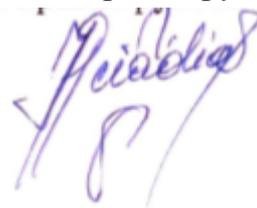


*На правах рукописи*



**КАДИАТА ЧИБАНДА ЭМЕРИ**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ  
ПАЛЬМОВОГО МАСЛА МОБИЛЬНЫМИ ТРАНСПОРТНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность: 05.20.01 - Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»)

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор  
**Федянов Евгений Алексеевич**

**Официальные оппоненты:**

**Лебедев Анатолий Тимофеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой технического сервиса, стандартизации и метрологии.

**Пуков Роман Владимирович**, кандидат технических наук, ФГБУ "Автотранспортный комбинат" Управления делами Президента Российской Федерации, ведущий специалист отдела материально-технического снабжения.

**Ведущая организация**

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (ФГАОУ ВО РУДН)

Защита диссертации состоится «24» декабря 2020 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.057.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: [www.rgatu.ru](http://www.rgatu.ru), с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

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

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент



И.А. Юхин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время сохраняется устойчивая тенденция расширения топливной базы для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин за счет использования альтернативных топлив, включая топлива растительного происхождения. Это связано с ростом числа эксплуатируемых машин, относительно высокой ценой на нефтяные топлива и нестабильностью нефтяного рынка. Особенно актуальным является расширение топливной базы сельскохозяйственной техники для стран, которые не обладают запасами нефти, но где развиты производство и переработка сельскохозяйственной продукции. К таким странам, в частности, относится Демократическая Республика Конго.

Африка заинтересована в использовании в качестве биотоплива пальмового масла, мировое производство которого превосходит производство других растительных масел. В африканском регионе культура масличной пальмы широко распространена, природно-климатические условия земледельческих районов благоприятны для ее выращивания, трудовые ресурсы для поддержания посевных площадей обеспечены.

Перевод и адаптация дизельных двигателей мобильных транспортно-технологических машин сельскохозяйственного производства на питание смесями нефтяного дизельного топлива (ДТ) с пальмовым маслом (ПМ) требует знания особенностей работы и эксплуатации дизелей на таких топливах. В частности необходимо знать, в какой мере переход на смесевые топлива влияет на показатели дизеля и как это влияние зависит от величины добавки ПМ, требуют ли изменения регулировки топливной аппаратуры, как долго сохраняются смесевые топлива без расслоения их компонентов и как влияет на сохранение свойств смесевых топлив их температура.

Существенное влияние на процесс впрыскивания и смесеобразования оказывают гидродинамические процессы в системе подачи топлива, зависящие от физических свойств топлива. Изменение физических характеристик топлива при переходе к альтернативным видам топлива следует учитывать при выборе регулировок топливной аппаратуры дизельного двигателя. Одна из важнейших физических характеристик топлива – коэффициент сжимаемости.

Наконец, необходимо знать как и в какой мере применение смесевых топлив отражается на экологических характеристиках транспортно-технологических машин.

**Целью исследования** является определение влияния добавок ПМ на показатели работы дизельных двигателей и необходимости изменения регулировок топливной аппаратуры при эксплуатации дизельных двигателей сельскохозяйственных машин на смесевых дизельных топливах с добавлением ПМ.

### **Задачи исследования:**

1. Определить физические свойства смесей ДТ с различным содержанием ПМ – плотность, вязкость, поверхностное натяжение, ЦЧ, коэффициент сжимаемости. Оценить стабильность топливных смесей.
2. На основе теоретических и экспериментальных исследований определить требуемые регулировки топливной аппаратуры при работе двигателя на дизельном топливе с добавкой ПМ.
3. Определить характеристики дизеля при переходе на дизельное топливо с добавлением ПМ.
4. Исследовать влияние добавок ПМ на дымность отработавших газов.

**Степень научной разработанности темы.** Проблемой использования растительных масел как топлива для дизелей в России занимаются в МГТУ им. Н.Э. Баумана, РУДН, МГУ, МГАУ имени В.П. Горячкина, РГАТУ; работают в этом направлении: Борычев С.Н., Бышов Н.В., Гайворонский А.И., Данилов И.К., Девянин С.Н., Лебедев А.Т., Марков В.А., Пуков Р.В., Симдянкин А.А., Успенский И.А., Шемякин А.В. и др. Использование ПМ в основном рассматривалось зарубежными учеными, которые работают в: Codeart (Belgium), Centre for energy science (Malaysia), University of King Abdelaziz (Saudi Arabia), University of Queensland (Australia), University of Songkla (Thailand) и др. Исследования проводятся в различных лабораториях Франции, Германии, Швеции, Канады и других стран. Большая часть результатов исследований по использованию в дизелях ПМ связана с токсичностью и эффективностью работы дизелей. Однако не были изучены гидродинамические процессы в топливной системе с учетом сжимаемости смесевоего топлива при использовании ПМ, и их влияние на рабочий процесс дизеля. Рекомендации по применению ПМ в качестве топлива для дизелей носят, в основном, эмпирический характер.

**Объект исследования** – дизельный двигатель Д-144, оснащенный топливной аппаратурой непосредственного действия с механическим управлением. Вид топлив – нефтяное дизельное и дизельное с добавлением пальмового масла.

**Предмет исследования** – физические свойства дизельного топлива с добавлением ПМ, показатели рабочего процесса дизеля, характеристики процесса подачи топлива, эффективные показатели дизеля.

### **Методология и методы исследования:**

- экспериментальное определение коэффициента сжимаемости дизельного топлива с добавлением ПМ,
- математическое моделирование процесса подачи топлива в топливной системе и рабочих процессов в цилиндре дизеля,

– экспериментальное определение эффективных показателей дизеля.

### **Научная новизна.**

1. Определены значения коэффициента сжимаемости ДТ с различными по величине добавками ПМ и впервые получена зависимость значения коэффициента сжимаемости от величины добавки ПМ.

2. Доказано, что в смесях с ДТ ПМ остается в капельно-жидком состоянии при температуре, ниже температуры застывания ПМ.

3. Установлено, что при использовании смесевых топлив с содержанием ПМ по объему до 30% изменения регулировок топливоподающей аппаратуры не требуется.

### **Теоретическая значимость работы.**

1. Установлено, что характеристики процесса подачи (активный ход плунжера, массовая цикловая подача, давление впрыскивания) дизельного топлива с добавлением ПМ от 10% до 30% по объему изменяются в сравнении с чистым ДТ незначительно: активный ход плунжера на номинальном режиме 2000 мин<sup>-1</sup> меняется в пределах от 0,68% до 1,86%.

2. Определена зависимость эффективных показателей дизельного двигателя при его эксплуатации на ДТ с добавкой ПМ от содержания ПМ в смеси.

3. Полученные величины коэффициента сжимаемости дизельного топлива с добавками ПМ могут быть использованы при моделировании процесса подачи в топливных системах дизелей.

### **Практическая значимость работы.**

1. Определено снижение мощности в зависимости от величины добавки ПМ.

2. Установлено, что дополнительных настроек топливной аппаратуры непосредственного действия при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ до 30% по объему не требуется.

3. Установлено влияние величины добавки ПМ на дымность отработавших газов дизеля.

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

1. Эксплуатационные свойства дизельного топлива с добавлением ПМ, в том числе, время хранения без расслоения.

2. Влияние добавок ПМ в дизельное топливо на требуемые регулировки топливной аппаратуры.

3. Влияние добавок ПМ на дымность отработавших газов при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ.

4. Влияние добавок ПМ на токсичность отработавших газов, при эксплуатации машин с дизельными двигателями.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием апробированных методик моделирования процесса подачи топлива и рабочего процесса дизельного двигателя, а также соразмерностью полученных результатов моделирования и экспериментального исследования.

**Вклад автора в решение поставленных задач состоит** в непосредственном участии в экспериментальных исследованиях, подготовке исходных данных для математического моделирования процесса подачи топлива и рабочего процесса дизельного двигателя, обработке результатов исследований.

**Реализация результатов исследований.** Результаты диссертационной работы предложены к внедрению в Национальную энергетическую комиссию (CNE) Демократической республики Конго.

**Апробация результатов работы.**

Основные положения диссертационной работы и ее результаты обсуждены и одобрены на следующих мероприятиях:

- на научно-практических конференциях Национальной энергетической комиссии (CNE) ДР Конго (2014 г.);
- The 102nd International Scientific and Technical Conference «Intelligent Systems of Driver Assistance: Development, Research, Certification» (г. Нижний Новгород, 18-19 апреля 2018 г.);
- Международной научно-практической конференции (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);
- XIV Международной научно-технической. конференции, посвященной 95-летию юбилею доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Авдонькина Ф.Н. (1923-1996) (г. Саратов, 2018 г.);
- 57-й Научной конференции, Волгоградский государственный технический университет (г. Волгоград, 4 – 6 февраля 2020 г.).

**Публикации.** Основные положения и результаты исследований опубликованы в 9-ти печатных работах, в том числе 4-х статьях в изданиях ВАК, одна статья – в SCOPUS. Общий объем публикаций составляет 4,06 печ. л., из которых 2,84 печ. л. принадлежит лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературных источников и приложений. Список литературы содержит 240 наименований, из которых 31 зарубежное. Работа изложена на 210 страницах, содержит 62 рисунка, 39 таблиц и 3 приложения.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрена актуальность работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Определены цель и задачи исследований.

### **В первой главе «Анализ состояния вопроса и задачи исследований»**

проанализировано современное состояние исследований и практического применения альтернативных видов топлива, в том числе биодизеля на основе растительных масел и смесевых топлив. Рассмотрены конструктивные особенности транспортных систем, предназначенных для эксплуатации на смесевом топливе. Приведены требования мировых стандартов к альтернативным топливам. ПМ является одним из наиболее перспективных альтернативных видов топлив для дизелей, эксплуатируемых в тропических странах мира.

Специфические требования, предъявляемые к ДТ с добавлением ПМ, связаны с обеспечением надежной и бесперебойной работы дизельного двигателя в условиях эксплуатации. При этом сохраняются традиционные для транспортного дизеля требования: обеспечение высоких мощностных, экономических и экологических показателей. Проведен анализ существующих и наиболее перспективных направлений использования ПМ как возобновляемого энергоресурса для дизелей с минимизацией вредного воздействия на окружающую среду.

**Вторая глава «Исследование физических свойств дизельных топлив с добавлением пальмового масла»** посвящена методике и экспериментальному определению физических свойств исследованных топливных смесей с добавлением ПМ: плотности, вязкости, поверхностного натяжения, цетанового числа, коэффициента сжимаемости. Оценена стабильность исследованных топливных смесей.

Одним из исходных параметров модели, характеризующих физические свойства топлива, является коэффициент сжимаемости. Отсутствие в литературе значений коэффициента сжимаемости для смесей дизельного топлива и ПМ различного состава привело к необходимости его экспериментального определения. Установка для определения коэффициента сжимаемости (рис. 1) была создана на базе стенда для регулировки форсунок КИ-3333.

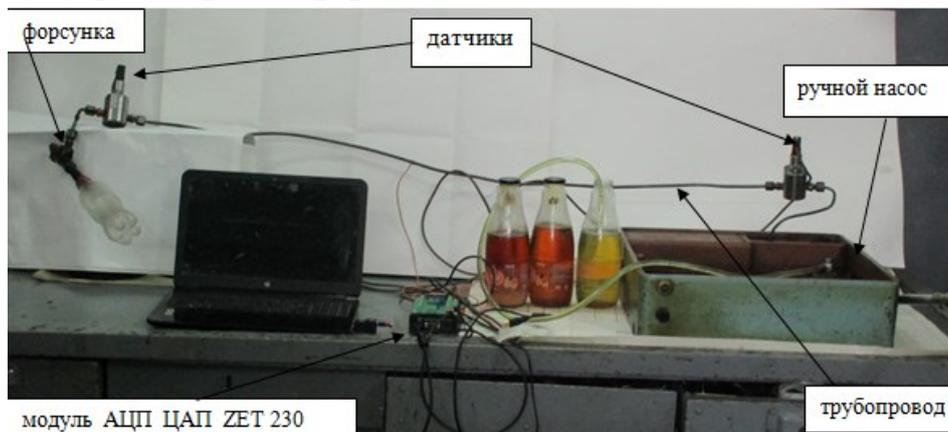


Рисунок 1 - Экспериментальный стенд для определения скорости распространения импульса давления по трубопроводу.

Импульс давления, создаваемый ручным топливным насосом стенда, регистрировался с помощью датчиков давления, установленных на входе в трубопровод высокого давления длиной  $L=1,4$  м и на выходе из него. Время распространения импульса давления, а затем и его скорость, определялись по запаздыванию нарастания фронта давления на выходном датчике относительно входного.

Коэффициенты сжимаемости ПМ и его смесей с ДТ рассчитаны по методике проф. И.В. Астахова на основе измеренных значений скорости распространения импульса давления по длинному трубопроводу:

$$\alpha = -\frac{1+p_H k}{2p_H} + \sqrt{\left(\frac{1+p_H k}{2p_H}\right)^2 + \frac{1}{a^2 \rho_0 p_H} - \frac{k}{p_H}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент сжимаемости;  $a$  – скорость распространения волны давления, м/с;  $k$  – поправка Ротрока;  $p_H$  – начальное давление, МПа;  $\rho$  – плотность топлива, г/м<sup>3</sup>. Поправка Ротрока вычислялась по известной формуле

$$k = \frac{2}{E} \left( \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu \right), \quad (2)$$

где  $R$ ,  $r$  – внешний и внутренний радиусы трубопровода, м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости, Па.

Для каждого вида топлива средний коэффициент сжимаемости определяется по выражению:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_0 + \alpha_{30}}{2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент сжимаемости при нормальных условиях;  $\alpha_{30}$  – коэффициент сжимаемости при начальном давлении 30 МПа.

На основе результатов экспериментальных исследований получена зависимость среднего коэффициента сжимаемости от плотности смесового топлива (рис. 2).

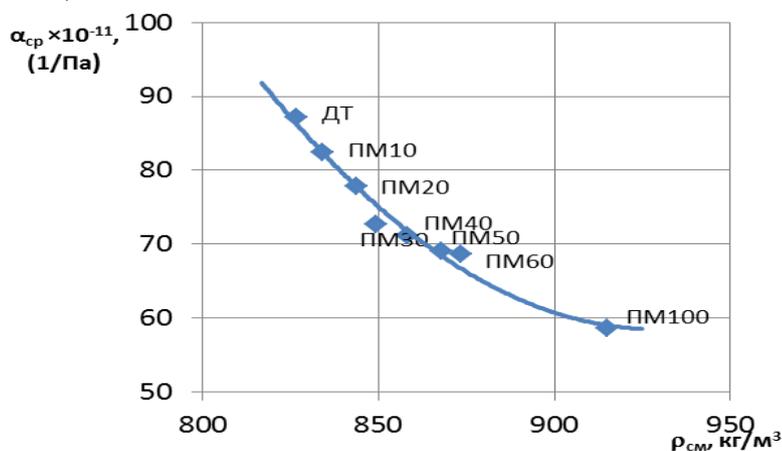


Рисунок 2 - Зависимость среднего коэффициента сжимаемости от плотности топлива

В табл. 1 приведены физические свойства дизельного топлива, пальмового масла и их смесей.

Таблица 1 - Физические свойства ДТ и смесей с добавлением ПМ.

Показатель	Дизельное топливо	ПМ	Биодизельная топливная смесь, ПМ, % об.					
			10	20	30	40	50	60
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> 50 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	918 907	838,8	847,6	856,4	865,0	874,0	882,8
Вязкость при 20 °С, сСт 50 °С, сСт 100 °С, сСт	3.8	37 8,6	4,37 4	4,84 4.7	5.7 5,31	8.3 5,78	11.1 6,25	12.8 6,72
Коэффициент поверхностного натяжения при 25 °С, мН/м	25	27.8	24.5	24.8	25.2	25.3	25.7	26.5
ЦЧ	50	40	48,6	47,4	46,1	45	44,4	43,8
Коэф. сжимаемости при 25 МПа, E <sup>-10</sup> Па <sup>-1</sup>	8,077	-	7,51	7,159	-	-	6,32	-

**Третья глава «Определение необходимых регулировок топливной аппаратуры при использовании дизельного топлива с добавлением пальмового масла на основе моделирования процесса впрыскивания с использованием программного комплекса «впрыск»»** посвящена исследованию влияния состава смеси ДТ и ПМ на регулировки топливоподающей аппаратуры дизеля. Использована модель процесса подачи топлива в разделенной топливной системе непосредственного действия, реализованная в программном комплексе «Впрыск», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В математических моделях, примененных в ПК «Впрыск» для расчета процесса топливоподачи в дизелях, использован ряд эмпирических зависимостей плотности  $\rho_T$  и коэффициента сжимаемости  $\alpha_T$  от значения давления  $p$ , полученных российскими учеными Д.Н. Вырубовым, И.В. Астаховым, Ю.Я. Фоминым, Я.В. Колупаевым, Ю.Л. Астанским и др.

Рассчитывались плотность и массовая цикловая подача для ДТ с добавлением ПМ при работе дизеля Д-144 на номинальном скоростном режиме при  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup> и частичных скоростных режимах при  $n = 1800, 1600$  и  $1400$  мин<sup>-1</sup>. Состав смесевоего топлива определялся объемной долей ПМ. Расчет топливоподачи с учетом сжимаемости и вязкости смесевоего топлива дает большее увеличение массовой цикловой подачи при повышении доли ПМ, чем расчет с

учетом только увеличения плотности смесового топлива. Это можно объяснить уменьшением утечек через зазоры в плунжерной паре из-за увеличения вязкости смеси с ростом доли ПМ. При уменьшении скоростного режима влияние доли ПМ на показатели впрыскивания становится заметнее.

Выполнена серия расчетов показателей процесса топливоподачи для смесового топлива при условии постоянной массовой цикловой подачи смеси, соответствующей цикловой подаче на чистом ДТ при каждом скоростном режиме. Сохранение величины массовой цикловой подачи с ростом доли ПМ в смеси ведет к снижению количества теплоты, введенной с топливом в КС, и к снижению мощности дизеля.

Выполнены расчеты показателей процесса топливоподачи для постоянного количества введенной теплоты, соответствующего чистому ДТ при номинальной цикловой подаче при каждом скоростном режиме.

Для сохранения при подаче смесей ДТ и ПМ постоянного количества введенной теплоты, соответственно чистому ДТ, необходимо уменьшать активный ход плунжера. В этом случае изменения объемной цикловой подачи при увеличении доли ПМ не превышают на всех скоростных режимах 2% от объемной цикловой подачи при работе на чистом ДТ, изменения массовой цикловой подачи лежат в пределах 8%.

Для практического использования наиболее ценными представляются результаты расчетов, выполненные при сохранении постоянным количества теплоты, введенной с топливом в КС. Результаты расчетов приведены на рис. 3 и в табл. 2.

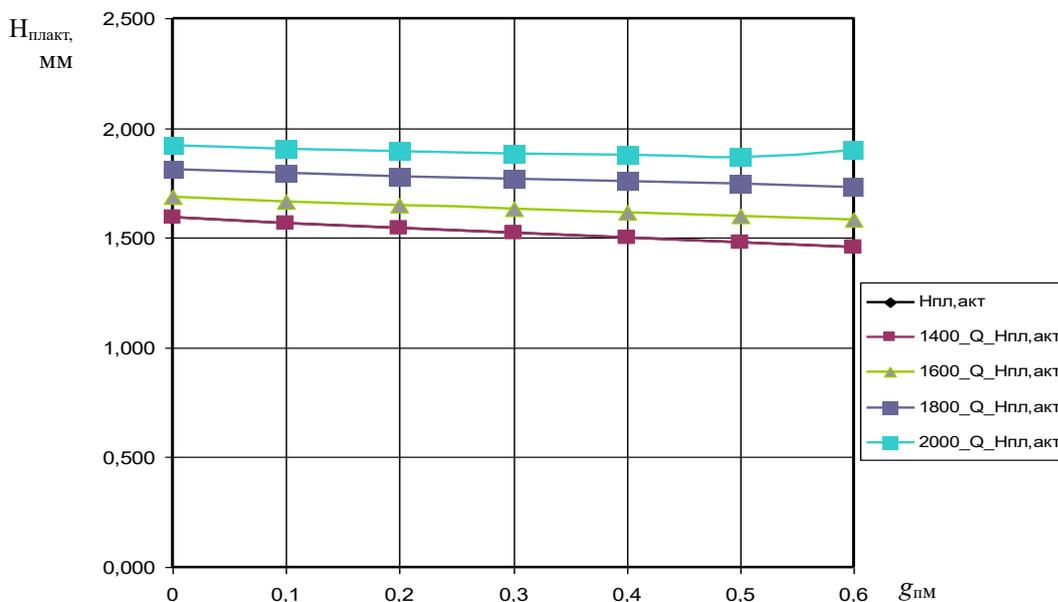


Рисунок 3 - Влияние состава смесового топлива  $g_{ПМ}$  на активный ход плунжера  $H_{пл,акт}$ , мм, при постоянном количестве подведенной теплоты  $Q_{см}$

Средние и максимальные давления впрыскивания возрастают меньше, чем при условии сохранения постоянного активного хода плунжера, но больше, чем при условии сохранения постоянной цикловой подачи. Активный ход плунжера снижается меньше, чем при сохранении постоянной массовой цикловой подачи. Однако при уменьшении частоты вращения коленчатого вала снижение активного хода плунжера становится более значительным. Общая продолжительность впрыскивания при данных условиях практически не менялась. Если принять в качестве основной цели при замене ДТ на смесевое сохранение количества теплоты, выделяющейся при сгорании, то изменений в регулировках ТНВД не требуется для смесей с содержанием ПМ до 30% по объему. Изменение величины цикловой подачи при этом находится в пределах установленных норм.

Таблица 2. Влияние объемной доли ПМ на регулировочные параметры ТНВД ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$  при сохранении количества теплоты, введенной с топливом в КС)

Доля пальмового масла в смеси $g_{\text{ПМ}}$	Изменение массовой цикловой подачи смеси		Изменение объемной цикловой подачи смеси		Изменение активного хода плунжера	
	г/цикл	%	мм <sup>3</sup> /цикл	%	мм	%
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,00077	1,29	0,16142	0,22	0,013	0,68
0,2	0,00153	2,56	0,31005	0,43	0,025	1,32
0,3	0,00235	3,93	0,52452	0,73	0,035	1,86
0,4	0,00319	5,34	0,75774	1,05	0,043	2,29
0,5	0,00405	6,78	1,00915	1,40	0,052	2,78
0,6	0,00492	8,23	1,26688	1,76	0,056	2,9

**В четвертой главе «Расчетная оценка влияния состава дизельного топлива с добавлением пальмового масла на показатели работы автотракторного дизельного двигателя»** приведены результаты расчетной оценки изменений показателей работы дизельного двигателя при использовании ДТ с добавлением ПМ и влияние добавок ПМ на экологические показатели работы дизельного двигателя.

Использована модель, реализованная в программном комплексе «Дизель-РК», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В качестве исходных данных использованы параметры дизеля Д-144 и результаты расчета характеристик подачи топлива по ПК «Впрыск».

Мощности и крутящие моменты для смесевых топлив с добавками 10, 20 и 30% ПМ снижались по сравнению с ДТ: на 1,8% и 0,1% для смеси ПМ20, на 5,8% и 5,74% для смеси ПМ30 из-за понижения теплоты сгорания. Показатели

для смеси ПМ10 отличаются от показателей для чистого ДТ не более, чем на 0,05%. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3 - Результаты расчетного моделирования зависимости эффективных показателей работы дизельного двигателя Д-144 от состава топливной смеси на номинальном режиме

ПМ, об.доли	$N_e$ , кВт	$g_e$ , г/кВт	$G_t$ , кг/ч	$M_k$ , Н*м	$q_c$ , г
0	50,0	288	14,40	238,8	0,060
0,1	50,0	288	14,40	238,8	0,060
0,2	49,1	297	14,88	239,1	0,062
0,3	47,1	321	15,12	225,1	0,063

Средние значения удельного расхода для ПМ10, ПМ20, ПМ30 оказались несколько выше (до 5%), чем расход ДТ. Эти результаты можно объяснить их более высокими вязкостью и плотностью, а так же пониженной теплотой сгорания.

Расчетные исследования позволяют предположить, что смесевые топлива ПМ10, ПМ20, ПМ30 могут обеспечить удовлетворительную топливную экономичность и меньшую дымность ОГ. Однако увеличилось содержание оксидов азота  $NO_x$ . Это можно объяснить высоким содержанием кислорода в смесевом топливе и повышением давления впрыскивания. Монооксид углерода и остаточные углеводороды в ОГ практически отсутствуют, поскольку коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  больше единицы, имеется дополнительный кислород в составе топлива. Все это предполагает полное окисление компонентов топлива. Отмечено снижение количества отложений ПМ и плотности дыма.

Таким образом, исследованные смесевые топлива по основным физико-техническим свойствам приближаются к стандартным топливам и обладают хорошими моторными качествами. Переход на использование дизельных топлив с добавлением ПМ может обеспечить улучшение экологических показателей автотракторного дизеля.

**Пятая глава «Методика стендовых испытаний и исследование показателей работы двигателя д-144 на дизельном топливе с добавлением пальмового масла. Определение эксплуатационных показателей двигателя 4D56T автомобиля Mitsubishi Pajero в процессе ПЭИ на дизельном топливе с добавлением пальмового масла»** посвящена экспериментальным исследованиям и оценке влияния добавок ПМ к дизельному топливу на эффективные и экологические показатели дизеля Д-144 при работе на стенде и на эксплуатационные показатели дизельного двигателя автомобиля.

Исследования выполнены на дизельном двигателе Д-144 с ТНВД УТН-5, установленном на динамометрическом стенде MEZ с динамометром постоянного тока DS 932-4/N. Для каждого вида смесового топлива с содержанием ПМ 10, 20, 30% по объему, а также для чистого ДТ были получены скоростные характеристики. Выбор внешних характеристик обоснован тем, что тракторные дизельные двигатели эксплуатируются на режимах, близких к номинальным.

Определялись и рассчитывались следующие характеристики:

Среднее эффективное давление:

$$P_e = \frac{30 \cdot \tau_{де} \cdot N_e}{n \cdot V_n}, \quad (4)$$

Эффективная мощность (кВт) определяется по выражению:

$$N_e = \frac{M_K \cdot n}{9550}, \quad (5)$$

Часовой расход топлива (кг/ч):

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

Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч). :

$$g_e = \frac{10^3 \cdot G_T}{N_e}, \quad (7)$$

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 4. С увеличением объемной доли ПМ в смесовом топливе эффективная мощность двигателя уменьшается, а удельный эффективный расход топлива увеличивается. Так при номинальной частоте  $n=2000 \text{ мин}^{-1}$  снижение мощности составляет 1,72%, 3,45% и 8,92% для ПМ10, ПМ20 и ПМ30 соответственно. Снижение мощности в основном вызвано уменьшением теплоты сгорания смеси по мере роста в ней объемной доли ПМ.

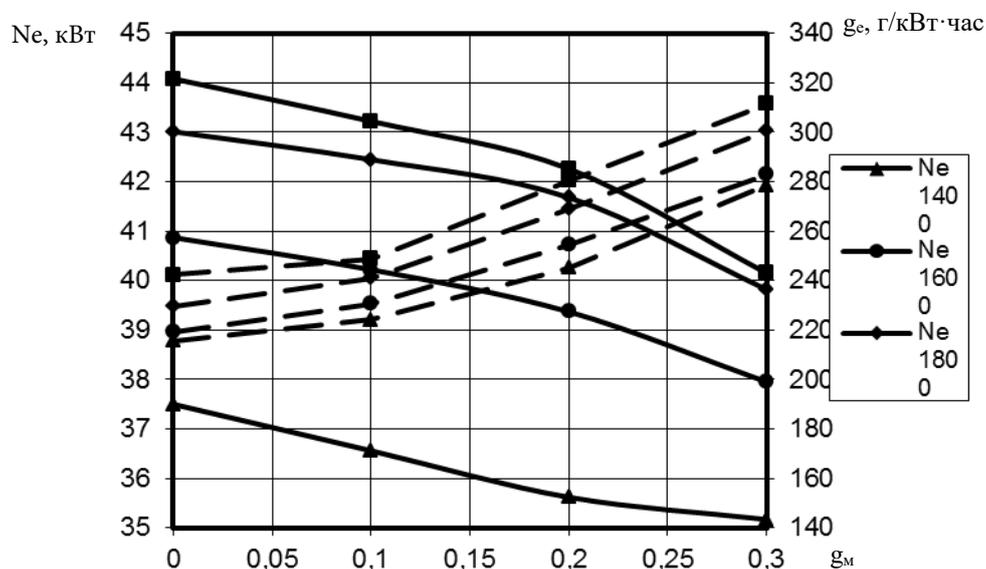


Рисунок 4 - Показатели работы двигателя в зависимости от состава смесового топлива

На рисунке 5 приведены результаты определения дымности ОГ при работе стендового дизельного двигателя Д-144 на чистом ДТ и на смесевых топливах.

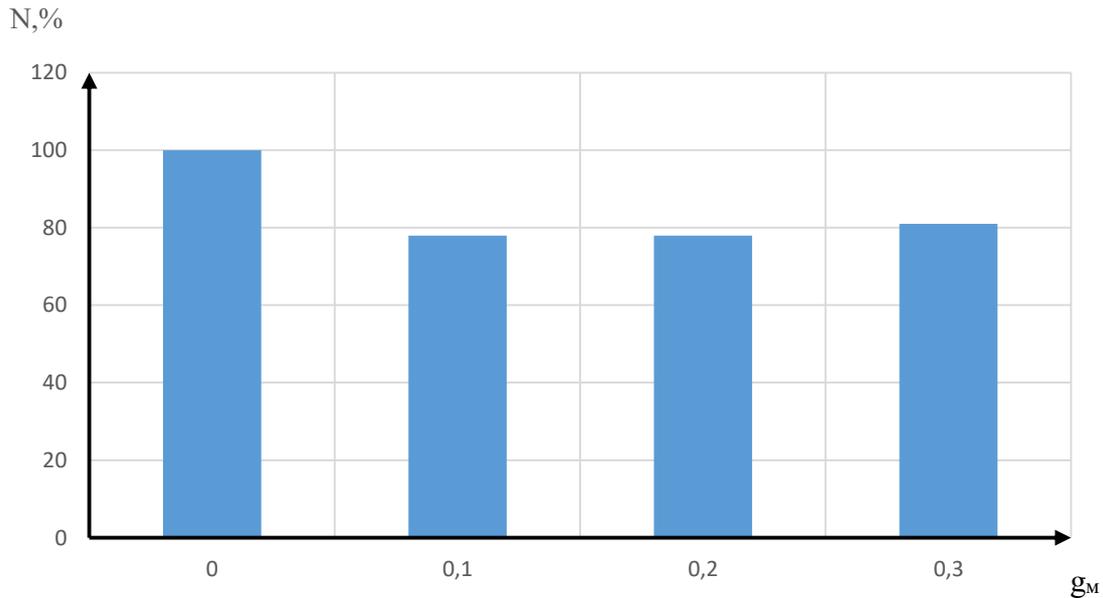


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента дымности от состава топлива.

Эксплуатационные испытания дизельного автомобиля, используемого на сельскохозяйственном предприятии, проводились в г. Киншасе, ДР Конго. Объектом испытаний был автомобиль Mitsubishi pajero с дизелем 4D56T. Длина испытательного участка 350 км, период проведения – август 2017 г. Производственно-эксплуатационные испытания (ПЭИ) проводились пятичасовыми этапами на эксплуатационных режимах. Были использованы четыре вида топлива: стандартное ДТ, и ДТ с добавлением ПМ 10, 20, 30% объема.

Испытания были разделены на два этапа: определение токсичности ОГ; определение топливной экономичности и мощности.

Для измерения токсичности выбросов ОГ использовался газоанализатор Bosh (модель ВЕА-350). Определялось содержание NO<sub>x</sub>, HC, CO и дымность ОГ.

Топливная экономичность определялась при заездах на дистанцию от 50 до 100 км. Расход топлива определялся мерными цилиндрами, скорость контролировалась по спидометру, время замерялось по секундомеру. Массовый расход, путевой расход, мощность определялись расчетным путем. Для каждого вида топлива проводилась серия из 5 измерений. После каждых 75 км пробега производилась замена масляных фильтров грубой очистки.

Испытания проводились как при полной подаче топлива, так и при частичных подачах топлива, при холостом ходе и под нагрузкой, с соблюдением процедур стандарта ГОСТ ISO8178-2-2013.

Результаты испытаний представлены в таблице 4. В условиях эксплуатации расход топлива с увеличением добавки ПМ возрастает в существенно большей

мере, чем это было получено в условиях стендовых испытаний тракторного дизеля. Так при эксплуатации автомобиля на смеси ДТ с 30% ПМ путевой расход оказался на 14% выше, а удельный расход на 39% выше, чем для ДТ.

Таблица 4 - Путевой расход топлива при производственно-эксплуатационных испытаниях дизельного двигателя Mitsubishi Pajero (модель 4D56T)

	ДТ	ПМ10	ПМ20	ПМ30
Плотность топлива, кг/м <sup>3</sup>	830	838,8	847,6	856,4
Мощность, кВт/час	28,72	28,55	25,08	24,22
Удельный расход, г/кВт	185,71	198	236	258
Скорость автомобиля, м/с	22	22	22	22
Путевой расход, л/100 км	8,11	8,51	8,82	9,21

Дымность и токсичность ОГ (по содержанию СО и СН<sub>x</sub>) заметно, на 25-35%, ниже, чем при работе на стандартном ДТ. За время длительных ПЭИ не наблюдалось никаких нарушений в работе автомобиля и его топливоподающей аппаратуры. Средний угар масла с начала до конца испытаний оставался практически в допустимых пределах.

**В шестой главе «Оценка экономической эффективности от применения дизельного топлива с добавлением пальмового масла в качестве моторного топлива»** произведены оценочные расчеты экономической эффективности использования смесового топлива и экономического эффекта при эксплуатации одной транспортной единицы в течение года. При расчете учтены затраты на нефтяное ДТ и ПМ при использовании топливных смесей с содержанием ПМ 10, 20, 30% объема. Результаты расчетов представлены в таблице 5. При ценах на ДТ и ПМ, которые были использованы при технико-экономическом анализе, применение ДТ с добавками пальмового масла до 30% экономически выгодно, так как при снижении затрат на топливо не требуются дополнительные расходы на изменение регулировок двигателя.

Таблица 5 - Показатели экономической эффективности использования дизельного топлива с добавлением ПМ.

№	Наименование показателей	на чистом ДТ	на смесовом топливе		
			ПМ10	ПМ20	ПМ30
1	2	3	4	5	6
1	Количество транспортных средств (ТС), ед.	1	1	1	1
2	Средний пробег ТС за год, км	20000	20000	20000	20000
3	Расход топлива, л/100 км	8,11	8,51	8,82	9,21
4	Годовой расход топлива, л	1622	1702	1764	1842
5	Добавка ПМ на ДТ, л	-	170,2	352,8	552,6

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6
6	Цена 1 л ПМ, долл США.	-	0,3	0,3	0,3
7	Цена 1 л ДТ, долл. США.	1,5	1,5	1,5	1,5
		2433	2348,76	2222,64	2099,88
		-	51,06	105,84	165,78
9	Годовая экономия ДТ, л	-	90,2	210,8	332,6
10	Годовая экономия эксплуатационных затрат на ДТ за год, долл. США	-	84,24	210,36	333,12
11	Количество фильтров грубой очистки, шт.	4	5	5	5
12	Стоимость замены 1 фильтра, долл. США	15	15	15	15
13	Суммарные эксплуатационные затраты, долл. США	60	75	75	75
14	Разница в эксплуатационных затратах на ТО, долл. США	-	15	15	15
15	Годовая экономия эксплуатационных затрат с учетом затрат на ТО за год, долл. США	-	69,24	195,36	318,12
16	Годовой экономический эффект от эксплуатации автомобиля на смесевом топливе, долл. США	-	61,58	179,48	293,22

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Определены физические свойства смесей ДТ с ПМ с содержанием пальмового масла до 60% по объему. Впервые определен коэффициент сжимаемости для исследованных смесей нефтяного ДТ с ПМ. Вследствие отличия физических свойств смесей ДТ с ПМ от свойств чистого ДТ нагрузка на элементы топливоподающей аппаратуры повышается.

2. В исследованном диапазоне температур с нижней температурой 20<sup>0</sup>С ПМ в смеси с ДТ остается в капельно-жидкой фазе. Это позволяет применять смеси ДТ с ПМ при температурах ниже 32<sup>0</sup>С – температуры застывания чистого ПМ. Срок хранения исследованных смесей без расслоения превышает 10 дней.

3. Установлено, что характеристики процесса подачи ДТ с добавлением ПМ до 30% по объему изменяются незначительно в сравнении с чистым ДТ.

4. При переводе дизельного двигателя с разделенной топливной аппаратурой на питание дизельным топливом с добавками ПМ до 30% по объему изменения регулировок топливной аппаратуры не требуется. В случае применения смесевое топлива с добавками ПМ более 30% объема требуется изменение конструкции двигателя.

5. Определена зависимость эффективных показателей дизельного

двигателя при эксплуатации на дизельном топливе с добавкой ПМ от содержания ПМ в смеси. Экспериментально полученный тренд соответствует зависимости, полученной в ходе математического моделирования.

6. На основе измерения токсичности в ходе производственно-эксплуатационных испытаний автомобиля на смеси ДТ с ПМ установлено, что дымность ОГ снизилась на 30-35%, а токсичность выбросов по показателям СО и СН<sub>x</sub> снизилась на 25-35%. Эмиссия NO<sub>x</sub> повысилась.

7. Оценочные экономические расчеты свидетельствуют об экономической целесообразности применения ПМ в качестве добавок к ДТ для мобильных транспортно-технологических средств сельскохозяйственного производства.

### **Предложения производству**

Для облегчения последующего перехода дизеля в рабочий режим, предупреждения потери его мощности, уменьшения износа деталей топливной аппаратуры и нагрузки на ее элементы при использовании смесового топлива с добавлением ПМ рекомендуется сначала запустить двигатель на холостом ходу на чистом ДТ в течение 10-15 минут для прогрева. Сразу по окончании работы, чтобы очистить элементы двигателя от остатков смесового топлива, необходимо также запустить двигатель на холостом ходу на чистом ДТ в течение 10-15 минут. Это позволит облегчить последующий запуск двигателя и увеличить срок службы элементов топливной аппаратуры.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

В последующих научных исследованиях смесового топлива с добавлением ПМ представляется необходимым продолжить работу над получением композиций, стабильных при длительном хранении в условиях эксплуатации. При этом особое внимание следует уделить повышению пусковых качеств при минимальной пусковой частоте, обеспечению эффективной работы без глубокой модернизации серийно выпускаемых и находящихся в эксплуатации двигателей (таких как Д-144 и др.). Представляется, что критериями оценки следует выбрать величину эффективного КПД двигателя 0,30-0,34 при улучшении экологических показателей, уменьшении дымности ОГ не менее, чем на 40%.

### **Положения диссертации и полученные результаты отражены в следующих основных публикациях:**

#### **Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ:**

1. Исследование сжимаемости смесового топлива на основе пальмового масла для дизельных двигателей / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славуцкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического ун-та. – 2018. – № 3 (61). – с. 238-245.

2. Сжимаемость пальмового масла и его смесей с дизельным топливом / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славущкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. – 2018. – т. 22, № 10. – с. 178-188.

3. Перспективы использования пальмового масла в качестве топлива для транспортных дизелей / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славущкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического ун-та. – 2017. – № 4 (58). – с. 143-148.

4. Оценка влияния состава и свойств смесей дизельного топлива и пальмового масла на показатели процесса впрыскивания топлива в дизеле / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славущкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2017. – № 2 (46). – с. 284-288.

**Статьи в изданиях международных баз данных Scopus:**

5. Impact of diesel fuel and palm oil blend compositions on the performance of the fuel supply process in the diesel engine [Электронный ресурс] / Е. А. Салыкин, А. В. Курапин, Эмери Чибанда Кадиата, В. Г. Дыгало, В. М. Славущкий // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 386, conference 1: The 102nd International Scientific and Technical Conference «Intelligent Systems of Driver Assistance: Development, Research, Certification» (18-19 April, 2018, Nizhni Novgorod, Russian Federation) / Nizhny Novgorod State Technical University. – [Publisher: IOP Publishing Ltd], 2018. – 10 p. – URL : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/386/1/012014/pdf>.

*Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная*

*Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 1459*

*подписано в печать 23.10.2020 г.*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования*

*«Рязанский государственный агротехнологический университет  
имени П. А. Костычева»*

*390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1*

*Отпечатано в издательстве учебной литературы  
и учебно-методических пособий*

*ФГБОУ ВО РГАТУ*

*390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1*