупности изолированных друг от друга проводящих сферических частиц радиуса  $a$ . В этом случае  $\alpha = a^3$ .

Согласно электромагнитной теории света Максвелла, для прозрачных диэлектриков, магнитная проницаемость которых близка к единице [28],

$$\varepsilon = n^2 \quad (2.14)$$

На этом основании вместо (2.13) можно написать:

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \frac{1}{d} = \frac{4\pi}{3} \frac{N_A}{M} \alpha \quad (2.15)$$

Полученная формула выявляет связь удельной рефракции Лорентц - Лоренца (1.4) с поляризуемостью молекул:

$$r = \frac{4\pi}{3} \frac{N_A}{M} \alpha \quad (2.16)$$

Показатель преломления углеводородов или топлив изменяется в зависимости от химического строения соединений, возрастая в следующем порядке: алканы — алкены — алкилциклопентаны — алкилциклогексаны — алкилбензолы — алкилнафталины.

Графики показателя преломления - состав для двойных систем могут иметь весьма различную форму (рис. 2.1). Они бывают кривыми с небольшой кривизной или практически прямыми, но могут иметь и значительную выпуклость к оси составов или к оси показателей преломления. Иногда на этих кривых встречаются максимумы или минимумы, причем одинаковые значения  $n$  соответствуют двум растворам разной концентрации. Реже встречаются на кривых  $n$  - состав изломы (сингулярные точки) и точки перегиба. Форма рассматриваемых кривых зависит от двух факторов: от природы компонентов и их взаимодействия при образовании раствора и от способа выражения состава раствора [28].

Второй фактор - способ выражения концентрации - весьма существенно влияет на величину кривизны (отклонения от аддитивности), а иногда и определяет ее знак (направление выпуклости). В связи с этим наличие на кривой и точек перегиба зависит от способа выражения концентрации. Наблюдаемая в данной системе при данном способе выражения состава точка перегиба на кривой может исчезнуть при переходе к другим единицам концентрации или, наоборот, появиться.

Наличие экстремумов показателей преломления растворов не зависит от того, выражен ли состав в массовых, объемных или молярных долях (процентах). Появление экстремумов  $n$  обусловлено происходящими при растворении процессами (изменением объема, взаимодействием компонентов) и соотношением числовых значений  $n$  компонентов.

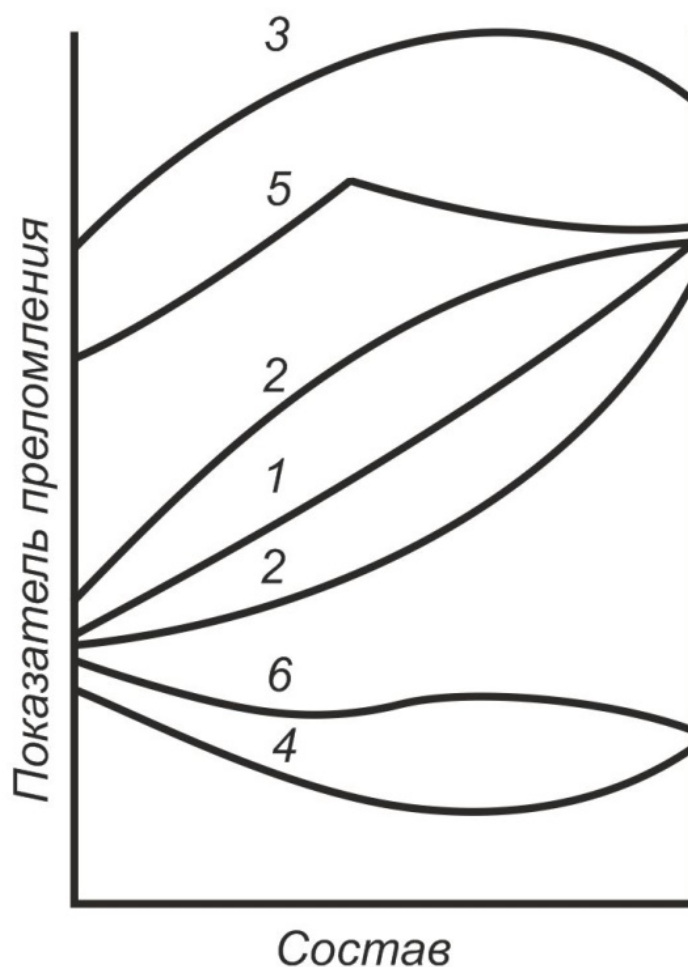


Рис. 2.1 Типы кривых показатель преломления - состав: 1 - с малой кривизной; 2 - с большой кривизной; 3 - с максимумом; 4 - с минимумом; 5 - с сингулярной точкой; 6 - с точкой перегиба.

Сингулярные точки (изломы) появляются на кривых только при образовании в системе прочных (термически недиссоциированных) соединений компонентов и сохраняются при любом способе выражения состава. Ординаты этих точек отвечают показателям преломления образующихся соединений, а абсциссы - их составу.

Всё ранее описанное даёт право предполагать, что удельная рефракция и диэлектрическая проницаемость тесно связаны между собой и к тому же характер изменения данных показателей, вероятнее всего, близок к показателям, характеризующим

ющим процессы, происходящие внутри цилиндра при работе ДВС. Одними из главных показателей для дизеля будут являться максимальное давление газов в цилиндре  $P_z$  и максимальная скорость нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\max}$ .

## 2.1. Разработка теоретических методов определения значения максимального давления цикла при работе дизеля

Показатель преломления света (или коэффициент рефракции) чаще всего определяется при  $20^\circ\text{C}$  ( $n_D^{20}$ ). Он постоянен для каждого углеводорода при данной температуре. При постоянной температуре значение этого показателя увеличивается в гомологическом ряду с ростом молекулярного веса углеводорода. Исключение составляют алкилароматические углеводороды, показатель преломления которых может уменьшаться с удлинением боковых цепей и увеличением их числа [28].

Показатель преломления находится в строгом соответствии с плотностью углеводородов. Чем выше плотность, тем выше показатель преломления углеводородов.

Смиттенберг [28] предложил простые, достаточно точные формулы для определения расчетным путем показателя преломления углеводородов некоторых гомологических рядов по числу углеродных атомов в молекуле или по молекулярному весу углеводородов.

В углеводородах с одинаковым числом углеродных атомов показатель преломления  $n_D$  при одной и той же температуре возрастает (как и плотность) с увеличением компактности расположения боковых цепей у циклических углеводородов, а также компактности и симметричности расположения боковых цепей у алифатических углеводородов.

Показатель преломления углеводородов позволяет судить об их чистоте и строении, а также о составе их смесей, поскольку для химического соединения при определенной температуре он постоянен, а для их смесей — аддитивен. В практике используются различные оптические показатели, характеризующие физические свойства вещества.

По формуле Лоренца и Лорентца можно определить молекулярную рефракцию, если дополнительно известен молекулярный вес  $M$  определенного углеводорода [28]:

$$MR = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} \quad (2.17)$$

Преимущество использования удельной и молекулярной рефракции в том, что их значения не зависят от температуры, в то время как показатель преломления и плотность от нее зависят. Удельная рефракция является аддитивной величиной.

Для определения удельной рефракции смеси нескольких невзаимодействующих между собой веществ (углеводородов) значения их удельных рефракций суммируют:

$$P_1R_1 + P_2R_2 + P_3R_3 + \dots = 100R_m \quad (2.18)$$

где  $P_1, P_2, P_3$  — процентное содержание компонентов в смеси;

$R_1, R_2, R_3$  — соответствующие удельные рефракции;

$R_m$  — удельная рефракция смеси.

В случае двухкомпонентной смеси по значениям удельной рефракции можно вычислить ее состав ( $P_1, P_2$ ), если известны удельные рефракции составных частей:

$$P_1 = \frac{100(R_m - R_2)}{R_1 - R_2} \quad (2.19)$$

На этом принципе основан метод группового анализа углеводородного состава. Моноциклические цикланы, независимо от их строения и молекулярного веса, обладают одной и той же удельной рефракцией, а удельная рефракция алканов зависит только от молекулярного веса углеводорода. Поэтому углеводородную смесь, состоящую, например, из цикланов и алканов, можно рассматривать как двухкомпонентную систему с некоторым «средним» молекулярным весом.

Для такой смеси, зная удельную рефракцию, нетрудно вычислить содержание цикланов и алканов. Значение удельной рефракции углеводородов уменьшается с понижением температуры. Эта зависимость носит, по-видимому, линейный характер [28].

По величине показателя преломления двухкомпонентного раствора можно установить его концентрацию. Точность анализа определяется в этом случае соотношением между точностью измерения показателей и разницей показателей преломления компонентов, а также зависит от формы кривой показатель преломления - состав. Чем выше температура точность рефрактометрических измерений и чем больше разница светопреломляющей способности компонентов, тем выше будет, вообще говоря, точность анализа. Если кривые показателей преломления имеют экстремум или значительную кривизну, то точность рефрактометрического анализа будет существенно зависеть от концентрации.

На участках, где производная от показателя преломления по концентрации мала (по абсолютной величине), точность рефрактометрических определений будет низкой (участок АВ на рис. 2.2). Зато на участке CD точность будет более высокой, чем можно было бы ожидать на основании разности показателей преломления компонентов. Таким образом, может оказаться, что рефрактометрический анализ в данной системе возможен или целесообразен лишь в ограниченной области концентраций.

Например, анализ спиртоводных смесей рефрактометром дает высокую точность при не слишком больших концентрациях спирта (до 50-60%), а более концентрированные растворы целесообразнее анализировать по плотности. Рефрактометрический анализ растворов предполагает, что известна зависимость между их составом и показателем преломления. Для ряда объектов промышленного значения, в частности, для водных растворов спиртов, сахара, глицерина, важнейших кислот, оснований и солей, зависимость показателей преломления от состава изучалась многократно и тщательно, и имеются подробные таблицы, непосредственно используемые при рефрактометрическом анализе [28].

Диэлектрическая проницаемость также тесно связана с удельной рефракцией, но, в силу своей физической значимости, определяет не абсолютные, а относительные или временные факторы исследуемых параметров, которые могут быть идентифицированы по наличию экстремумов кривых показатель преломления-состав.

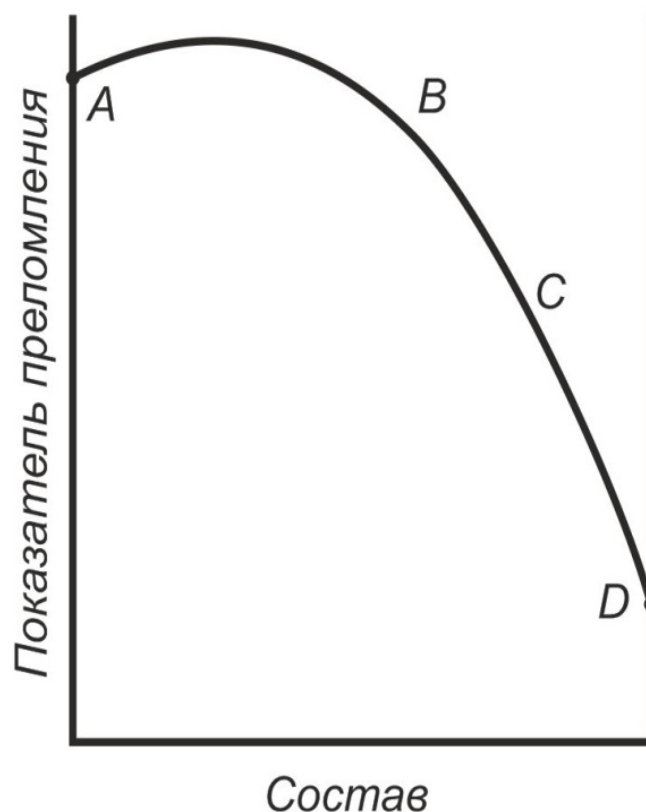


Рис. 2.2 Рефрактометрический анализ двойных систем в случае экстремума на кривой показателей преломления.

Для многих двойных систем имеются также эмпирические формулы, связывающие показатель преломления и концентрацию. Если для анализируемой системы в литературе данных нет, то обычно пользуются кривыми показателей преломления, вычерчиваемыми в большом масштабе по результатам измерения специально приготовленных растворов точно известного состава. При этом, естественно, следует уделить особое внимание тщательности приготовления смесей, служащих эталонами. Изучение обширного экспериментального материала по показателям преломления растворов свидетельствует, что небрежное приготовление эталонных растворов является наиболее вероятной причиной низкой точности многих опубликованных данных. Смесей известного состава следует готовить путем точного взвешивания, причем навески жидкостей должны быть не меньше нескольких граммов. Количество летучих компонентов надо всегда определять по привесу, вводя их в навеску менее летучего компонента и принимая меры против испарения.

Растворы с малой концентрацией одного из компонентов предпочтительно получать путем разбавления растворов средней концентрации, а не непосредственно из компонентов. На аналитических графиках для внутри лабораторного пользования можно вместо показателей преломления откладывать просто углы, отсчеты по барабану микрометрического винта или число делений произвольных шкал.

Иногда показатели преломления компонентов анализируемых смесей несколько отличаются от показателей преломления веществ, использованных для приготовления эталонных растворов. Такие расхождения в показателях часто встречаются при работе с графиками, построенными по литературным данным, и могут быть вызваны колебаниями содержания примесей во взятых препаратах или разными видами систематических ошибок оптических измерений. В подобных случаях при пользовании графиками и таблицами возникнут систематические ошибки. Чтобы избежать этих ошибок, весьма целесообразно применение смешанного графоаналитического способа расчета, сущность которого сводится к следующему.

Рефракция, или показатель удельной поляризуемости единицы вещества, тесно связана с его молекулярной активацией. По значению молекулярной рефракции ( $MR$ ) можно подсчитать теплоту сгорания алканов, поскольку отношение теплоты сгорания к молекулярной рефракции является величиной постоянной, равной 33,6.

Удельная и молекулярная рефракции не зависят от внешних условий - температуры, давления, агрегатного состояния вещества. Однако они находятся в зависимости от состава топлива, наличия органических веществ, содержащих углерод и водород, и числа их атомов в молекуле.

Отношение  $Q / MR$  ( $Q$ —теплота сгорания в *ккал/моль*) постоянно и для циклоалканов: среднее значение этой величины равно 33,7.

У алкенов это отношение ниже, чем у алканов и, возрастая с повышением молекулярного веса, достигает 33,6, как и у алканов.

В общем виде приближенно (с точностью до 1%) связь между теплотой сгорания и молекулярной рефракцией будет выражаться уравнением [29]:

$$Q = KMR \quad (2.20)$$

где  $K = 33,7$  (для алканов и цикланов);

$Q$  - теплота сгорания;

$MR$  – молекулярная рефракция;

$K$  - коэффициент пропорциональности

А это значит, что по значению удельной рефракции  $sR$  топлива можно условно судить об энергии и скорости активации его частиц в одинаковых условиях реакции окисления. Влияние свойств топлива на процесс сгорания в цилиндре дизеля следует рассматривать в связи с показателями характеристик топлива. Потенциальная энергия активации частиц топлива может нам характеризовать сравнительную величину максимального давления цикла  $P_z$  в цилиндре дизеля при его сгорании в заданных условия.

Анализ исходных данных подтвердил, что имеет место сильная корреляционная связь между удельной рефракцией  $sR$  и максимальным давлением в цилиндре  $P_z$  [30]. Однако, отсутствие теоретической модели, которая позволила бы нам установить функциональный вид зависимости давления от показателя преломления, вынуждает пользоваться моделью линейной регрессии. Тогда для различных видов топлив значения  $P_z$  будут считаться следующим образом.

1. Для товарного нефтяного топлива формула для расчёта будет выглядеть так:

$$P_z = -8,754 + 43,943sR$$

2. Для состава АТ с добавлением сурепного масла формула для расчёта примет следующий вид:

$$P_z = 26,175 + 18,886\ln(sR) \quad (2.21)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет:  $R^2 = 0,9472$ . При увеличении содержания сурепного масла в смеси уменьшаются, как показатель преломления, так и максимальное давление; связь между ними, таким образом, оказывается прямой. Соответственно можно посчитать  $P_z$  через концентрацию добавочного топлива  $C$ , и такая регрессия будет иметь вид:

$$P_z = 10,628 - 0,01425C \quad (2.22)$$

Коэффициент корреляции между переменными составляет  $R = -0,9914$ ; коэффициент детерминации  $R^2 = 0,983$ .

3. Для состава АТ с добавлением РМ формула для расчёта  $P_z$  получается такой:

$$P_z = 29,238 + 16,922 \ln(sR) \quad (2.23)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет  $R^2 = 0,9821$ .

Связь между давлением  $P_z$  и концентрацией  $C$  представлена ниже:

$$P_z = 10,613 - 0,01464 C \quad (2.24)$$

Коэффициент корреляции между переменными составляет  $R = -0,9923$ ; коэффициент детерминации  $R^2 = 0,985$ .

4. Для состава АТ с добавлением этанола связь между давлением  $P_z$  прослеживается также через концентрацию спирта в смеси:

$$P_z = -1,507 \cdot 10^{-4} C^2 + 0,0237C + 10,413 \quad (2.25)$$

Зависимость для определения  $P_z$  при работе на составе АТ с добавлением этанола через удельную рефракцию  $sR$  получается такой:

$$P_z = 99,169 + 80,114 \ln(sR) \quad (2.26)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет:  $R^2 = 0,4049$ .

В отношении этанола ситуация оказывается несколько иной. Вероятно, это связано с тем, что показатели преломления у чистого ДТ и чистого этанола практически совпадают. Судя по приведенным данным выше, зависимость между содержанием этанола и максимальным давлением нелинейная.

Безусловно, показатель - низшая теплота сгорания - является одной из важнейших характеристик топлива: по его величине оценивают энергетические возможности топлива, его влияние на экономическую эффективность. От низшей теплоты сгорания зависит энерговооруженность транспортного средства - запас хода, размеры и масса топливного бака, возможность выполнения транспортной работы на одной заправке. Проводя анализ между всеми ранее рассмотренными показателями, можно сказать, что относительная удельная рефракция связана с молекулярной рефракцией, а та, в свою очередь, с низшей теплотой сгорания топлива [31]. От

низшей теплоты сгорания  $Q_n$ , соответственно, зависят практически все параметры работы двигателя, такие, как максимальное давление цикла  $P_z$ , скорость нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{max}$  и т.д.

Предложенные математические модели были использованы в дальнейшем при расчетно-теоретическом определении значений максимального давления цикла при работе дизеля на жидких топливах в номинальном режиме.

На основе полученных теоретических зависимостей разработаны программные комплексы «Pz – экспресс» [42] и «Расчет жесткости процесса сгорания при работе дизеля» [43], предназначенные для автоматизации расчётов максимального давления цикла и жёсткости процесса сгорания в цилиндре дизеля при работе на жидких топливах различного состава.

## **2.2. Разработка теоретических методов определения значения жёсткости процесса сгорания при работе дизеля**

Результаты теоретических и экспериментальных работ, посвященных свойствам диэлектриков, обобщены в нескольких книгах и монографиях [32...38, 92...96]. С целью раскрытия физического смысла величин кратко рассмотрены основные уравнения, описывающие диэлектрические свойства жидкостей. В ограниченном объеме теоретической части невозможно подробно описать все физические и математические допущения, лежащие в основе вывода каждого уравнения. Эти вопросы подробно рассмотрены в литературе.

При помещении диэлектрика в электрическое поле, происходит его поляризация, т. е. смещение связанных зарядов в диэлектрике, а также поворот электрических диполей в случае полярных молекул. Состояние вещества характеризуется поляризованностью (вектором поляризации)  $P$ . Поляризованность может быть представлена в виде суммы электронной  $P_e$ , атомной  $P_a$  и ориентационной  $P_o$  поляризованностей [39].

$$P = P_e + P_a + P_o \quad (2.27)$$

Электронная и атомная поляризации вызваны упругим смещением электронов и, соответственно, атомных ядер в молекулах под действием внешнего поля. Ориентационная поляризация обусловлена изменением распределения ориентаций диполей, возникающим при наложении внешнего электрического поля.

Поляризация вещества определяется молекулярными параметрами: дипольным моментом молекулы, ее поляризуемостью и числом молекул в единице объема. А такая важная макроскопическая величина, как диэлектрическая проницаемость (показатель преломления), в свою очередь, связана с поляризацией вещества. Таким образом, устанавливается зависимость макроскопических параметров вещества от его молекулярных, которую можно описать различными уравнениями, полученными для определенных моделей молекулярного строения вещества.

Рассмотрим диэлектрик с хаотическим распределением молекул в однородном электрическом поле. Вокруг какой-либо молекулы проведем сферу радиусом  $r$ , намного большим, чем диаметр молекулы. Диэлектрик за пределами этой сферы считается непрерывным и характеризуется диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ . Поле, действующее на молекулу в такой молекулярной модели, называется внутренним (локальным) полем Лорентца и определяется выражением [39]

$$E_{\text{Л}} = E + \frac{4\pi}{3} P \quad (2.28)$$

где  $E$  - среднее макроскопическое поле;

$P$  - электрический момент, индуцированный в единице объема.

В этом случае диэлектрическая проницаемость и поляризация связаны соотношением:

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} a = P_M \quad (2.29)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость;

$M$  - молекулярный вес;

$\rho$  - плотность;

$N$  число Авогадро;

$A = a_э + a_a$  - деформационная поляризуемость молекулы, т. е. сумма электронной  $a_э$  и атомной  $a_a$  поляризуемостей;

$P_n$  - молекулярная поляризация.

Соотношение (2.29) называется уравнением Клаузиуса-Мосотти. В тех случаях, когда можно пренебречь атомной поляризуемостью  $a_a$  по сравнению с электронной  $a_э$ , используя связь между диэлектрической проницаемостью и показателем преломления ( $\epsilon = n^2$ ), уравнение (2.29) можно представить в виде

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} a_э = P_R \quad (2.30)$$

где  $n$  - показатель преломления;

$P_R$  - молекулярная рефракция.

Это уравнение применимо в оптическом диапазоне.

Уравнением (2.29) можно пользоваться для вычисления диэлектрической проницаемости неполярных и слабополярных жидкостей.

Рассмотрим изменение диэлектрической проницаемости неполярных и слабополярных жидкостей от температуры. В уравнение Клаузиуса-Мосотти входят число молекул в единице объема жидкости и деформационная поляризуемость этих молекул, не зависящая от температуры. При нагревании жидкость расширяется, вследствие чего число молекул в единице объема, а следовательно, и плотность жидкости уменьшается, что приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости [39]. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости можно получить, дифференцируя уравнение (2.30) по температуре:

$$\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{(\epsilon-1)(\epsilon+2)}{3\epsilon} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (2.31)$$

или

$$\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{dt} = - \frac{(\epsilon-1)(\epsilon+2)}{3\epsilon} \beta_0 \quad (2.32)$$

где  $\beta_0$  - коэффициент объемного расширения.

В полярных жидкостях поле, действующее на молекулу, существенно отличается от поля, вычисленного Лорентцем. Любая молекула жидкости находится в

поле соседних молекул. Направление поля, создаваемого соседними молекулами, изменяется вместе с изменением ориентации молекул.

Используя формулу внутреннего поля Лорентца и учитывая ориентационную поляризуемость молекул, Дебай [32] предложил следующее уравнение для поляризации полярной жидкости:

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \pi N \left( a + \frac{\mu^2}{3KT} \right) = P \quad (2.33)$$

где  $a$  - деформационная поляризуемость;

$\mu$  - постоянный дипольный момент свободной молекулы;

$K$  - постоянная Больцмана;

$T$  - температура;

$\frac{\mu^2}{3KT}$  - поляризуемость, обусловленная изменением ориентации диполя.

Изучение температурной зависимости поляризации дает возможность определить деформационную и ориентационную поляризуемости. Для этой цели удобно представить уравнение (2.33) в следующей форме:

$$PT = AT + B \quad (2.34)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{4\pi N}{3} a \\ B &= \frac{4\pi N \mu^2}{9K} \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

где  $A$  - деформационная поляризация, не зависящая от температуры;

$B$  - ориентационная поляризация, зависящая от температуры.

Зависимость  $PT$  от  $T$  представляет собой прямую линию с наклоном к оси  $T$ , равным  $A$ . Экстраполируя прямую линию к точке  $T=0$ , можно получить величину  $B$ . Так как электронная поляризация может быть определена с помощью уравнения (2.30) из измерений коэффициента преломления в видимой области оптического диапазона, то молярная поляризация может быть разделена на электронную, атомную и ориентационную составляющие. Построение температурной зависимости поляризации позволяет определять степень полярности молекул исследуемой жидкости.

Отметим, что уравнение Дебая дает хорошие результаты для газов, неполярных жидкостей и разбавленных растворов полярных жидкостей в неполярных растворителях, но его нельзя применить к полярным жидкостям.

Наиболее успешное решение задачи о внутреннем поле в жидком полярном диэлектрике и о взаимодействии полярной молекулы с окружением было дано Онзагером в предположении, что поле, действующее на молекулу со стороны ее окружения, зависит от направления ее дипольного момента. Моделью Онзагера является диполь с моментом  $\mu$ , помещенный в центре сферы молекулярного радиуса  $r$ , а сфера окружена сплошной средой со статической диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . На диполь действует поле полости. Кроме того, диполь внутри сферы поляризует сплошную среду. Эта поляризация окружающей среды в свою очередь создает в обратном направлении поле реакции, которое оказывает поляризующее действие на диполь. Исходя из этих предположений, Онзагер получил следующее уравнение [32]:

$$\frac{(\epsilon - n^2)(2\epsilon + n^2)}{\epsilon(n^2 + 2)^2} = 4rN \frac{\mu^2}{9RT} \quad (2.36)$$

где  $n$  - показатель преломления.

Результаты теоретических расчетов по выражению (2.36) хорошо совпадают с опытными данными для слабополярных жидкостей, а для сильнополярных жидкостей теория дает заниженные значения  $\epsilon$ .

В этой теории рассматривается не одна молекула, а целая область диэлектрика сферической формы с радиусом  $r$ , достаточно большим по сравнению с размерами молекулы. Сфера является частью диэлектрика, имеющего сферическую форму с большим радиусом. Средняя составляющая дипольного момента  $\mu^*$ , обусловленная внешним полем и средней составляющей дипольного момента молекул в направлении поля, равна:

$$\mu^* = \bar{\mu} + aE \quad (2.37)$$

При определении величины  $\overline{\mu}$  статистическим методом вычисляется потенциальная энергия шаровой области, помещенной в электрическое поле, и энергия взаимодействия. В результате получается следующее уравнение:

$$\varepsilon - n^2 = \frac{3\varepsilon}{2\varepsilon + n^2} \cdot \frac{4\pi N \mu \mu^*}{3KT} \quad (2.38)$$

При предположении, что кратковременное взаимодействие имеет место лишь между рассматриваемой молекулой и  $Z$  ее ближайших молекул, получаем

$$\mu \mu^* = \mu^2 (1 + z \overline{\cos \gamma}) = \mu^2 g \quad (2.39)$$

где  $g = 1 + z \overline{\cos \gamma}$  - структурный фактор, являющийся постоянной величиной для данной молекулы;

$\cos \gamma$  - среднее значение косинуса угла между направлениями диполей двух соседних молекул.

Подставляя выражение (2.39) для  $\mu \mu^*$  в соотношение (2.38), получим формулу

$$\varepsilon - n^2 = \frac{3\varepsilon}{2\varepsilon + n^2} \cdot \frac{4\pi N \mu^2 g}{3KT} \quad (2.40)$$

В случае сферической молекулы  $\mu$  может быть выражен через дипольный момент свободной молекулы  $\mu_0$

$$\varepsilon - n^2 = \frac{3\varepsilon}{2\varepsilon + n^2} \left( \frac{n^2 + 2}{3} \right) \frac{4\pi N \mu_0^2 g}{3KT} \quad (2.41)$$

Выражения (2.40) и (2.41) могут быть использованы для определения структурного фактора  $g$ .

В дизелях топливо впрыскивается в нагретый сжатием воздух, имеющий температуру 450-550°C и давление 3-4 МПа. При наличии наддува это давление может быть значительно больше. На рис. 2.3 представлена типичная диаграмма изменения давления в цилиндре дизеля в процессе сгорания топлива. Максимальная скорость нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{max}$  на участке  $C-Z$  индикаторной диаграммы характеризует «жесткость» процесса сгорания. Работа дизеля считается не очень жесткой, если среднее значение  $dp/d\varphi$  на участке  $C-Z$  не превышает 0,4-0,5 МПа/градус, а максимальное – не более 1,0 МПа/градус. Максимальное давление сгорания  $P_z$  и значения  $dp/d\varphi$  оказываются тем большими, чем большее количество топлива

участвует в сгорании в течение первой фазы на участке  $K-C$  индикаторной диаграммы.



Рис. 2.3. Типичная диаграмма изменения давления в цилиндре дизеля в процессе сгорания топлива

Это количество топлива определяется длительностью задержки воспламенения и законом подачи, то есть общей длительностью впрыска и характером изменения количества подаваемого топлива по углу  $\varphi$ , а также интенсивностью испарения и смешивания впрыснутого топлива с воздухом [40].

На продолжительность задержки воспламенения топлива влияет ряд факторов, а, именно:

- а) химические свойства топлива – его воспламеняемость, оцениваемая ЦЧ;
- б) температура и давление сжатого воздуха в цилиндре в момент начала впрыскивания топлива;
- в) мелкость распыливания топлива;

- г) характер вихревого движения заряда;
- д) наличие в камере сгорания (КС) нагретых поверхностей.

Элементарный и групповой химический состав топлива существенно влияет на продолжительность периода задержки воспламенения. Чем больше в топливе содержится парафиновых углеводородов, тем выше его ЦЧ, и, соответственно, короче период задержки и мягче работа двигателя.

Физические характеристики топлива – его вязкость, плотность, поверхностное натяжение и испаряемость – также влияют на процесс сгорания. Первые два фактора влияют на мелкость распыливание, а испаряемость на скорость образования горючей смеси. Использование более лёгкого топлива этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) при неизменном его ЦЧ вызывает некоторое сокращение задержки воспламенения при одновременном возрастании максимального давления сгорания и значений  $dp/d\varphi_{max}$ . Однако лёгкие топлива в большинстве случаев обладают худшей воспламеняемостью (меньшим ЦЧ), что приводит к увеличению угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{впр}$ , и ещё большему возрастанию значений  $dp/d\varphi_{max}$  и  $P_z$ .

Анализируя теоретические изыскания по неполярным жидкостям, можно установить связь диэлектрической проницаемости и жесткости процесса сгорания [41].

Ввиду выявленных точных и явных зависимостей свойств топлив от фракционного, элементарного и группового химического их состава, для топлив на основе ДТ с рапсовым и сурепным маслами, а также этанолом будут справедливы следующие соотношения.

Скорость нарастания давления будет определяться по следующим зависимостям:

1. Для расчёта жесткости при работе дизеля на ДТ:

$$dp / d\varphi_{max} = 0,418 + 0,093\varepsilon$$

2. Для расчёта жесткости при работе дизеля на составе АТ с добавлением этанола:

$$dp / d\varphi_{\max} = 0,0492 \ln(\varepsilon) + 0,5642 \quad (2.42)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет  $R^2 = 0,9569$ .

3. Для расчёта жесткости при работе дизеля на составе АТ с добавлением РМ:

$$dp / d\varphi_{\max} = 0,3009 \ln(\varepsilon) + 0,3647 \quad (2.43)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет  $R^2 = 0,9686$ .

4. Для расчёта жесткости при работе дизеля на составе АТ с добавлением су-репного масла:

$$dp / d\varphi_{\max} = 0,243 \ln(\varepsilon) + 0,4119 \quad (2.44)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет  $R^2 = 0,9222$ .

Уравнения 2.42 – 2.44 были использованы для предварительной оценки жесткости процесса сгорания в цилиндре дизеля при работе на обозначенных составах жидких топлив.

Представленные регрессионные зависимости (2.21 – 2.26, 2.42 – 2.44) были получены в результате статистической обработки экспериментальных данных и имеют строгое физико-химическое обоснование.

Удельная рефракция  $sR$ , являясь функцией от показателя преломления и плотности, интегрирует в себе информацию о групповом углеводородном составе топлива и его энергетическом потенциале. Установленная сильная корреляционная связь  $R^2 > 0,94$  между  $sR$  и максимальным давлением в цилиндре  $P_z$  позволяет использовать её в качестве надежного прогностического параметра. Это особенно явно прослеживается для смесей с растительными маслами, где увеличение их доли приводит к закономерному линейному снижению как  $sR$ , так и  $P_z$ .

Аналогично, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  чувствительна к присутствию полярных компонентов (этанол, сложные эфиры масел). Увеличение их концентрации изменяет электрофизические свойства смеси, что, как показали исследования, статистически значимо влияет на интенсивность протекания предпламенных процессов и скорость нарастания давления. Логарифмический характер зависимостей (2.42 – 2.44) для жесткости процесса косвенно подтверждает нелинейный характер влияния полярных добавок на кинетику сгорания.

Таким образом, предложенные уравнения являются не просто эмпирическими аппроксимациями, а формализованными математическими моделями, устанавливающими количественную связь между легко измеримыми физико-химическими свойствами топливных композиций и ключевыми параметрами рабочего процесса дизеля.

### **2.3. Теоретическое определение рациональных составов смесевых биотоплив**

Математические модели 2.21 – 2.26 были использованы в дальнейшем при расчетно-теоретическом определении значений максимального давления цикла при работе дизеля на жидких топливах в номинальном режиме.

Математические модели 2.42 – 2.44 были использованы для предварительной оценки жесткости процесса сгорания в цилиндре дизеля при работе на обозначенных составах жидких топлив.

Расчеты показывают, что присутствие этанола в смесевом биотопливе на уровне 30% влечет повышение жесткости процесса сгорания  $(dp/d\varphi)_{\max}$  с 0,619 МПа/градус до 0,7 МПа/градус (13%), а рост максимального давления цикла  $P_z$  практически до 11 МПа, целесообразно ограничить присутствие этанола в смесевом биотопливе на уровне 30% [42,43].

Расчеты показывают, что присутствие рапсового масла и сурепного масла на уровне 50% влечет повышение жесткости процесса сгорания  $(dp/d\varphi)_{\max}$  на 11%, соответственно, их присутствие в смесевом биотопливе следует ограничить на уровне 50%.

### **2.4. Выводы по главе 2**

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден способ определения рациональных составов смесевых биотоплив для автотракторного дизеля на основе показателей процесса сгорания.

2. Уточнены теоретические зависимости определения максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на чистом дизельном топливе. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при работе дизеля на чистом ДТ  $P_z$  равно 10,431 МПа,  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,619 МПа/градус.

3. Предложены теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе максимального давления цикла в цилиндре автотракторного дизеля. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для АТ с добавкой 50% этанола  $P_z$  равно 11,233 МПа, для АТ с добавкой 50% рапсового масла  $P_z$  равно 9,912 МПа, для АТ с добавкой 50% сурепного масла  $P_z$  равно 9,945 МПа.

4. Предложены теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для АТ с добавкой 50% этанола  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,793 МПа/градус, для АТ с добавкой 50% рапсового масла  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,667 МПа/градус, для АТ с добавкой 50% сурепного масла  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,664 МПа/градус.

5. Добавка сурепного и рапсового масла в дизель не должна превышать 50%, добавка этанола не должна превышать 30%.

Тем не менее, полученные теоретические данные нуждаются в экспериментальной проверке.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1. Общая методика исследований

В основу методики определения параметров рабочего процесса автотракторных дизелей при работе на ДТ и АТ с добавками этанола, рапсового и сурепного масел был положен сравнительный метод. Решение поставленных задач проводилось в пять этапов.

На первом этапе проводилось получение различных составов топлив при смешивании ДТ с этанолом, РМ и сурепным маслами при содержании компонентов от 10% до 90%.

На втором этапе предусматривалось определение физико-химических свойств составов полученных топлив, а, именно, плотности, кинематической вязкости, коэффициента преломления, электрических параметров (сопротивление между обкладками конденсатора, ёмкость конденсатора по воздуху, ёмкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, величина прямоугольного переменного тока).

Третьим этапом являлись вычисления удельной рефракции для каждого состава полученного топлива, а также их диэлектрической проницаемости.

Целью четвёртого этапа исследований явилось получение параметров рабочего процесса автотракторного дизеля Д-245.5S2 (4ЧН 11,0/12,5) посредством его индицирования на номинальном режиме нагрузки при работе на ДТ и составах топлив с добавлением этанола, РМ и сурепного масла.

На последнем - пятом этапе осуществлялся сравнительный анализ показателей процесса сгорания с физико-химическими свойствами АТ и установление закономерностей связи данных параметров с отдельными физико-химическими свойствами, определение рациональных составов.

В исследованиях использовалось ДТ марки ДТЛ-УЛЬТРА (ДТ-Л-К5) СТО 84758038-002-2010 (табл. 3.1), спирт этиловый технический гидролизный ректифицированный [44]. по ГОСТ Р 55878-2013 Сорт «Экстра» (табл. 3.2).

Таблица 3.1

## Показатели дизельного топлива ДТЛ-УЛЬТРА (ДТ-Л-К5)

№ п/п	Наименование показателей	Норма по СТО 84758038-002-2010, вид 4	Норма по ТР ТС 013/2011 класс К5	Фактическое значение	Метод испытания
1	Цетановое число	Не менее 51	Не менее 51	51	ГОСТ 3122
2	Цетановый индекс	Не менее 46,0		53,0	ЕН ИСО 4264
3	Фракционный состав:				ГОСТ 2177
	При температуре 250°С, % объёмных	Менее 65		39	
	При температуре 350°С, % объёмных	Не менее 85		96	
	95% объёмных перегоняется при температуре, °С	Не выше 360	Не выше 360	346	
4	Кинематическая вязкость при 40 °С, в пределах, мм <sup>2</sup> /с (сСт)	2,00-4,00		2,44	ГОСТ 33
5	Предельная температура фильтруемости, °С	Не выше минус 5	Не определяется	Минус 7	ГОСТ 22254
6	Температура застывания, °С	Не выше минус 10		Минус 15	ГОСТ 20287
7	Температура вспышки в закрытом тигле, °С	Не ниже 55	Не ниже 55	56	ГОСТ 6356
8	Массовая доля серы, мг/кг	Не более 10	Не более 10	7,2	ГОСТ Р 52660
9	Испытание на медной пластинке	Выдерживает		Выдерж. 1 кл	ГОСТ 6321
10	Кислотность, мг КОН на 100 см <sup>3</sup> топлива	Не более 5		1,7	ГОСТ 5985
11	Зольность, %	Не более 0,01		0,001	ГОСТ 1461
12	Коксуемость 10 %-ного остатка, %	Не более 0,3		0,01	ГОСТ 19932
13	Массовая доля полициклических ароматических углеводородов, %	Не более 8	Не более 8	2,6	ГОСТ EN 12961
14	Смазывающая способность, мкм	Не более 460	Не более 460	403	ГОСТ Р ИСО 12156-1
15	Общее загрязнение, мг/кг	Не более 24		Менее 12	EN 12662
16	Содержание воды, мг/кг	Не более 200		45	EN ISO 12937
17	Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	820-845		832,6	ГОСТ Р 51069

Показатели спирта этилового технического гидролизного ректифицированного  
сорт «Экстра»

Наименование показателя	Значение для сорта			Фактические данные
	«Экстра»	высший	первый	
1. Внешний вид, цвет	Бесцветная прозрачная жидкость, не содержащая механических примесей			Соответствует норме
2. Запах	Характерный запах ректифицированного спирта без запаха посторонних веществ			Соответствует норме
3. Объёмная доля этилового спирта, %, не менее	96,2	96,2	96	96,3
4. Проба на чистоту	Должен выдерживать испытания			Выдерживает
5. Проба на окисляемость при 20° С, мин, не менее	15	15	10	23
6. Массовая концентрация уксусного альдегида в пересчёте на безводный спирт, мг/дм <sup>3</sup> , не более	4	4	10	0,2
7. Массовая концентрациясивушного масла (пропанол-1, пропанол-2, изобутанол, бутанол-1, изопентанол) в пересчёте на безводный спирт, мг/дм <sup>3</sup> , не более	4	4	10	1,74
8. Массовая концентрация кислот в пересчёте на уксусную кислоту в безводном спирте, мг/дм <sup>3</sup> , не более	10	15	20	3,1
9. Массовая концентрация сложных эфиров (метилацетат, этилацетат) в пересчёте на безводный спирт, мг/дм <sup>3</sup> , не более	25	30	40	1,9
10. Объёмная доля метилового спирта в пересчёте на безводный спирт, %, не более	0,03	0,05	0,05	0,0036
11. Проба на фурфурол	Отсутствие			Отсутствует
12. Массовая концентрация сухого остатка в пересчёте на безводный спирт, мг/дм <sup>3</sup> , не более	2	4	15	1,0
13. Удельное электрическое сопротивление при 25° С, Мом×см, не менее	1,3	не нормируется		20,8

Для исследований также использовалось рапсовое и сурепное масло, произведённое на сельхозпредприятиях РФ, присадки к топливу согласно соответствующих ТУ.

Приготовление топливных смесей на основе ДТ, этанола, рапсового и сурепного масел, а также исследование их свойств производилось при постоянных условиях. Учитывая специфику работы тракторного дизеля Д-245.5S2, основным режимом исследований был выбран номинальный режим при частоте вращения коленчатого вала  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Обработка индикаторных диаграмм рабочего процесса дизеля при работе на ДТ и составах топлив осуществлялась с помощью ноутбука HP 4530s Intel Core i3-2350M/15.6 HD AG LED SVA по методике ЦНИДИ [45, 46].

При монтаже оборудования и приборов, исследованиях свойств топлив и стендовых испытаниях, газоанализе учитывались требования ГОСТа 18509-88, ГОСТа 20000-82, ГОСТа 17.2.1.03-84, ГОСТа 17.2.1.02-76, ГОСТа 17.2.2.01-84, ГОСТа 17.2.2.02-98, ГОСТа Р 17.2.2.07-2000, ГОСТа Р 52517-2005, ГОСТа Р ИСО 8178-7-99.

Отбор и анализ проб ОГ производился в автоматической системе газоанализатора Maha MGT-5 с соблюдением всех требований согласно инструкции к прибору и на дымомере MDO 2 LON.

Перед проведением испытаний дизель прогревался до температуры охлаждающей жидкости  $75...85^\circ\text{C}$ . Температура окружающего воздуха и топлива во время опытов не превышала значений, указанных в технической документации завода-изготовителя. Мощность двигателя, крутящий момент, среднее эффективное давление и расходы топлив на режиме нагрузки приводились к стандартным атмосферным условиям, температуре и плотности топлива согласно ГОСТа 18509-88. После прогрева двигатель выводился на номинальный режим работы, который являлся контрольным. Отклонения эффективных показателей дизеля, более чем на 2%, свидетельствовали о нарушениях работы какой-либо системы, которые сразу же устранялись. После окончания испытаний дизель вновь выводился на контрольный режим и показатели проверялись. Для выравнивания температур дизель перед началом измерений работал не менее 5 мин. Частота вращения КВ дизеля не отличалась

от заданной более чем на  $5 \text{ мин}^{-1}$ . Для уменьшения погрешностей измерений замер показателей в каждом опыте повторялся не менее 3 раз, а результат усреднялся.

### **3.2. Общая методика проведения лабораторных исследований свойств дизельного топлива и альтернативного топлива**

Для проведения более точных исследований потребовалось взять три вида уже известных АТ в жидком состоянии (этанол, рапсовое и сурепное масло) и при смешивании с ДТ получить пятнадцать различных составов топлив. С ними приготавливались различные пробы смесей, содержащие 10, 20, 30, 40 и 50% этанола и масла, до 5% выбранного эмульгатора. При этом для каждого из значений концентрации этанола и масел, равных 10, 20, 30, 40 и 50%, приготавливалось по три пробы эмульсии, с содержанием присадки до 5,0%. Процентное соотношение ингредиентов смеси выражалось в массовых долях от массы пробы, которая оставалась равной 100 г. во всех случаях за счет изменения количества ДТ.

#### **3.2.1. Методика проведения измерений плотности по пикнометру альтернативного топлива**

Измерение плотности составов производилось согласно методике [47]. Предварительно все образцы топлив взвешивались на электронных весах AND HL-100 с добавлением нужных пропорций ДТ, этанола, рапсового и сурепного масел. Далее измерялась их плотность.

Плотность по пикнометру рассчитывалась по формуле:

$$d = \frac{m_{\text{пс}} - m_{\text{пп}}}{m_{\text{нд}} - m_{\text{пп}}} \cdot 0,99703, \quad (3.1)$$

где  $m_{\text{пс}}$  – масса пикнометра со смесью;

$m_{\text{пп}}$  – масса пустого пикнометра;

$m_{\text{нд}}$  – масса пикнометра с дистиллированной водой;

0,99703 - значение относительной плотности воды при 20°C с учетом плотности воздуха.

Для проведения опытов были использованы следующие приборы и приспособления:

1. Термостат BWT-U Biosan;
2. Гирьки ГОСТ-7328-65 Г-4-110МГ-1100-10;
3. Гирьки ГОСТ-7328-73 Г-4-1111.10 МГ-4-1100-10иГ-4-1110;
4. Весы AND HL-100, max 100g d=0.01g;
5. Весы SCL-300, max 300g d=0.01g;
6. Весы ВЛА-200г-М;
7. Пикнометры ГОСТ 22524-77.

### **3.2.2. Методика проведения измерений коэффициента преломления жидкого топлива**

Измерения коэффициента преломления проводилось по методике [48, 49], при этом использовался рефрактометр ИРФ-22 (предназначен для непосредственного измерения показателя преломления жидких и твердых тел; для быстрого качественного определения концентраций водных, спиртовых, эфирных и других растворов по показателю преломления). Данные получали следующим образом. Открывали измерительную головку, выполненную в форме усеченного шара. Внутри измерительной головки визируется блок треугольных призм (в каждом полушарии головки), в том числе измерительная и осветительная призмы. На поверхность измерительной призмы стеклянной палочкой или пипеткой наносили несколько капель исследуемого топлива и осторожно закрывали головку, убедившись, что исследуемый состав топлива заполнил зазор между обеими призмами (с помощью окна, расположенного с другой стороны измерительной головки). Производя возвратно-поступательные и вращательные движения верхней призмой, в

течение 1 минуты производили притирку эмульсии [50]. Далее настраивали осветительное зеркало так, чтобы свет от него падал на окно измерительной головки. Следующим ходом настраивали окуляр на резкость, вращая его вправо или влево. Вращая большой маховик, находили границу раздела света и тени. Вращая маленький маховик, устраняли окрашенность раствора. С помощью большого маховика точно совмещали границу раздела с перекрестием сетки. После этого снимали показания по шкале преломления. Полученный результат записывали.

### **3.2.3. Методика проведения измерений электрических параметров жидкого топлива**

В жидкостях ток переносится ионами. Ионы — это заряженные частицы (атомы или группы атомов). Ионы могут быть как положительными, так и отрицательными, причем положительные ионы притягиваются к отрицательной пластине, а отрицательные ионы — к положительной пластине. Положительный ион — это частица с некоторым отнятым отрицательным зарядом, а отрицательный ион — это частица с добавленным дополнительным отрицательным зарядом. В зависимости от проводимости жидкости делятся на проводники и непроводники (диэлектрики). Проводимость жидкостей зависит от способности жидкостей образовывать ионы. Некоторые жидкости, такие как масло или спирт, не образуют ионов и не проводят электричество [51].

Для определения электрических параметров составов топлив использовался плоский конденсатор и Мультиметр Sinometex ZT-Y. Измерения проводятся при погружении в АТ конденсатора, состоящего из двух алюминиевых пластин размером 175x102 мм (рис. 3.1) [52].

В данном случае для каждого состава топлива измерялись следующие параметры:

1. Величина прямоугольного переменного тока с частотой 200 кГц  $I$ , при  $t=20^\circ\text{C}$ , мкА;
2. Сопротивление между обкладками конденсатора,  $R$ , мОм;

3. Емкость конденсатора при наличии смеси между обкладками,  $C$ , nF;

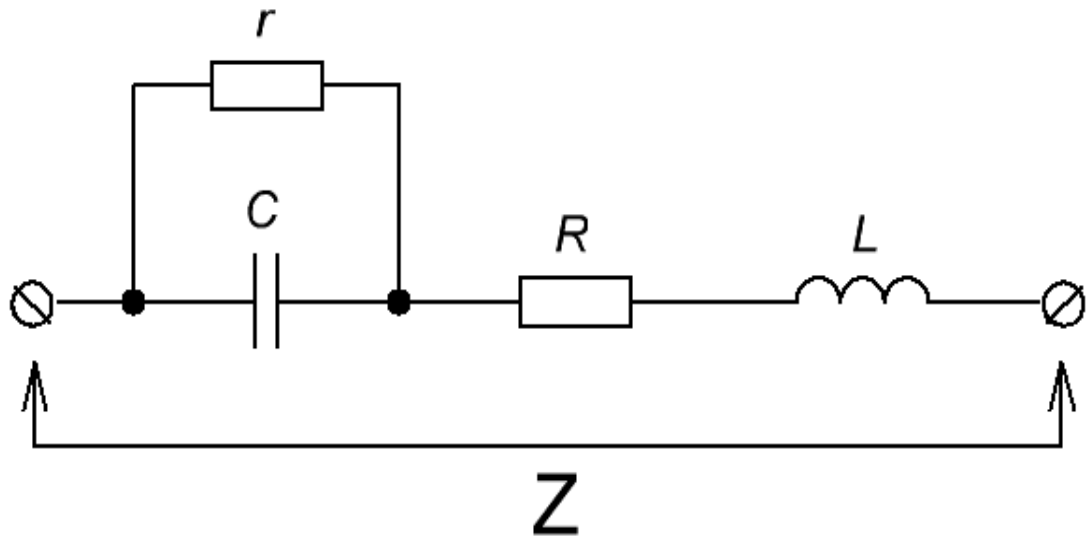


Рис. 3.1 – Схема измерения электрических параметров АТ:

$Z$  – импеданс;  $C$  – собственно, емкость;  $r$  – сопротивление через жидкость (определяет ток утечки);  $R$  - паразитное последовательное сопротивление;  $L$  – паразитная последовательная индуктивность.

### 3.2.4. Методика вычисления удельной рефракции и диэлектрической проницаемости жидкого топлива

Так как показатель преломления и плотность зависят от температуры и давления, при которых проводится измерение, то для экспресс-методов оценки эксплуатационных свойств предпочтительно использовать не сами эти величины, а их функцию - удельную рефракцию Лорентца-Лоренца  $sR$ , которая практически не зависит от внешних условий: температуры окружающей среды и давления [53]:

$$sR = \frac{(n^2-1)}{(n^2+2)} \cdot \frac{1}{d} \quad , \quad (3.2)$$

где  $n$  – коэффициент преломления;

$d$ - плотность смеси.

Для каждого из полученных составов АТ находили удельную рефракцию. По данным плотности и показателя преломления, с использованием формулы (3.2), строились графики удельной рефракции Лорентца-Лоренца. Аддитивность удельной рефракции позволяет предположить, что между компонентами смеси не возникает химического взаимодействия.

Диэлектрическая проницаемость является ключевым параметром, определяющим поведение электрических и магнитных полей внутри материалов. Она определяет, насколько легко может проникать электричество через материал и как это влияет на поведение электрических и магнитных полей внутри него [54].

В электромагнетизме абсолютная диэлектрическая проницаемость, часто называемая просто диэлектрической проницаемостью и обозначаемая греческой буквой  $\varepsilon$  (эпсилон), является мерой электрической поляризуемости диэлектрика. Её можно вычислить следующим образом [55]:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{см}}}{C_{\text{возд}}} \quad (3.3)$$

где:  $C_{\text{см}}$  – ёмкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, нФ;

$C_{\text{возд}}$  – ёмкость конденсатора по воздуху, нФ;

Материал с высокой диэлектрической проницаемостью сильнее поляризуется в ответ на приложенное электрическое поле, чем материал с низкой диэлектрической проницаемостью, тем самым накапливая в материале больше энергии. В электростатике диэлектрическая проницаемость играет важную роль в определении емкости конденсатора.

Диэлектрическая проницаемость среды — физическая величина, характеризующая свойства изолирующей (диэлектрической) среды и показывающая зависимость электрической индукции от напряжённости электрического поля.

### 3.3. Методики исследований рабочего процесса автотракторного дизеля Д-245.5S2

При индицировании рабочего процесса дизеля с различным соотношением компонентов АТ необходимым условием являлось сохранение одинаковых значений  $p_e$  для исследуемого скоростного режима. Величина  $p_e$  определялась косвенным путем из показаний весового механизма загрузочного устройства. Все характеристики снимались при оптимальных значениях установочного угла опережения впрыскиваемого топлива [6].

Для получения экспериментальных данных индикаторных диаграмм использовался датчик динамического давления PS-01 с пьезокварцевым чувствительным элементом. Резьбовой датчик PS-01 устанавливался в камеру сгорания, в гнездо от свечи накаливания. Датчик вставляется при помощи втулки, на конец которой монтировался датчик динамического давления в соответствии с ГОСТ 18509-88 (п.5.16) [56]. В головке самого датчика имеется чувствительный пьезокварцевый элемент, выдающий заряд в кулонах при изменении давления в цилиндре двигателя. От датчика через кабель с разъемом 10-32 unг сигнал по высокоскоростному проводу поступал на усилитель для преобразования высокоимпедансного сигнала и получения его в вольтах с коэффициентом трансформации 1пК в 1 мВ [11]. Преобразованный сигнал в мВ поступал в модульную USB систему сбора данных NICOMPACTDAQ, которая позволяет работать с датчиками-акселерометрами. Далее устройство сбора данных подключалось к ПК через USB порт. Модульная USB система сбора данных (NATIONALINSTRUMENTS NIcDAQ-9178), усилитель (AQ02-001), датчик динамического давления (PS-01,) датчик контроля частоты вращения (DI6001) и программное обеспечение обслуживалось системой Nationalinstrument, которая позволяла получить на экране монитора зависимость сигнала в мВ от времени (секунды или миллисекунды) в дифференциальной форме записи, а также формировать полученные экспериментальные данные в таблице Excel [57].

Для определения угла поворота КВ двигателя использовался датчик индуктивного типа DI6001 – отметчик положения поршня в цилиндре двигателя в положении верхней мёртвой точки (ВМТ) поршня. Отметчик ВМТ устанавливался на кожухе маховика, а на сам маховик крепилась металлическая площадка [11]. При прохождении площадки рядом с индуктивным датчиком наводилась ЭДС индукции. Сигнал с индуктивного датчика поступал во второй модуль USB системы сбора данных NICOMPACTDAQ, который также позволял работать с индуктивными датчиками. Зависимость от второго модуля отражалась на дисплее монитора. По ГОСТ необходимо не менее 1000 циклов для сбора и обработки информации. В программном обеспечении Nationalinstrument в разделе «количество циклов» ставилось значение – 1000. Программа выдавала среднее значение индикаторной диаграммы за 1000 циклов в режиме реального времени. При помощи коэффициента трансформации расчетным путем определялось значение давления в цилиндре двигателя [57].

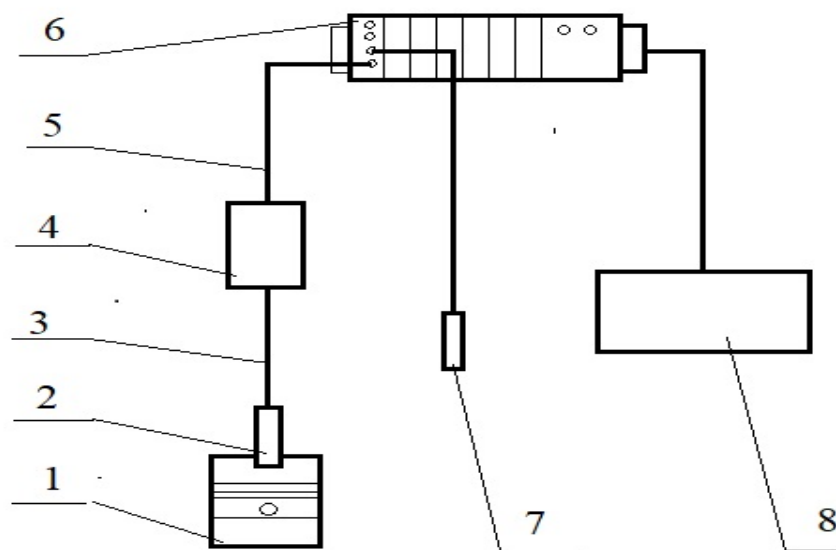


Рис.3.2 – Схема подключения датчиков: 1 – цилиндр; 2 – датчик динамического давления PS-01; 3,5 – высокоскоростной провод; 4 – усилитель AQ02-001; 6 – модульная USB система сбора данных; 7 – датчик контроля частоты вращения DI6001; 8 – ПК с системой Nationalinstrument.

Схема подсоединения датчиков динамического давления и индукционного датчика ВМТ представлена на рис. 3.2.

Индикаторная диаграмма снималась на номинальном режиме при частоте вращения КВ  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . После включения стенда запускался двигатель, устанавливалась заданная постоянная частота вращения КВ дизеля. Испытания проводились при температурном режиме от  $100^\circ\text{C}$  до  $300^\circ\text{C}$ . Использовалась система охлаждения динамического датчика давления, так как температура в КС поднималась выше  $2000 \text{ K}$ , а температура ОГ достигала  $870 \text{ K}$ .

Исследование процесса сгорания топлива предусматривает определение оптимального закона тепловыделения, при котором процессы смесеобразования и сгорания приводят к улучшению топливно-экономических показателей двигателя. Тепловыделение в цилиндрах дизеля – важный функциональный процесс.

При определении тепловыделения использовалась стандартная методика расчета Центрального научно-исследовательского дизельного института (ЦНИДИ) и авторское программное обеспечение. В расчете использовались данные с учетом их изменения от предварительного подогрева топлива. По полученным данным строились графики зависимостей [11].

На основании первого закона термодинамики общее тепловыделение идет на совершение работы, изменение внутренней энергии и на теплоотвод:

$$dQ_x = C_v dT + PdV + dQ_w \quad (3.4)$$

где  $dQ_x$  – количество тепла, Дж;

$C_v$  – изохорная теплоемкость;

$dT$  – температура, К ( $^\circ\text{C}$ );

$P$  – давление, МПа;

$dV$  – изменение объема;

$dQ_w$  – количество тепла в потери, Дж.

Количество тепла, которое уходит в потери, учитывает в себе четыре вида теплообмена (лучистый, радиационный, контактный, конвективный). Изменение температуры вычисляется по уравнению Менделеева – Клапейрона [57]:

$$PV = \frac{m}{M}RT \quad (3.5)$$

Из выражения (3.5) определяем температуру и подставляем в уравнение (3.4) для определения тепловыделения.

Для расчета тепловыделения применялась также программа, разработанная ЦНИДИ. Концентрация цетанповышающей присадки выбиралась с учётом рекомендации завода изготовителя и составляла 1 мас. % к общему количеству топливной эмульсии всех составов с этанолом. Концентрация присадки выбиралась также с учетом результатов ранее проведённых исследований стабильности и составляла от 2% до 5% масс. для всех опытов. Таким образом, при изменении нагрузочного режима всегда поддерживалось постоянное соотношение:

$$K_{ДТ} = 100 - K_э (1+0,12) - 1 - (2...5) \text{ const}, \quad (3.6)$$

где:  $K_{ДТ}$  и  $K_э$  – соответственно, концентрации ДТ и этанола в эмульсии, %, масс;

1 - концентрация цетанповышающей присадки (1%);

(2...5) const – концентрация присадки, повышающей стабильность, в зависимости от количества содержания этанола в эмульсии.

Приготовление и подача эмульсии и смесей осуществлялись следующим образом. Эмульсии с этанолом и смеси с маслами приготавливались с помощью электромиксера с использованием добавки для улучшения стабильности и цетанповышающей присадки при фиксированных требуемых значениях ингредиентов смеси. Требуемое количество присадок предварительно растворялось в ДТ. подача смеси осуществлялась штатной системой топливоподачи после пуска и прогрева дизеля на чистом ДТ [44].

### 3.4. Экспериментальные установки, приборы и оборудование

Исследование процесса сгорания дизельного двигателя проводилось в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории. Общий вид экспериментальной установки и общий вид пульта управления установкой представлены на рис. 3.3. и 3.4.



Рис. 3.3. Общий вид экспериментальной установки

При исследованиях экспериментальная установка создавалась на базе тракторного дизеля Д-245.5S2 (4ЧН 11,0/12,5) трактора БЕЛАРУС-922 производства ОАО «Минский моторный завод».

Комплекс содержал необходимое измерительное оборудование и приборы с выводом данных на монитор компьютера. Экспериментальные исследования производились на нагрузочном стенде (рис. 3.5) RAPIDO (Германия) мощностью 250 кВт производства Германии с балансирной маятниковой машиной [44].



Рис. 3.4. Вид на пульт управления и измерительные приборы



Рис. 3.5. Нагрузочный стенд RAPIDO



Рис. 3.6. Датчик давления PS01

Индицирование дизеля производилось следующим образом. Датчик давления (рис.3.6) устанавливался во втулке, вмонтированной в головку блока второго цилиндра согласно инструкции к индикатору [58]. От датчика PS-01 через скоростной кабель сигнал поступает на преобразователь и усилитель сигнала (рис. 3.7), имеющий собственный источник питания (а также источник питания 220 В), затем в модуль сбора информации (рис. 3.8).



Рис. 3.7 Преобразователь и усилитель сигнала

Далее через модульную USB систему сбора данных NI COMPACT DAQ (рис. 3.8) данные передавались на компьютер.

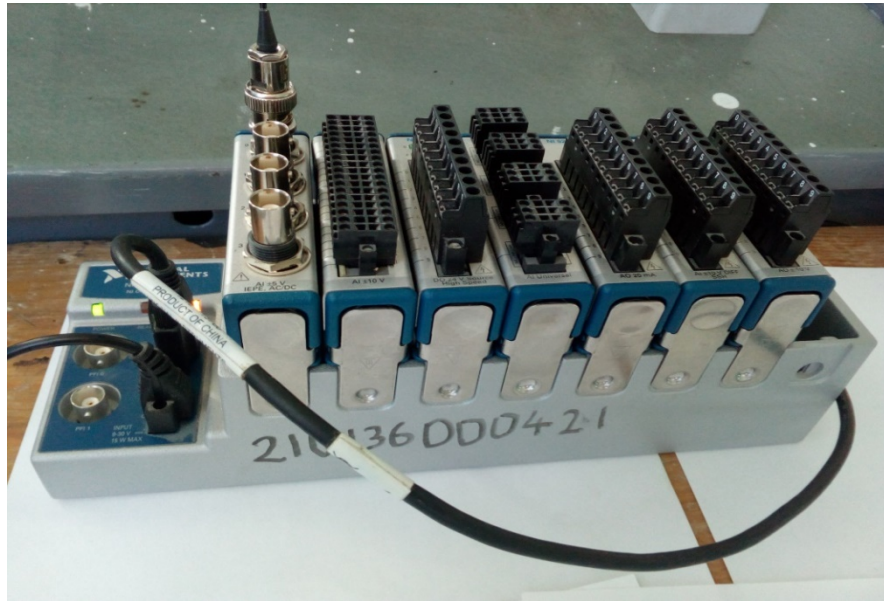


Рис. 3.8. Модульная USB системы сбора данных NI COMPACT DAQ

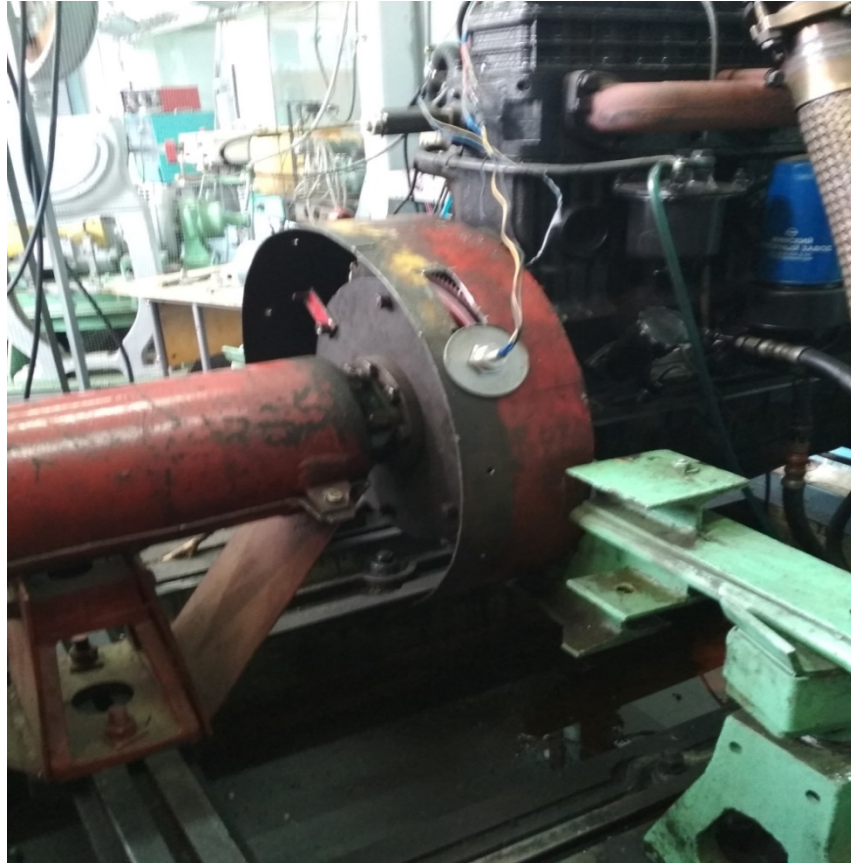


Рис. 3.9. Датчик отметки ВМТ

Датчик отметки ВМТ (рис. 3.9) устанавливался на корпусе маховика. Учитывая, что правильность отметки ВМТ значительно влияет на точность обработки индикаторных диаграмм, установка датчика корректировалась по положению поршня в ВМТ во втором цилиндре, и проверялась по диаграмме сжатия-расширения без подачи топлива.

КВ двигателя экспериментальной установки соединялся с валом электродвигательного стенда посредством карданной передачи. Частота вращения КВ двигателя измерялась электронным цифровым тахометром ЦАТ-2М [44].

На рисунке 3.10 показан вид на монитор компьютера с текущими данными в процессе испытаний.

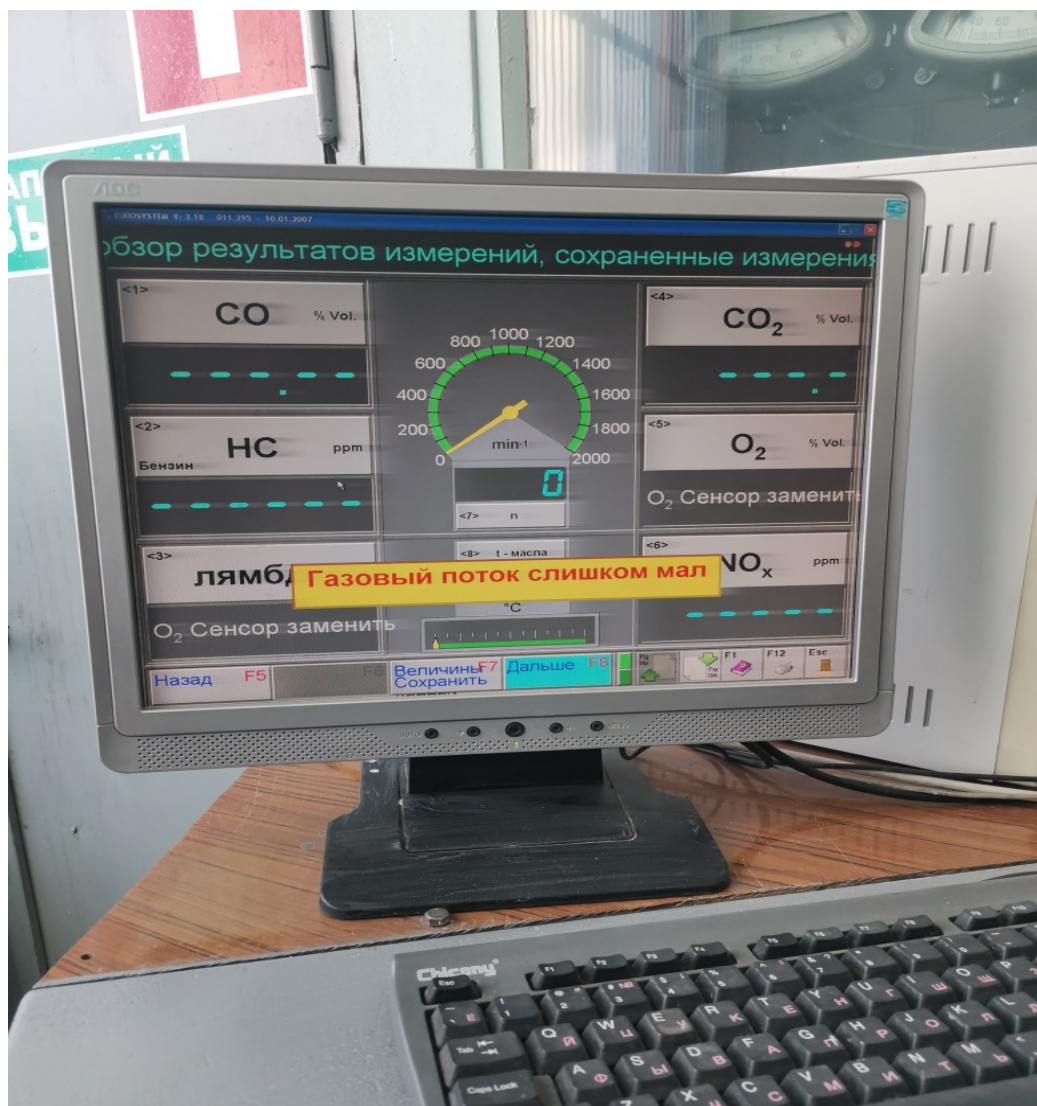


Рис. 3.10. Монитор компьютера

Расход топлива определялся электронным расходомером АИР–50 массовым способом (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Вид на весовое устройство расходомера топлива

Давление ОГ и разрежение во впускном патрубке измерялось с помощью U-образных водяных манометров. Влажность и барометрическое давление окружающего воздуха измерялись психрометром и барометром. Температура окружающего воздуха и температура топлив измерялись ртутными термометрами. Полученные результаты приводились к нормальным атмосферным условиям согласно ГОСТ 18509-88.

Давление масла измерялось датчиком и манометром. Перед началом испытаний и после окончания весовой механизм «Рапидо» балансирной маятниковой машины тарировался с помощью эталонных гирь [44].

Коэффициент преломления измерялся с помощью рефрактометра ИРФ-22 (рис. 3.12) [59]. Экспериментальные установки оснащались комплексом необходимого измерительного оборудования и приборов.



Рис. 3.12. Общий вид рефрактометра ИРФ-22

Для измерения электрических параметров АТ применялся мультиметр (рис. 3.13).



Рис. 3.13. Мультиметр Sinometex ZT-Y

Перечень оборудования представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3.

## Оборудование и приборы, применяемые в исследованиях

№ п/п	Наименование оборудования	Марка	Назначение
1	2	3	4
1	Весы	AND HL-100, SCL-300, ВЛА-200г-М	Измерение веса
2	Рефрактометр	ИРФ-22	Измерение коэффициента преломления
3	Секундомер	СОП Пр-2а-2-010 «АГАТ»	Измерение времени опыта
4	Ареометр	ТУ-25-11.1514-79	Измерение плотности
5	Электромиксер	MBP-201	Приготовление топливных смесей
6	Балансирный тормозной стенд	RAPIDO	Управление экспериментальной установкой
7	Весовой механизм электрического маятникового испытательного стенда	SAK-N670	Измерение крутящего момента
8	Расходомеры топлива	АИР-50, ДРТ-5 с терминалом СКРТ 31	Определение расходов дизельного и суммарного топлив
9	Тахометры	ЦАТ-2М, AVL DIS-peed 492	Измерение частоты вращения
10	Модульная USB системы сбора данных	NI COMPACT DAQ	Сбор данных
11	Усилитель	AQ02-001	Преобразование высокоимпеданского сигнала заряда
12	Датчик давления	PS01	Замер давления в цилиндре
13	Измеритель	ПИД-Регулятор ТРМ 148-Р.Щ4	Построение автоматизированных систем мониторинга
16	Мультиметр	Sinometex ZT-Y	Измерение электрических параметров
17	Ноутбук	HP 4530s Intel Core i3-2350M/15.6 HD AG LED SVA	Обработка полученных данных

### 3.5. Погрешности, ошибки измерений

Проведение измерений всегда проходит с погрешностями, которые связаны с выбором и погрешностью метода измерений, с ограниченной точностью измерительных приборов, особенностями изменяемых объектов, а также изменением условий измерения. Полученные значения всегда имеют приближенные значения. Объективность полученных данных в результате исследований характеризуется ошибками измерения и определяется суммарной погрешностью результатов опыта.

При стендовых испытаниях двигателя Д-245.5S2 определялись параметры погрешностей измерений, указанные в таблице 3.4. Атмосферное давление и влажность окружающего воздуха измерялась в помещении, где находился испытательный стенд и двигатель. Температура окружающего воздуха замерялась в потоке всасываемого воздуха рядом с воздухозаборником [57].

Проведение исследований в соответствии с действующими гостами [44,49-51, 56], соблюдение технических параметров в соответствии с руководством по эксплуатации двигателя, оборудования [60], а также проведения поверок приборов и оборудования (сертификация) и поддержание постоянных условий проведения опытов позволяют допустить, что при выполнении опытов имелись только систематические ошибки [57].

Математическая обработка результатов производилась в соответствии с существующей методикой [61, 62, 63]. Определялись погрешности косвенных измерений – определение погрешности функции по известным значениям погрешностей независимых переменных:

$$Y = f(x_1 x_2 x_3 \dots x_n) \quad (3.7)$$

где  $x_1 x_2 x_3 \dots x_n$  – независимые переменные.

Предельная абсолютная погрешность определяется неравенством:

$$\Delta x \geq |x - x_n| \quad (3.8)$$

Для функции нескольких переменных абсолютная ошибка равна сумме всех частных ошибок:

$$\Delta x = \pm [\Delta x_1(x_1) + \Delta x_2(x_2) + \dots + \Delta x_n(x_n)] \quad (3.9)$$

где  $x_1 x_2 \dots x_n$  – численные (измеренные) величины.

Относительная погрешность определяется следующим общим выражением:

$$\frac{\Delta x}{x} = \pm \frac{1}{y} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left( \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x_i \right)^2} \quad (3.10)$$

При определении суммарной ошибки все частные ошибки берутся со знаком плюс, как неблагоприятный случай.

Мощность двигателя при проведении испытания определяется косвенно через крутящий момент и частоту вращения коленчатого вала:

$$N_e = \frac{M_{кр} n}{9500} \quad (3.11)$$

где  $N_e$  – эффективная мощность, кВт;

$n$  – частота вращения, мин<sup>-1</sup>.

$M_{кр}$  – эффективный крутящий момент, Нм;

А, так как крутящий момент определяется через значение показания тормоза (кг), то можно записать

$$M_{кр} = P_T L \quad (3.12)$$

где  $P_T$  – показания тормоза, кг;

$L$  – длина плеча тормозного механизма, м.

Используя выражение относительной погрешности для эффективной мощности двигателя, можно записать:

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = \pm \sqrt{(\delta_n^2 + \delta_{M_{кр}}^2)} = \sqrt{(\delta_n^2 + \delta_{P_T}^2 + \delta_L^2)} \quad (3.13)$$

где  $\delta_n$  – погрешность прибора для измерения частоты вращения;

$\delta_{M_{кр}}$  – погрешность измерения крутящего момента.

При испытании двигателя на стенде расход топлива изменяется на стенде массовым способом, часовой расход топлива определяется [62]:

$$G_T = 3,6 \frac{\Delta G_T}{\tau_T} \quad (3.14)$$

где  $G_T$  – расход топлива, кг/ч;

$\Delta G_T$  – измеренный объем топлива, г;

$\tau_T$  – время расхода объема топлива, с.

Относительная погрешность расхода топлива выражается следующим образом:

$$\frac{\Delta G_T}{G_T} = \pm \sqrt{(\delta_T^2 + \delta_t^2)} \quad (3.15)$$

Относительная погрешность определения удельного эффективного расхода топлива, которое определяется из выражения:

$$g_e = \frac{1000 G_T}{N_e} \quad (3.16)$$

можно определить, как:

$$\frac{\Delta g_e}{g_e} = \pm \sqrt{(\delta_T^2 + \delta_t^2 + (\delta_n^2 + \delta_{P_T}^2 + \delta_L^2))} \quad (3.17)$$

Среднее эффективное давления при проведении испытания определяется косвенно через крутящий момент:

$$P_e = \frac{0.00314 \tau_{дв} M_{кр}}{i V_h} \quad (3.18)$$

где  $\tau_{дв}$  – коэффициент тактности двигателя;

$V_h$  – рабочий объем цилиндра, л;

$i$  – число цилиндров.

Относительная погрешность определяется:

$$\frac{\Delta P_e}{P_e} = \pm \sqrt{(\delta_{V_h}^2 + (\delta_n^2 + \delta_{P_T}^2 + \delta_L^2))} \quad (3.19)$$

Аналогично оцениваются погрешности других величин. Величины предельных ошибок измерений и вычислений представлены в таблице 3.4.

Все производимые расчеты в диссертационной работе, а также ее оформление проводилось с использованием стандартного программного обеспечения MicrosoftOffice (Word, PowerPoint, Excel) [57].

Оценка погрешности экспериментальных исследований проводилась в соответствии с рекомендациями РМГ 29-2013 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» и ГОСТ Р 8.736-2011 «ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений». Предельные значения абсолютных и относительных погрешностей основных измеряемых и рассчитываемых параметров, полученные на основе паспортных данных приборов и статистической обработки

результатов многократных измерений, представлены в таблице 3.4. Относительная погрешность вычислялась от номинального значения параметра на основном исследуемом режиме ( $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ).

Таблица 3.4

Предельные ошибки вычислений и измерений

№ п/п	Наименование и обозначение параметра	Размерность	Предельная ошибка	
			абсолютная	относительная
1	Мощность, $N$	кВт	0.25	0.5
2	Частота вращения коленчатого вала, $n$	$\text{мин}^{-1}$	5	0.0045
3	Крутящий момент, $M_{кр}$	Н·м	1	0,05
4	Показания тормоза	Н	1	0,05
5	Часовой расход дизельного топлива, $G_T$	кг/ч	0,02	0,025
6	Среднее эффективное давление, $P_e$	МПа	0,005	0,55
7	Удельный эффективный расход топлива, $g_e$	г/кВт·ч	1,1	0,5
8	Часовой расход воздуха, $G_B$	кг/ч	2,8	2,6
9	Коэффициент избытка воздуха,	$\alpha$	0,01	2,1
10	Температура отработавших газов	°К, °С	5	0,022
11	Атмосферное давление, $P_0$	кПа	0,1	0,001
12	Давление масла в магистрали, $P_M$	кПа	10	0,05
13	Температура окружающего воздуха	°С	1	0,0625
14	Температура топлива	°С	1	0,0625
15	Температура охлаждающей жидкости	°С	1	0,0625
16	Относительная влажность воздуха, $\delta_0$	%	1	0,024

Графики представлены с использованием графического приложения CorelDRAW 2018ч.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

### 4.1. Результаты лабораторных исследований

В данном разделе представлены экспериментальные измерения физико-химических свойств полученных смесей топлив на основе товарного ДТ с этанолом, рапсовым и сурепным маслом.

#### 4.1.1. Результаты исследований по определению удельной рефракции топлив

Согласно представленной методике (глава 3), первым этапом исследования физико-химических свойств полученных топлив явилось измерение их плотности, вязкости и коэффициента преломления (табл. 4.1, 4.2, 4.3).

Таблица 4.1

Свойства топлив различного состава с добавлением этанола

№ п/п	Состав топлива	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость мм/с <sup>2</sup>	Коэффициент преломления, n
1	ДТ 90 % + Э 10 %	0,830	3,506	1,4638
2	ДТ 80 % + Э 20 %	0,826	2,822	1,4610
3	ДТ 70 % + Э 30 %	0,825	2,678	1,4600
4	ДТ 60 % + Э 40 %	0,820	2,423	1,4591
5	ДТ 50 % + Э 50 %	0,818	2,253	1,4586

Из данных таблицы видно, что плотность и коэффициент преломления для ЭТЭ несколько уменьшается при увеличении содержания до 50% этанола в ЭТЭ. Имея при этом ДТ плотностью 0,832 г/см<sup>3</sup>, можно сказать с уверенностью, опираясь на данные учёных в этой области, что при последующих испытаниях этот показатель топлива не будет оказывать негативного влияния на процессы топливоподачи ЭТЭ в цилиндры двигателя, а также на процессы сгорания ЭТЭ [64,65].

Свойства топлив различного состава с добавлением РМ

№ п/п	Состав топлива	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость мм/с <sup>2</sup>	Коэффициент преломления, n
1	ДТ 90 % + РМ 10 %	0,831	5,11	1,4607
2	ДТ 80 % + РМ 20 %	0,840	7,51	1,4617
3	ДТ 70 % + РМ 30 %	0,850	10,02	1,4631
4	ДТ 60 % + РМ 40 %	0,859	12,44	1,4641
5	ДТ 50 % + РМ 50 %	0,868	15,17	1,4657

Обращая внимание на данные таблицы 4.1, и, сравнивая с данными таблицы 4.2, можно сказать следующее, что добавление РМ от 10% до 50% в смесь повышает плотность и коэффициент преломления данного топлива.

Таблица 4.3

Свойства топлив различного состава с добавлением сурепного масла

№ п/п	Состав топлива	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость мм/с <sup>2</sup>	Коэффициент преломления, n
1	ДТ 90 % + СурМ 10 %	0,834	3,915	1,4639
2	ДТ 80 % + СурМ 20 %	0,842	5,18	1,4644
3	ДТ 70 % + СурМ 30 %	0,849	7,00	1,4659
4	ДТ 60 % + СурМ 40 %	0,857	9,46	1,4666
5	ДТ 50 % + СурМ 50 %	0,865	12,99	1,4673

Анализируя данные таблицы 4.3 совместно с данными таблицы 4.2, можно сказать, что растительные масла данного происхождения при добавлении их в смесь до 50% увеличивают плотность, вязкость и коэффициент преломления суммарных топлив. Нефтяное топливо имеет наиболее близкое значение коэффициента преломления n по отношению к его смеси с сурепным топливом 10% и составляет 1,4637 [66,67]:

Подставляя данные таблиц 4.1, 4.2 и 4.3 в формулу для расчёта удельной рефракции (глава 3), получим следующие данные, представленные в таблице 4.4.

Значение удельной рефракции исследуемых топлив различного состава

№ п/п	Состав топлива	Удельная рефракция sR (этанол) при t=20° С, см <sup>3</sup> /Г	Удельная рефракция sR (рапсовое масло) при t=20° С, см <sup>3</sup> /Г	Удельная рефракция sR (сурепное масло) при t=20° С, см <sup>3</sup> /Г
1	90%ДТ+10%Э	0,3323		
2	90%ДТ+10%РМ		0,3299	
3	90%ДТ+10% Сурепное масло			0,4359
4	80%ДТ+20%Э	0,3321		
5	80%ДТ+20%РМ		0,3270	
6	80%ДТ+20% Сурепное масло			0,4315
7	70%ДТ+30%Э	0,3319		
8	70%ДТ+30%РМ		0,3240	
9	70%ДТ+30% Сурепное масло			0,4297
10	60%ДТ+40%Э	0,3334		
11	60%ДТ+40%РМ		0,3212	
12	60%ДТ+40% Сурепное масло			0,4263
13	50%ДТ+50%Э	0,3329		
14	50%ДТ+50%РМ		0,3188	
15	50%ДТ+50% Сурепное масло			0,4227

Как замечено ранее по коэффициенту преломления, значение удельной рефракции sR для ДТ схоже с значением для смеси сурепного масла до 10% и, соответственно, равно 0,4366 см<sup>3</sup>/Г.

На основании вышеизложенных значений удельной рефракции для АТ можно сделать вывод, что полученные данные удельной рефракции при применении растительных масел, как добавки к нефтяному топливу, показывают прямолинейную зависимость от концентрации добавки, а при добавке этанола – параболическую.

Наличие зависимости удельной рефракции от содержания растительных масел и этанола позволяет разработать в дальнейшем экспресс-метод определения состава произвольно взятой смеси. Если зависимости эксплуатационных свойств топлив от содержания этанола и растительных масел предварительно известны, можно сделать предварительную оценку эффективности использования данной смеси в двигателе [68...74].

#### **4.1.2. Результаты исследований по определению диэлектрической проницаемости топлив**

Материал классифицируется как “диэлектрик”, если он способен запасать энергию при приложении внешнего электрического поля [76]. Если источник постоянного напряжения включен параллельно обкладкам плоского конденсатора, больше заряда накапливается, когда между обкладками помещен диэлектрик, чем в случае отсутствия материала (вакуума) между обкладками. Диэлектрический материал увеличивает емкость конденсатора, нейтрализуя заряды на его электродах, которые в обычном случае вносили бы вклад во внешнее поле. Емкость при наличии диэлектрического материала зависит от диэлектрической проницаемости. Если источник постоянного напряжения включен параллельно обкладкам плоского конденсатора, больше заряда накапливается, когда между обкладками присутствует диэлектрический материал, по сравнению со случаем отсутствия диэлектрика (вакуум) между обкладками.

Изменение значений показателей процесса сгорания топлива в КС дизеля обычно связывают с физико-химическими свойствами топлив. Следующим этапом исследований явилось изучение влияния на углеводородное топливо электрического тока и снятие параметров для всех исследуемых АТ (табл. 4.5, 4.6 и 4.7). Нужно отметить, что для ДТ данные параметры будут иметь следующие значения: сопротивление между обкладками конденсатора  $R = 0$  Мом; ёмкость конденсатора при наличии смеси между обкладками  $C = 0,647$  нФ; величина прямоугольного переменного тока с частотой 200 кГц  $I$ , при  $t=20^\circ\text{C}$  равна 32,5 мкА.

Электрические параметры топлив различного состава с добавлением этанола

№ п/п	Состав топлива	Сопротивление между обкладками конденсатора, R, МОм	Емкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, C, nF	Емкость конденсатора по воздуху (перед каждым измерением), C, nF
1	ДТ 90 % + Э 10 %	1,3	1,7	0,304
2	ДТ 80 % + Э 20 %	1,3	2,5	0,304
3	ДТ 70 % + Э 30 %	1,3	8,1	0,304
4	ДТ 60 % + Э 40 %	1,3	12	0,304
5	ДТ 50 % + Э 50 %	1,3	16,3	0,304

Результаты проведенных (табл. 4.5) измерений указывают на то, что изменение процентного содержания этанола в составе ЭТЭ не влияет на омическое сопротивление конденсатора постоянному току. Однако увеличение массового содержания этанола с 10% до 50% в составе эмульсии повышает электроемкость состава (применяемого в качестве диэлектрика конденсатора). Например, ёмкость конденсатора при наличии смеси ДТ с содержанием этанола 10% составляет  $C = 1,7$  nF, а добавление 50% спирта в смесь даёт ёмкость  $C = 16,3$  nF. Резкий перепад в сторону увеличения значения ёмкости конденсатора происходит при достижении массового содержания этанола около 30%. Это явление происходит, вероятно, из-за имеющегося свойства накопления электричества именно этанолом [77].

Полученные значения электрофизических величин обусловлены тем, что этанол, используемый в качестве добавляемого вещества, не содержит в своем составе солей и органических примесей, в связи с чем не меняет электрическое сопротивление ( $R = 1,3$  МОм) полученной топливной смеси электрическому току.

Электрические параметры топлив различного состава с добавлением РМ

№ п/п	Состав топлива	Сопротивление между обкладками конденсатора, R, МОм	Емкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, С, nF	Емкость конденсатора по воздуху (перед каждым измерением), С, nF	Величина прямоугольного переменного тока с частотой 200 кГц I, при t=20° С, мкА
1	ДТ 90 % + РМ 10 %	12,4	0,757	0,302	5,31
2	ДТ 80 % + РМ 20 %	11,8	0,765	0,302	5,36
3	ДТ 70 % + РМ 30 %	11,2	0,780	0,302	5,38
4	ДТ 60 % + РМ 40 %	10,4	0,805	0,302	5,41
5	ДТ 50 % + РМ 50 %	9,7	0,820	0,302	5,45

Проводя анализ результатов проведенных измерений (табл. 4.6), можно заметить, что изменение процентного содержания РМ в составе топливной смеси в большей степени (в отличие от спирта) влияет на омическое сопротивление конденсатора постоянному току. К примеру, для смеси ДТ с 10% содержанием РМ  $R = 12,4$  МОм, тогда как при добавлении РМ до 50% значение становится равным  $R = 9,7$  МОм. То есть, происходит снижение сопротивления при увеличении содержания РМ. При этом электроемкость состава, применяемого в качестве диэлектрика конденсатора, изменяется в другую сторону, а, именно, с увеличением содержания РМ в АТ с 10% до 50% растёт и значение ёмкости от 0,757 nF до 0,820 nF [78].

Что касается величины прямоугольного переменного тока I, то здесь значение изменяется незначительно и пропорционально присутствию РМ. К примеру, при увеличении содержания РМ в смеси происходит увеличение тока с 5,31 мкА до 5,45 мкА, а при увеличении содержания сурепного масла – снижается (табл. 4.7). Остальные электрические параметры для смеси ДТ с сурепным маслом имеют схожие значения и характер протекания со смесями ДТ с РМ.

Электрические параметры топлив различного состава с добавлением сурепного масла до 50% в смеси

№ п/п	Состав топлива	Сопротивление между обкладками конденсатора, R, МОм	Ёмкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, C, nF	Ёмкость конденсатора по воздуху (перед каждым измерением), C, nF	Величина прямоугольного переменного тока с частотой 200 кГц I, при $t=20^{\circ}\text{C}$ , мкА
1	ДТ 90 % + Сурепное масло 10 %	34,0	0,749	0,304	4,1
2	ДТ 80 % + Сурепное масло 20 %	30,0	0,760	0,304	3,8
3	ДТ 70 % + Сурепное масло 30 %	28,0	0,777	0,304	3,4
4	ДТ 60 % + Сурепное масло 40 %	27,0	0,801	0,304	2,9
5	ДТ 50 % + Сурепное масло 50 %	20,0	0,808	0,304	2,3

Смесь ДТ с сурепным маслом имеет увеличенное сопротивление между обкладками конденсатора, по отношению к его смесям с РМ. К примеру, для смеси ДТ с 30% содержанием РМ  $R = 11,2$  МОм, а для смеси ДТ с 30% содержанием сурепного масла  $R = 28,0$  МОм. Величина же прямоугольного переменного тока для смеси ДТ с содержанием сурепного масла от 10% до 50% снижается (от 4,1 до 2,3 мкА) [78].

Как и предполагалось, растительные масла не являются диэлектриками. Анализ данных показывает неоднозначную зависимость для всех представленных смесей. Ёмкость конденсатора по воздуху для всех испытуемых приготовленных сме-

сей АТ остаётся постоянной (табл. 4.5, 4.6 и 4.7). Исследуемые результаты нуждаются в дальнейшем детальном изучении причин возникновения таких зависимостей. По методике, представленной в разделе 3, был произведен расчет диэлектрической проницаемости, руководствуясь данными из таблиц 4.5, 4.6 и 4.7. Результаты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Диэлектрическая проницаемость топлив различного состава с добавлением АТ до 50% в смеси

№ п/п	Состав топлива	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ (этанол), при $t=20^\circ\text{C}$	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ (рапсовое масло), при $t=20^\circ\text{C}$	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ (сурепное масло), при $t=20^\circ\text{C}$
1	90%ДТ+10%Э	3,05		
2	90%ДТ+10%РМ		2,35	
3	90%ДТ+10% Сурепное масло			2,33
4	80%ДТ+20%Э	7,98		
5	80%ДТ+20%РМ		2,41	
6	80%ДТ+20% Сурепное масло			2,5
7	70%ДТ+30%Э	27,5		
8	70%ДТ+30%РМ		2,54	
9	70%ДТ+30% Сурепное масло			2,65
10	60%ДТ+40%Э	39,47		
11	60%ДТ+40%РМ		2,63	
12	60%ДТ+40% Сурепное масло			2,76
13	50%ДТ+50%Э	45,31		
14	50%ДТ+50%РМ		2,72	
15	50%ДТ+50% Сурепное масло			2,8

Сравнивая значения диэлектрической проницаемости всех представленных составов АТ между минимальным и максимальным содержанием добавленного

спирта и растительных масел в смесь, можно проследить неоднозначную зависимость. Взаимосвязь прослеживается между характером значений диэлектрической проницаемости с электроёмкостью конденсатора при наличии смеси между обкладками, причём для всех добавляемых в смесь углеводородов (этанол, рапсовое и сурепное масла). Так, например, диэлектрическая проницаемость растёт во всём диапазоне от 10% до 50% добавленного этанола, рапсового и сурепного масел, показывая значения от  $\epsilon=3,05$  до  $\epsilon=45,31$ ; от  $\epsilon=2,35$  до  $\epsilon=2,72$ ; от  $\epsilon=2,33$  до  $\epsilon=2,8$ , соответственно. Стоит отметить, что диэлектрическая проницаемость для чистого ДТ равна  $\epsilon=2,14$  [78].

#### **4.2. Результаты исследований влияния альтернативного топлива на рабочий процесс дизеля**

Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на всех приготовленных смесях топлив с различным количеством добавленного этанола, рапсового и сурепного масел производилось с помощью индицирования на номинальном скоростном режиме с частотой вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Снятие индикаторных диаграмм осуществлялось при известных [79...84] оптимальных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива и постоянных для каждого из скоростных режимов значениях среднего эффективного давления  $p_e$ .

В процессе сгорания впрыскиваемого в цилиндр дизеля распылённого с помощью форсунок топлива возникает, как объёмное воспламенение, так и диффузионное горение. Очаг воспламенения зарождается, вероятно, по механизму объёмного воспламенения, далее пламя распространяется по паровоздушному заряду, подготовленному к горению за период задержки воспламенения (ПЗВ). Остальная часть топлива сгорает по механизму диффузного горения. Топливо впрыскивается в нагретый при сжатии воздух, имеющий температуру  $794 \text{ К}$  и давление  $6,7 \text{ МПа}$ . Для товарного ДТ, используемого в испытаниях, значение максимального давления цикла составляло  $P_z = 10,474 \text{ МПа}$ , а жесткости процесса сгорания  $dp/d\varphi = 0,617 \text{ МПа/град}$ .

Диффузное горение происходит в пограничном слое между горючим газом или паром и воздухом при таких условиях, когда скорость химических реакций и скорость смешения находится в соответствии друг другу. В противоположность взрывному сгоранию, при диффузионном горении присутствуют три основные фазы вещества в один и тот же момент, а, именно: горючий газ или пар, воздух и сгоревшая смесь; зона реакции находится между паром и воздухом. Пар может образовываться в ходе процесса с поверхностей капель или плёнки жидкости. В дизелях капли образуются в результате распыливания, а плёнка – вследствие осаждения топлива на стенках КС [85].

#### 4.2.1. Определение показателей процесса сгорания смеси ДТ с этанолом в цилиндре дизеля

На рис. 4.1, представлены совмещённые индикаторные диаграммы дизеля при работе на ДТ и его эмульсиях с добавками этанола до 50% [86]. По результатам видно, что возрастание количества этанола в эмульсии ведёт к увеличению максимального давления цикла  $P_z$  (МПа). Добавляя по 10% спирта в эмульсию, получаем следующие значения:  $P_{z10} = 10,641$  МПа,  $P_{z20} = 10,816$  МПа,  $P_{z30} = 10,984$  МПа,  $P_{z40} = 11,137$  МПа,  $P_{z50} = 11,214$  МПа. Дальнейший анализ полученных результатов показывает, что добавка в смесь спирта приводит к уменьшению угла  $\varphi_i$  поворота КВ между точками начала видимого горения и ВМТ. Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ, угол  $\varphi_d = 20,5^\circ$ , а при содержании этанола в эмульсии 30% и 50 % он равен, соответственно,  $\varphi_{30} = 17,1^\circ$  и  $\varphi_{50} = 16,6^\circ$ .

Данные расчёта значений максимальной скорости нарастания давления  $dp/d\varphi_{\max}$  по индикаторной диаграмме для АТ показывают, что жёсткость процесса сгорания возрастает в зависимости от увеличения процентного содержания этанола в смеси. Так,  $dp/d\varphi_{\max 20} = 0,655$  МПа/град, а  $dp/d\varphi_{\max 50} = 0,798$  МПа/град [86].

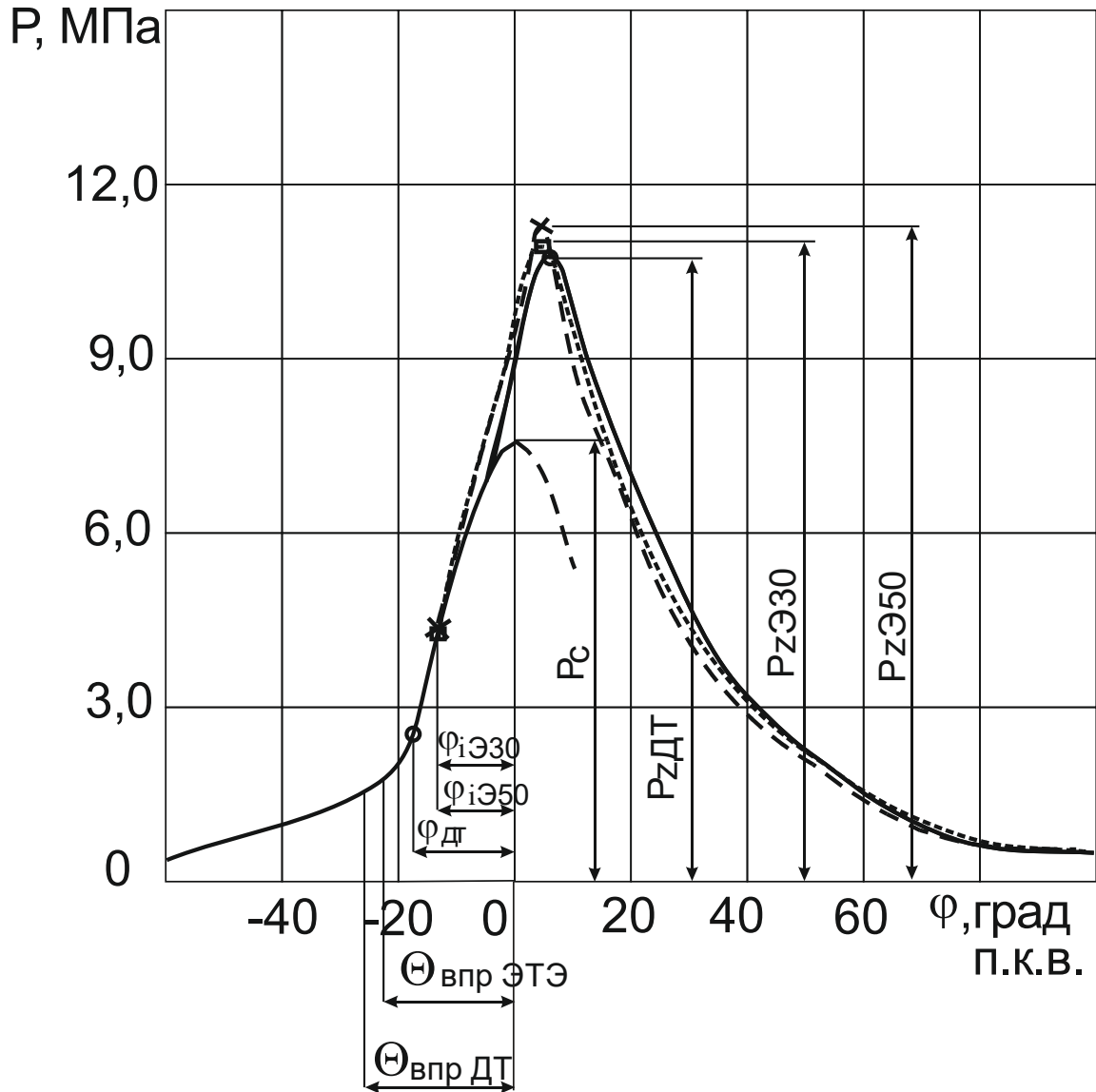


Рис. 4.1. Индикаторные диаграммы дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ\text{---}\circ$  - дизельное топливо;  $\times\text{---}\times$  - 30 % этанола в эмульсии;  $\square\text{---}\square$  - 50 % этанола в эмульсии.

Максимальное давление цикла и значение жёсткости процесса сгорания тем выше, чем большее количество топлива подаётся в течение первой фазы, а также чем интенсивнее испарение и смешение впрыснутого топлива с воздухом.

Обработка данных индикаторных диаграмм по методике ЦНИДИ показывает, что работа дизеля на ЭТЭ сопровождается изменением характеристик тепловыделения (рис. 4.2). Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ максимальная температура цикла  $T_{\max}=2190 \text{ К}$ , а при работе на эмульсии с содер-

жанием 20 % и 50 % этанола она равна  $T_{\max 20}=2160$  К и  $T_{\max 40}=2080$  К, соответственно. Применение ЭТЭ приводит к снижению на 30...80 градусов максимальной температуры цикла, а, значит, уменьшает теплонапряженность.

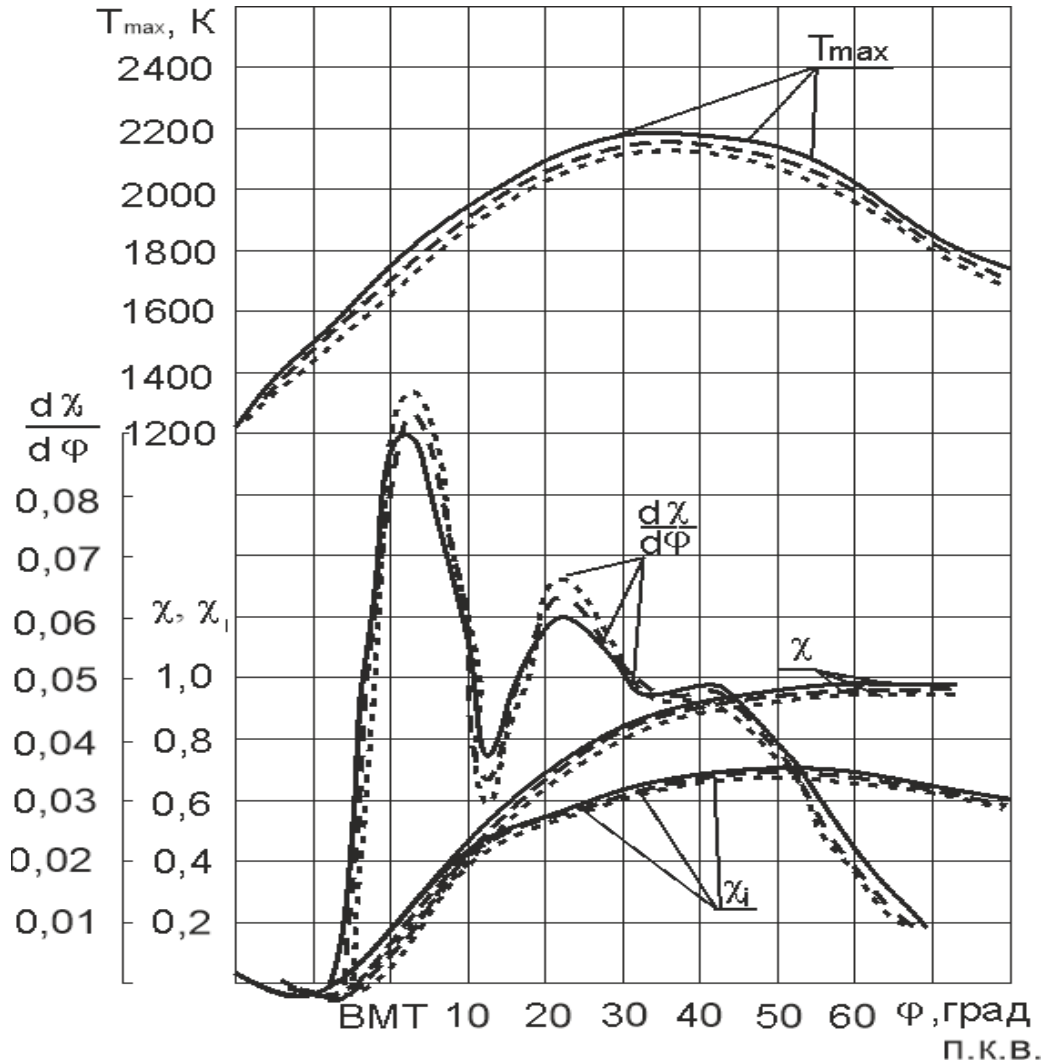


Рис. 4.2. Влияние применения ЭТЭ на характеристики тепловыделения дизеля Д-245.5S2:  $\circ$ — $\circ$  - дизельное топливо;  $\times$ — $\times$  - 20 % этанола в эмульсии;  $\square$ — $\square$  - 40 % этанола в эмульсии.

Сравнение кривых выделения теплоты  $\chi$ , активного тепловыделения  $\chi_i$  и динамики использования теплоты позволяет заключить, что сгорание ЭТЭ начинается позже, чем ДТ, но идет быстрее. Это можно объяснить тем, что смесевое топливо имеет несколько меньшее значение ЦЧ, чем ДТ, но спирт горит быстрее, чем ДТ [87].

При работе дизеля на ДТ доля активного тепловыделения в ВМТ. составляет 0,17 от общего количества выделившейся теплоты [88]. При содержании 20 % этанола в эмульсии она равна  $\chi_{i 20} = 0,15$ , а при содержании этанола 40 % значение достигает  $\chi_{i 40} = 0,13$ . По кривым динамики активного тепловыделения видно, что весь процесс выделения теплоты с увеличением содержания этанола в смеси замедляется, процесс сгорания заканчивается позднее. Из данных графика (рис. 4.2) также видно, что добавление этанола в топливо приводит к увеличению скорости тепловыделения, так как этанол сгорает быстрее ДТ. Если для чистого ДТ  $(d\chi/d\varphi)_{\max \text{ ДТ}} = 0,092$ , то при работе на ЭТЭ эти значения равны, соответственно,  $(d\chi/d\varphi)_{\max 20} = 0,096$  и  $(d\chi/d\varphi)_{\max 40} = 0,099$ .

#### 4.2.2. Определение показателей процесса сгорания смеси ДТ с рапсовым маслом в цилиндре дизеля

Анализируя график (рис. 4.3) видно [89], что при увеличении содержания РМ в смеси, начало видимого горения сдвигается в сторону поздних углов  $\varphi_i$ . Так, угол поворота КВ от момента впрыскивания до начала видимого горения для ДТ равен  $\varphi_{i \text{ ДТ}} = 20,4$  градуса, а значения соответствующих углов при работе дизеля на смеси-вом топливе равны  $\varphi_{i \text{ РМ10}} = 20,8$  градуса и  $\varphi_{i \text{ РМ50}} = 21,8$  градуса [98]. Наблюдается снижение максимального давления цикла  $P_z$  с увеличением концентрации РМ в смеси. К примеру, при содержании 10% РМ в смеси значение максимального давления цикла равно  $P_{z \text{ РМ10}} = 10,433$  МПа, тогда как при содержании РМ в 50% оно уже будет равно  $P_{z \text{ РМ50}} = 9,874$  МПа.

Расчётные значения максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\max}$  по индикаторной диаграмме для смеси ДТ с РМ показывают, что жёсткость процесса сгорания незначительно повышается в зависимости от процентного содержания масла в смеси. Так, при добавлении 10% РМ в смесь значение жесткости равно  $(dp/d\varphi)_{\max \text{ РМ10}} = 0,623$  МПа/град, а для 50% РМ в смеси жесткость равна  $(dp/d\varphi)_{\max \text{ РМ50}} = 0,67$  МПа/град [89].

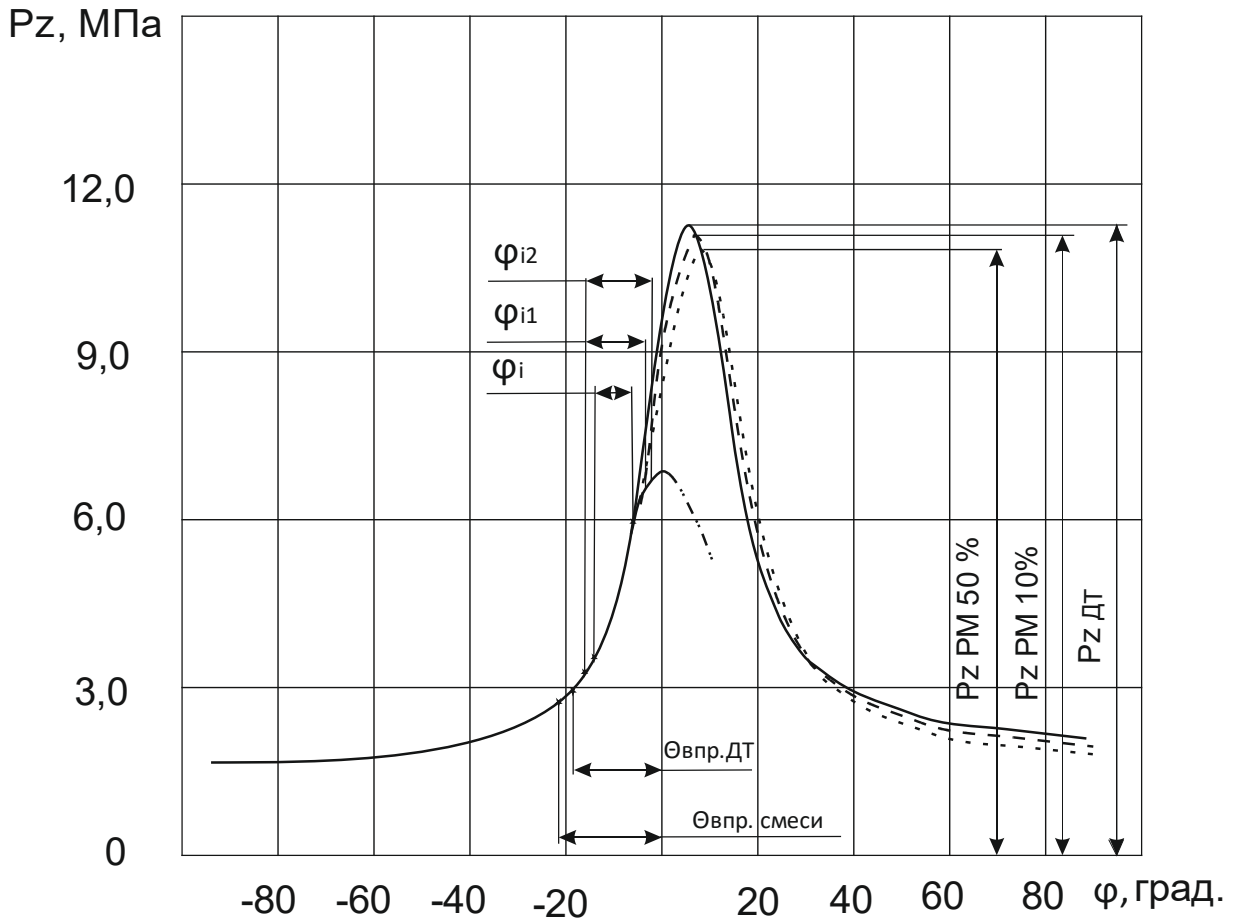


Рис. 4.3. Индикаторные диаграммы дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ\text{---}\circ$  - дизельное топливо;  $\times\text{---}\times$  - 10 % РМ в смеси;  $\square\text{---}\square$  - 50 % РМ в смеси.

Анализ данных, рассчитанных по индикаторным диаграммам, показал [89], что работа дизеля на смесях ДТ с РМ сопровождается некоторым изменением в небольшом диапазоне значений характеристик тепловыделения (рис. 4.4). Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  при работе дизеля на смеси с добавками 10% и 40% РМ максимальная температура цикла составляет  $T_{\max \text{ РМ}10} = 2188 \text{ К}$  и  $T_{\max \text{ РМ}40} = 2133 \text{ К}$ . Это говорит о том, что добавление РМ несущественно влияет на данный показатель.[30,86]

Анализируя характер кривых выделения теплоты  $\chi$ , активного тепловыделения  $\chi_i$  и динамики использования теплоты, можно заключить, что сгорание смешанного топлива начинается позже, чем ДТ и идет медленнее. Это можно объяснить тем, что смешанное топливо имеет на несколько единиц меньшее значение ЦЧ, чем

ДТ.

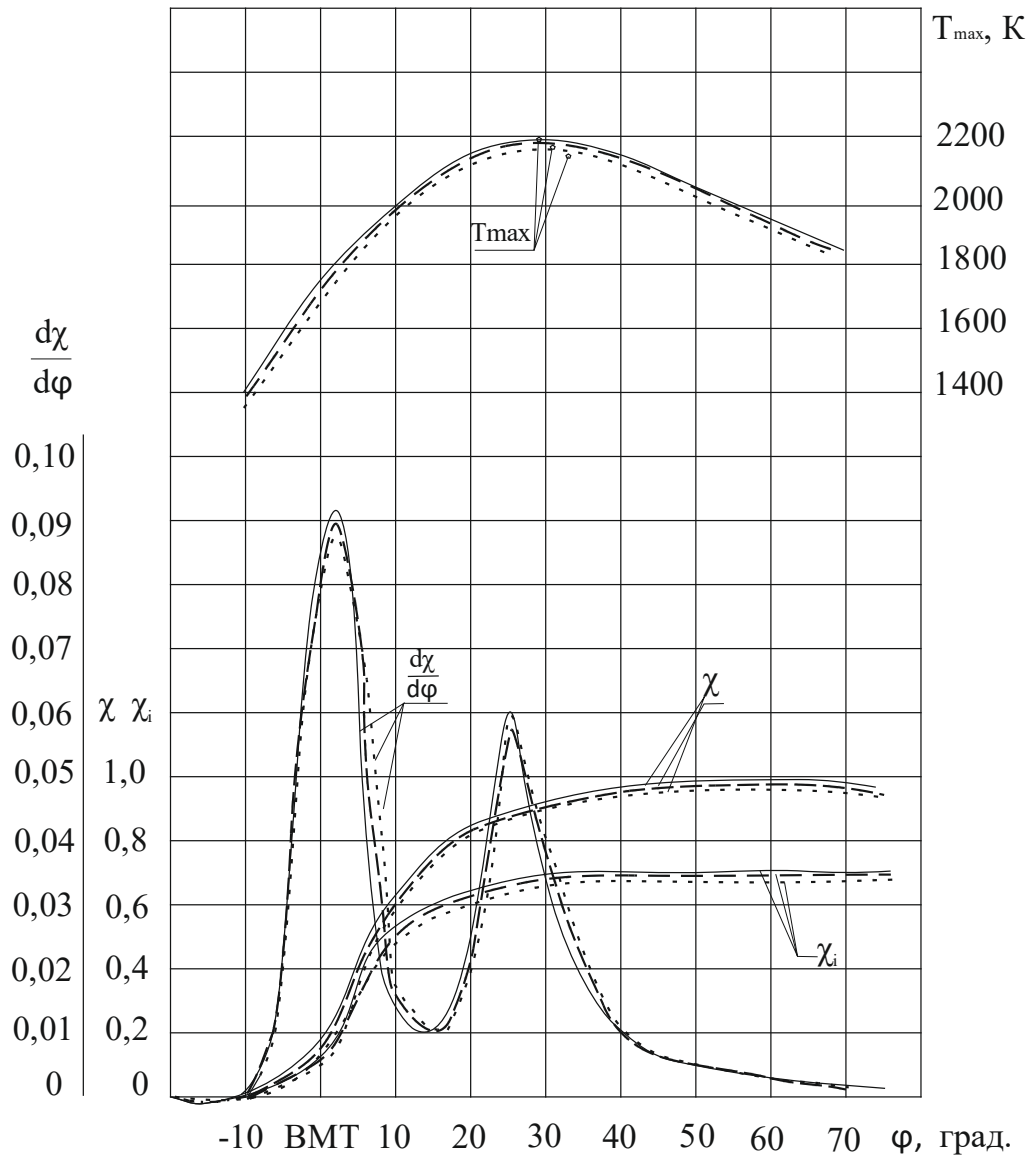


Рис. 4.4. Влияние применения смеси ДТ с РМ на характеристики тепловыделения дизеля Д-245.5S2:  $\circ$ — $\circ$  - дизельное топливо;  $\times$ — $\times$  - 10 % РМ в смеси;  $\square$ — $\square$  - 40 % РМ в смеси.

В ВМТ при работе дизеля на ДТ доля активного тепловыделения составляет 0,17 от общего количества выделившейся теплоты. При содержании 10% РМ в топливе это значение в ВМТ равно  $\chi_{i \text{ РМ}10} = 0,16$ , а при содержании 40% РМ  $\chi_{i \text{ РМ}40} = 0,14$ . По кривым динамики активного тепловыделения видно, что выделение теп-

лоты с увеличением содержания РМ в смеси замедляется, процесс сгорания заканчивается позднее.[90]

Замедление процесса сгорания обуславливает снижение скорости тепловыделения. Если для дизельного процесса  $(d\chi/d\varphi)_{\max \text{ ДТ}} = 0,092$ , то при работе дизеля на смеси ДТ и РМ эти значения равны, соответственно,  $(d\chi/d\varphi)_{\max \text{ РМ10}} = 0,090$  и  $(d\chi/d\varphi)_{\max \text{ РМ40}} = 0,085$ . Снижение максимальной скорости тепловыделения обуславливается увеличением периода задержки воспламенения и меньшей скоростью сгорания смесевоего топлива.

Рассмотрев показатели индикаторной диаграммы и тепловыделения дизеля Д-245.5S2, видно, что с увеличением содержания РМ в смеси замедляется процесс сгорания топлива.

#### 4.2.3. Определение показателей процесса сгорания смеси ДТ с сурепным маслом в цилиндре дизеля

Как известно, сурепное масло по своим физико-химическим свойствам не сильно отличается от РМ. Его присутствие в составе топливной смеси при работе дизеля и влияние на показатели процесса сгорания можно рассмотреть на индикаторных диаграммах (рис. 4.5) [90].

По графикам видно, что при увеличении содержания сурепного масла в смеси начало видимого горения сдвигается в сторону поздних углов  $\varphi_i$ . Так, угол поворота КВ от момента впрыскивания до начала видимого горения для ДТ равен  $\varphi_{i \text{ ДТ}}=20,4$  градуса, а значения соответствующих углов при работе дизеля на смесевом топливе равны  $\varphi_{i \text{ СурМ10}}=20,9$  градуса и  $\varphi_{i \text{ СурМ50}}=21,7$  градус [98]. Вместе с увеличением процентного содержания сурепного масла в смеси наблюдается снижение максимального давления цикла  $P_z$ . К примеру, при содержании 10% сурепного масла в смеси максимальное давление цикла равно  $P_{z \text{ СурМ10}} = 10,453$  МПа, тогда как при содержании 50% его значение составит  $P_{z \text{ СурМ50}} = 9,915$  МПа.

Расчётные значения максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\max}$  по индикаторной диаграмме для смеси ДТ с сурепным маслом показывают [90], что

жѐсткость процесса сгорания незначительно повышается в зависимости от процентного содержания масла в смеси. Так, при добавлении 10% сурепного масла в смесь значение жесткости процесса сгорания равно  $(dp/d\varphi)_{\max} \text{ СурМ10} = 0,621$  МПа/град, а добавка 50% масла в смесь повышает значение жесткости до  $(dp/d\varphi)_{\max} \text{ СурМ50} = 0,669$  МПа/град.

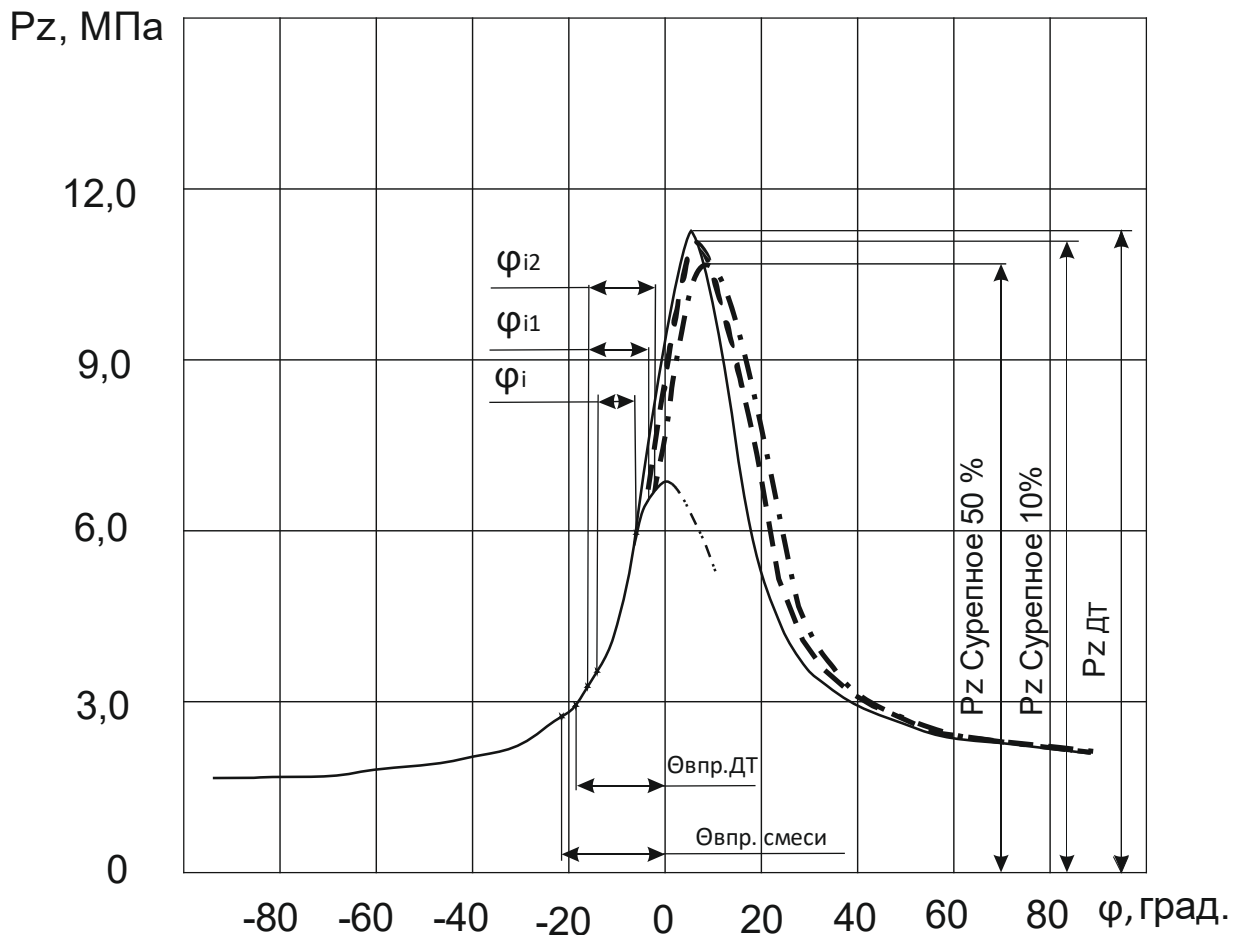


Рис. 4.5. Индикаторные диаграммы дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ\text{---}\circ$  - дизельное топливо;  $\times\text{---}\times$  - 10 % сурепного масла в смеси;  $\square\text{---}\square$  - 50 % сурепного масла в смеси.

Анализ индикаторных диаграмм показал, что характер работы дизеля на смеси ДТ с сурепным маслом близок к характеру работы на смеси ДТ с РМ. Продолжая рассматривать процесс сгорания при работе дизеля на смеси ДТ с сурепным маслом, обращаем внимание на графики характеристик тепловыделения (рис. 4.6). Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  при работе дизеля на смесях, содержащих

30% и 50% сурепного масла, максимальная температура цикла составит  $T_{\max \text{ СурМ30}} = 2148 \text{ К}$  и  $T_{\max \text{ СурМ50}} = 2128 \text{ К}$ .

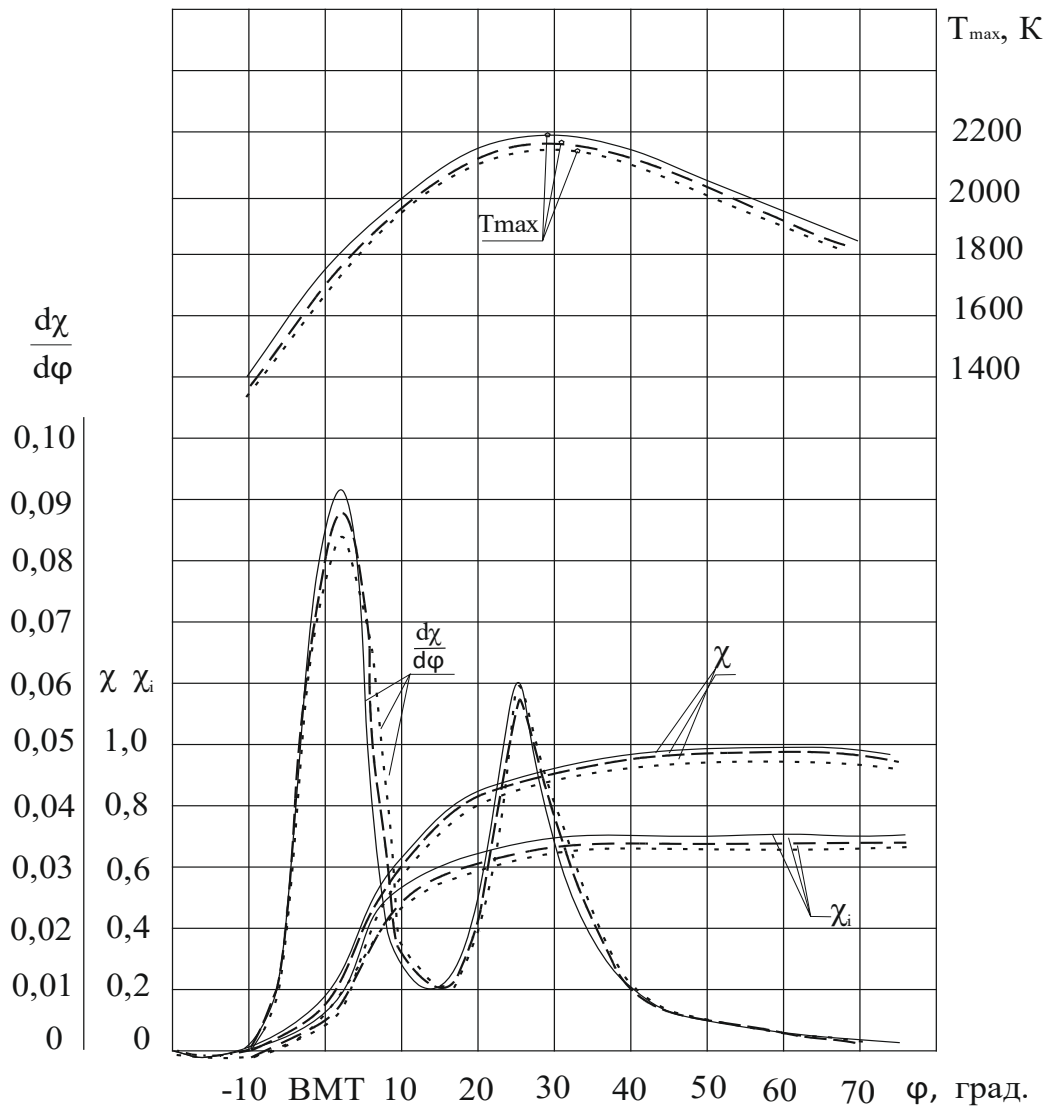


Рис. 4.6. Влияние применения смеси ДТ с сурепным маслом на характеристики тепловыделения дизеля Д-245.5S2:  $\circ$ — $\circ$  - дизельное топливо;  $\times$ — $\times$  - 30 % сурепного масла в смеси;  $\square$ — $\square$  - 50 % сурепного масла в смеси.

Анализируя кривые выделения теплоты  $\chi$ , активного тепловыделения  $\chi_i$  и динамики использования теплоты можно заключить, что сгорание смесевое топлива с добавками сурепного масла начинается позже, чем чистого ДТ и идет медленнее. Это можно объяснить тем, что смесевое топливо имеет на несколько единиц меньшее значение ЦЧ, чем ДТ.

В ВМТ при работе дизеля на смеси с содержанием 30% сурепного масла в топливе  $\chi_{i \text{ СурМ30}} = 0,16$ , а при содержании в 50%  $\chi_{i \text{ СурМ50}} = 0,15$ . По кривым динамики активного тепловыделения видно, что выделение теплоты с увеличением содержания сурепного масла в смеси замедляется, процесс сгорания заканчивается позднее.

### **4.3. Результаты исследований влияния альтернативного топлива на эффективные и экологические показатели работы**

Оценка рациональных составов смесевых биотоплив различного состава производилась также на основе данных эффективных и экологических показателей.

На рис. 4.7. представлены нагрузочные характеристики дизеля Д-245.5S2 при работе на ДТ и ЭТЭ различного состава при  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

Как видно из данных, во всём диапазоне изменения нагрузки повышается суммарный часовой расход топлива при работе с добавками этанола. В то же время, расход самого ДТ уменьшается за счёт замещения его этанолом. Так, на номинальной нагрузке при  $p_e=0,96 \text{ МПа}$  и работе на ДТ  $G_{\text{дт}}=16,2 \text{ кг/ч}$ , а при работе с добавками этанола 20% и 50% расход самого ДТ составляет 13,4 кг/ч и 10,8 кг/ч, соответственно. [44]

Уменьшением количества теплоты, выделяющейся при сгорании смесевого топлива и степени ее использования объясняется рост удельного эффективного расхода топлива. При этом ее минимум  $g_e$  приблизительно соответствует режимам максимального нагружения дизеля (рис. 4.7).

Влияние добавок этанола на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  представлено на рис. 4.8.

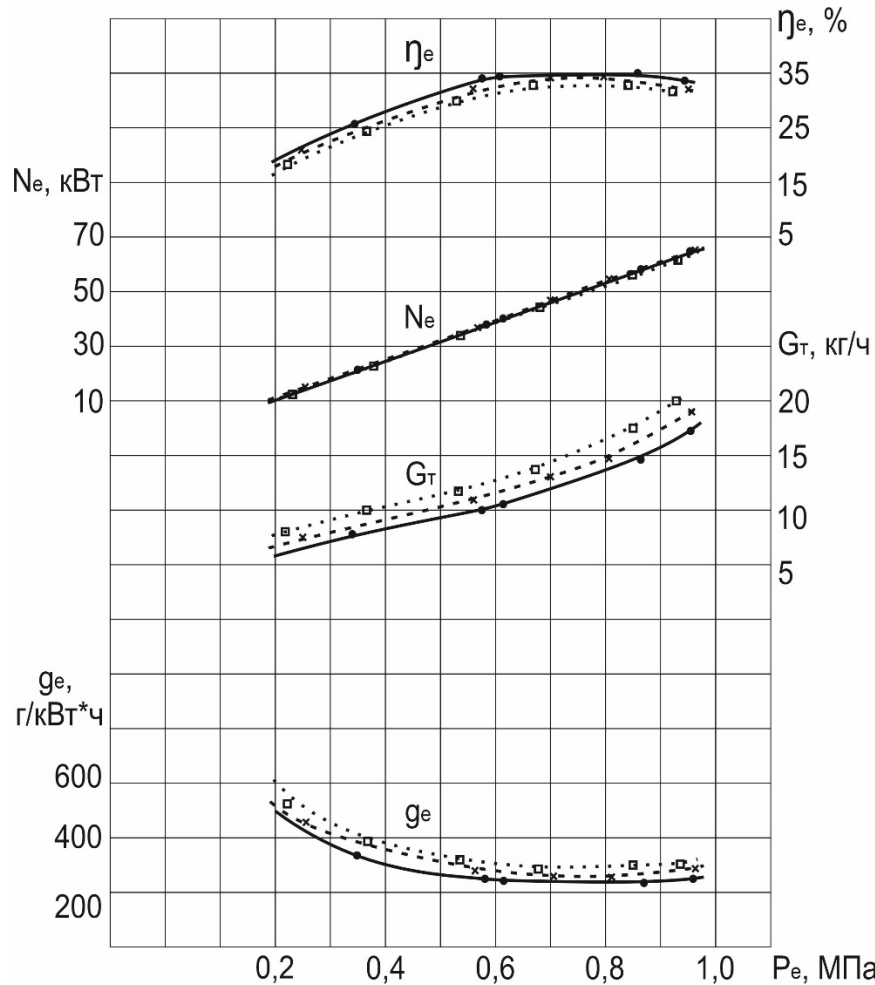


Рис. 4.7. Нагрузочные характеристики дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ$ — $\circ$  - дизельное топливо;  $\times$ — $\times$  - 20% этанола в топливе;  $\square$ — $\square$  - 50% этанола в топливе (эффективные показатели)

Характер кривых уровня концентрации CO и CO<sub>2</sub> не изменяется. При увеличении нагрузки содержание CO и CO<sub>2</sub> в ОГ возрастает. Так, при работе двигателя на ДТ при  $p_e=0,1$  МПа содержание CO и CO<sub>2</sub>, соответственно, равны 0,0% и 3%, а при работе в номинальном режиме и эффективной нагрузке  $p_e=0,96$  МПа, соответственно, равны 0,05 % и 7%. При добавлении в топливо этанола содержание CO и CO<sub>2</sub> в ОГ также увеличивается.

Так при  $p_e=0,1$  МПа и содержании этанола 20% и 50% значения CO соответствуют 0,02% и 0,03%, а содержание в ОГ CO<sub>2</sub>, соответственно, равно 3% и 4%.

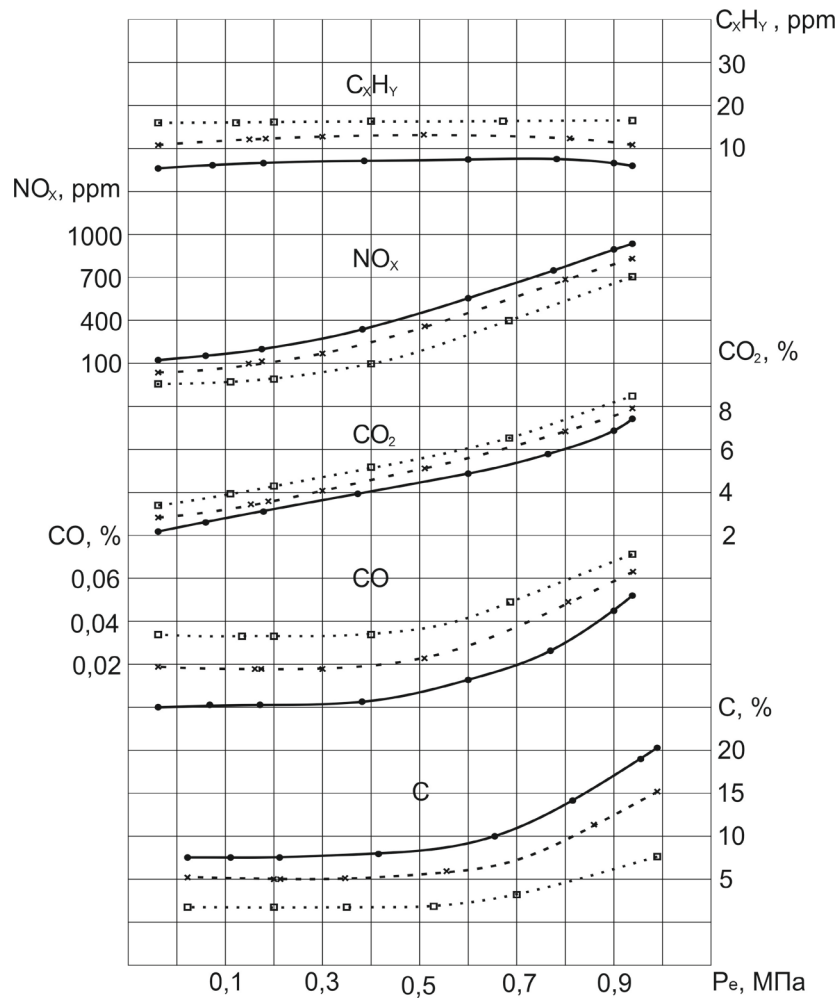


Рис. 4.8. Нагрузочные характеристики дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ\text{---}\circ$  - дизельное топливо;  $\times\text{---}\times$  - 20% этанола в топливе;  $\square\text{---}\square$  - 50% этанола в топливе (экологические показатели)

При работе дизеля в номинальном режиме с содержанием этанола 20% и 50% содержание в ОГ CO, соответственно, равно 0,06% и 0,07%, а содержание CO<sub>2</sub>, соответственно, равно 8% и 9%.

Содержание сажи в ОГ также снижается в случае работы дизеля с добавками этанола. Так, увеличение нагрузки от  $p_e=0,1 \text{ МПа}$  до  $p_e=0,96 \text{ МПа}$  влечёт за собой рост выброса сажи от 6,5% до 19% при работе на чистом дизельном топливе. В то же самое время работа на смесевом топливе сопровождается меньшей эмиссией сажи во всём диапазоне нагрузок. Снижение, как и следовало ожидать, вызывается меньшей склонностью к дымлению этанола в сравнении с ДТ.[11]

Так, на номинальном скоростном режиме уменьшение выбросов сажи с ОГ составляет, соответственно, 14,5%, и 6,4% для случаев содержания 20% и 50% этанола. Повышение содержания сажи в ОГ одновременно с повышением нагрузки обуславливается, в первую очередь, недостатком в воздухе кислорода воздуха, необходимого для окисления топлива. В условиях высокой температуры и недостатка кислорода воздуха, несгоревшее топливо будет подвергаться пиролизу (термическому крекингу) с образованием твёрдых частиц углеводородов – сажи.

При анализе графика (рис. 4.8) видно, что содержание суммарных углеводородов  $C_xH_y$  в ОГ несколько возрастает при работе с добавкой этанола. Основное влияние значение в этом случае оказывает ускорение процесса горения, снижение осреднённой температуры цикла и температуры ОГ. В итоге на номинальном режиме при  $p_e=0,96$  МПа концентрация  $C_xH_y$  увеличивается от 6 ppm для случая дизельного топлива до 17 ppm для случая 50% этанола в топливе.

Содержание суммарных оксидов азота  $NO_x$  в ОГ уменьшается практически наполовину при работе с добавками этанола. Так, на номинальном режиме при  $p_e=0,96$  МПа концентрация  $NO_x$  в ОГ для случая дизельного топлива составляет 978 ppm, а для топлива, содержащего 50% этанола это значение равно 720 ppm.

Согласно термической природе образования оксидов азота  $NO_x$  (имеется в виду оксид азота NO и диоксид азота  $NO_2$ ) их эмиссия находится в прямой зависимости от содержания свободного кислорода в пламени при условии достаточно высокой его температуры. Снижение локальной и средней температур цикла в случае работы на эмульсии непосредственно обуславливает снижение эмиссии оксидов азота. В то же время концентрация  $NO_x$  находится в прямой зависимости и от величины нагрузки, т.к. параллельно с нагрузкой растёт температура ОГ.[11]

Таким образом, рост содержания этанола в топливе целесообразен с точки зрения экологии, но нежелателен с точки зрения ухудшения экономических показателей.

Нагрузочная характеристика тракторного дизеля Д-245.5S2 (эффективные показатели,  $n=1800$  мин-1) при различном содержании РМ приведена на рис. 4.9.

Как видно из данных, представленных на графиках (рис.4.9) при снижении нагрузки с 1,0 до 0,2 МПа и увеличении содержания в топливе РМ от 20 до 55 % - эффективный КПД  $\eta_e$  уменьшается с 37% до 14%.

Исходя из графиков эффективных показателей при номинальном режиме работы, удельный  $g_e$  и часовой  $G_T$  расходы топлива увеличились с 225 до 618 г/(кВт·ч) и с 5,3 до 17,6 кг/ч, соответственно. Численные значение эффективной мощности  $N_e$  и крутящего момента  $M_{кр}$  изменились незначительно при увеличении содержания в топливе РМ от 20% до 55%.

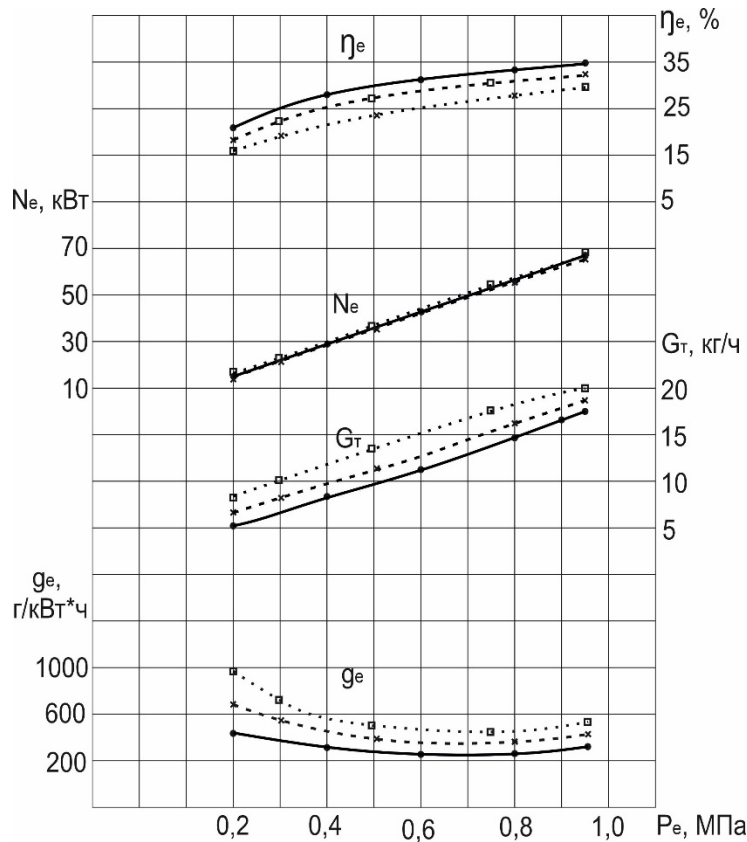


Рис. 4.9. Нагрузочные характеристики дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ$  — дизельное топливо;  $\times$  — 20% РМ в топливе;  $\square$  — 55% РМ в топливе (эффективные показатели)

Влияние добавок РМ на содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля в зависимости от нагрузки при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  представлено на рис. 4.10.

Из данных рисунка 4.10, а видно, что при увеличении нагрузки с 0,2 до 1,0 МПа и росте содержания РМ в смесевом топливе до 55% снизились концентрации

в отработавших газах: сажи с 38,0 до 6,8 %, суммарных оксидов азота  $\text{NO}_x$  с 2650 до 125 ppm, несгоревших углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$  с 13,0 до 1,0 ppm и диоксида углерода  $\text{CO}_2$  с 8,65 до 2,12 %, а монооксида углерода  $\text{CO}$  увеличились с 0,01 до 0,09%, соответственно.

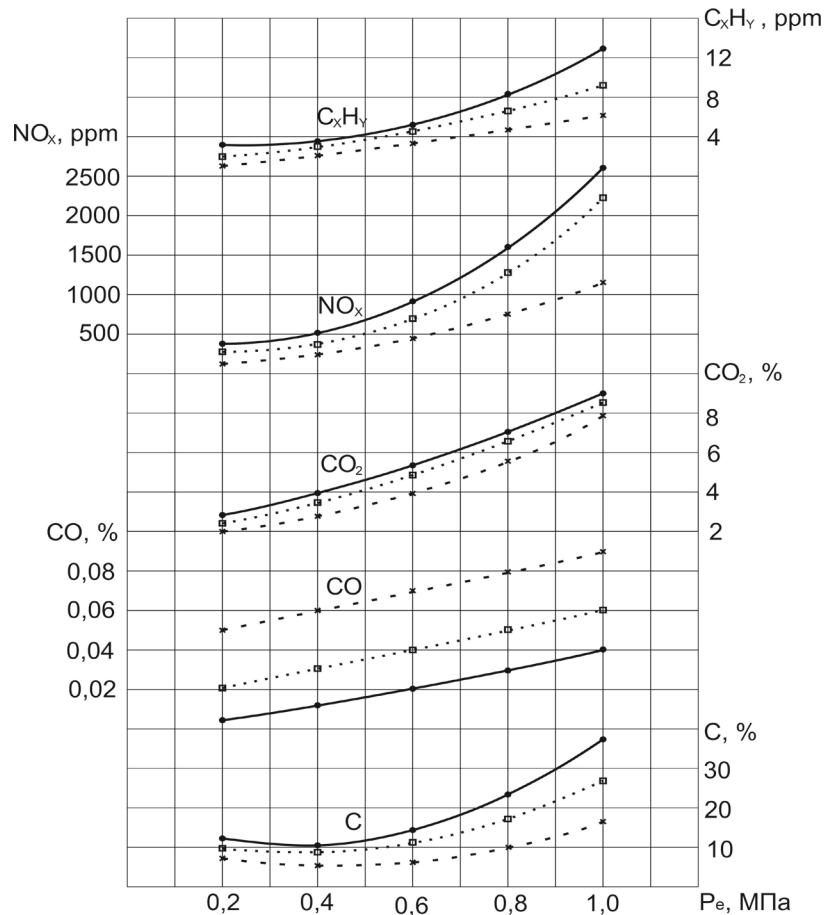


Рис. 4.10. Нагрузочные характеристики дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ\text{---}\circ$  - дизельное топливо;  $\times\text{---}\times$  - 20% РМ в топливе;  $\square\text{---}\square$  - 55% РМ в топливе (экологические показатели)

Как показывает анализ графиков 4.9 и 4.10, рост содержания РМ в топливе улучшает экологические показатели, в частности, выбросов оксидов азота и сажи, но ухудшает экономичность процесса.

Оценка рациональных составов смесевых биотоплив производилась также на основе данных работы дизеля с добавками сурепного масла.

Из графика (рис. 4.11) видно, что при увеличении нагрузки имеет место рост часового расхода топлива. Так, при работе дизеля на минимальной нагрузке  $p_{e \text{ min}} =$

0,02 МПа часовой расход топлива  $G_T$  для ДТ, топлива с добавкой 10% СурМ 25% СурМ составлял  $G_{дт} = 3,3$  кг/ч,  $G_{СурМ-10} = 3,9$  кг/ч,  $G_{СурМ-25} = 4,2$  кг/ч, соответственно. При повышении нагрузки до  $p_e = 0,95$  МПа часовой расход топлива возрастал и составил  $G_{дт} = 17,1$  кг/ч,  $G_{СурМ-10} = 19$  кг/ч,  $G_{СурМ-25} = 20$  кг/ч, соответственно.

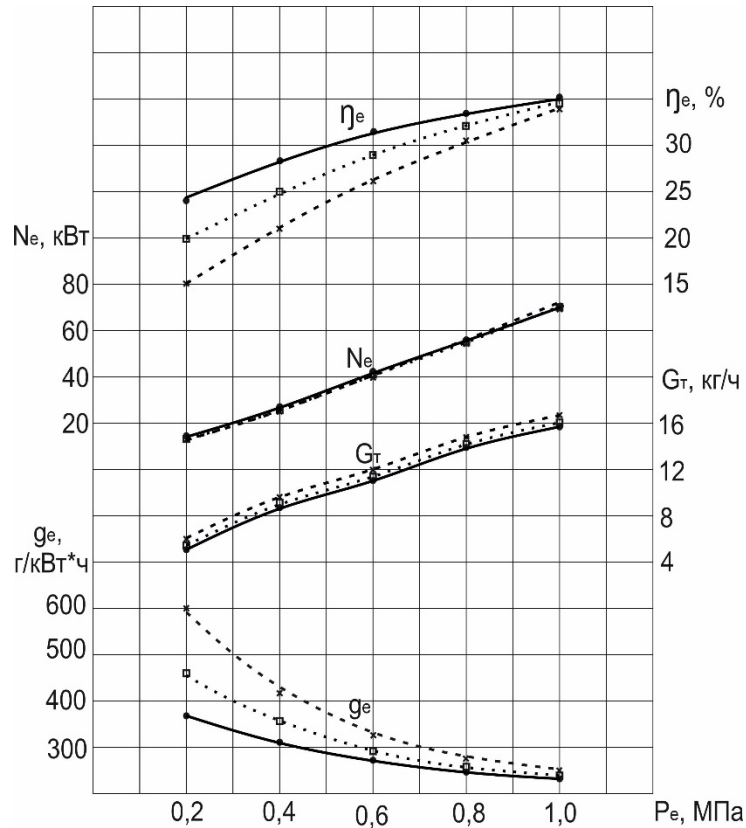


Рис. 4.11 - Нагрузочные характеристики дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800$  мин<sup>-1</sup>:  $\circ$ — $\circ$  - дизельное топливо;  $\times$ — $\times$  - 10% СурМ в топливе;  $\square$ — $\square$  - 25% СурМ в топливе (эффективные показатели)

Рассматривая значения эффективной мощности  $N_e$ , необходимо отметить, что ее максимум для дизеля в номинальном режиме, как при работе на ДТ, так и с добавками СурМ, равен 68 кВт. Если указанный показатель эффективной мощности при работе в номинальном режиме при  $p_e = 0,95$  МПа сохранялся, и при добавках СурМ 10% и 25%, то значения удельного эффективного расхода топлива при увеличении концентрации в смесях биологических добавок увеличивались и составляли  $g_e = 253$  г/кВт\*ч для чистого ДТ,  $g_e = 280$  г/кВт\*ч для топлива с добавкой 10% СурМ и  $g_e = 304$  г/кВт\*ч для топлива с добавкой 25% СурМ, соответственно.

На графике также видно увеличение удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  при снижении нагрузки. Это объясняется тем, что при снижении нагрузки, соответственно, уменьшается механический КПД  $\eta_m$ . При увеличении нагрузки свыше  $p_e = 0,95$  МПа также наблюдается рост удельного эффективного расхода топлива. Это связано с тем, что при высоких нагрузках происходит снижение индикаторного КПД  $\eta_i$ .

Оценка экологических показателей работы дизеля с добавками СурМ проводилась согласно методике ЕЭК ООН №96.

Как показывает анализ, рост содержания СурМ в смесевом топливе существенно увеличивает удельный эффективный расход топлива.

#### **4.4. Определение показателей рабочего процесса дизеля Д-245.5S2 на основе физико-химических свойств топлив**

Известно, что удельная и молярная рефракции не зависят от внешних условий - температуры, давления, агрегатного состояния вещества [29]. Однако они находятся в зависимости от состава топлива, наличия органических веществ, содержащих углерод и водород, и числа их атомов в молекуле [40].

Сама органическая часть жидких топлив состоит из большого количества сложных химических соединений, образованных пятью химическими элементами: углерод (С), водород (Н), сера (S), кислород (О) и азот (N). Теплота, выделяющаяся вследствие термохимического окисления топлива, идет на повышение внутренней энергии рабочего тела и на совершение механической работы. А это, в свою очередь, влияет на скорость окисления топлива и характер тепловыделения  $a$ , значит, величину максимального давления газов в цилиндре  $P_z$ , что позволяет использовать значения рефракции  $sR$  для предварительной оценки значений максимального давления цикла  $P_z$  при работе дизеля на различных составах АТ (рис. 4.12).

Анализ полученных данных (табл. 4.4, рис. 4.1, рис. 4.3 и рис. 4.5) показал, что имеет место корреляционная связь между удельной рефракцией  $sR$  и максималь-

ным давлением в цилиндре  $P_z$ . Можно сказать, что данные теоретических изысканий удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. На графике (рис. 4.12) видно, что характер кривых  $P_z$  на всех составах альтернативного топлива совпадает с характером изменения значений удельной рефракцией  $sR$ .

Также известно, что диэлектрическая проницаемость жидких веществ зависит от микроскопической структуры и свойств атомов и молекул вещества. В диэлектрике под воздействием электрического поля происходит поляризация атомов или молекул, что приводит к образованию внутреннего электрического поля. Макроскопические свойства диэлектриков определяются суммарным эффектом всех микроскопических процессов, происходящих на уровне атомов и молекул. [91]. Концентрация примесей оказывает влияние на диэлектрическую проницаемость состава. Примеси изменяют структуру и свойства смеси, что приводит к изменению его диэлектрических свойств и свойств поляризации. Спирты, например, характеризуются более высокой активностью при горении по сравнению с углеводородами. В диэлектрике, помещённом в электрическое поле, происходит процесс поляризации. Для вещества она определяется молекулярными параметрами: дипольным моментом молекулы, её поляризуемостью и числом молекул в единице объёма.

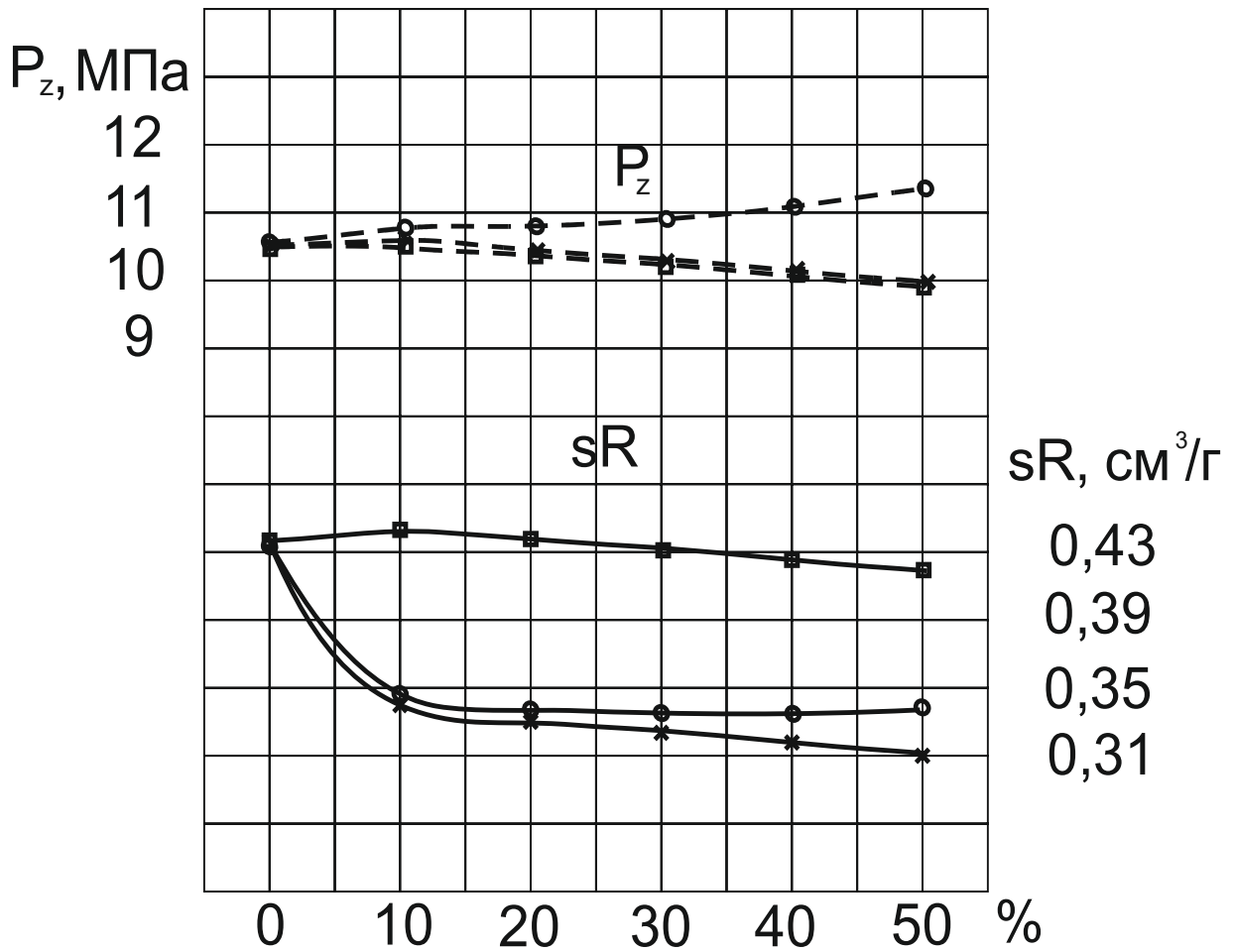


Рис. 4.12. Показатели максимального давления цикла, определенные на основе значений удельной рефракции топлив:  $\circ$ — $\circ$  -  $sR$  (этанол);  $\ast$ — $\ast$  -  $sR$  (PM);  $\blacksquare$ — $\blacksquare$  -  $sR$  (сурепное масло);  $\circ$  - - - -  $\circ$  -  $P_z$ (этанол);  $\ast$  - - -  $\ast$  -  $P_z$  (PM);  $\blacksquare$  - - - -  $\blacksquare$  -  $P_z$  (сурепное масло).

Максимальная скорость нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\max}$  зависит от соотношения С/Н в смеси, а, именно, молекулярного состава. Это позволяет использовать для сравнения значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  с жесткостью процесса сгорания  $(dp/d\phi)_{\max}$ . Влияние свойств топлива на процесс сгорания в цилиндре дизеля следует рассматривать в связи с зависимостью характеристик топлива. Применение в дизеле топлив облегченного фракционного состава ведет к увеличению ПЗВ и скорости тепловыделения в фазе быстрого сгорания. При этом возрастают максимальное давление цикла и скорость его нарастания [92].

Проводя анализ полученных данных (табл. 4.8, рис. 4.1, рис. 4.3 и рис. 4.5) видно, что имеет место корреляционная связь между диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и максимальной скоростью нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\max}$ . Можно заметить, что данные теоретических изысканий удовлетворительно согласуются с экспериментальными. На графике (рис. 4.8) видно, что характер кривых  $(dp/d\phi)_{\max}$  практически на всех составах АТ совпадает с характером изменения значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

На графиках (рис. 4.12, рис. 4.13) точки с нулевым содержанием АТ характеризуют чистое ДТ.

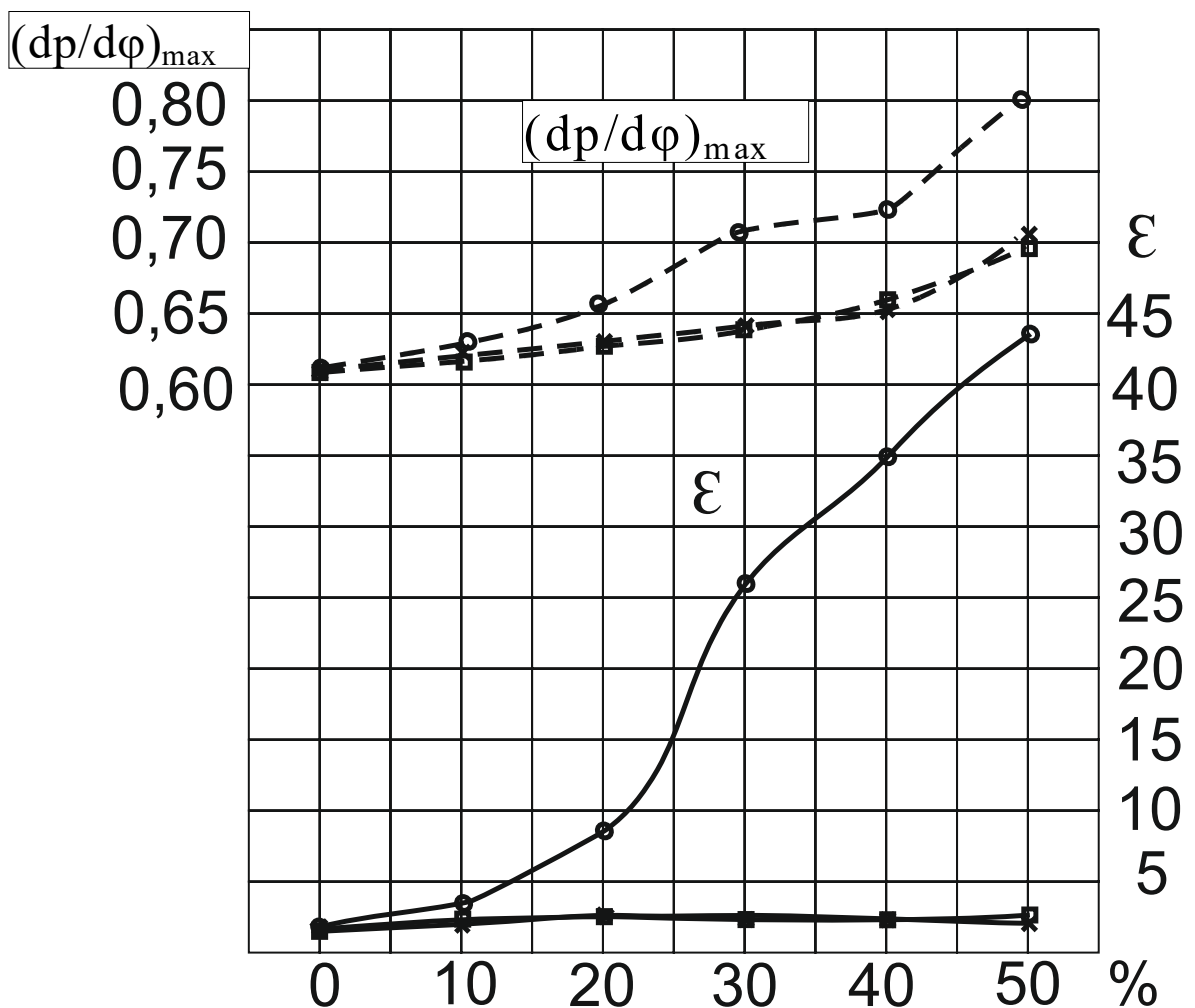


Рис. 4.13. Показатели жесткости процесса сгорания, определенные на основе значений диэлектрической проницаемости топлив:  $\circ$ — $\circ$  -  $\epsilon$  (этанол);  $\ast$ — $\ast$  -  $\epsilon$  (PM);  $\blacksquare$ — $\blacksquare$  -  $\epsilon$  (сурепное масло);  $\circ$ - - - -  $\circ$  -  $(dp/d\phi)_{\max}$  (этанол);  $\ast$ - - -  $\ast$  -  $(dp/d\phi)_{\max}$  (PM);  $\blacksquare$ - - -  $\blacksquare$  -  $(dp/d\phi)_{\max}$  (сурепное масло).

#### 4.5. Верификация теоретических и экспериментальных данных показателей рабочего процесса дизеля Д-245.5S2. Определение рациональных составов смесевых топлив

Сопоставляя расчётные данные, полученные по теоретические моделям из главы 2, с экспериментальными данными, получаем следующие значения максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\max}$  (табл. 4.9) и максимального давления цикла в цилиндре  $P_z$  (МПа) (табл. 4.10).

Таблица 4.9

Данные экспериментальных и теоретических значений  $(dp/d\phi)_{\max}$  для различных составов смесевых топлив

№ п/п	Состав топлива	Максимальная скорость нарастания давления $(dp/d\phi)_{\max}$						Погрешность $\Delta$ , %
		теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	
1	90%ДТ+10%Э	0,629	0,631					0,47
2	90%ДТ+10%РМ			0,621	0,623			0,32
3	90%ДТ+10%СурМ					0,620	0,621	0,16
4	80%ДТ+20%Э	0,652	0,655					0,46
5	80%ДТ+20%РМ			0,634	0,630			0,66
6	80%ДТ+20%СурМ					0,637	0,632	0,83
7	70%ДТ+30%Э	0,7	0,710					1,42
8	70%ДТ+30%РМ			0,641	0,644			0,46
9	70%ДТ+30%СурМ					0,639	0,642	0,47
10	60%ДТ+40%Э	0,712	0,715					0,42
11	60%ДТ+40%РМ			0,648	0,651			0,46
12	60%ДТ+40%СурМ					0,654	0,657	0,46
13	50%ДТ+50%Э	0,793	0,798					0,63
14	50%ДТ+50%РМ			0,667	0,670			1,06
15	50%ДТ+50%СурМ					0,664	0,669	0,75
16	ДТ	0,619	0,617					0,33

Как видно из таблицы 4.9, расхождение расчётных и экспериментальных данных максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\max}$  при работе дизеля с частотой  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  на различных видах смесевых топлив не превышает  $\Delta \approx 1,5\%$  [93].

Как видно из данных таблицы 4.10, расхождение расчётных и эксплуатационных данных максимального давления цикла  $P_z$  при работе дизеля с частотой  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  на различных видах смесевых топлив не превышает  $\Delta \approx 0,6\%$ .

Высокая сходимость расчётных и экспериментальных данных подтверждает адекватность предложенных теоретических моделей и корректность работы разработанных на их основе программных комплексов « $P_z$  – экспресс» [42] и «Расчет жесткости процесса сгорания при работе дизеля» [43].

Таблица 4.10

Данные экспериментальных и теоретических значений  $P_z$  для различных составов смесевых топлив

№ п/ п	Состав топлива	Значение максимального давления цикла $P_z$						По- греш- ность, $\Delta$ , %
		теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	
1	90%ДТ+10%Э	10,632	10,641					0,1
2	90%ДТ+10%РМ			10,439	10,433			0,1
3	90%ДТ+10%Сур М					10,460	10,453	0,1
4	80%ДТ+20%Э	10,799	10,816					0,2
5	80%ДТ+20%РМ			10,373	10,366			0,1
6	80%ДТ+20%Сур М					10,419	10,390	0,3
7	70%ДТ+30%Э	10,970	10,984					0,2
8	70%ДТ+30%РМ			10,201	10,178			0,2
9	70%ДТ+30%Сур М					10,230	10,201	0,3
10	60%ДТ+40%Э	11,101	11,137					0,4
11	60%ДТ+40%РМ			10,081	10,020			0,1
12	60%ДТ+40%Сур М					10,102	10,041	0,6

13	50%ДТ+50%Э	11,233	11,214					0,2
14	50%ДТ+50%РМ			9,912	9,874			0,6
15	50%ДТ+50%Сур М					9,945	9,915	0,3
16	ДТ	10,431	10,474					0,41

Данные показывают, что присутствие этанола в смесевом биотопливе на уровне 30% влечет повышение жесткости процесса сгорания  $(dp/d\phi)_{\max}$  до 0,71 МПа/градус (15,1%) и рост максимального давления цикла  $P_z$  до 10,984 МПа. Для сохранения долговечности дизеля следует ограничить присутствие этанола в смесевом биотопливе на уровне 30% [41].

Данные эксперимента показывают, что присутствие рапсового масла и сурепного масла на уровне 50% также влечет повышение жесткости процесса сгорания  $(dp/d\phi)_{\max}$  на 10%, соответственно, для сохранения долговечности дизеля их присутствие в смесевом биотопливе следует ограничить на уровне 50%.

#### 4.6. Выводы по главе 4

1. Экспериментально подтвержден способ определения рациональных составов смесевых биотоплив для автотракторного дизеля на основе показателей процесса сгорания.

2. Экспериментально определены показатели процесса сгорания при работе дизеля Д-245.5S2 с добавками жидких АТ.

Максимальное давление цикла составляет 10,474 МПа для чистого ДТ, 11,214 МПа для АТ с добавкой 50% этанола, 9,874 МПа для АТ с добавкой 50% РМ, 9,915 МПа для АТ с добавкой 50% сурепного масла.

Жесткость процесса сгорания составляет 0,617 МПа/градус для чистого ДТ, 0,798 МПа/градус для АТ с добавкой 50% этанола, 0,670 МПа/градус для АТ с добавкой 50% РМ, 0,669 МПа/градус для АТ с добавкой 50% сурепного масла.

3. Верификация показала расхождение расчетных и экспериментальных значений не более 0,1...0,6% для максимального давления цикла и не более 0,16...1,42% для жесткости процесса сгорания.

Определены рациональные значения составов смесевых биотоплив исходя из надежности и долговечности двигателя – добавка сурепного и рапсового масла в дизель не должна превышать 50%, добавка этанола не должна превышать 30%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден способ определения рациональных составов альтернативных топлив для автотракторного дизеля на основе их химмотологических показателей.

2. Уточнены теоретические зависимости определения максимального давления цикла и жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе на чистом дизельном топливе. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при работе дизеля на чистом ДТ  $P_z$  равно 10,431 МПа,  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,619 МПа/градус.

3. Предложены теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе максимального давления цикла в цилиндре автотракторного дизеля. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для АТ с добавкой 50% этанола  $P_z$  равно 11,233 МПа, для АТ с добавкой 50% рапсового масла  $P_z$  равно 9,912 МПа, для АТ с добавкой 50% сурепного масла  $P_z$  равно 9,945 МПа.

4. Предложены теоретические зависимости определения рациональных составов смесевых биотоплив с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла на основе жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для АТ с добавкой 50% этанола  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,793 МПа/градус, для АТ с добавкой 50% рапсового масла  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,667 МПа/градус, для АТ с добавкой 50% сурепного масла  $(dp/d\phi)_{\max}$  равно 0,664 МПа/градус.

5. Усовершенствована методика определения удельной рефракции жидких альтернативных топлив (патент РФ № 2835685).

6. Экспериментально определены показатели процесса сгорания при работе автотракторного дизеля с добавками жидких альтернативных топлив.

Максимальное давление цикла составляет 10,474 МПа для чистого ДТ, 11,214 МПа для альтернативного топлива с добавкой 50% этанола, 9,874 МПа для альтернативного топлива с добавкой 50% рапсового масла, 9,915 МПа для альтернативного топлива с добавкой 50% сурепного масла.

Жесткость процесса сгорания составляет 0,617 МПа/градус для чистого ДТ, 0,798 МПа/градус для альтернативного топлива с добавкой 50% этанола, 0,670 МПа/градус для альтернативного топлива с добавкой 50% рапсового масла, 0,669 МПа/градус для альтернативного топлива с добавкой 50% сурепного масла.

Верификация показала расхождение расчетных и экспериментальных значений не более 0,1...0,6% для максимального давления цикла и не более 0,16...1,42% для жесткости процесса сгорания.

Определены рациональные значения составов смесевых биотоплив – добавка сурепного и рапсового масла в дизель не должна превышать 50%, добавка этанола не должна превышать 30%.

7. Разработаны программы расчета на ЭВМ максимального давления цикла (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2024613086) и жесткости процесса сгорания (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2024613184) в цилиндре автотракторного дизеля при работе на жидких топливах.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

1. АТ – альтернативное топливо
2. ВМТ – верхняя мертвая точка;
3. ДВС – двигатель внутреннего сгорания
4. ДТ – дизельное топливо;
5. КВ – коленчатый вал;
6. КС – камера сгорания;
7. ОГ – отработавшие газы;
8. ПЗВ – период задержки воспламенения;
9. РМ – рапсовое масло;
10. ТНВД – топливный насос высокого давления;
11. ТПА – топливоподающая аппаратура;
12. ЦЧ – цетановое число;
13. ЦНИДИ – Центральный научно-исследовательский дизельный институт
14. Э – этанол
15.  $\eta_e$  – эффективный коэффициент полезного действия;
16.  $P_z$  – максимальное давление сгорания в цилиндре, МПа;
17.  $P_e$  – среднее эффективное давление, МПа;
18.  $\varphi$  – угол поворота коленчатого вала, градус;
19.  $\Theta_{впр}$  – установочный угол опережения впрыскивания топлива, градус;
20.  $T_{max}$  – максимальная температура цикла, К;
21.  $(dp/d\varphi)$  – скорость нарастания давления в цилиндре, МПа/градус;
22.  $\chi$  – полное тепловыделение от сгорания топлива;
23.  $\chi_i$  – активное тепловыделение;
24.  $(d\chi/d\varphi)$  – относительная скорость активного тепловыделения, 1/градус;
25.  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость
26.  $\eta_e$  – эффективный коэффициент полезного действия;
27.  $sR$  – удельная рефракция,
28.  $G_T$  – часовой расход топлива, кг/ч;

29.  $N_e$  – эффективная мощность дизеля, кВт;
30.  $M_k$  – крутящий момент дизеля, Н×м;
31. МЭС - мобильных энергетических средств
32. ТО – техническое обслуживание
33. СТД - средства технической диагностики
34. ИП - измерительный преобразователь
35.  $n_D$  – показатель преломления
36.  $MR$  - молекулярная рефракция
37.  $Q_n$  - низшей теплоты сгорания
38. ЭТЭ – этанола-топливная эмульсия

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Указ Президента России от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».
2. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации
3. Государственная программа Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (далее – ГП НТР, госпрограмма)
4. Указом Президента России от 25 апреля 2022 г. № 231 в 2022 году в Российской Федерации объявлено Десятилетие науки и технологий (далее – Десятилетие, ДНТ)
5. Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 1734-р от 22.11.2008
6. Шипин А.И. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторного дизеля путем применения многокомпонентных биотоплив: диссертация ... кандидата технических наук : 05.04.02 // Шипин Александр Игоревич. – СПб., 2023 – 154с.
7. Экспресс-методы тестирования композиционных продуктов нефтепромышленной химии и моторных топлив: монография / В.Ф. Николаев - Казань: Изд-во Казан. нац. исслед. технол. ун-та, 2012.-125 с.
8. Камфер Г.М., Болотов А.К., Плотников С.А. Расчетная оценка цетановых чисел спирто-топливных смесей. //Улучшение показателей автомобильных и тракторных двигателей – М.: Тр. МАДИ, 1990. - С. 59-64.
9. Камфер Г.М. Научные основы эффективного применения топлив различного состава в автотракторных дизелях. Дисс. д-ра техн. наук: 05.04.02. М.: РГБ, 2005.
10. Камфер Г.М., Плотников С.А. Математическое моделирование процесса сгорания спиртосодержащего топлива в дизеле. – Киров: ООО «Авангард, 2005. – 106 с., ил.
11. Пляго А.В. Улучшение эффективных и экологических показателей автотракторного дизеля путем координирования эксплуатационных свойств высококонцентрированных этанола-топливных эмульсий: диссертация ... кандидата

- технических наук : 05.04.02 // Пляго Анатолий Веславович. – Нижний-Новгород, 2021. – 159 С.
12. Кутушев И.Р., Николаев В. Ф., Диаров И.Н., Варшавский О.М. // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Сборник материалов XV Всероссийской межвузовской конференции. Часть II. – Казань: Михайловский военный артиллерийский университет 20 – 22 мая 2003. – 103 с., ил.
  13. Применение этанола в дизелях / А.Н. Карташевич [и др.]. – Горки : БГСХА, 2023. – 151 с. :
  14. Шароглазов Б.А., Сафаров М.Ф. Моделирование параметров дизелей при работе на режимах внешней скоростной характеристики // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. № 5 (50). С. 80-82.
  15. Шароглазов, Б.А. Анализ рабочего цикла дизеля при пуске по индикаторной диаграмме / Б.А. Шароглазов, В. В. Шишков // Двигателестроение. - 1993. - № 3.-С. 3-12.
  16. Шароглазов, Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев; под ред. засл. деят. науки РФ Б.А. Шароглазова. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. -130 с.
  17. Шароглазов Б.А., Машков О.Г., Мартынов А.А. Оценка параметров агрегата турбонаддува поршневого транспортного двигателя на базе безмоторных испытаний / Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 74-78.
  18. Шароглазов Б.А., Попов А.Е. Уравнение для расчёта отношений теплоемкостей рабочего тела в транспортных дизелях / Транспорт Урала. 2011. № 3 (30). С. 81-83.

19. Шароглазов Б.А., Шишков В.В., Попов А.Е. Оценка численных значений коэффициента избытка воздуха при низкотемпературном пуске дизелей с использованием разогрева впускного заряда / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2009. № 11 (144). С. 64-67.
20. Шароглазов Б.А., Закомолдин И.И. Численная оценка температур деталей цилиндропоршневой группы двигателей воздушного охлаждения / Двигательостроение. 2009. № 3 (237). С. 13-18.
21. Улучшение экологических и экономических показателей дизеля за счёт изменения структуры водо-топливной эмульсии: диссертация. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Али Махмуд Али Аттия. М.: ВлГУ, 2012. - 133 с.
22. Численное моделирование параметров рабочего цикла комбинированной энергетической установки применительно к режимам полных нагрузок : для целей предпроектных, проектных и доводочных работ : диссертация ... кандидата технических наук: 05.04.02 / Машков Олег Григорьевич; [Место защиты: Юж.-Ур. гос. ун-т]. - Челябинск, 2017. - 136 с.: ил.
23. Экспресс-методы тестирования композиционных продуктов нефтепромышленной химии и моторных свойств / В.Ф. Николаев - Казань: Изд-во Казан. нац. исслед. технол. ун-та, 2012.-125 с.
24. Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Романцова С.В. О молекулярном составе биодизельного топлива. // Вестник МичГАУ, 2013. - № 3. – С. 70-73.
25. Романцова С.В., Корнев А.Ю., Нагорнов С.А., Ликсутина А.П. Физико-химические свойства биодизельного топлива и способы их изменения. // Наука в центральной России, 2019. - № 5(41). – С. 110-118.
26. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.04.02 / Кулешов Андрей Сергеевич; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. - Москва, 2011. - 32 с.
27. Методы определения состава и модели описания физико-химических и эксплуатационных свойств многокомпонентных смесей: Учебное пособие/ В.Ф.

- Николаев, Р.Б. Султанова, А.И. Пеньковский, В.И. Гаврилов - Казань: Изд-во Казанск. гос. тех-нол. ун-та, 2008. - 178 с.
28. Иоффе Б.Ф. Рефрактометрические методы химии. 3-е изд., перераб., Л.: Химия, 1983. – 352 с., ил.
29. Верещагин, А.Л. Рефрактометрический анализ. Методические рекомендации к лабораторным работам по курсу «Физическая химия» и «Физическая химия и коллоидная химия» для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки и специальностей / А.Л. Верещагин, С.С. Балабанова; Алт. гос. техн. ун, БТИ. – Бийск: Изд-во. Алт. гос. техн. ун, 2018.- 31 с.
30. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В., Кантор П.Я. Связь удельной рефракции с максимальной нарастания давлением цикла. // Будущее технической науки: сб. мат. XXIII Всеросс. молодежн. науч.-техн. конф.; Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2024. - С. 484-486.
31. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» В.П. Алексеев, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 288 с., ил.
32. Дебай П. Полярные молекулы. Пер. Щодро К., ГОНТИ, 1931.
33. Сканави Г.И. Физика диэлектриков. М., Гостехиздат, 1949.
34. Фрелих Г. Теория диэлектриков. М., ИИЛ. 1960.
35. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. М., ИИЛ. 1960.
36. Браун В.Ф. Диэлектрики. М., ИИЛ. 1961.
37. Шахпоронов М.И. Методы исследования теплового исследования молекул и строение жидкости. Изд. МГУ, 1963.
38. Богородский Н.П. Волакобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М. Теория диэлектриков. М., «Энергия», 1965.
39. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М., Издательство стандартов, 1972. – 431 с.

40. Николаенко А.В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей.— М.: Колос, 1984. — 335 с., и л.— (Учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. заведений).
41. Мильденберг А.Ю., Кожаев А.В. Разработка метода экспресс-контроля качества моторного масла на базе его диэлектрической проницаемости / В сборнике: ИЗБРАННЫЕ ДОКЛАДЫ 64-Й УНИВЕРСИТЕТСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ. Сборник докладов. 2018. С. 363-366.
42. Плотников С.А., Гневашев П.В., Заболотских Г.Э., Шишкин Г.П., Кантор П.Я., Карташевич А.Н. Расчет максимального давления цикла при работе дизеля («P<sub>z</sub> – экспресс») //Свидетельство об офиц. регистр. прогр. для ЭВМ № 2024613086 от 08.02.2024.
43. Плотников С.А., Гневашев П.В., Заболотских Г.Э., Шишкин Г.П., Кантор П.Я., Карташевич А.Н. Расчет жесткости процесса сгорания при работе дизеля. //Свидетельство об офиц. регистр. прогр. для ЭВМ №2024613184 от 08.02.2024.
44. Смольников М.В. Улучшение показателей применяемости альтернативных топлив с добавками этанола в автотракторных дизелях: диссертация ... кандидата технических наук: 05.04.02 // Смольников Михаил Владимирович. – Нижний-Новгород, 2020. – 173 С.
45. ГОСТ Р 55878-2013. Спирт этиловый технический гидролизный ректифицированный. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2014. - 20 с.
46. Единая система электронных вычислительных машин. Операционная система ФОРТРАН 4. Описание языка. Ц51.804.001 – 01Д18, 1979. – 166 с.
47. Лазурько В.П., Кудрявцев В.А. Программа обработки индикаторных диаграмм дизелей на алгоритмическом языке «Базисный фортран». – Тр. ЦНИДИ, Вып. 68. – 1975.
48. ГОСТ 3900-85 Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 36 с.

49. ГОСТ Р 8.830-2013 Оптическая плотность фотоматериалов. Методика измерения. – М.: Изд-во стандартов, 2014. - 15 с.
50. ГОСТ 18995.2-2022 Продукты химические жидкие. Метод определения показателя преломления. – М: Российский институт стандартизации, 2022.- 3 с.
51. Плотников С.А., Смольников М.В., Гневашев П.В., Кантор П.Я., Шишкин Г.П., Пляго А.В. Способ определения показателя преломления этанола-топливной эмульсии. - Патент РФ № 2835685, СПК G01N 21/41. – 3С., 1 табл.
52. Мушаилов М.Р. Определение диэлектрической проницаемости газовых растворов воды, используемых в энергетике, и составление справочных таблиц: Автореф. дис.. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1988.
53. Курунина, Г. М. Рефрактометрический метод анализа [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г.М. Курунина ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 535,86КБ). – Волжский, 2020. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.
54. Справочник химика. Том 2. Химия и химическая технология / Б.П. Никольский [и др.]. Под ред. Б.П. Никольского. Л.: Химия, 1971. - 157 с.
55. Корицкий Ю.В. Основы физики диэлектриков: Учебник для электромеханических техникумов. – М.: Энергия. – 248 с., ил.
56. ГОСТ 18509-88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. – М.: Стандартиформ, 1988. – 128 с.
57. Мотовилова М.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторного дизеля путем предварительного подогрева топлива: диссертация ... кандидата технических наук : 05.04.02// Мотовилова Марина Владимировна. – СПб., 2022 – 154с.
58. Руководство по эксплуатации ТУАС.406233.001 РЭ Датчик давления PS01, 2016.
59. Описание и руководство к использованию. Рефрактометр ИРФ-55, 1959.
60. Свешников, А.А. Основы теории ошибок /А.А. Свешников – Л.: ленинградский университет, 1972. – 126 с.

61. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
62. Гоц, А.Н. Погрешности измерений при экспериментальных исследованиях двигателей внутреннего сгорания: Учеб. пособие / А. Н. Гоц, Ю.Г. Горнушкин – Владимир: ВГУ, 2003. – 64 с.
63. Калинина, В.Н., Математическая статистика /В. Н. Калинина, В.Ф. Панкин – М.: Высш. шк., 1998. – 336 с.
64. Плотников С.А., Гневашев П.В., Шишкин Г.П., Карташевич А.Н. Зондирование составов альтернативных топлив с целью определения электрических параметров. // Инженерные технологии и системы, 2024. – Т.1. – № 1. – С. 378-390.
65. Плотников С.А., Шишкин Г.П., Смольников М.В., Гневашев П.В., Кутергин Н.Ю. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив с добавкой этанола. Международный научно-технический журнал «Транспорт на альтернативном топливе» № 6 (90)/ 2022г.
66. Плотников С.А., Гневашев П.В. Экспресс-методы оценки моторных свойств дизельных топлив. // Тракторы и сельхозмашины, 2021. - № 2. - С. 16-20.
67. Плотников С.А., Шишкин Г.П., Резник Е.Н., Гневашев П.В. Смольников М.В. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств топлив для сельскохозяйственной техники. //Вестник РГАТУ, 2021. - № 2 (13). – С. 110-115.
68. Плотников С.А., Гневашев П.В. Безмоторные экспресс-методы оценки свойств дизельных топлив. Будущее технической науки: сборник материалов XX Всероссийской молодежной научно-техн. конф. Посвящённой 800-летию Нижнего Новгорода; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2021. – С. 212-213.
69. Плотников С.А., Гневашев П.В., Карташевеч А.Н. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив. Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В. Р. Петровец [и др.]. – Горки : БГСХА, 2021. – Вып. 6. – С. 230-235

70. Плотников С.А., Гневашев П.В. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив. Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2022. – Вып. 7. – С. 176-179.
71. Смольников М.В., Плотников С.А., Сергеев Д.Г., Гневашев П.В. Предпосылки российских учёных в оценке экспресс-методом моторных свойств топлив для ДВС. ИННОВАЦИИ (НПК-2022) [Электронный ресурс] : сб. статей : XXII Всерос. ежегод. науч.-практ. конф., 11–29 апреля 2022 г. – Киров : [Науч. изд-во ВятГУ], 2022. – Том 2 - С. 440-444.
72. Смольников М.В., Плотников С.А., Гневашев П.В. Анализ промежуточных итогов при безмоторной оценке экспресс-методом свойств биотоплив. Будущее технической науки: сборник материалов XXI Всероссийской молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. – 246 с.
73. Смольников М.В., Плотников С.А., Гневашев П.В. Безмоторный метод оценки альтернативных топлив. Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: сб. материалов VI Междунар. Науч. Конф. Молодых учёных, Гродно, 2 июня 2022 г. / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: А.С. Воронцов (отв. Ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2022. – 124-129.
74. Смольников М.В., Плотников С.А., Гневашев П.В. Безмоторная оценка экспресс-методом свойств биотоплив на основе трёх компонентов. Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2023. – Вып. 8. – 265-268 с.
75. Плотников, С. А. Применение показателя рефракции в определении свойств жидких моторных топлив = Application of the refraction index in determining the properties of liquid motor fuels / С. А. Плотников, М. В. Смольников, П. В.

- Гневашев П.В // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов: в 2 томах. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 145-148.
76. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003 – 244 с.
77. Плотников С.А., Смольников М.В., Плотников С.А., Гневашев П.В. Результаты электрических измерений углеродосодержащих смесей с дизельным топливом. Будущее технической науки: сборник материалов XXII Всероссийской молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. – 369-370 с.
78. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В. Промежуточные результаты электрических измерений смесей растительных масел с дизельным топливом. Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2024. – Вып. 9. – 263-266 с.
79. Карташевич А.Н., Плотников С.А., Смольников М.В., Бажан П.И., Миронов А.А. Оптимизация системы топливоподачи тракторного дизеля для работы на топливах с добавками этанола. //Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева: Нижний Новгород, 2019. - № 1 (124). – С. 186 - 193.
80. Плотников С.А., Карташевич А. Н., Шипин А.И., Смольников М.В. Оценка регулировочных показателей двигателя сельскохозяйственных транспортных средств при применении многокомпонентных биотоплив. //Вестник РГАТУ, 2021. - № 1 (13). – С. 149-155.
81. Плотников С.А., Смольников М.В. Козлов И.С. Определение оптимального установочного угла опережения впрыскивания состава с рапсовым маслом при работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5. Будущее технической науки: сборник материалов XIX Всероссийской молодежной научно-техн. конф. Посвящённой 75-летию Победы в Великой Отечественной войне; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. – С. 182-183.

82. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Заболотских Г.Э. Определение рациональных регулировок топливоподающей аппаратуры дизеля при работе на биоминеральных топливных смесях. // Грузовик, 2024. - № 2. – С. 16-20.
83. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Черемисинов П.Н. Определение оптимальных регулировок системы топливоподачи двигателя 4Ч 11,0/12,5 при работе на смесях рапсового масла с дизельным топливом. ОБЩЕСТВО, НАУКА, ИННОВАЦИИ. (НПК-2017) [Электронный ресурс] //Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 01-29 апреля 2017 г. /Вят. гос. ун-т. – Киров, 2017. – С. 1841–1848.
84. Пляго А.В. Исследование работы топливной аппаратуры и дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в целом на спиртосодержащих топливах. // Будущее технической науки: сборник материалов XVII Международной молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. - С.168-169.
85. Сгорание в поршневых двигателях. Броне Д.Д. М., «Машиностроение», 1969, 248 с.
86. Плотников С.А., Гневашев П.В., Смольников М.В., Шишкин Г.П. Идентификация максимального давления цикла безмоторным методом на основе удельной рефракции. // Известия МГТУ «МАМИ», Том 17, № 4, 2023. – С. 331-337.
87. Марков В.А., Патрахальцев Н.Н. Спиртовые топлива для дизельных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе, 2009. - № 6. - С. 40-46.
88. Этиловый спирт в моторном топливе / В.П. Баранник [и др.]. Под ред. В.В. Макарова. М.: ООО «РАУ-Университет», 2005. 184 с.
89. Плотников С.А., Черемисинов П.Н., Бажан П.И., Захаров Л.А. Исследование процесса сгорания дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе с добавкой рапсового масла. //Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева: Нижний Новгород, 2018. - № 4 (123). – С. 249-256.

90. Плотников С.А., Смольников М.В., Гневашев П.В., Шишкин Г.П. Связь диэлектрической проницаемости с максимальной скоростью нарастания давления. // Будущее технической науки: сб. мат. XXIII Всеросс. молодежн. науч.-техн. конф.; Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2024. - С. 492-493.
91. Саблина З.А., Широкова Г.Б., Ермакова Т.И. Лабораторные методы оценки свойств моторных и реактивных топлив. – М.: Химия, 1978. – 240., ил.
92. Автомобильные двигатели. Под ред. М.С. Ховаха. М., А22 «Машиностроение», 1977.
93. Плотников С. А., Смольников М. В., Гневашев П. В. Сравнение теоретических и экспериментальных данных показателей рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 // Общество. Наука. Инновации (НПК2024): сб. ст.: XXIV Всерос. науч.-практ. конф., 23 апреля – 25 апреля 2024 г.: в 2 т. Т. 2. Химико-биологические, технические и физико-математические науки. – Электрон. текстовые дан. – Киров: Вятский государственный университет, 2024. С. 132-135.
94. Smth C.P. Dielectric behaviour and structure, New York, 1955.
95. Bottcher C,O,A, Theory of electric polarization. New York, 1952.
96. Davies M. Some electrical and optical aspects of molecylar behaviour, New York, 1965.
97. Onsager L.J. Amer. Chem. Soc., 1936
98. Higasi K. Dipole, molecule and chemistry, Sappore (Japan), 1965.
99. Ladommatos N., Goacher J. Equations for predicting the cetane number of diesel fuels from their physical properties// Fuel, 1995, vol. 74, No. 7, pp. 1083-1093
100. J. E. De Souza, V.D. Scherer, J.A.S. Caceres, A.R.L. Caires, J.C. M'Peko. A close dielectric spectroscopic analysis of diesel/biodiesel blends and potential dielectric approaches for biodiesel content assessment// Fuel, 2013, vol. 105, pp. 705-710.
101. J. O. Alvarez, D. Jacobi, S. Althaus, S. Elias. Dielectric characterization of geochemical properties of liquid hydrocarbons from 25°C to 125°C// Fuel, 15 March 2021, vol.288.

- 102.E. Arik, H. Altan, O. Esenturk. Dielectric properties of diesel and gasoline by terahertz spectroscopy// *Journal of infrared, millimeter and terahertz waves*, 06 june 2014, pp 759-769.
- 103.Pérez AT, Hadfield M. Low-cost oil quality sensor based on changes in complex permittivity. *Sensors* 2011;11:10675–90.
- 104.Dario Alviso, Julian Corach A review of electrical properties of biodiesel and its blends: experimental data, prediction models, and applications. January 2023 *Bio-fuels Bioproducts and Biorefining*.
- 105.Julian Corach, Eriel Fernandez Galvan, Patricio Sorichetti, Silvia Daniela Romano. Broadband permittivity sensor for biodiesel and blends. October 2019 *Fuel* 254(3):11579.
- 106.Julian Corach, Eriel Fernandez Galvan, Patricio Sorichetti, Silvia Daniela Romano. Estimation of the composition of soybean biodiesel/soybean oil blends from permittivity measurements. January 2019 *Fuel* 235(2):1309
- 107.D. El Khaled, Nuria Novas, Jose A. Gazquez Parra, Rosa Garcia. Alcohols and alcohols mixtures as liquid biofuels: A review of dielectric properties. December 2016 *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66(4):556-571
- 108.Dario Alviso. Regression equations of the biodiesel permittivity from its composition, molecular structure, and temperature. April 2022 *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 44(4)
- 109.Christian Diniz Carvalho, Allan Kardec Duailibe Barros Filho, Marcus Vinicius Lopes, Fernando C. Silva, Ewaldo Santana, Francisco Sávio Mendes Sinfrônio. Determination of the Composition of Biodiesel-Diesel Blends Using the Dielectric Constant. December 2015 *Instrumentation Science & Technology*.
- 110.Patricio Sorichetti, Martina Colman, Silvia Daniela Romano. Refractive index of biodiesel-diesel blends from effective polarizability and density. January 2018 *Fuel* 211(211):130-139.
- 111.Irina Nita, Osman Geacai Sibel, Neagu Anișoara-Arleziana, Elis Geacai. Estimation of the refractive index of diesel fuel+biodiesel blends. October 2013 *Analele Universitatii Ovidius Constanta - Seria Chimie* 24(1)

112. Nicolás Figueroa Semorile, Dario Alviso, Silvia Daniela Romano. Universidad de Buenos Aires Flash point and refractive index measurements of diesel and bio-diesel, and their binary blends with n-butanol and n-pentanol. December 2022 *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 45(1).
113. Siti Norhafiza Mohd Khazaai, Prakash Bhuyar, Mohd Hasbi Ab. Rahim, Muhammad Hasnol Fazirin Mohd Alwi, Sih Yiting, Gaanty Pragas Maniam. Rapid determination of diesel/biodiesel blend ratio using refractive index, density, and kinematic viscosity measurements. September 2021 *Biomass Conversion and Biorefinery* 13(12):3
114. Boniphace Kanyathare, Kai-Erik Peiponen. Hand-Held Refractometer-Based Measurement and Excess Permittivity Analysis Method for Detection of Diesel Oils Adulterated by Kerosene in Field Conditions. May 2018 *18 (5)*
115. Osman Geacai Sibel, Irina Nita, Olga Iulian, Elis Geacai. Refractive indices for biodiesel mixtures. January 2012 *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 74(4):149-160
116. Dario Alviso, Silvia Daniela Romano. Prediction of the refractive index and speed of sound of biodiesel from its composition and molecular structure. November 2021 *Fuel* 304(2):120606
117. Patricio Sorichetti, Martina Colman, Silvia Daniela Romano. Refractive index of biodiesel-diesel blends from effective polarizability and density. January 2018 *Fuel* 211(211):130-139
118. Irina Nita, Osman Geacai Sibel, Olga Iulian. Measurements and correlations of physico-chemical properties to composition of pseudo-binary mixtures with bio-diesel. December 2011 *Renewable Energy* 36(12):3417-3423
119. Satish Shah. Property Prediction of Jatropha Oil based Biodiesel – Petro-diesel blends using Refractive Indices. January 2021

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. Договор о научно-техническом сотрудничестве.****ДОГОВОР** *№ 1/21*  
**о научно-техническом сотрудничестве***от 01.01.2021*

г. Горки

г. Киров

Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» в лице ректора Великанова Виталия Викторовича, действующего на основании Устава, и федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», в лице ректора Пугача Валентина Николаевича, действующего на основании Устава, совместно именуемые «Стороны», с целью внедрения новых методов обучения, повышения качества учебного процесса, проведения научных исследований, углубления связей в отрасли культуры, упрочнения хозяйственного, научного и культурно-образовательного сотрудничества между сторонами заключили настоящий Договор о нижеследующем.

**1. Предмет Договора**

1.1. Предметом настоящего договора является научно-техническое сотрудничество Сторон по следующим направлениям:

1.1.1. Участие Сторон в совместных мероприятиях научно-исследовательского и научно-производственного характера по вопросам применения альтернативных видов топлив и направлениям улучшения эксплуатационных показателей энергетических установок наземных транспортных средств.

1.1.2. Разработка теоретических блоков и проведение экспериментальных исследований по вопросам улучшения эксплуатационных показателей энергетических установок наземных транспортных средств.

1.1.3. Совместное написание научных статей высокого уровня, монографий, учебных пособий, оформление заявок на выдачу патентов и авторских свидетельств.

1.1.4. Обмен преподавателями, аспирантами и докторантами с целью участия в научных конференциях, семинарах, симпозиумах и других мероприятиях, проводимых обеими сторонами.

1.2. Стороны могут привлекать финансовую поддержку различных организаций, предприятий, региональных структур, а также международных фондов.

2. Настоящий договор определяет общую цель и этапы сотрудничества между сторонами в соответствии с календарным планом. Договаривающиеся стороны будут решать общие задачи в учебно-методической и научно-исследовательской работе в сфере улучшения эксплуатационных показателей наземных транспортных средств

**2. Обязательства сторон**

2.1. Стороны договора обязуются принять участие в конкурсе инициативных научных проектов 2021 – 2023 годов, проводимом совместно РФФИ и Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований.

2.2. Стороны обязуются принять участие в совместном написании научных статей, монографий, учебных пособий, оформлении заявок на выдачу патентов и авторских свидетельств.

2.3. Настоящий Договор не накладывает на Стороны никаких финансовых обязательств на учебные заведения, которые его подписали, но каждый партнер обязывается проявить инициативу для того, чтобы получить финансовые средства для обеспечения реализации этого договора.

### 3. Сроки действия Договора

3.1. Договор вступает в силу с момента его подписания и действует до 31.12.2023.

### 4. Порядок расторжения Договора

4.1. Досрочное расторжение Договора может иметь место по соглашению сторон либо по основаниям, предусмотренным действующим на территории Республики Беларусь, либо на территории Российской Федерации, гражданским законодательством.

### 5. Календарный план работы по договору

Номер этапа	Наименование вида работ	Сроки	
		начало	окончание
1	2	3	4
1.	Анализ научно-технической литературы, патентных источников по современному состоянию вопросов использования альтернативных видов топлив, создания новых топлив с улучшенными эксплуатационными свойствами. Взаимные консультации и обмен имеющимися данными.	01.01.2021	30.06.2021
2.	Разработка и совершенствование методик проведения испытаний с применением альтернативных топлив.	01.07.2021	31.12.2021
3.	Проведение лабораторных исследований моторных свойств новых образцов альтернативных топлив, разработка конструкций деталей и систем энергетических установок с улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами. Разработка теоретических блоков улучшения эксплуатационных показателей энергетических установок.	01.01.2022	30.06.2022
4.	Проведение стендовых испытаний энергетических установок наземных транспортных средств при работе на новых видах и составах альтернативных топлив с улучшенными эксплуатационными свойствами.	01.07.2022	31.12.2022

5.	Проведение эксплуатационных испытаний транспортных средств при работе на новых видах и составах альтернативных топлив с применением образцов деталей и систем с улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами.	01.01.2023	31.12.2023
----	--	------------	------------

### 6. Особые обстоятельства

6.1. Ни одна из сторон не несет ответственности перед другой стороной за задержку или невыполнение обязательств по настоящему договору, обусловленных обстоятельствами, возникшими помимо воли и желания Сторон и которые нельзя предвидеть или избежать, включая объявленную или фактическую войну, гражданские волнения, эпидемии, блокаду, эмбарго, землетрясения, наводнения, пожары и другие стихийные бедствия.

6.2. Сторона, которая не исполняет своего обязательства, должна дать извещение другой стороне о препятствии и его влиянии на исполнение обязательств по Договору.

### 7. Заключительные положения

7.1. Любые изменения и дополнения к настоящему договору действительны лишь при условии, что они совершены в письменной форме и подписаны уполномоченными на то представителями сторон.

Документы, отправленные по электронной почте, имеют юридическую силу для обеих Сторон с последующей заменой их на оригиналы.

7.2. Настоящий договор составлен в двух экземплярах на русском языке. Оба экземпляра идентичны и имеют одинаковую силу. У каждой из сторон находится один экземпляр настоящего договора.

### 8. Подписи и реквизиты сторон

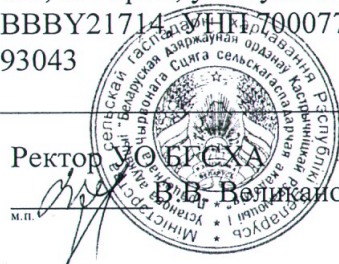
**ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»**  
Россия, 610000 г. Киров ул. Московская, 36, ИНН 4346011035/ КПП 434501001  
УФК по Кировской области (ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ВятГУ, Вятский государственный университет л/с 20406Х65110) Отделение Киров, г. Киров БИК 043304001, кор. счета нет. Р/с 40501810300002000002

Ректор ФГБОУ ВО ВятГУ  
В.Н. Пугач

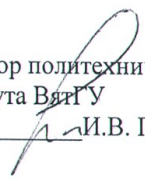


**УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»**  
Республика Беларусь, 213407, Могилевская обл, г. Горки, ул. Мичурина, 5,  
р/с BY25AKBB36329000012567300000 в ЦБУ № 708 филиала №714 ОАО «АСБ Беларусбанк», г. Горки, ул. Куйбышева, 3, БИК АКВВВY21714, ИНН 700077852, ОКПО 00493043

Ректор УО БГСХА  
В.В. Великанов



Директор политехнического  
института ВятГУ

  
И.В. Губин

Начальник правового  
управления ВятГУ

  
А.Л. Веселкова

И.О. зав. каф. «Технология  
машиностроения» ВятГУ

  
Д.Г. Сергеев

Профессор каф. «Технология  
машиностроения» ВятГУ

  
С.А. Плотников

Согласовано:

Проректор по научной  
работе БГСХА

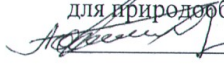
  
Ю.Л. Тибец

Декан факультета механизации  
с.-х. БГСХА


  
В.В. Гусаров

Исполнители:

Зав. каф. «Тракторы, автомобили и машины  
для природообустройства» БГСХА

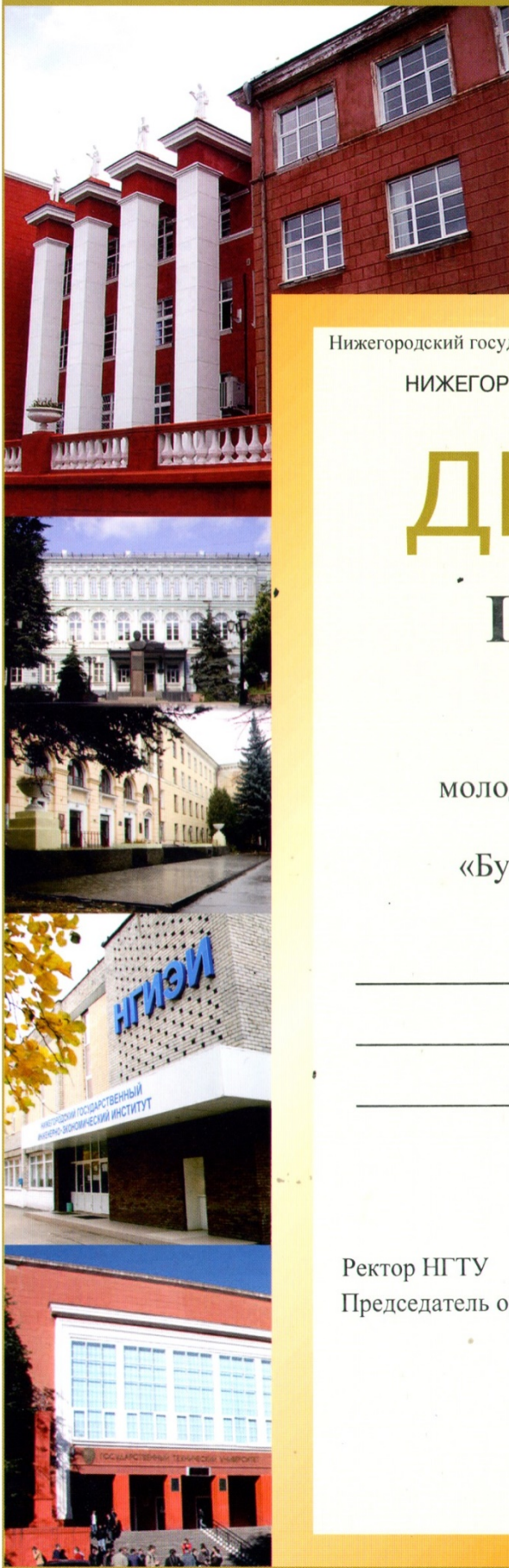
  
А.Н. Карташевич

Ст. преподаватель каф. «Тракторы, автомобили  
и машины для природообустройства» БГСХА

  
П.Ю. Малышкин

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Дипломы и сертификаты.**





Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

НИЖЕГОРОДСКИЙ ОБЛАСТНОЙ СОВЕТ ПО НИРС

# ДИПЛОМ I СТЕПЕНИ

участнику  
XX Всероссийской  
молодежной научно-технической  
конференции  
«Будущее технической науки»

*Гневашеву*

*Павлу*

*Вячеславовичу*

Ректор НГТУ

Председатель оргкомитета



*С.М. Дмитриев*

Нижний Новгород  
21 мая 2021

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ



УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКАЯ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

# СЕРТИФИКАТ

участника Международной научно-практической конференции

**Гневашев**

**Павел Вячеславович**

**«ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕХАНИЗАЦИИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА»**

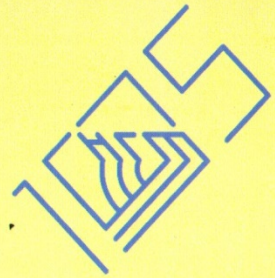
посвященная памяти выдающегося ученого, педагога, академика,  
заслуженного деятеля науки и техники БССР С.И. Назарова



Ректор

**В. В. Великанов**

Горки, 25–26 ноября 2021 г.



Нижегородский областной Совет по НИРС  
Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е. Алексеева

# ДИПЛОМ III степени

участнику  
XXI Всероссийской молодежной  
научно-технической конференции  
«Будущее технической науки»,  
посвященной 105-летию  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

*Гневашев П.В.*

Ректор



С.М. Дмитриев



г. Нижний Новгород, 27 мая 2022 г.



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКАЯ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА



# СЕРТИФИКАТ

выдан участнику

Международной научно-практической конференции  
«ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ  
И МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА»

Гневашеву

Павлу Вячеславовичу

посвященная памяти выдающегося ученого, педагога, академика,  
заслуженного деятеля науки и техники БССР С.И. Назарова  
и 75-летию создания факультета механизации сельского хозяйства

Ректор УО «БГСХА»



В.В. Великанов

Горки, 29 ноября – 1 декабря 2022 г.



125  
— НГТУ им. Р.Е. Алексеева



**приоритет2030<sup>+</sup>**  
лидерами становятся



**Передовые  
инженерные  
школы**

НИЖЕГОРОДСКИЙ ОБЛАСТНОЙ СОВЕТ ПО НИРС

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

# ДИПЛОМ III степени

участнику XXII Всероссийской молодежной научно-технической  
конференции  
"Будущее технической науки"

**Гневашеву  
Павлу Вячеславовичу**

Председатель оргкомитета  
ректор НГТУ



С.М. Дмитриев

Нижний Новгород

24-26 мая 2023

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

# СЕРТИФИКАТ



участника  
Международной



научно-практической конференции  
«ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В  
ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕХАНИЗАЦИИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО  
ПРОИЗВОДСТВА»

посвященная памяти выдающегося ученого, педагога,  
академика, заслуженного деятеля науки и техники БССР

**С.И. Назарова**

выдан

***Гневашеву Павлу Вячеславовичу***

Ректор академии

**В.В. Великанов**



**30 ноября 2023 г.**

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА



# ДИПЛОМ

## I степени

в XXIII Всероссийской молодежной  
научно-технической конференции  
«БУДУЩЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ НАУКИ»

НАГРАЖДАЕТСЯ

**Гневашев**

**Павел Вячеславович**

**Ректор**

**С.М. Дмитриев**

31.05.2024 г.

приоритет2030  
идеи становятся реальностью

Персональные  
инженерные  
школы



**ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты внедрения.****ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Политехнический институт

СОГЛАСОВАНО

Проректор по науке и инновациям

С.Г. Литвинец

« 12 » 12 2023 г.

СОГЛАСОВАНО

Проректор по образованию

С.В. Никулин

« 12 » 12 2023 г.

**АКТ**

Об использовании (внедрении) результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан факультета технологий, инжиниринга и дизайна Лисовский В.А., заведующий кафедрой технологии машиностроения Сергеев Д.Г. составили настоящий акт о том, что результаты госбюджетной научно-исследовательской работы «Разработка безмоторных методов экспериментальных исследований показателей рабочего цикла тепловых двигателей» (исполнитель – аспирант Гневашев П.В.) внедрены (использованы) в учебном процессе: при чтении лекций по дисциплинам «Организация и планирование эксперимента», «Турбомашины и поршневые двигатели», и выполнении выпускных квалификационных работ для студентов и аспирантов, обучающихся по направлениям подготовки 15.04.01. «Машиностроение», 2.4.7. «Турбомашины и поршневые двигатели».

Декан ФТИД

Лисовский В.А.

Зав. кафедрой ТМ

Сергеев Д.Г.



АО «ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ГАЗПРОМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ КИРОВ»

(АО «Газпром газораспределение Киров»)

**ФИЛИАЛ В Г. КИРОВО-ЧЕПЕЦКЕ**

Ул. Революции, д. 4, г. Кирово-Чепецк, Кировская обл.,  
Российская Федерация, 613040  
Тел.: +7 (83361) 463-39, факс: +7 (83361) 463-39  
E-mail: info.chepetsk@gpgrkirov.ru  
ОКПО 03273945, ОГРН 1024301312881, ИНН 4346006589, КПП 431202001

№ \_\_\_\_\_  
на № 5 от 14.12.2023

АКТ

о внедрении результатов научных исследований

Комиссия в составе представителей филиала АО «Газпром газораспределение Киров» в г. Кирово-Чепецке:

1. Гл. механика Кутергин Н.Ю.
2. Механика Чураков В.В.

подтверждает, что результаты научно-исследовательской работы по определению параметров рабочего процесса автотракторного дизеля путем применения альтернативного топлива (автор – Гневашев П.В.) использованы при диагностировании неисправности двигателей автотранспорта филиала АО «Газпром газораспределение Киров» в г. Кирово-Чепецке.

Гл. механик

Кутергин Н.Ю.

Механик

Чураков В.В.





**МИНИСТЕРСТВО  
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
(Удмуртский ГАУ, УдГАУ)

Удмуртская Республика,  
Студенческая ул., д. 11, Ижевск г., 426069,  
тел.(3412) 58-99-48, факс 58-99-47  
e-mail: [info@udsau.ru](mailto:info@udsau.ru),  
<https://udsau.ru>  
ОКПО 00493646, ОГРН 1021801172370,  
ИНН/КПП 1831036505/183101001

№  
на №275/02-6 ИФот 24.01.2024

ФГБОУ ВО [Вятский государствен-  
ный университет](#)

**АКТ**

**Об использовании (внедрении) результатов научно-исследовательской  
работы в учебном процессе**

Настоящий акт составлен о том, что результаты госбюджетной научно-исследовательской работы «Разработка безмоторных методов определения параметров рабочего процесса автотракторного дизеля» (исполнитель – аспирант Гневашев Павел Вячеславович) внедрены (используются) в учебный процесс Удмуртского ГАУ на инженерном факультете при выполнении выпускной квалифицированной работы и чтении лекций по дисциплинам «Мобильные энергетические средства в АПК», «Диагностика и ТО машин» для обучающихся по направлению подготовки 36.03.06 –«Агроинженерия».

Проректор по научной  
работе и стратегиче-  
скому развитию

С.И. Коконов

<b>ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ</b>	
Сертификат:	00E37D458454E0969780AE3120975CA7A4
Владелец:	Коконов Сергей Иванович, ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
Действителен: с 18.01.2024 по 12.04.2025	



Утверждаю  
 Проректор по образованию  
 С.В. Никулин  
 08.02.2024

Акт № 164

**о внедрении программы для ЭВМ  
 на факультете технологий, инженеринга и дизайна**

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024613184 от 08.02.2024 г.

Получено на имя: ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

Название: «Расчет жесткости процесса сгорания при работе дизеля»

Авторы: Плотников С. А., Гневашев П.В., Заболотских Г.Э., Шашкин Г. П., Кантор П. Я., Карташев А. Н.

Настоящий Акт составлен в том, что вышеуказанная программа для ЭВМ внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» и используется по дисциплине «Рабочие процессы в тепловых двигателях» с 2022 года в соответствии с описанным свидетельстве о регистрации.

Использование программы подтверждается наличием ее в составе электронного курса входящего в состав платформы электронных учебных курсов ВятГУ, а также упоминаем разработки в УМКД по соответствующей дисциплине.

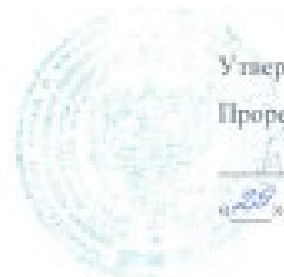
Срок использования программы – 2 года

Декан

Зав. кафедрой

Начальник ОИС

 / В.А. Лисовский /  
 / Д.Г. Сергеев /  
 / М.В. Ковина /



Утверждаю

Проректор по образованию

С.В. Никулин

20.02.2024

Акт № 265

**о внедрении программы для ЭВМ  
на факультете технологий, инженеринга и дизайна**

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024613086 от 08.02.2024

Получено на имя: ФГБОУ ВО «Витебский государственный университет»

Название: «Расчет максимального давления цикла при работе дизеля «Pz – экспресс»

Авторы: Плотников С. А., Гнезашев П.В., Заболотских Г.Э., Шишкин Г. П., Кантор П. Я., Карташевич А. Н.

Настоящий Акт составлен в том, что вышеуказанная программа для ЭВМ внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «Витебский государственный университет» и используется по дисциплине «рабочие процессы в тепловых двигателях» с 2022 года в соответствии с означенном свидетельстве о регистрации.

Использование программы подтверждается наличием ее в составе электронного курса входящего в состав платформы электронных учебных курсов ВитГУ, а также упоминаем разработки в УМКД по соответствующей дисциплине.

Срок использования программы – 2 года

/Декан

Зав. кафедрой

Начальник ОИС

 / В.А. Лисовский /  
 / Д.Г. Сергеев /  
 / М.В. Кожина /



ООО «Промышленная группа ДИМЕТ»  
ИНН 1655377715  
тел./факс: +7 8332 411 511 (многоканальный)  
тел./факс: +7 8332 533 320, 534 420  
www.dimetm.ru

## АКТ

внедрения результатов научных исследований.

Настоящим актом подтверждаем, что материалы работы аспиранта Гневашева Павла Вячеславовича, выполнившего исследования по теме диссертации «Разработка безмоторных методов определения параметров рабочего процесса автотракторного дизеля» использованы при диагностике технического состояния ДВС автопарка ООО "Промышленная группа ДИМЕТ".

Также установлена возможность оценки остаточного ресурса ДВС. Автору даны рекомендации для дальнейшего практического применения научных данных.

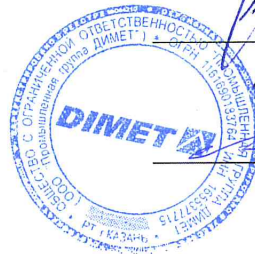
Начальник планово-диспетчерского отдела,

к.т.н.

А. И. Шипин

Директор по производству

А.В. Мельников



18.03.2024 г.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельства о государственной регистрации программ  
для ЭВМ**

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2024613086**

**Расчет максимального давления цикла при работе  
дизеля «Pz – экспресс»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Плотников Сергей Александрович (RU), Гневашев Павел Вячеславович (RU), Заболотских Георгий Эдуардович (RU), Шишкин Геннадий Петрович (RU), Кантор Павел Яковлевич (RU), Карташевич Анатолий Николаевич (BY)*

Заявка № **2024612149**

Дата поступления **08 февраля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 февраля 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024613184

Расчет жесткости процесса сгорания при работе дизеля

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Плотников Сергей Александрович (RU), Гневашев Павел Вячеславович (RU), Заболотских Георгий Эдуардович (RU), Шишкин Геннадий Петрович (RU), Кантор Павел Яковлевич (RU), Карташевич Анатолий Николаевич (BY)*

Заявка № 2024612203

Дата поступления 08 февраля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 февраля 2024 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов