

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Киров

2025

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

Научный руководитель: **Плотников Сергей Александрович**  
доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный изобретатель Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров.

Официальные оппоненты: **Неговора Андрей Владимирович**  
доктор технических наук, профессор  
Заслуженный работник транспорта Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»  
**Бирюков Александр Леонидович**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет»**

Защита состоится «05» декабря 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.033.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» по адресу: 196601, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, лит А. ауд. 2113. Тел. +7(812)470-04-22, e-mail: ds431\_2@spbgau.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://spbgau.ru> ФГБОУ ВО СПбГАУ. Объявление о защите и автореферат размещены на сайтах <https://spbgau.ru> ФГБОУ ВО СПбГАУ и <https://vak.minobrnauki.gov.ru> ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.033.02  
доктор технических наук, профессор



**Огнев Олег Геннадьевич**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

Указом Президента России от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», 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.

Стоит отметить, что большинство исследований применения альтернативных топлив в наземном транспорте проводятся с целью простого определения показателей процесса сгорания, улучшения эффективных или экологических показателей. Чаще всего научные исследования ведутся энергоёмкими методами, определение рациональных составов добавок АТ основывается на показателях экономичности и токсичности энергетических средств.

Разработкой методов определения рациональных составов смесевых биотоплив в настоящее время занимаются такие компании, как John Deere (США), Ricardo (Англия), Komatsu (Япония), Volkswagen, Daimler-Benz A.G. MAN (Германия) и др.

В нашей стране подобными методами исследований занимаются такие учреждения, 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.

### **Связь с планами научных исследований.**

Научные исследования, на основе которых подготовлена настоящая диссертация, были выполнены в Вятском государственном университете и Белорусской государственной сельскохозяйственной академии в 2020...2024 годах. Исследования выполнялись в соответствии с планами НИР ВятГУ и договором о научно-техническом сотрудничестве между ВятГУ и БГСХА № 1 от 01.01.2021.

### **Цель и задачи исследования.**

Цель работы: «Определение рациональных составов альтернативных топлив для автотракторного дизеля на основе их химмотологических показателей»

Для достижения поставленной цели были решены 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.

**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 максимального давления цикла в цилиндре автотракторного дизеля при работе с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла.

4. Впервые предложены теоретические зависимости определения жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе с добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла.

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

**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.

**Положения, выносимые на защиту:**

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.

**Квалификационная формула работы.** Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основе проведенных исследований изложены положения, квалифицируемые как совокупность новых научно обоснованных технических решений, заключающихся в обосновании и разработке способа определения рациональных составов альтернативных топлив для сельскохозяйственной техники на основе их химмотологических показателей.

Предложены теоретические зависимости определения показателей рабочего процесса дизеля при работе добавкой этанола, рапсового масла и сурепного масла, уточнены теоретические зависимости для случая работы дизеля на дизельном топливе. Использование данных зависимостей позволяет оценивать применимость альтернативных топлив в энергоустановках АПК РФ.

Заявлен новый способ определения свойств топлив для сельскохозяйственной техники, новое программное обеспечение.

Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при прогнозировании надежности и долговечности дизелей при работе на АТ.

**Практическая ценность.** 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.

Материалы диссертации использованы в учебном процессе Вятского государственного университета, Удмуртского государственного аграрного университета. Разработанные технические решения использованы на автотранспорте филиала АО «Газпром газораспределение Киров» в г. Кирово-Чепецке, в АО «Промышленная группа ДИМЕТ» в г. Кирове.

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

**Апробация работы.** 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); на Международной научной конференции 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 1 патентом и 2 а.с. РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, общие выводы, список литературы. Работа содержит 155 страниц машинописного текста, в том числе 34 рисунка, 14 таблиц. Список литературы включает 120 наименований, в том числе 26 на иностранных языках. Приведены документы, отражающие уровень практического использования результатов исследований, копии сертификатов, дипломов, а.с.

### ***ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ***

**Во введении** обоснована актуальность способа определения рациональных составов альтернативных топлив для применения в сельскохозяйственной технике на основе их химмотологических показателей, сформулированы научная новизна, цель, задачи, практическая ценность работы, положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор отечественных и зарубежных научно-исследовательских работ по заявленному направлению. Проанализированы известные программные, аппаратные и конструктивные решения. Отмечено, что данной проблеме посвящены работы ученых: Барскова В.В., Карташевича А.Н., Картошкина А.П., Неговоры А.В., Николаева В.Ф., Плотникова С.А., Хакимова Р.Т. и некоторых других. Это означает, что выбранное направление - определение рациональных составов альтернативных топлив на основе их химмотологических показателей - является актуальной научной проблемой.

Во второй главе представлены теоретические предпосылки.

Термин «рефракция» - означает преломление, рефрактометрия - метод исследования свойств веществ, на основе определении показателя преломления, для идентификации химических соединений, количественного и структурного анализа, определения физико-химических параметров веществ.

Показатель преломления принадлежит к числу свойств, определение которых является обязательным для жидких соединений. Для углеводородов или топлив он изменяется в зависимости от химического строения соединений, возрастая в следующем порядке: алканы - алкены - алкилциклопентаны - алкилциклогексаны - алкилбензолы - алкилнафталины.

Формы кривых показатель преломления - состав у двойных систем (рисунок 1), зависят от природы компонентов, их взаимодействия, способа выраженности состава. По удельной рефракции топлива можно судить об энергии и скорости активации частиц в одинаковых условиях реакции. Потенциальная энергия активации частиц топлива может характеризовать величину максимального давления в цилиндре ДВС при сгорании в заданных условиях

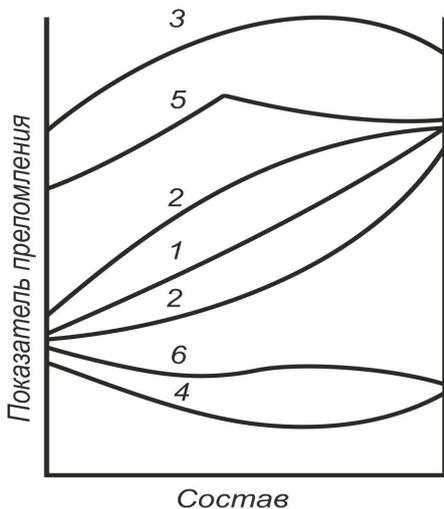


Рисунок 1 - Кривые показатель преломления - состав: 1 - с малой кривизной; 2 - с большой кривизной; 3 - с максимумом; 4 - с минимумом; 5 - с сингулярной точкой; 6 - с точкой перегиба.

Это позволяет предполагать, что удельная рефракция и диэлектрическая проницаемость связаны между собой, а характер их изменения близок к показателям, оценивающим работу внутри цилиндра. По значению молекулярной рефракции ( $MR$ ) можно подсчитать теплоту сгорания алканов, так как отношение теплоты

сгорания к молекулярной рефракции - Const - 33,6. Из сказанного видно, что удельная рефракция  $sR$  топлив тесно связана с максимальным давлением цикла  $P_z$  при работе дизеля, для различных топлив значения  $P_z$  будут считаться:

1. Для товарного нефтяного топлива:

$$P_z = -8.754 + 43.943 sR \quad (1)$$

2. Для состава АТ с добавлением СурМ:

$$P_z = 26,175 + 18,886 \ln(sR) . \quad (2)$$

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

$$P_z = 10.628 - 0.01425 C \quad (3)$$

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

3. Для состава АТ с добавлением РМ:

$$P_z = 29,238 + 16,922 \ln(sR) \quad (4)$$

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

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

$$P_z = 10,613 - 0,01464C \quad (5)$$

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:

$$P_z = -1,507 \cdot 10^{-4} C^2 + 0,0237C + 10,413 \quad (6)$$

Формула определения  $P_z$  для составов АТ с добавлением этанола:

$$P_z = 99,169 + 80,114 \ln(sR) \quad (7)$$

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

По величине низшей теплоты сгорания оценивают энергетические возможности топлива, его влияние на экономическую эффективность. Проводя анализ между всеми ранее рассмотренными показателями можно сказать, что относительная удельная рефракция связана с молекулярной рефракцией, а та, в свою очередь, связана с низшей теплотой сгорания топлива. От низшей теплоты зависят максимальное давление цикла  $P_z$ , жесткость  $(dp/d\varphi)_{max}$  и т.д.

Показатель преломления углеводородов позволяет судить об их строении и о составе смесей, так как для химического соединения при определенной температуре он постоянен, а для смесей — аддитивен. По показателю преломления двухкомпонентного раствора можно установить его концентрацию. Точность определяется соотношением между точностью измерения и разницей показателей преломления компонентов, зависит от формы кривой (рисунок 2).

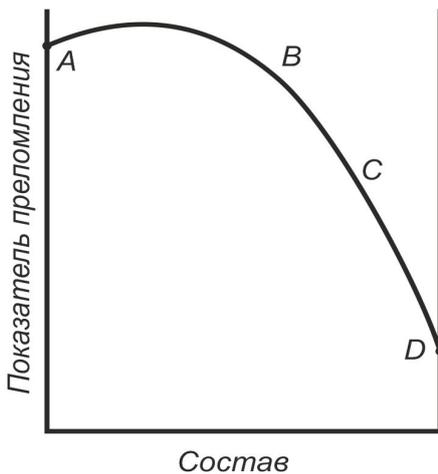


Рисунок 2 - Рефрактометрический анализ двойных систем в случае экстремума на кривой

Диэлектрическая проницаемость — способность вещества накапливать энергию. Она связана с удельной рефракцией, но, в силу своей физической значимости, определяет не абсолютные, а относительные факторы исследуемых параметров, которые могут быть идентифицированы по наличию экстремумов кривых.

Наличие экстремума в физико-химическом анализе (рисунок 2) означает наличие химического взаимодействия компонентов, характеризует скорость взаимодействия. А это значит, что по значению диэлектрической проницаемости двойных систем можно оценить скорость взаимодействия топлива и окислителя, что в заданных условиях работы ДВС характеризует скорость нарастания давления - жесткость. Анализ свойств неполярных жидкостей позволяет установить связь диэлектрической проницаемости и жесткости процесса сгорания. В нашем случае будут справедливы регрессии:

1. Для расчёта жесткости при работе дизеля на ДТ:

$$(dp / d\varphi)_{\max} = 0,418 + 0,093 \varepsilon \quad (8)$$

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

$$dp / d\varphi_{\max} = 0,0492 \ln(\varepsilon) + 0,5642 \quad (9)$$

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

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

$$dp / d\varphi_{\max} = 0,3009 \ln(\varepsilon) + 0,3647 \quad (10)$$

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

4. Для расчёта жесткости при работе дизеля на АТ с добавлением СурМ:

$$dp / d\varphi_{\max} = 0,243 \ln(\varepsilon) + 0,4119 \quad (11)$$

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

**В третьей главе** изложены методики исследований. На первом этапе проводилось получение различных составов топлив при смешивании ДТ с этанолом, РМ и СурМ при содержании компонентов от 10% до 50%.

На втором этапе предусматривалось определение физико-химических свойств полученных топлив - плотности, коэффициента преломления, электрических параметров.

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

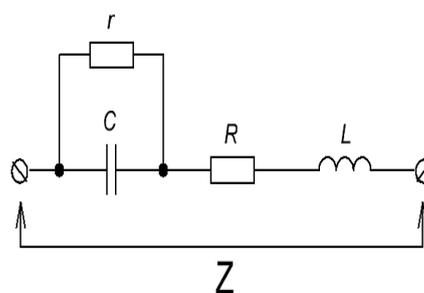
На четвертом этапе определялись параметры рабочего процесса автотракторного дизеля Д-245.5S2 при работе на ДТ и составах топлив с добавлением этанола, РМ и СурМ.

На пятом этапе проводился сравнительный анализ показателей процесса сгорания с физико-химическими свойствами АТ, установление связи данных параметров с отдельными физико-химическими свойствами. Определялись рациональные значения составов смесевых биотоплив на основе показателей работы автотракторного дизеля.

Коэффициент преломления измерялся с помощью рефрактометра, для измерения электрических параметров альтернативных топлив применялся мультиметр, измерение производилось согласно схемы (рисунок 3).



а)



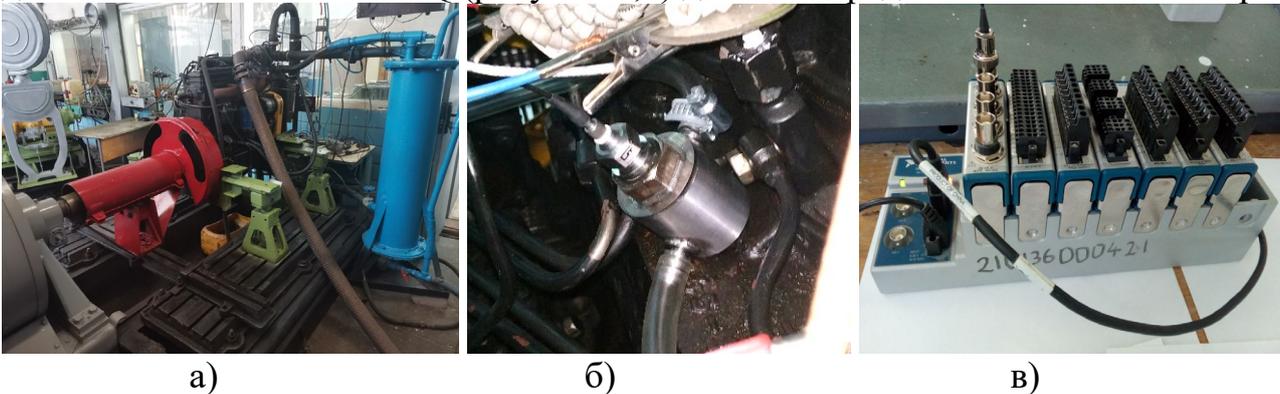
б)



в)

Рисунок 3 – Измерение электрических параметров: рефрактометр ИРФ-22 (а); схема включения (б); мультиметр Sinometex ZT-Y (в)

В экспериментальном исследовании использовался нагрузочный электродвигательный стенд RAPIDO SAK N670 с балансирующей маятниковой машиной (рисунок 4,а). При индицировании использовались: датчик динамического давления PS-01 с пьезокварцевым чувствительным элементом (рисунок 4,б) и датчик индуктивного типа – отметчик положения поршня в ВМТ. Датчик PS-01 устанавливался в камеру сгорания с применением дополнительной системы охлаждения. Через модульную USB систему сбора данных NI COMPACT DAQ (рисунок 4,в) данные передавались на компьютер.



а)

б)

в)

Рисунок 4 – Экспериментальная установка:

стенд RAPIDO SAK N670 (а); датчик динамического давления PS-01 с системой охлаждения (б); модульная USB системы сбора данных NI COMPACT DAQ (в)

Смеси дизельного топлива с этанолом и 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.

**В четвертой главе** представлены результаты лабораторных и расчетно-теоретических исследований, стендовых испытаний дизеля.

Первым этапом исследования явилось измерение плотности, вязкости и коэффициента преломления топлив. Выяснилось, что коэффициент преломления для ЭТЭ несколько уменьшается при увеличении содержания до 50% этанола в ЭТЭ. Добавление РМ от 10% до 50% в смесь повышает его коэффициент преломления. При добавлении в смесь до 50% СурМ коэффициент преломления также возрастает. Чистое дизельное топливо имеет наиболее близкое значение коэффициента преломления  $n$  по отношению к его смеси с сурепным топливом 10% и составляет 1,4637.

Подставляя полученные данные в формулу для расчёта удельной рефракции, были получены следующие результаты (таблица 1).

Следующим этапом исследований явилось изучение влияния на углеводородное топливо электрического тока и снятие параметров для всех исследуемых АТ. Выяснилось, что увеличение массового содержания этанола с 10% до 50% в составе эмульсии повышает электроёмкость состава. Изменение содержания РМ в составе топливной смеси в большей степени (чем спирт) влияет на омическое сопротивление конденсатора переменному току.

Значение удельной рефракции исследуемых топлив различного состава

№ п/п	Состав топлива	Удельная рефракция sR (Э), см <sup>3</sup> /г	Удельная рефракция sR (PM), см <sup>3</sup> /г	Удельная рефракция sR (СурМ), см <sup>3</sup> /г
1	90%ДТ+10%Э	0,3323		
2	90%ДТ+10%PM		0,3299	
3	90%ДТ+10% СурМ			0,4359
4	80%ДТ+20%Э	0,3321		
5	80%ДТ+20%PM		0,3270	
6	80%ДТ+20% СурМ			0,4315
7	70%ДТ+30%Э	0,3319		
8	70%ДТ+30%PM		0,3240	
9	70%ДТ+30% СурМ			0,4297
10	60%ДТ+40%Э	0,3334		
11	60%ДТ+40%PM		0,3212	
12	60%ДТ+40% СурМ			0,4263
13	50%ДТ+50%Э	0,3329		
14	50%ДТ+50%PM		0,3188	
15	50%ДТ+50% СурМ			0,4227

Смесь дизельного топлива с сурепным маслом имеет еще большее сопротивление между обкладками конденсатора, чем его смесь с PM.

Таблица 2

Диэлектрическая проницаемость топлив различного состава при t=20°С

№ п/п	Состав топлива	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ (Э)	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ (PM)	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ (СурМ)
1	90%ДТ+10%Э	3,05		
2	90%ДТ+10%PM		2,35	
3	90%ДТ+10% СурМ			2,33
4	80%ДТ+20%Э	7,98		
5	80%ДТ+20%PM		2,41	
6	80%ДТ+20% СурМ			2,5
7	70%ДТ+30%Э	27,5		
8	70%ДТ+30%PM		2,54	
9	70%ДТ+30% СурМ			2,65
10	60%ДТ+40%Э	39,47		
11	60%ДТ+40%PM		2,63	
12	60%ДТ+40% СурМ			2,76
13	50%ДТ+50%Э	45,31		
14	50%ДТ+50%PM		2,72	
15	50%ДТ+50% СурМ			2,8

Данные диэлектрической проницаемости представлены в таблице 2.

Оценка рациональных составов смесевых биотоплив первоначально производилась на основе данных эффективных и экологических показателей.

На рисунках 5 и 6 представлены нагрузочные характеристики дизеля Д-245.5S2 при работе на ДТ и смесевых топливах различного состава.

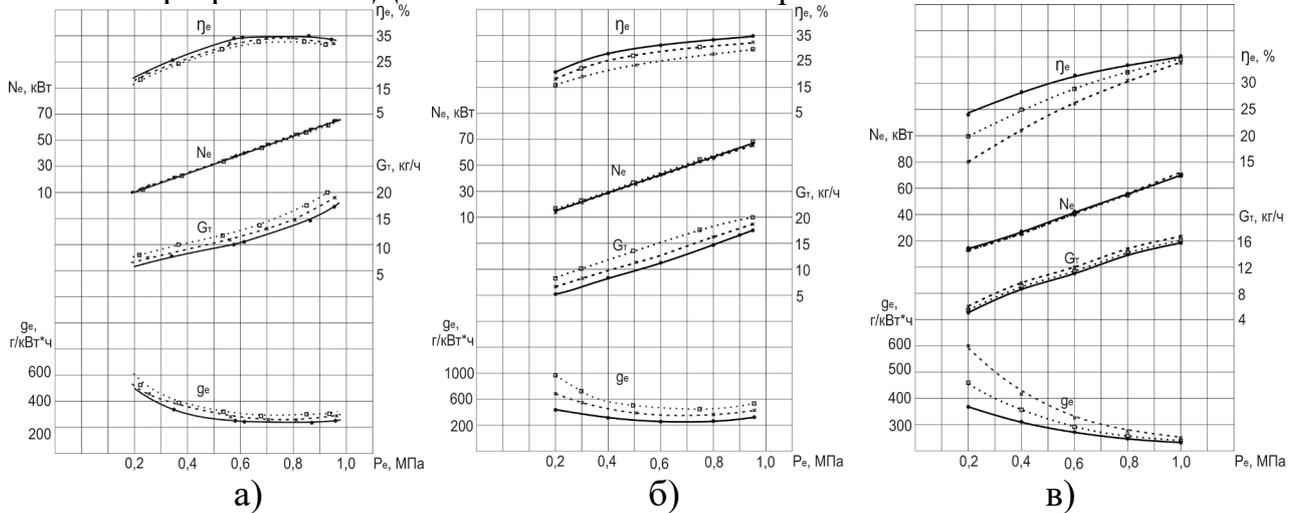


Рисунок 5 – Эффективные показатели работы дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  а) с добавками этанола; б) с добавками РМ; в) с добавками СурМ:  $\circ\text{---}\circ$  - ДТ;

$\times\text{---}\times$  - 20% Э в смеси;  $\times\text{---}\times$  - 20% РМ в смеси;  $\times\text{---}\times$  - 10% СурМ в смеси;  
 $\square\text{---}\square$  - 50% Э в смеси;  $\square\text{---}\square$  - 50% РМ в смеси;  $\square\text{---}\square$  - 25% СурМ в смеси.

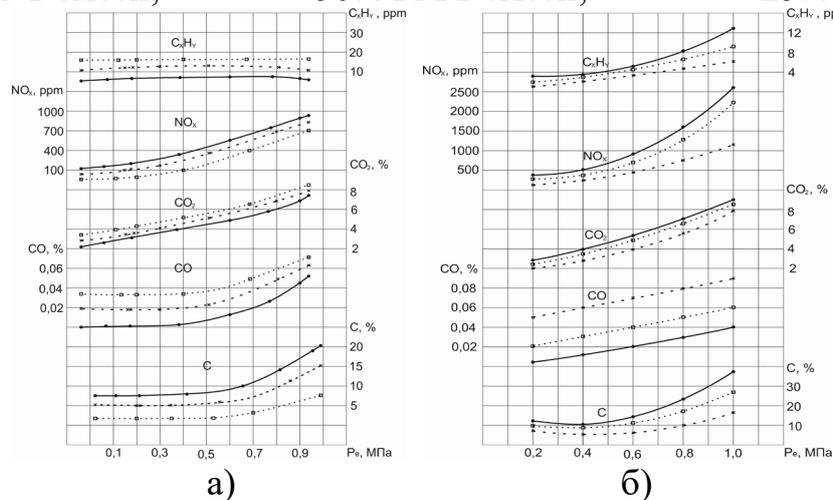


Рисунок 6 – Экологические показатели работы дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  а) с добавками этанола; б) с добавками РМ:

$\circ\text{---}\circ$  - ДТ;  $\times\text{---}\times$  - 20% Э и РМ в смеси;  $\square\text{---}\square$  - 50% Э и РМ в смеси;

Как видно из данных, добавки альтернативного топлива в смесь улучшают экологические показатели дизеля в части снижения выбросов сажи и оксидов азота. При этом возрастает удельный эффективный расход суммарного топлива. Оценка рациональных значений состава смесевоего топлива на основе показателей рабочего процесса показывает, что для сохранения долговечности дизеля добавка сурепного и рапсового масла в топливо не должна превышать 50%, добавка этанола не должна превышать 30%.

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

На рисунках 7-9 представлены совмещённые индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения дизеля при работе на ДТ и смесях с добавками этанола, РМ и СурМ до 50%.

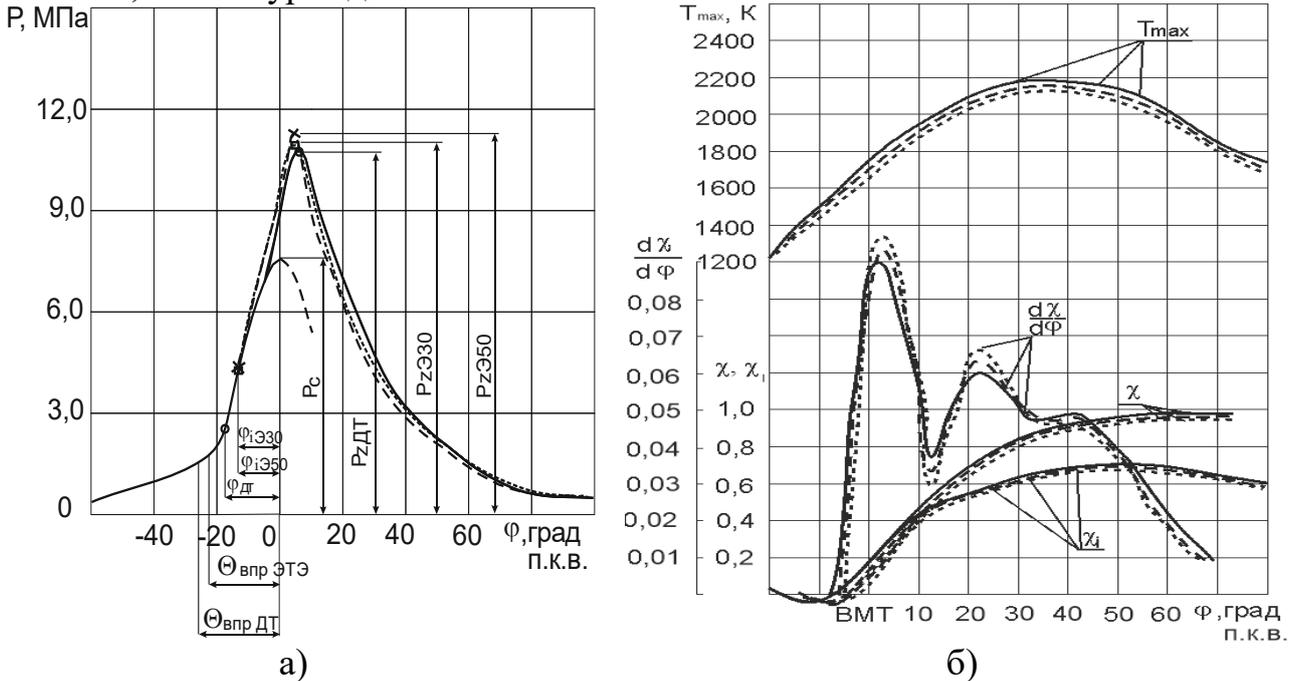


Рисунок 7 - Индикаторные диаграммы (а) и характеристики тепловыделения дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ$ — $\circ$  - дизельное топливо;  $\times$ — $\times$  - 30 % этанола в эмульсии;  $\square$ — $\square$  - 50 % этанола в эмульсии.

Видно, что возрастание количества этанола в эмульсии ведёт к увеличению максимального давления цикла  $P_z$ . Добавляя по 10% спирта в эмульсию, получаем следующие значения:  $P_{z10} = 10,641 \text{ МПа}$ ,  $P_{z20} = 10,816 \text{ МПа}$ ,  $P_{z30} = 10,984 \text{ МПа}$ ,  $P_{z40} = 11,137 \text{ МПа}$ ,  $P_{z50} = 11,214 \text{ МПа}$ . Добавка в смесь спирта приводит к уменьшению угла  $\phi_i$  поворота коленчатого вала между точками начала видимого горения и ВМТ. Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ, угол  $\phi_d = 20,5^\circ$ , а при содержании этанола в эмульсии 30% и 50 % он равен, соответственно,  $\phi_{\text{э}20} = 17,1^\circ$  и  $\phi_{\text{э}40} = 16,6^\circ$ .

Данные расчёта значений максимальной жёсткости  $(dp/d\phi)_{max}$  по индикаторной диаграмме для АТ показывают, что жёсткость процесса сгорания возрастает в зависимости от увеличения процентного содержания этанола в смеси. Так,  $(dp/d\phi)_{max\text{Э}20} = 0,655 \text{ МПа/град}$ , а  $(dp/d\phi)_{max\text{Э}50} = 0,798 \text{ МПа/град}$ .

Анализируя график (рисунок 8) видно, что при увеличении содержания РМ в смеси, начало видимого горения сдвигается в сторону поздних углов  $\phi_i$ .

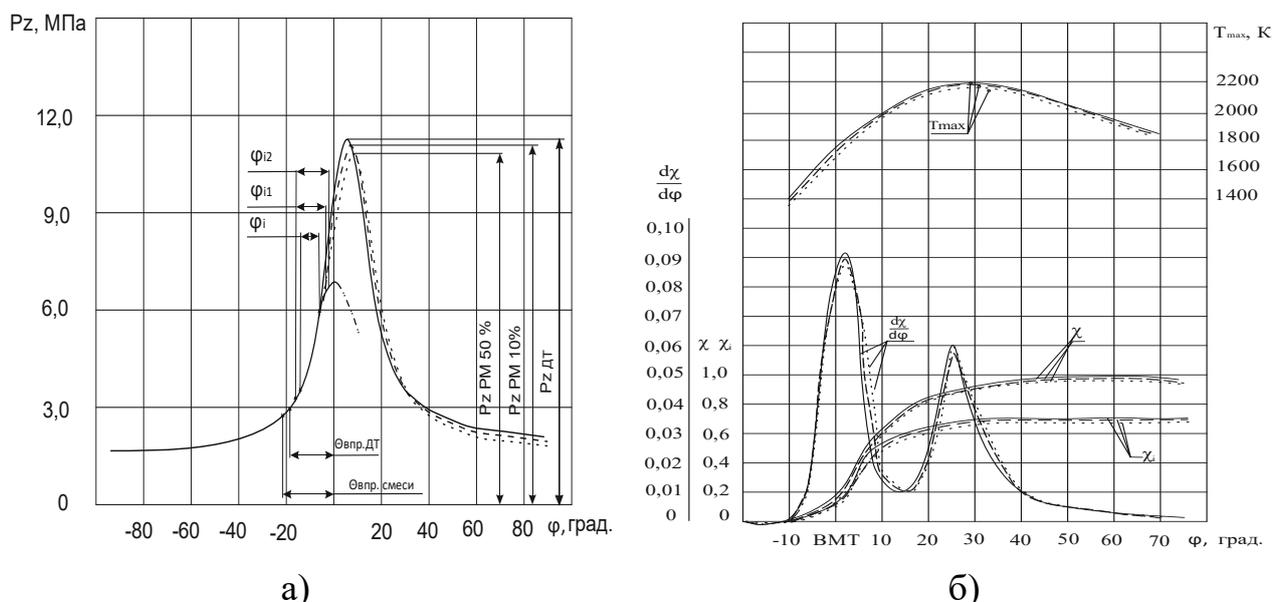


Рисунок 8 - Индикаторные диаграммы (а) и характеристики тепловыделения (б) дизеля Д-245.5S2 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ\text{---}\circ$  - дизельное топливо;  $\times\text{---}\times$  - 10 % РМ в смеси;  $\square\text{---}\square$  - 50 % РМ в смеси.

Так, угол поворота коленчатого вала 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  $\varphi_{i \text{ РМ}10} = 20,8$  градуса и  $\varphi_{i \text{ РМ}50} = 21,8$  градуса. Наблюдается снижение максимального давления цикла  $P_z$  с увеличением концентрации РМ в смеси. При содержании 10% РМ в смеси значение максимального давления цикла равно  $P_{z \text{ РМ}10} = 10,433$  МПа, тогда как при содержании РМ в 50% оно уже будет равно  $P_{z \text{ РМ}50} = 9,874$  МПа.

Расчётные значения максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$  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  $(dp/d\varphi)_{\text{max РМ}10} = 0,623$  МПа/град, а для 50% РМ в смеси жесткость равна  $(dp/d\varphi)_{\text{max РМ}50} = 0,67$  МПа/град.

По графикам (рисунок 9,а) видно, что при увеличении содержания СурМ в смеси начало видимого горения сдвигается в сторону поздних углов  $\varphi_i$ . Так, угол поворота коленчатого вала от момента впрыскивания до начала видимого горения для ДТ равен  $\varphi_{i \text{ ДТ}}=20,4$  градуса, а значения углов при работе дизеля на смесевом топливе равны  $\varphi_{i \text{ СурМ}10}=20,9$  градуса и  $\varphi_{i \text{ СурМ}50}=21,7$  градус. Вместе с увеличением процентного содержания СурМ в смеси наблюдается снижение максимального давления цикла  $P_z$ . При содержании 10% СурМ в смеси максимальное давление цикла равно  $P_{z \text{ СурМ}10} = 10,453$  МПа, а при 50% значение составит  $P_{z \text{ СурМ}50} = 9,915$  МПа.

При добавлении 10% СурМ в смесь значение жесткости процесса сгорания равно  $(dp/d\varphi)_{\text{max СурМ}10} = 0,621$  МПа/град, а добавка 50% масла в смесь повышает значение жесткости до  $(dp/d\varphi)_{\text{max СурМ}50} = 0,669$  МПа/град.

Анализ полученных данных показал, что имеет место корреляционная связь между удельной рефракцией  $sR$  и максимальным давлением в цилиндре  $P_z$ .

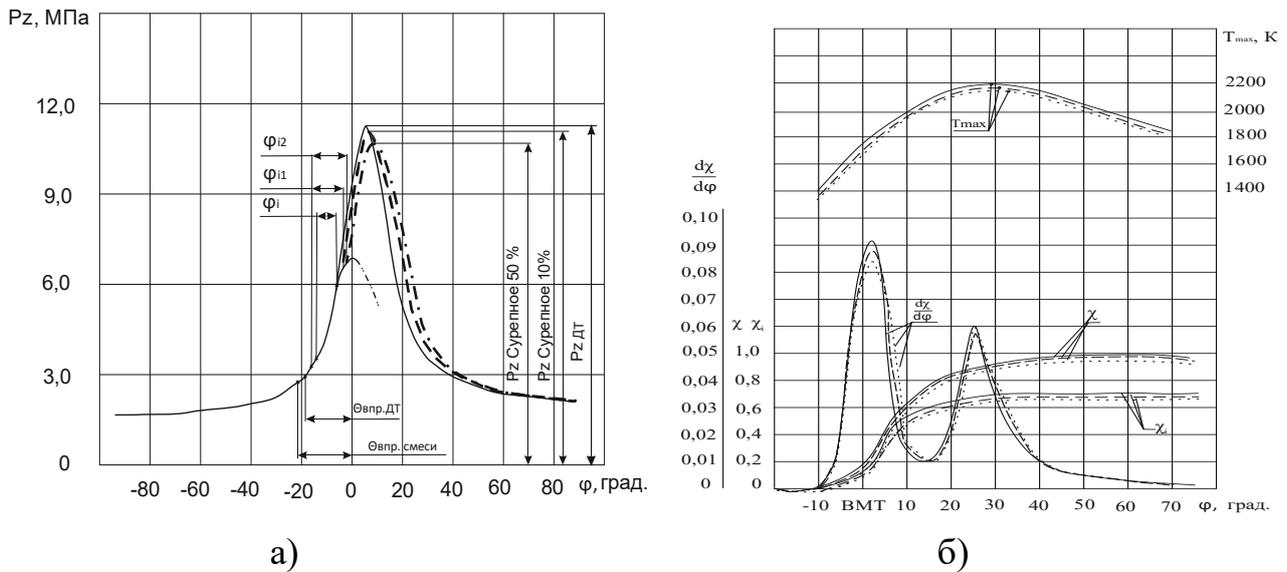


Рисунок 9 - Индикаторные диаграммы (а) и характеристики тепловыделения(б) дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при частоте вращения  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ :  $\circ\text{---}\circ$  - дизельное топливо;  $\times\text{---}\times$  - 10 % СурМ в смеси;  $\square\text{---}\square$  - 50 % СурМ в смеси.

На рисунке 10,а видно, что характер кривых  $P_z$  на всех составах АТ совпадает с характером изменения значений удельной рефракцией  $sR$ .

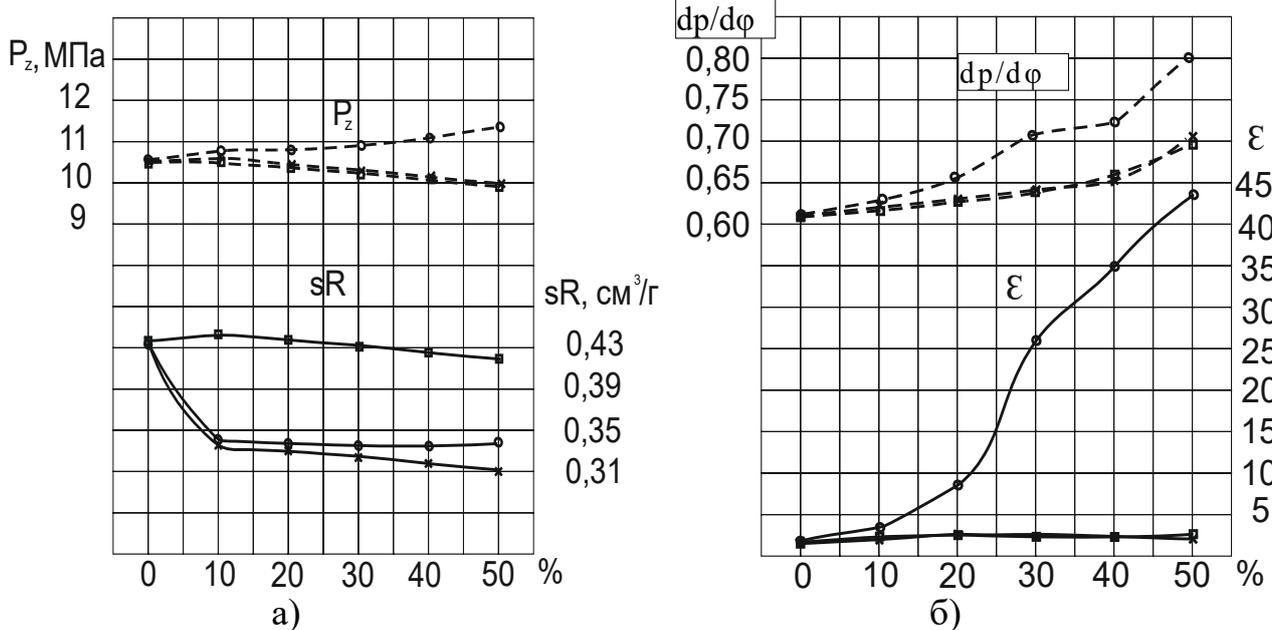


Рисунок 10. Показатели максимального давления цикла (а) и жесткости процесса сгорания (б), определенные на основе физико-химических свойств топлив:

$\circ\text{---}\circ$  -  $sR$ ,  $\epsilon$  (Э);  $\times\text{---}\times$  -  $sR$ ,  $\epsilon$  (PM);  $\square\text{---}\square$  -  $sR$ ,  $\epsilon$  (СурМ);  
 $\circ\text{---}\square$  -  $P_z$ ,  $(dp/d\phi)_{\max}$  (Э);  $\times\text{---}\times$  -  $P_z$ ,  $(dp/d\phi)_{\max}$  (PM);  $\square\text{---}\square$  -  $P_z$ ,  $(dp/d\phi)_{\max}$  (СурМ).

Проводя анализ полученных данных, также видно, что имеет место корреляционная связь между диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и максимальной скоростью нарастания давления  $(dp/d\phi)_{\max}$ , (рисунок 10,б).

Сопоставляя расчётные данные, полученные по теоретические моделям, с экспериментальными данными, получаем значения жесткости  $(dp/d\phi)_{\max}$  (таблица 3) и максимального давления цикла в цилиндре  $P_z$  (МПа) (таблица 4).

Таблица 3

Экспериментальные и теоретические значения  $(dp/d\varphi)_{\max}$ 

№ п/п	Состав топлива	Максимальная жесткость $(dp/d\varphi)_{\max}$						Погрешность, %
		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

Таблица 4

Экспериментальные и теоретические значения  $P_z$ 

№ п/п	Состав топлива	Значение максимального давления цикла $P_z$						Погрешность, %
		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%СурМ					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%СурМ					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%СурМ					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%СурМ					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%СурМ					9,945	9,915	0,3
16	ДТ	10,431	10,474					0,41

Как видно из данных таблиц 3 и 4, расхождение расчётных и экспериментальных данных жесткости  $(dp/d\varphi)_{\max}$  при работе дизеля на различных видах смесевых топлив не превышает  $\Delta \approx 1,5\%$ , а расхождение расчётных и экспериментальных данных максимального давления цикла  $P_z$  не превышает  $\Delta \approx 0,6\%$ .

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

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.

**Публикации с изложением основных положений диссертации:**  
**Статьи в изданиях, рецензируемых SCOPUS и WoS**

1. 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. 34. – № 2. – С. 178-190.

2. Плотников С.А., Гневашев П.В. Экспресс-методы оценки моторных свойств дизельных топлив. // Тракторы и сельхозмашины, 2021. - № 2. - С. 16-20.

**Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК**

3. Плотников С.А., Гневашев П.В., Шишкин Г.П., Резник Е.Н. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств топлив для сельскохозяйственной техники. // Вестник РГАТУ, 2021. - № 2 – С. 110-115.

4. Плотников С.А., Смольников М.В., Гневашев П.В., Кутергин Н.Ю., Шишкин Г.П. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив с добавками этанола. // Транспорт на альтернативном топливе, 2022. - № 6. - С. 72-76.

5. 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.

6. Плотников С.А., Смольников М.В., Гневашев П.В., Даргель Р.С. Верификация расчётных данных определения показателей процесса сгорания в дизеле. // Транспорт на альтернативном топливе, 2024. - № 5. – С. 52-58.

**Статьи, индексируемые РИНЦ**

7. Плотников С.А., Гневашев П.В., Карташевич А.Н. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив. // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В.Р.Петровец (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2021. – Вып. 6. С. 230-235.

8. Плотников С.А., Гневашев П.В. Безмоторные экспресс-методы оценки свойств дизельных топлив. // Будущее технической науки: сб. мат. XX Всерос. молодежн. науч.-техн. конф.; Н-Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2021. - С. 212-213.

9. Гневашев П.В., Плотников С.А. 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.

10. Плотников С.А., Гневашев П.В., Смольников М.В. Безмоторный метод оценки альтернативных топлив. // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: сб. мат. VI Межд. науч. конф. молодых ученых; Гродно, 2022. – С. 124-129.

11. Плотников С. А., Сергеев Д. Г., Смольников М. В., Гневашев П. В. Предпосылки российских ученых в оценке экспрессметодом моторных свойств топлив для ДВС // Общество. Наука. Инноваций (НПК2022): сб. ст.: XXII Всерос. науч.-практ. конф., 11 апреля – 29 апреля 2022 г.: в 2 т. Т. 2. Химико-биологические, технические и физико-математические науки. – Электрон. текстовые дан. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 440-444.

12. Смольников М.В., Гневашев П.В., Плотников С.А. Анализ промежуточных итогов при безмоторной оценке экспресс-методом свойств

биотоплив. // Будущее технической науки: сб. мат. XXI Всеросс. молодежн. науч.-техн. конф.; Н-Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2022. - С. 246-247.

13. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В., Шишкин Г.П. Безмоторная оценка экспресс-методом свойств биотоплив на основе трех компонентов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : БГСХА, 2023. Вып. 8. – С. 265-268.

14. 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 // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 145-148.

15. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В. Результаты электрических измерений углеродосодержащих смесей с дизельным топливом. // Будущее технической науки: сб. мат. XXII Всеросс. молодежн. науч.-техн. конф.; Н-Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2023. - С. 369-370.

16. 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. – Горки : БГСХА, 2024. – Вып. 9. – С. 263-266.

17. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В., Кантор П.Я. Связь удельной рефракции с максимальной скоростью нарастания давления цикла. // Будущее технической науки: сб. мат. XXIII Всеросс. молодежн. науч.-техн. конф.; Н-Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2024. - С. 484-486.

18. 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.; Н-Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2024. - С. 492-493.

19. 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 (НПК-2024) : сб. материалов : XXIV Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. 23 апр. – 25 апр. 2024 г. : [в 2 т.] Т. 2. Технические и естественные науки. – Киров : Вятский государственный университет, 2024. – С. 132-135.

20. Плотников, С. А. Безмоторные методы оценки процесса сгорания в ДВС / С. А. Плотников, М. В. Смольников, П. В. Гневашев // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский, А. С. Поварехо (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – С. 204-208.

#### **Патенты, авторские свидетельства**

21. 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 № 024613086 от 08.02.2024.

22. 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.

23. 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. – ЗС., 1 табл.