**Быковская, Лариса Игоревна. Оценка эффективности применения многокомпонентных биотоплив в дизельных двигателях сельскохозяйственных машин : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Быковская Лариса Игоревна; [Место защиты: Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В.П. Горячкина].- Москва, 2013.- 184 с.: ил. РГБ ОД, 61 13-5/2706**

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.П. Горячкина**

На правах рукописи  
УДК 621.436

04201362958

Быковская Лариса Игоревна

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ БИОТОПЛИВ В ДИЗЕЛЬНЫХ  
ДВИГАТЕЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**05.20.01 - Технологии и средства  
механизации сельского хозяйства

Диссертация

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор С.Н. Девянин

Москва - 2013

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[**ВВЕДЕНИЕ 6**](#bookmark2)

1. **ВИДЫ БИОТОПЛИВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ДИЗЕЛЯХ,**

**И ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

* 1. Преимущества и перспективы использования биотоплив

в двигателях внутреннего сгорания 13

* 1. Виды биотоплив, используемых в двигателях внутреннего

сгорания 20

* 1. Физико-химические свойства биотоплив на основе растительных

масел и нефтяного дизельного топлива 24

* 1. Особенности работы дизельных двигателей на биотопливах на основе

растительных масел 38

* 1. [Цель работы и задачи исследования 45](#bookmark16)

1. **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**
   1. Режимы работы дизельных двигателей и испытательные циклы для

оценки токсичности их отработавших газов 48

* 1. Распределения режимов работы дизельных двигателей различного

назначения в условиях эксплуатации 59

* 1. Свойства многокомпонентных биотоплив и оценка токсичности

отработавших газов дизелей, работающих на этих биотопливах 69

* 1. Методика оптимизации состава многокомпонентных смесевых

[биотоплив для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин 76](#bookmark18)

Основные результаты и выводы по второй главе 85

з

1. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВАХ
   1. Методики расчета процесса топливоподачи дизельных двигателей и

[основных характеристик многокомпонентных топлив 88](#bookmark26)

* + 1. Расчет основных характеристик многокомпонентных топлив 88
    2. Методики расчета процесса топливоподачи дизельных

двигателей 102

* 1. Расчет процесса топливоподачи дизеля, работающего на смесях

дизельного топлива и рапсового масла 118

* 1. Расчет процесса топливоподачи дизеля, работающего на смесях

дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла 131

[Основные результаты и выводы по третьей главе 140](#bookmark32)

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВАХ
   1. Проблемы использования растительных масел в качестве топлива

для дизелей 142

* 1. Экспериментальные исследования дизеля, работающего на

многокомпонентных смесевых топливах 148

* 1. Оптимизация состава многокомпонентных биотоплив для

дизелей сельскохозяйственных машин 158

Основные результаты и выводы по четвертой главе 163

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ 165

[СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 168](#bookmark38)

ПРИЛОЖЕНИЕ 181

**СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ВМТ, НМТ - верхняя и нижняя мертвые точки;

ДТ - дизельное топливо;

КПД - коэффициент полезного действия;

КС - камера сгорания;

ОГ - отработавшие газы;

МЭРМ - метиловый эфир рапсового масла;

ПДК - предельная допустимая концентрация;

ПЗВ, Т; - период задержки воспламенения; п.к.в. - поворот коленчатого вала двигателя;

РМ - рапсовое масло;

СЛР - система автоматического регулирования;

ТНВД - топливный насос высокого давления;

УОВТ, 0 - угол опережения впрыскивания топлива;

ЦПТ - цикловая подача топлива;

ЦЧ — цетановое число;

NOx, СО, СНХ, С, Кх - оксиды азота, монооксид углерода, углеводороды, са­жа, дымность ОГ;

Cnoxj Ссо, ССнх> Стч - объемные концентрации в ОГ оксидов азота, моноок­сида углерода, углеводородов, твердых частиц;

Enox, Есо, Еснх, Етч - массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода, углеводородов,твердых частиц;

Cnox, С( о, еСцх, етч - удельные массовые выбросы оксидов азота, монооксида углерода, углеводородов, твердых частиц;

GT - часовой расход топлива;

ge, ge уел - удельный эффективный расход топлива; условный удельный эф­фективный расход топлива;

Срм - объемная концентрация рапсового масла (растительного масла) в сме- севом биотопливе;

dp - диаметр распиливающего отверстия; hp - положение дозирующей рейки ТНВД;

L - длина струи распиливаемого топлива;

п, пт„ - частоты вращения двигателя и топливного насоса;

Ne, Ме ~ эффективная мощность двигателя и эффективный крутящий момент; ра - давление начала сжатия; pz - максимальное давление сгорания; q„ - цикловая подача топлива;

**Рф0** - давление начала подъема иглы форсунки;

Jo, J0 отн - обобщенный критерий оптимальности, относительный обобщен­ный критерий оптимальности;

J,1C, Jgt, Jnox, Jco, Jchx - частные критерии оптимальности по эффективному КПД, часовому расходу топлива, выбросам оксидов азота, монооксида угле­рода, углеводородам;

алс, аот, aNOx, асо, аСНх - весовые коэффициенты частных критериев оптималь­ности по соответствующим параметрам; а - коэффициент избытка воздуха;

Р , - эффективный угол раскрытия струи;

рт - плотность топлива;

vT - вязкость топлива;

ат - коэффициент сжимаемости топлива;

ат - коэффициент поверхностного натяжения топлива;

цс, рсусл - эффективный КПД дизеля, условный эффективный КПД;

(ipfp - эффективная площадь распылителя в сборе.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из наиболее актуальных проблем современного двигателестрое- ния является проблема поиска моторных топлив, которые смогут успешно заменить традиционные бензин и дизельное топливо. Это обусловлено как постепенным истощением нефтяных месторождений, так и непрерывным повышением цен на нефть и нефтепродукты. По пессимистичным прогнозам организации стран - экспортеров нефти (ОПЕК) запасы нефти в промыш­ленно развитых странах иссякнут уже в ближайшем будущем. В России раз­веданных запасов нефти хватит до 2025-30 гг., а запасов газа - до 2085-95 гг. Мировые цены на нефть практически непрерывно повышаются, и прогнози­руется их дальнейший рост. В этих условиях использование в промышленно­сти, на транспорте, в сельском хозяйстве, других секторах экономики России топлив ненефтяного происхождения (альтернативных топлив) становится не только необходимым, но и экономически оправданным.

В последние годы повышенный интерес проявляется к топливам, полу­чаемым из возобновляемых энергетических ресурсов растительного проис­хождения, сырьевые запасы которых практически неограничены. В первую очередь - это биотоплива, производимые из растительных масел. Цена этих топлив соизмерима с ценой топлив нефтяного происхождения, а в ряде слу­чаев -даже ниже цен на традиционные моторные топлива.

Применительно к условиям европейской части России наиболее пер­спективными представляются топлива на основе рапсового масла. Рапс от­личается сравнительно неплохой урожайностью и с агрономической точки зрения рапс является желательной культурой для улучшения севооборота (он улучшает структуру и плодородие почвы). Получаемый при отжиме расти­тельных масел жмых (шрот) является ценным белковым продуктом, который может быть использован для откорма крупного рогатого скота и других жи-

вотных. С одного гектара посевов рапса можно получить до 3 т маслосемян (до 1 т рапсового масла), до 3,5 т соломы, до 2 т жмыха.

Использование биотоплив на базе рапсового масла позволит не только заместить нефтяные моторные топлива альтернативными, но и улучшить по­казатели токсичности отработавших газов (ОГ). При работе дизельных дви­гателей на биотопливах, как правило, отмечается заметное уменьшение эмиссии токсичных компонентов ОГ. В первую очередь это относится к дымности ОГ и выбросам других продуктов неполного сгорания топлива, которые при использовании биотоплив снижаются в 1,5-2 раза. Кроме того, использование топлив растительного происхождения обеспечивает круго­оборот углекислого газа в атмосфере, поскольку при сжигании биотоплив в двигателях внутреннего сгорания в атмосферу выбрасывается примерно та­кое же количество углекислого газа, которое поглощается в процессе выра­щивания сырья для производства биотоплива. Это приводит к уменьшению выброса в атмосферу парниковых газов, и предотвращению парникового эффекта, способствующего глобальному потеплению и возникновению раз­личных природных аномалий.

Следует отметить, что по своим физико-химическим свойствам биотоп­лива ближе к дизельным топливам, чем к бензинам: они имеют сравнительно высокие плотность и вязкость, плохую испаряемость. Поэтому их использо­вание возможно лишь в дизельных двигателях, отличающихся меньшей чув­ствительностью к свойствам применяемого топлива. К тому же, дизельные двигатели, работающие с большой степенью сжатия и повышенными значе­ниями коэффициента избытка воздуха, характеризуются лучшими показате­лями топливной экономичности и токсичности ОГ.

Вместе с тем, биотоплива имеют физико-химические свойства, отлича­ющиеся от свойств традиционного дизельного топлива. Поэтому при пере­воде двигателей, изначально адаптированных к работе на дизельном топли-

вс, па биотоплива, возникает ряд проблем, связанных с организацией рабо­чих процессов, в первую очередь - процессов топливоподачи, распиливания топлива, смесеобразования и сгорания. При этом возможно нарушение ис­ходных регулировок двигателя, ухудшение ряда эксплуатационных показа­телей дизельных двигателей, увеличение износа деталей двигателей и уменьшение ресурса их работы. Поэтому необходима адаптация двигателей к работе на этом виде топлива. Одним из эффективных путей адаптация дви­гателей к работе на биотопливах является применение смесевых биотоплив - смесей дизельного топлива и рапсового масла. Наибольшего приближения свойств биотоплив к свойствам нефтяного дизельного топлива можно до­стичь путем использования многокомпонентных биотоплив. При этом удает­ся обеспечить улучшенные показатели топливной экономичности и токсич­ности ОГ.

Диссертационная работа посвящена проблемам улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ автотракторного дизельного двигателя при использовании многокомпонентных смесевых биотоплив.

В работе проведен сравнительный анализ видов биотоплив, используе­мых в двигателях внутреннего сгорания, а также физико-химических свойств биотоплив на основе растительных масел. Рассмотрены особенности работы дизельных двигателей на биотопливах на основе растительных масел. Про­веден сравнительный анализ распределений режимов работы дизельных дви­гателей транспортного и автотракторного назначения и испытательных цик­лов для оценки токсичности их отработавших газов. Разработана методика оптимизации состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизель­ных двигателей сельскохозяйственных машин. Проведена адаптация мето­дики расчета процесса топливоподачи дизельных двигателей применительно к многокомпонентным смесевым биотопливам. Проведены расчетные иссле­дования процесса топливоподачи дизеля, работающего на смесях дизельного

топлива с рапсовым маслом и метиловым эфиром рапсового масла. Экспе­риментально исследован дизель, работающий на многокомпонентных смесе- вых топливах - смесях дизельного топлива с рапсовым маслом и метиловым эфиром рапсового масла. Проведены оптимизационные расчеты состава многокомпонентных биотоплив для дизелей сельскохозяйственных машин.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью удовлетворения жестких требований к показателям топливной экономично­сти и токсичности ОГ дизелей, в том числе и для сельхозмашин. Эти показа­тели в значительной степени зависят от характера протекания процессов распыливания топлива и смесеобразования, которые в большой мере опреде­ляются свойствами топлив. Особенно остро эта проблема стоит в дизелях, работающих на биотопливах на основе растительных масел, поскольку эти топлива отличаются от нефтяных топлив худшей испаряемостью, более тя­желым фракционным составом, повышенными плотностью, вязкостью, по­верхностным натяжением. Эта проблема может быть решена путем разра­ботки многокомпонентных смесевых топлив, но при этом необходима опти­мизация их состава, которая должна проводиться с учетом целого комплекса показателей. Использование многокомпонентных смесевых биотоплив на основе растительных масел в сочетании с оптимизацией их состава позволит достичь требуемых показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизелей сельхозмашин.

Цель работы: Обосновать и экспериментально подтвердить эффектив­ность применения многокомпонентных биотоплив в дизельных двигателях сельскохозяйственных машин.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается соче­танием теоретических и экспериментальных методов исследования. С помо­щью теоретических методов проведена оценка экологических показателей различных топлив. Экспериментальная часть работы заключалась в опреде-

лении показателей дизеля, работающего на многокомпонентных смесевых биотопливах.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

* разработана методика оптимизации состава многокомпонентных сме­севых биотоплив для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин, заключающаяся в использовании предложенного четырехрежимного испы­тательного цикла и уточненного обобщенного критерия оптимальности.
* проведена адаптация методики расчета процесса топливоподачи ди­зельных двигателей применительно к многокомпонентным смесевым био­топливам.
* в сравнительных экспериментальных исследованиях подтверждены преимущества многокомпонентных смесевых биотоплив на основе рапсово­го масла перед нефтяным дизельным топливом.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяются:

* использованием современных методик оптимизации состава смссевого биотоплива и параметров дизельного двигателя;
* использованием современных методик расчета процесса топливопода­чи дизеля;
* совпадением результатов расчетных и экспериментальных исследова­ний, полученных при испытаниях на развернутом двигателе.

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

* разработанная методика сравнительной оценки различных топлив поз­воляет определить оптимальный состав смесевых биотоплив, обеспечиваю­щий благоприятное сочетание показателей топливной экономичности и ток­сичности отработавших газов дизельного двигателя сельскохозяйственной машины, выполняющей основные технологические операции;
* методика расчета процесса топливоподачи, адаптированная для дизе­ля, позволяет оценить особенности этого процесса в дизелях, работающих на многокомпонентных биотопливах;
* проведенные экспериментальные исследования дизеля, работающего на многокомпонентных биотопливах, подтвердили эффективность исполь­зования этих топлив в отечественных дизельных двигателях сельхозмашин.

**Реализация результатов работы.** Работа проводилась в соответствии с планами госбюджетных и хоздоговорных работ кафедры «Тракторы и авто­мобили МГЛУ им. В.П. Горячкина. Результаты исследований внедрены во Всероссийском научно-исследовательском институте использования техники и нефтепродуктов Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии) и в ЗАО «Ногинский завод топливной аппа­ратуры».

**Апробация работы:**

Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Тракторы и автомобили» в МГАУ им. В.П. Горячкина в 2013 г.

По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

* на межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития поршневых ДВС», посвященной 80-летию кафедры су­довых ДВС и дизельных установок СПбГМТУ и 120-летию проф. В.А. Ван- шейдта, 18 ноября 2010 г., Санкт-Петербург, СПбГМТУ;
* на научно-практическом семинаре «Чтения В.Н. Болтинского»,

20-21 января 2010 г. и 22-23 января 2013 г., Москва, МГАУ

им. В.П, Горячкина;

* на международной научно-практической конференции «Трибология и экология (наука, образование, практика)», 22-23 апреля 2010 г., Москва, МГАУ им. В.П. Горячкина;

- на Всероссийском научно техническом семинаре (ВНТС) им. проф. В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетиче­ских установок при кафедре «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010, 2011, 2012 и 2013 г.г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 4 статьи (из них 4 - по перечню, рекомендованному ВАК) [31, 52, 59, 73] и 4 материала конференций [24, 25, 43, 53].

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 182 страницы, включая 167 страниц основного текста, содержащего 67 рисунков, 28 таблиц. Список литературы включает 117 наименований на 13 страницах. Приложение на 2 страницах включает документы о внедрении резуль татов работы.

**ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали, что применение многокомпонентных смесевых биотоплив на основе расти­тельных масел в автотракторных дизелях, а также использование методик оптимизации их состава и совершенствования процесса гопливоподачи поз­воляют значительно улучшить показатели топливной экономичности и ток­сичности ОГ дизеля. Полученные при исследованиях результаты сводятся к следующим основным выводам и рекомендациям:

1. Разработана методика сравнительного анализа эффективности ис­пользования альтернативных топлив в дизельных двигателях сельскохозяй­ственных машин, учитывающая преимущественные режимы их работы. По­казано существенное различие режимов работы дизелей сельскохозяйствен­ных машин, выполняющих технологические операции от распределения ре­жимов двигателей транспортных средств, что необходимо учитывать при анализе их экономических и экологических характеристик.
2. Для сравнительного анализа эффективности использования альтерна­тивных топлив в дизельных двигателях сельскохозяйственных машин пред­ложен четырехрежимный испытательный цикл, включающий четыре нагру­зочных режима на номинальной частоте вращения, соответствующих нагрузкам **100%, 75%, 50%** и **25%** с весовыми коэффициентами этих режи­мов (доля времени работы на режиме) соответственно **0,1; 0,4; 0,4** и **0,1.**
3. Результаты расчетных исследований процесса топливоподачи дизель­ного двигателя типа **Д-245.12С,** адаптированные на программном комплексе «Впрыск», при работе на дизельном топливе и смесевых биотопливах на ре­жиме максимальной мощности показали:

- рост давлений впрыскивания при увеличении содержания РМ или МЭРМ  
в смеси с нефтяным ДТ. На исследованном режиме максимальное давление

впрыскивания ДТ составило около 49,5 МПа, МЭРМ - 53,5 МПа, РМ - 57,0 МПа;

* подтвердилась тенденция увеличения объемной и массовой цикловых по­дач смесевого биотоплива при росте содержания РМ или МЭРМ в смеси с нефтяным ДТ. Так цикловая подача ДТ оказалась равна 67,6 мг, МЭРМ - 73,7 мг (рост 9%), РМ - около 76,0 мг (рост 12%);
* рост доли РМ или МЭРМ в смеси с нефтяным ДТ сопровождался увеличе­нием действительного угла опережения начала подачи топлива. Так впрыс­кивание МЭРМ и РМ вместо ДТ увеличило угол на 0,4-0,5 град.;
* повышение нагрузок на привод ТНВД при увеличении содержания РМ или МЭРМ в смеси с нефтяным ДТ. Так максимальный крутящий момент на кулачковом валу ТНВД оказался равным при работе на ДТ - 61,5 Н м, при работе на МЭРМ - 71,5 Н м (рост 16%), при работе на РМ - 73,5 РГм (рост 19%), что необходимо учитывать при использовании этих топлив.

1. Разработана методика оптимизации состава многокомпонентных био­топлив для автотракторных дизелей, базирующаяся на использовании обоб­щенной целевой функции относительных безразмерных показателей топлив­ной экономичности и токсичности ОТ. Оценка топливной экономичности дизеля производилась по эффективному КПД, а токсичности ОГ - по выбро­сам оксидов азота, монооксида углерода и несгоревших углеводородов. Апробация методики проведена на режимах предложенного для дизелей сельскохозяйственных машин четырехрежимного цикла.
2. Сравнительные экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С на дизельном и многокомпонентных топливах:

* биотопливо № 1 (смесь 90% ДТ, 5% РМ и 5% МЭРМ);
* биотопливо № 2 (смесь 80% ДТ, 10% РМ и 10% МЭРМ);
* биотопливо № 3 (смесь 60% ДТ, 20% РМ и 20% МЭРМ),

подтвердили возможность снижения выбросов токсичных компонентов ОГ при их использовании.

1. Наилучшие показатели дизеля, оцененные по разработанным методи­кам получены с биотопливом №2 (наименьшее значение обобщенного кри­терия *J0* ОТН=0,920). При этом достигнуто улучшение всех интегральных пока­зателей дизеля на режимах предложенного испытательного цикла для дизе­лей сельскохозяйственных машин - выброс оксидов азота снизился на 6,9 %, выброс монооксида углерода - на 10,4%, выброс несгорсвших углеводоро­дов - на 11,7%, условный эффективный КПД возрос на 0,3%.
2. При исследовании биотоплива № 2 по правилам *R* 49 (тринадцатире­жимный цикл для определения интегральных показателей токсичности ОГ двигателей транспортных машин) получено следующее снижение: оксидов азота - на 2,9%, монооксида углерода - на 6,0%, несгоревших углеводородов — на 5,8%, дымности ОГ на 30-45%. При этом условный эффективный КПД дизеля г|е усл оставался неизменным (цс усл=0,342). Эти данные подтверждают необходимость учета особенностей распределения режимов работы двигате­лей сельскохозяйственных машин при оценке эффективности применения альтернативных топлив.