

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Российский научно-исследовательский институт информации  
и технико-экономических исследований по инженерно-техническому  
обеспечению агропромышленного комплекса»  
(ФГБНУ «Росинформагротех»)

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ  
ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАКТОРОВ  
НА ТОПЛИВЕ С БИОДОБАВКАМИ  
РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

Аналитический обзор



Москва 2021



# Техника и оборудование для села

Сельхозпроизводство • Переработка • Агротехсервис • Агробизнес

ЖУРНАЛ

**«ТЕХНИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СЕЛА» –  
ВАШ ПОМОЩНИК В НАУЧНОЙ, ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ,  
УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ И УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ!**



Ежемесячный полноцветный научно-производственный и информационно-аналитический журнал «Техника и оборудование для села», учредителем и издателем которого является ФГБНУ «Росинформагротех», выпускается с 1997 г. при поддержке Минсельхоза России. За это время журнал стал одним из ведущих изданий в отрасли и как качественное и общественно значимое периодическое средство массовой информации в 2008, 2009 и 2011 гг. удостоен знака отличия «Золотой фонд прессы». В редакционный совет журнала входят 8 академиков РАН и один академик НАН Республики Казахстан.

В журнале освещаются актуальные проблемы технической и технологической модернизации АПК: инновационные проекты, технологии и оборудование, энергосбережение и энергоэффективность; механизация, электрификация и автоматизация производства и переработки сельхозпродукции; агротехсервис; аграрная экономика; информатизация в АПК; развитие сельских территорий; технический уровень сельскохозяйственной техники; возобновляемая энергетика и др.

Журнал является постоянным участником международных и российских выставок, конференций и других крупных мероприятий в области АПК, проходящих в России, неоднократно отмечался почетными грамотами, дипломами и медалями (более 10).

Журнал включен в международную базу данных AGRIS ФАО ООН, Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, входит в ядро РИНЦ и базу данных RSCI.

Регионы распространения журнала: Центральный, Центрально-Черноземный, Поволжский, Северо-Кавказский, Уральский, Западно-Сибирский, Восточно-Сибирский, Северный, Северо-Западный, Калининградская область, а также государства СНГ (Украина, Беларусь, Казахстан).

Индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 42285.

Стоимость подписки на 2021 г. с доставкой по Российской Федерации – 9636 руб. с учетом НДС (10%).

Приглашаем разместить в журнале «Техника и оборудование для села» информационные (рекламные) материалы, соответствующие целям и профилю журнала.

Подписку и размещение рекламы можно оформить через ФГБНУ «Росинформагротех» с любого месяца, на любой период, перечислив деньги на наш расчетный счет.

**Банковские реквизиты:** УФК по Московской области (Отдел № 28 Управления Федерального казначейства по МО)

ИНН 5038001475/КПП 503801001

ФГБНУ «Росинформагротех», л/с 20486Х71280,

Единый казначейский счет 40102810845370000004

Казначейский счет 03214643000000014800 в ГУ Банка России

по ЦФО // УФК по Московской области, г. Москва, БИК 004525987

В назначении платежа указать

код КБК (000 0000 0000000 000 440), ОКТМО 46758000.

Адрес редакции: 141261, Московская обл., пос. Правдинский, ул. Лесная, 60,

Росинформагротех, журнал «Техника и оборудование для села».

Справки по телефонам: (495), 993-44-04, (496) 531-19-92;

E-mail: [r\\_technica@mail.ru](mailto:r_technica@mail.ru), [fgnu@rosinformagrotech.ru](mailto:fgnu@rosinformagrotech.ru)



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Российский научно-исследовательский институт информации  
и технико-экономических исследований по инженерно-  
техническому обеспечению агропромышленного комплекса»  
(ФГБНУ «Росинформагротех»)

# **ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАКТОРОВ НА ТОПЛИВЕ С БИОДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

***Аналитический обзор***

---

Москва 2021

УДК 621.436:662.762.2

ББК 40.421:31.354

Э 94

**Рецензенты:**

**А.И. Петрашев**, д-р. техн. наук (ФГБНУ ВНИИТиН);

**Ю.А. Шамарин**, канд. техн. наук, доцент  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал)

**Голубев И.Г., Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Корнев А.Ю., Мишу-  
Э 94 ров Н.П., Болотина М.Н. Эффективность работы дизельных  
двигателей тракторов на топливе с биодобавками растительного  
происхождения: аналит. обзор – М.: ФГБНУ «Росинформагротех»,  
2021. – 72 с.**

**ISBN 978-5-7367-1627-2**

Показана возможность использования рапса, подсолнечника, сои и других масличных культур для производства биодобавок к смесевому топливу, получаемых из хлопчатника, льна, кориандра, горчицы, сафлора, хвойных деревьев, арахиса, ятрофы и др. Дано сравнение свойств биодобавок из некоторых растительных масел и нефтяного дизельного топлива.

Предназначен для руководителей и специалистов предприятий АПК, научных работников, а также преподавателей и студентов вузов.

---

**Golubev, I.G., Nagornov, S.A., Zazulya, A.N., Kornev, A.Yu., Mi-  
shurov, N.P., Bolotina, M.N. Efficiency of Operation of Tractor Diesel  
Engines on Fuel with Plant Bio-Additives. Analytical Review (Moscow:  
Rosinformagrotekh) 72 (2021).**

The possibility of using rapeseed, sunflower, soybeans and other oilseeds obtained from cotton, flax, coriander, mustard, safflower, conifers, peanuts, jatropha, etc. for the production of bioadditives for blended fuels is shown. The properties of bioadditives made of some vegetable oils and petroleum diesel fuel are compared.

It is intended for managers and specialists of agricultural enterprises, researchers, as well as teachers and university students.

УДК 621.436:662.762.2

ББК 40.421:31.354

ISBN 978-5-7367-1627-2

© ФГБНУ «Росинформагротех», 2021

В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642) указано, что приоритетным и перспективным направлениями научно-технологического развития Российской Федерации является переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству [1]. Сельскохозяйственное производство – один из основных потребителей дизельного топлива. По данным Росстата и Минсельхоза России, только в 2019 г. в сельскохозяйственные организации поступило свыше 4223 тыс. т дизельного топлива [2], так как агропромышленное производство потребляет практически все виды энергоресурсов (электрическую энергию, природный и сжиженный газ, мазут, автотракторное топливо, твердые виды топлива и др.) [3].

Важным резервом экономии топлива являются совершенствование технологии обеспечения топливосмазочных материалов (ТСМ), техническое перевооружение службы, введение автоматических систем контроля и учета количества ТСМ. Установлено, что при хранении и транспортировании около 75% потерь топлива приходится на испарение. Модернизация нефтескладов, в том числе благодаря использованию цифровых решений, позволит снизить потери ТСМ в процессе транспортирования, хранения и выдачи на 1,5-2,0% их годового расхода по хозяйству [4, 5, 6, 7, 8].

Продукты переработки нефти – главный источник энергии двигателей автомобилей, сельскохозяйственных машин и другой техники. По причине выброса вредных веществ при сгорании топлива, таких как оксиды углерода, серы, азота, сажа, соединения свинца, несгоревшие углеводороды и продукты их окисления, бенз[а]пирен, происходит загрязнение окружающей среды. В отработавшем дизельном топливе меньше оксида углерода, чем в топливе карбюраторного двигателя, но больше сажи и бенз[а]пирена. Последний содержит канцерогены и представляет большую опасность для здоровья человека и экологии. Поэтому проводятся исследования по замене топлива нефтяного происхождения альтернативным, в том числе смесевым. Например, на основе анализа физико-химических свойств этилового спирта показано, что его можно использовать в качестве одного из компонентов смесевого топлива для дизелей. Возможность использования этилового спирта для частичной

замены стандартного дизельного топлива показывают результаты исследований, проведенных в Англии («Ricardo»), Японии («Komatsu»), США («John Deere»), ФРГ («Volkswagen», «MAN»), России (МАДИ, НАМИ и др.) и других странах [9].

Большой объем исследований отечественных и зарубежных ученых связан с использованием биотоплива для сельскохозяйственной техники [9, 10, 11, 12, 13]. Среди видов биотоплива значимое место занимает биодизель – вид топлива на основе жиров растительного и животного происхождения. По техническим характеристикам он схож с обычным дизельным топливом, но менее токсичен, имеет более высокую температуру вспышки, что снижает вероятность случайного возгорания. Хорошие смазочные свойства биодизеля продлевают срок работы двигателя. В странах ЕС он рассматривается как основное возобновляемое жидкое топливо [14].

Перспективным источником тепловой энергии, используемой в дизелях автотракторной техники, является биоминеральное топливо, получаемое смешиванием растительного масла и товарного минерального дизельного топлива (ДТ). В качестве биокompонента для такого смешевого топлива применяются рапсовое, яatroфовое, соевое, мадуковое, касторовое, пальмовое, подсолнечное, горчичное, рыжиковое и другие масла [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Смесевое топливо с биодобавками способно улучшать эксплуатационные и эмиссионные характеристики дизельных двигателей. В то же время использование биотоплива в дизельных двигателях имеет и недостатки (высокая вязкость смешевого топлива, полимеризация при хранении и сжигании, кислотный состав, содержание свободных жирных кислот, загущение смазочного масла) [19].

В аналитическом обзоре показана возможность использования рапса, подсолнечника, сои и других масличных культур для производства биодобавок для смешевого топлива, а также дано сравнение некоторых свойств растительных масел и нефтяного дизельного топлива. Показаны результаты стендовых и эксплуатационных испытаний дизельных двигателей на смешевом топливе.

При подготовке обзора использовались результаты исследований ученых ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (ФГБНУ ВНИИТиН), ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФНАЦ ВИМ), РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Пензенского ГАУ, Ульяновского ГАУ, Тверской ГСХА и др.



## 1. СЫРЬЕВАЯ БАЗА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОДОБАВОК РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

---

Сельскохозяйственное производство является одним из основных потребителей дизельного топлива. Только в 2019 г. в сельскохозяйственные организации его поступило свыше 4223 тыс. т. Динамика объемов поставок дизельного топлива сельскохозяйственным организациям субъектов Российской Федерации приведена в табл. 1.1 [2].

Таблица 1.1

### Поставки дизельного топлива сельскохозяйственным организациям субъектов Российской Федерации в 2016-2019 гг., тыс. т

| Субъект Российской Федерации  | 2016 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Центральный федеральный округ | 816,4   | 827,7   | 860,9   | 828,7   |
| Тверская область              | 16,3    | 15,5    | 14,4    | 13,1    |
| Смоленская область            | 13,9    | 14,0    | 12,5    | 13,2    |
| Ярославская область           | 19,0    | 17,4    | 18,5    | 17,6    |
| Всего                         | 4258,4  | 4287,5  | 4306,5  | 4223    |

В настоящее время проводятся исследования по замене топлива нефтяного происхождения альтернативным, в том числе смесевым с биодобавками. Анализ показал, что биодобавки для смесового дизельного топлива могут быть произведены из более чем 50 видов масличных культур [10, 14, 18, 19, 20]. Это позволяет подобрать для производства биотоплива масличную культуру, в наибольшей степени приспособленную к выращиванию в конкретном регионе. Особенности и эффективность их применения в смесовом дизельном топливе для тракторов подробно рассмотрены в работах [21, 22].

Для получения растительных масел в мире возделывают в основном сою, рапс и подсолнечник. Применительно к условиям Европейской части России перспективной масличной культурой считается рапс – с 1 га посевов можно получить до 1 т масла [14].

Наибольшую долю в мировом производстве растительных масел занимает соевое масло. В России распространенным растительным маслом является также подсолнечное. Объем его производства превышает 80% общего объема получения растительных масел. Оно вызывает дополнительный интерес еще и потому, что выпуск биотоплива может быть организован из отработанного фритюрного подсолнечного масла, широко применяемого в пищевой промышленности. Результаты проведенных исследований подтверждают возможность использования в дизельных двигателях топлива, получаемого из растительных масел. Динамика посевных площадей некоторых масличных культур в хозяйствах всех категорий дана в табл. 1.2 [2].

Таблица 1.2

**Посевные площади некоторых масличных культур в хозяйствах всех категорий Российской Федерации в 2016-2019 гг., тыс. га**

| Культура     | 2016 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| Подсолнечник | 7607    | 7994    | 8160    | 8584    |
| Рапс:        |         |         |         |         |
| яровой       | 881     | 851     | 1387    | 1357    |
| озимый       | 98      | 154     | 189     | 191     |
| Соя          | 2237    | 2636    | 2949    | 3079    |

Динамика валового сбора рапса в хозяйствах всех категорий представлена на рис. 1.1 [2].

Наибольшее распространение в качестве сырья для биотоплива получило *рапсовое масло* [22-30]. У чистого рапсового масла вязкость в 25 раз выше, содержание серы в 10 раз меньше, чем у дизельного топлива, температура застывания на 17° выше по сравнению с зимним топливом и на 10° ниже – с летним. Жиры (глицериды), входящие в состав растительных масел, представляют собой сложные эфиры трехатомного спирта глицерина и высших карбоновых кислот [24]. Эти отличия необходимо учитывать при адаптации топливной аппаратуры дизелей для работы на топливе с биодобавками из рапсового масла.





Рис. 1.1. Динамика валового сбора рапса в хозяйствах всех категорий, тыс. т

В работе [31] показано, что биокomпонентом дизельного смешанного топлива может быть растительное масло, получаемое из *сурепицы*, которая в отличие от рапса менее требовательна к условиям произрастания. Короткий период вегетации и высокая урожайность семян сурепицы, схожие теплотворные, химические и физические свойства сурепного и рапсового масел позволяют отнести сурепное масло (далее – СурМ) к перспективному биокomпоненту.

Путем сравнительной оценки показателей сурепицы и сурепного масла с аналогичными показателями рапса и рапсового масла установлено, что основными достоинствами сурепицы являются хорошие урожайность (1,4-2,2 т/га) и масличность (39-45%). В отличие от рапса она менее требовательна к условиям произрастания и имеет более короткий период вегетации [31].

В Ульяновском ГАУ предлагается применять в качестве биодобавки к смешанному топливу *рыжиковое масло*. Использование его в качестве биокomпонента дизельного смешанного топлива позволяет улучшить смазывающие свойства топлива и параметры топливоподачи дизеля, снизить износ и повысить ресурс плунжерных пар насосных секций ТНВД [32]. У рыжикового масла низшая теплота сгорания 37,0 (37,1) МДж/кг, плотность – 920 кг/м<sup>3</sup>, вязкость – 51,6 мм<sup>2</sup>/с. Содержание высших жирных кислот в натуральном

рыжиковом масле следующее: насыщенные ВЖК – 8,5%, мононенасыщенные – 26,4, полиненасыщенные – 69,1% с преобладанием  $\alpha$  – линоленовой (36,92%), линолевой (24,29%), олеиновой (12,73%) и эйкозеновой (11,19%) кислот [32].

**Рыжик** (*Camelina sativa* (L.) Crantz.) (рис. 1.2) – масличная культура, относящаяся к семейству капустных (*Brassicaceae* Burnett) [14].

В промышленных масштабах выращивается в Западной и Восточной Сибири, на небольших площадях – в Европейской части России, Швеции, Германии, Франции, Бельгии, Нидерландах. Обширная селекционная программа по рыжику осуществляется в Красноярском крае, где созданы сорта Чулымский и Крупносемянный. Коллекция насчитывает более 300 образцов различного происхождения и включает в себя все разнообразие форм и сортов, встречающихся на территории России, а также небольшое количество сортов и образцов

шведской, немецкой, чешской и венгерской селекции. Рыжик бывает яровой и озимый.

**Рыжик яровой** имеет ветвистый стебель высотой 40–95 см. Листья ланцетовидные, к вершине заостренные, сидячие, со стреловидным основанием, цельнокрайние или зубчатые. Цветки желтые на длинных цветоножках. Чашелистики продолговатые, тупые, длиной 2,5–8 мм, шириной 1 мм. Лепестки вверху закругленные, длиной 4–5 мм. Плод – стручочек обратно-яйцевидной формы с округлой верхушкой и сильно выпуклыми створками длиной 7–9 мм. Семена мелкие, удлинено-яйцевидные, длиной 2 мм, шириной 1 мм, желтые или желто-оранжевые, масса 1000 семян 0,9–1,4 г.



Рис. 1.2. Рыжик посевной

**Рыжик озимый** имеет прямой ветвистый жесткий деревянистый стебель высотой 70-100 см. Листья ланцетные, зазубренные, на коротких черешках или сидячие. Стебель и листья покрыты короткими волосками. Цветки мелкие, бледно-желтые, соцветие кистевидное, стручки на коротких плодоножках. Число стручков на одном растении достигает 120. Продолжительность вегетационного периода ярового рыжика – 65-90 дней. Он созревает раньше других озимых и яровых (подсолнечник, рапс) культур. Как более скороспелую культуру его можно использовать в промежуточных посевах. Рыжик практически не поражается вредителями и болезнями, что снижает затраты на выращивание и делает его производство экологически безопасным. Урожай семян рыжика (6-20 ц/га) ниже, чем у рапса (10-30 ц/га), но более стабилен, масличность достигает значений ярового рапса (до 41 %). Содержание эруковой кислоты в масле (2-6 % суммы жирных кислот) и глюкозинолатов (18-26 мкмоль/г) в семенах не превышает требований, предъявляемых к использованию жмыхов и шротов в кормах. В отличие от рапса рыжик не нуждается в дополнительной селекции (табл. 1.3) [14].

Таблица 1.3

### Характеристика рапса и рыжика по хозяйственным признакам

| Культура    | Урожайность по семенам, ц/га | Длина вегетационного периода, дни | Масличность, % |
|-------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Озимый рапс | 20-47                        | 290                               | 35-48          |
| Яровой рапс | 10-30                        | 100                               | 32-46          |
| Рыжик       | 6-20                         | 65                                | 33-41          |

В ФГБНУ ВИАТН (г. Тамбов) проведен весь цикл исследований, связанных с получением биодизельного топлива из семян различных масляных культур. Отжим масла из семян рыжика осуществлялся на шнековом экструдере. Влажность семян при отжиге составляла около 8%. Выход масла – 42,6% (для рапсового – 44,2%). Полученное масло прозрачное, светло-жёлтого цвета, без посторонних запахов. Плотность при 20°C 920 кг/м<sup>3</sup>, вязкость при той же температуре 56 мм<sup>2</sup>/с, кислотное число 0,64 мг КОН/г, серосодержащие соединения отсутствуют.

*Масло рыжика* имеет более высокое йодное число, чем масло рапса, поэтому оно более жидкое с более низкой температурой за-

ствывания. Сумма полиненасыщенных жирных кислот (линолевой и линоленовой) у рыжика превышает 50%.

*Соевое масло* обладает наименьшей вязкостью (57,5 мм<sup>2</sup>/с) и плотностью (918 кг/м<sup>3</sup>), по температуре застывания (от -10 до -18°C) уступает только сафлоровому маслу. Соя имеет ряд преимуществ перед альтернативными масличными культурами: высокая урожайность (2,2-3,0 т/га), более низкая стоимость, наибольшие площади посева. Основные показатели физико-химических, теплотворных и смазочных свойств соевого масла: плотность 918 кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость 57,5 мм<sup>2</sup>/с, температура вспышки 312°C, низшая теплота сгорания 37,05 МДж/кг [33].

Некоторые специалисты предлагают использовать в качестве биоконпонета в смесевое топливо *редечное масло* [34]. Исследования показали, что редечное масло имеет значительно бóльшие плотность и вязкость по сравнению с соответствующими показателями минерального топлива. При увеличении в смесевом топливе доли минерального дизельного топлива разница значений существенно снижается. Низшая теплота сгорания редечного масла равна 37,37 МДж/кг, что на 11,9% ниже соответствующего показателя минерального топлива (42,40 МДж/кг). При увеличении доли минерального топлива в смесевом топливе низшая теплота сгорания увеличивается. Например, для смесевое топлива 25%РедМ+75%ДТ она равна 41,24 МДж/кг, что ниже соответствующего показателя минерального топлива на 2,8% [34].

**Редька масличная** (*Rhaphanus sativus* L.) (рис. 1.3) относится к семейству *Brassicaceae*. Однолетнее растение, достигающее высоты 1 м и более. Соцветие – рыхлая кисть. Цветки небольшие, белые, светло-сиреневые или розовые. Характеризуется быстрым ростом, холодостойкостью, высокой урожайностью, масса семян с 1 м<sup>2</sup> – 160 г, что в пересчете на 1 га составляет 1,6 т, масса 1000 семян – 8-13 г. Через 35-40 дней после появления всходов формирует урожай – 25-30 т/га зеленой массы. Благодаря короткому вегетационному периоду (90-110 дней) редьку масличную можно успешно возделывать в качестве поукосной и пожнивной культуры.

Масличность семян составляет 34-40%, жирнокислотный состав масла характеризуется наибольшим содержанием олеиновой (22-41%) и эруковой кислот (15-39%). Зеленую массу редьки используют на силос и зеленую подкормку. Из-за высокого содержа-

ния белка до конца цветения она силосуется плохо, поэтому при ранней уборке редьку нужно силосовать совместно с другими культурами.



*Рис. 1.3. Редька масличная*

Редьку масличную, как и горчицу белую, можно успешно возделывать в составе различных смесей однолетних трав, например в смешанных посевах с вико-овсяной смесью. Редька не очень требовательна к плодородию почвы. Высевают ее зерновой сеялкой обычным рядовым способом (норма высева – 6-7 млн семян на 1 га, глубина посева – 2-4 см), на зеленый корм убирают с фазы цветения до плодоношения, для силосования в чистом виде – в период плодоношения. На семенных участках уборку проводят двухфазным способом при созревании семян в средней части растения. Наиболее распространенные в Российской Федерации сорта редьки масличной Тамбовчанка и Радуга. По данным эколого-географического изучения, масличность сорта Радуга составляет от 30,7 до 36,9% [14].

В Пензенском ГАУ считают целесообразным применение в качестве биодобавки в смесевое топливо *сафлорового масла*. Основные преимущества сафлора (рис. 1.4): хорошая урожайность (1,5-2,2 т/га), высокая масличность (45-50%), короткий период вегетации, повы-





Рис. 1.4. Сафлор красивый

шенные жаростойкость и засухоустойчивость, меньшая требовательность к условиям произрастания. Сафлоровое масло имеет низкую теплоту сгорания – 36,99 Дж/кг, плотность 920 кг/м<sup>3</sup>, кинематическую вязкость – 67,3 мм<sup>2</sup>/с, динамическую – 58,3 мПа·с, температуру вспышки 232°C [35].

Для биодобавок в топливо применяют также сосновое и скипидарное масло (скипидар) [19, 36].

Сосновое масло получают из хвои, молодых веток и шишек сосны путём отгонки паром, скипидар – из смолы хвойных деревьев (живицы) (рис. 1.5). Живичный скипидар (масло терпентинное) представляет собой продукт переработки сосновой живицы с температурой вспышки 34°C, самовоспламенения – 300°C.



Рис. 1.5. Сосна обыкновенная

При исследованиях наблюдалось полное растворение скипидара в смеси с различными растительными маслами [36]. По данным некоторых исследователей, скипидар можно использовать в смесях до 60-65% к общему объему смесового топлива с незначительными изменениями в конструкции двигателя. Эксплуатационные показатели использования скипидарного масла, такие как удельный расход топлива, температура выхлопных газов и выброс дыма, ниже, чем у товарного дизельного топлива.

Впервые скипидарное масло было использовано в быту и промышленности в 1700-х годах. Некоторые исследования показали улучшение характеристик и выбросов дизельных двигателей при использовании скипидарно-дизельных топливных смесей. Скипидарное масло – это биотопливо, которое можно легко получить из смолы (живицы), извлекаемой из сосен. Физически – это желтоватая, непрозрачная, бесцветная, пахучая, не смешивающаяся с водой жидкость. Химически оно представляет собой легковоспламеняющееся, летучее и горючее вещество, содержащее  $\alpha$ -пинен – 40% по массе в скипидаре. Оно состоит из 58-65%  $\alpha$ -пинена наряду с  $\beta$ -пиненом и другими изометрическими терпенами. Благодаря таким свойствам, как вязкость, теплотворная способность, обладает значительным потенциалом для снижения зависимости от традиционных ископаемых видов топлива. Кроме того, имея способность смешиваться с дизельным топливом в любой пропорции, скипидарное масло может использоваться в качестве добавки к дизельному топливу и впоследствии полностью вытеснить его. Более высокая стоимость скипидарного масла по сравнению с традиционным дизельным топливом может быть компенсирована благодаря его низкой эмиссионной способности [19]. Скипидар имеет различные преимущества перед дизельным топливом. В двухтопливном режиме при незначительных изменениях конструкции двигателя возможна 60-65%-ная замена дизельного топлива на скипидар [19].

В последние годы внимание исследователей сосредоточено на всестороннем изучении масличных и в меньшей степени эфиромасличных культур пищевого и непищевого назначения [19, 37-54]. Наиболее популярными в данной отрасли, кроме вышеуказанных, считаются хлопчатник, лён, кориандр, горчица, рыжик яровой (посевной), кунжут, сафлор красильный, арахис, клещевина обыкновенная (кастор), ятрофа, масличная и кокосовая пальма и др. Многие

из масличных растений используются в пищевых целях. В связи с этим для производства биодизельного топлива необходим поиск новых перспективных растений – источников жирных кислот, масло которых не применяется в пищевых производствах. В частности, в России, странах ближнего зарубежья и Европе для расширения возможностей получения более дешёвых видов биодизельного топлива изучаются следующие виды растений: рыжик яровой, виды борщевика, сафлор красильный, виды дурнишника, амарант хвостатый, виды гулявника, ярутка полевая, виды желтушника, клоповник полевой, конрингия восточная, цикорий обыкновенный, фенхель обыкновенный, огуречник лекарственный, виды рода чернушка, известные в литературе под названием «чёрный тмин» и др. [14].

В работе [37] в качестве добавки в смесевое топливо рассматривается *горчичное масло*, поскольку оно является важным по значимости растительным маслом в России. Горчичное масло чаще производят из горчицы сорта сарептская (сизая) (рис. 1.6), которая представляет собой однолетнее растение семейства капустных.



Рис. 1.6. Горчица сарептская

В диком виде произрастает в Средней Азии, Северном Китае, Монголии и Сибири. Корень растения стержневой и длинный, способен проникать на 200-300 см в толщу земли. Стебель голый, ветвистый у основания, прямостоячий, достигающий 50-150 см в высоту. Листья лировидно-перисто-надрезанные, черешковые, крупные.

Цветки обоеполые, мелкие, золотисто-желтые, собраны в соцветия. Завязь содержит 12-20 семян. Период цветения – апрель-май. Плод – тонкий стручок длиной до 5 см. Семена красновато-коричневого или темно-бурого цвета, ячеистые,  $\varnothing$  0,1-0,13 см. Плоды созревают в конце лета. Горчица культивируется в странах Европы, Индокитае, Северной Африке, Индии, Китае. Растение холодо- и засухоустойчивое, нетребовательно к почвам, хороший медонос [45].

Углеводородный состав горчичного масла: С – 77,1%, Н – 11,8, О – 11,1%; плотность при 20°C – 920 кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость – 70 мм<sup>2</sup>/с, низшая теплота сгорания 37200 кДж/кг, цетановое число 35, температура самовоспламенения 320°C [37].

Учеными выявлена возможность использования масла *алепского сорго* (*Dipteryx alata* Vog., сем. бобовые) в качестве биодобавки для дизельного топлива [46]. Несмотря на питательные свойства, оно не является пищевым продуктом. Алепское сорго произрастает в Бразилии. Его плоды содержат 38,2% жира и 23,9% белка. Перспективность применения масла алепского сорго для получения биодизеля исследована недостаточно. Оно имеет следующие характеристики: кислотность – 0,7324 мг КОН/г, плотность при 20°C – 912,96 кг/м<sup>3</sup>, йодное число 65,31 мг I<sub>2</sub>/100 г, вязкость при 40°C – 35,4 мм<sup>2</sup>/с, содержание воды 1546 млн<sup>-1</sup>, пероксидное число 4 мг/1000 г, число омыления 188,2 мг КОН/г, показатель преломления при 40°C – 1,4728, эфирное число 187,44 [46].

*Льняное масло* – одно из лучших высыхающих масел, имеющих разнообразное техническое применение [38].

Лен обыкновенный (культурный или посевной – *Linum usitatissimum*) представляет собой однолетнее (иногда озимое) растение семейства льновых (рис. 1.7).

Лен масличный является для России традиционной сельскохозяйственной культурой. Известно около 20 сортов этого растения. Наибольшее распространение получили три разновидности: лен-долгунец, который отличается волокном высокого качества; лен-кудряш, используемый в основном как масличная культура; лен-межеумок (промежуточный), который является маслично-волокнистой культурой. В семенах современных сортов *масличного* льна содержится до 50% и более растительного масла. Жирнокислотный состав льняного масла несколько отличается от аналогичного состава наиболее распространенного в России подсолнечного масла. Так, если



подсолнечное масло богато линолевой кислотой, то льняное – линоленовой, имеющей три ненасыщенные связи. Поэтому льняное масло менее стабильно в окислительных процессах по сравнению с подсолнечным. Низкая окислительная стабильность (высокая окисляемость) льняного масла обуславливает ограниченное время его хранения. Если срок хранения подсолнечного нерафинированного масла составляет 38 недель, то льняного нерафинированного – лишь 26 недель. Но при этом просроченное льняное масло может быть использовано в качестве моторного топлива. По сравнению с нефтяным дизельным топливом льняное масло отличают большие плотность и вязкость, поэтому работа дизельных двигателей на смесях дизтоплива и льняного масла целесообразна. Эти компоненты хорошо смешиваются между собой, образуя стабильные смеси. Плотность льняного масла при 20°C – 912 кг/м<sup>3</sup>, вязкость кинематическая при 20°C – 59,6 мм<sup>2</sup>/с, при 40°C – 23,6 мм<sup>2</sup>/с, низшая теплота сгорания 37600 кДж/кг, цетановое число 38, температура самовоспламенения 300°C, помутнения – 12°C, застывания – 20°C, углеводородный состав льняного масла С – 77,8%, Н – 12,0, О – 10,2, общее содержание серы – 0,002% [38].



*Рис. 1.7. Лен масличный*

*Кукурузное масло* используется в меньших объемах, чем рапсовое или подсолнечное. Показатель вязкости у него немного меньше, чем у подсолнечного, что позволяет выпрыскивать большее его количество в камеру сгорания. Температура застывания кукурузного масла на 3°C выше, чем подсолнечного и на 10°C – рапсового [47].



*Талловое масло* (ТМ) является побочным продуктом сульфатно-целлюлозного производства, представляет собой жидкость с поликомпонентным комплексом биологически активных веществ растительного происхождения. Его получают из древесного сырья хвойного и лиственного происхождения [39]. В связи с увеличением в перерабатываемом древесном сырье доли лиственных пород (осина, береза и др.) в составе образцов ТМ различного происхождения содержание жирных кислот и нейтральных веществ может изменяться в широком интервале. Так, в составе очищенного ТМ суммарно обнаруживается более 75% природных жирных кислот (ЖК), в том числе: олеиновой – 9,7%, линолевой – 48,5, линоленовой – 1,3, эйкозеновой – 0,7, стеариновой – 3,6, пальмитиновой – 7, арахидовой – 2,4, гонэйкозановой – 0,8, бегеновой – 2,5, лигноцериновой – 1,2%. Содержание смоляных кислот: пимаровой – 0,6%, дегидро-абиетиновой – 3,7, оксикислот – 3,8%. Состав сырого ТМ может включать в себя, в зависимости от вида сырья и технологии его переработки, до 30-50% смоляных кислот, 35-90% ЖК и несколько процентов сернистых соединений, которые после дистилляционной очистки ТМ остаются в кубовом остатке. Очищенные талловые масла обычно содержат 92-94% жирных (ЖК), 2-3 смоляных кислот и 2-5% неомыляемых веществ. Из сырого ТМ из древесины лиственных пород вакуумной дистилляцией с присадкой водяного пара выделяют до 70% ЖК, содержащихся в виде продукта высокой степени чистоты. Доля ЖК в них превышает 96-97%, доля неомыляемых веществ составляет около 1%. Основными липидными компонентами ТМ являются природные триглицериды, в которых алкильные заместители представляют собой остатки предельных, моно- и полиненасыщенных жирных кислот [38]. Вещество обладает следующими физико-химическими характеристиками: вязкость (при  $t = 40^{\circ}\text{C}$ ) – 410-1660 сСт; плотность при  $20^{\circ}\text{C}$  – 994-1001 кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость – 1,6-4,1 кДж/(кг·К); кислотное число – 158-163; температура вспышки –  $221^{\circ}\text{C}$ , самовоспламенения –  $304-311^{\circ}\text{C}$ ; теплопроводность при нормальной температуре – 0,13-0,15 Вт/(м·К). Свойства таллового масла (температура затвердевания, вязкость) улучшают путем добавления присадок из фенолформальдегидных смол, спиртов и других соединений. Плотность, содержание смоляных кислот, кислотное число и число омыления зависят от состава древесного сырья [40].

Перспективным направлением замещения светлых нефтепродуктов биотопливом является переработка фитомассы *микроводорослей*. Биосырье данного класса многократно превосходит традиционные культуры по продуктивности фитомассы. Проведенный анализ полученных данных установил сходство свойств триацилглицеринов высших алифатических кислот микроводорослей и растительных масел. Этот факт свидетельствует о возможности использования липидов микроводорослей в качестве исходного сырья для синтеза биодобавки к смесевому моторному топливу. Доказано, что состав липидов микроводорослей сходен с аналогичным составом растительных масел. Выявлено, что у биодобавок плотность, вязкость и цетановое число выше, а содержание серы ниже, чем у дизельного топлива. При испытании тракторов экспериментально получено существенное снижение дымности и токсичности отработавших газов дизелей при увеличении содержания биодобавок из микроводорослей в смесевом моторном топливе. Полученные результаты обуславливают перспективность широкого применения такого смесового моторного топлива в дизельных двигателях тракторов сельскохозяйственного назначения [41-44].

Сырьем для получения биотоплива из растительных масел служат: в Европе – рапс, США – соя, Канаде – канولا, в Индонезии и на Филиппинах – пальмовое и кокосовое масла, в Индии – ятрофа, Африке – соя и ятрофа, Бразилии – касторовое масло. Выбор масла в основном обусловлен распространенностью в данной стране и слабо связан с его выходом из семян масличной культуры [14].

*Масло ятрофы* может стать наиболее эффективным заменой в качестве альтернативного топлива среди непищевых растительных масел. Ятрофу (*Jatropha curcas*) можно выращивать на землях всех типов, включая пустыни и пустоши. Эти растения могут выдерживать неблагоприятные погодные условия. Растение ядовито, поэтому жмых не может использоваться в качестве корма для животных, а только как органическое удобрение (рис. 1.8) [19].

*Индау* (лат. *Eruca*) – однолетнее растение семейства капустных. Возделывается в различных климатических условиях в качестве масличной и овощной культуры. Цветет с мая по июль, плодоносит в июле-августе. Высота растения около 80 см, на нем формируется до 250 семян, которые находятся в продолговатых загнутых стручках, богаты растительным маслом (рис. 1.9). Культура устойчива к

засухе и болезням, незначительно поражается вредителями. Продолжительность вегетационного периода 75-90 дней. Условия Центральной России наиболее благоприятны для выращивания индау на масло.



*Рис. 1.8. Ятрофа куркас*



*Рис. 1.9. Индау*

*Молочай* (лат. *Euphórbia*) – самый большой род растений семейства молочайные (рис. 1.10).

Неприхотливое растение, размножается семенами, черенками и делением куста. Цветет с мая по октябрь, после чего в цветоносах формируются плоские шаровидные плоды – трёхорешники, приблизительный диаметр 2 мм. Молочай – сорняк, произрастает в садах и огородах, засеивается самостоятельно, имеет плотную, крепкую корневую систему, хорошую выносливость. Может свободно произрастать на сухих почвах, а также садах и огородах. Даже после тщательной уборки, выживаемость сорняка остается высокой [14].



Рис. 1.10. Молочай

Растительное масло получают из семян индау и молочая методом отжима на маслопрессе. Масло индау – желтое с травянистым запахом, плотностью 897 кг/м<sup>3</sup> при 20°C, молочая – темно-коричневое с травянистым запахом, плотностью 902 кг/м<sup>3</sup> при 20°C [14].

*Крамбе абиссинская* (*Crambe abyssinica* Hochst.) однолетнее растение, семейства *Brassicaceae* (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Крамбе абиссинская

Крамбе (абиссинская горчица, абиссинская капуста, катран) в диком виде распространена в средиземноморье, где растет на известковых и каменистых почвах. Корень стержневой, неглубокий с большим количеством длинных боковых ответвлений. Стебель прямостоячий высотой 80-120 см, сильно ветвистый, число ветвей первого порядка от 10 до 32. Ветвление начинается от основания стебля. Встречаются растения с высотой штамба 10-20 см. Стебель в нижней части покрыт короткими густыми волосками. Листья черешковые, нижние имеют округлую форму, последующие – перисто-расчеченные с сильно развитой верхней долей и двумя маленькими боковыми. Верхние листья мелкие, яйцевидной формы, верхушечные листочки линейные, сидячие. Цветки сравнительно мелкие, белые, собраны в кистевидное соцветие, четырехлепестковые, типичные для семейства капустных [14]. Плод – односемянной (редко – двусемянный) орешек шаровидной формы  $\varnothing$  1,5-4,5 мм, окраска ко времени созревания соломенно-желтая. Семена шаровидные, бурые или зеленовато-бурые, мелкие,  $\varnothing$  1,8-2,5 мм. Масса 1000 семян 9-12 г. На одном растении от 2450 до 2750 семян.



Возделывать крамбе можно на различных почвах, за исключением сухих песчаных и тяжелых глинистых. В севообороте крамбе размещают в пропашном поле после озимых зерновых и зернобобовых культур. Не рекомендуется высевать в севообороте после других крестоцветных культур (капуста, горчица и др.), а также ежегодно на одном и том же участке. Обработка почвы включает в себя систему зяблевой вспашки, ранневесеннее боронование зяби, предпосевную культивацию с боронованием. В северных районах нечерноземной полосы под посеvy крамбе следует проводить перепашку зяби с последующим боронованием. Как высокоурожайная культура крамбе требует сравнительно большого количества питательных веществ. Внесение в почву органических и минеральных удобрений резко увеличивает урожай семян. Наиболее благоприятен ранневесенний посев вслед за ранними зерновыми культурами. Прибавка урожая семян по сравнению с более поздним сроком посева составляет 3-5 ц/га. Длина вегетационного периода в условиях Тамбовской области – 90-110 дней. Всходы-цветение 42-50 дней, цветение-созревание 48-60 дней. Урожай семян с 1 м<sup>2</sup> опытных посевов составляет 300-500 г. В конкурсном сортоиспытании получен урожай семян 4 т/га, масличность – 30,7-35,7%. Масло используется в технических целях, легко рафинируется, имеет низкое йодное число (от 86 до 97). По качеству оно близко к маслу белой горчицы. Содержание эруковой кислоты 60-65%. Культура получила более широкое распространение как источник эруковой кислоты, которая используется в лакокрасочной промышленности, при изготовлении нейлона, смазочных материалов и биодизельного топлива. Крамбе возделывают в Канаде, США, Испании, Польше и других странах. Семена содержат большое количество белка (до 35%). Мука грубого помола используется как белковая добавка в рационы крупного рогатого скота, а жмых – как ценное белковое удобрение [14].

Объемы производства масла из различного сырья с 1 га пашни в год приведены в табл. 1.4.

Сравнительный анализ биодобавок в смесевое топливо из наиболее часто применяемых растительных масел, в том числе рапсового, приведен в табл. 1.5.

Таблица 1.4

**Производство масла  
из различного сырья с 1 га пашни в год, л**

| Сырье            | Объем масла | Сырье             | Объем масла |
|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Кукуруза         | 172         | Сафлор красильный | 779         |
| Хлопок           | 325         | Подсолнечник      | 952         |
| Соя              | 446         | Арахис            | 1059        |
| Лен              | 478         | Рапс              | 1190        |
| Лесной орех      | 482         | Олива             | 1212        |
| Семена тыквы     | 534         | Кастор            | 1413        |
| Кориандр         | 536         | Ятрофа            | 1892        |
| Семена горчицы   | 572         | Бразильский орех  | 2392        |
| Рыжик (растение) | 583         | Кокос             | 2689        |
| Кунжут           | 696         | Пальмовое масло   | 5950        |

Таблица 1.5

**Сравнительные характеристики растительных масел  
и нефтяного дизельного топлива**

| Масло                      | Цетановое число | Теплотворная способность, МДж/кг | Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с (при 40°C) | Плотность, кг/л (при 40°C) |
|----------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------|
| Дизельное топливо (летнее) | 45              | 42,97                            | 3-6 (при 20°C)                                         | 0,86 (при 20°C)            |
| Подсолнечное               | 37,1            | 39,6                             | 33,9                                                   | 0,9161                     |
| Рапсовое                   | 37,6            | 39,7                             | 37,0                                                   | 0,9115                     |
| Соевое                     | 37,9            | 39,6                             | 32,6                                                   | 0,9138                     |
| Пальмовое                  | 42,0            | -                                | 39,6                                                   | 0,9180                     |
| Кукурузное                 | 37,6            | 39,5                             | 34,9                                                   | 0,9095                     |
| Арахисовое                 | 41,8            | 49,8                             | 39,6                                                   | 0,9026                     |
| Сосновое                   | 11              | 42,8                             | 1,3                                                    | 0,87                       |
| Скипидар                   | 38              | 44,4                             | 2,5                                                    | 0,86                       |

Таким образом, исследования, касающиеся применения растений в качестве источника биодизельного топлива, в настоящее время активно проводятся в нашей стране и за рубежом. Количественное содержание масла в различных видах культурных растений, перспективных для производства биодизельного топлива, приведено на рис. 1.12 (The Global Petroleum Club).



Рис. 1.12. Содержание масла в культурных растениях различных видов

Как видно из приведённого перечня, многие растения, в которых велико содержание масла, используются в пищевых целях. В связи с этим для производства биодизельного топлива необходим поиск новых перспективных растений – источников жирных кислот, масло которых не применяется в пищевых производствах. При этом внимание исследователей сосредоточено на всестороннем изучении масличных и в меньшей степени эфиромасличных культур пищевого и непищевого назначения.

В России, странах ближнего зарубежья и Европе для расширения возможности получения более дешёвых видов биодизельного топлива изучаются рыжик яровой (*Camelina sativa* (L.) Crantz.), виды борщевика (борщевик обыкновенный *Heracleum sphondylium* L., борщевик сибирский *H. sibiricum* L.), сафлор красильный (*Carthamus tinctorius* L.), виды дурнишника (дурнишник обыкновенный *Xanthium strumarium* L., дурнушник колючий *X. spinosum* L.), амарант хвостатый (*Amaranthus cruentus* L.), виды гулявника (гулявник Лёзеля *Sisymbrium loeselii* L., гулявник лекарственный *S. officinalis* (L) Scop., гулявник высокий *S. altissimum* (L.) Scop.), ярутка полевая (*Thlaspi arvense* L.), виды желтушника (желтушник серый *Erysimum cheiranthoides* L., желтушник раскидистый *E. diffusum* L.), клоповник полевой (*Lepidium campestre* L.), конрингия восточная (*Conringia orientalis* (L.) Dumort.),

цикорий обыкновенный (*Cichorium inthybus* L.), фенхель обыкновенный (*Foeniculum vulgare* Mill.), огуречник лекарственный (*Borago officinalis* L.), виды рода чернушка, известные в литературе под названием чёрный тмин (чернушка посевная *Nigella sativa* L., чернушка дамасская *N. damascena* L.) и др.

Данные о содержании жирного масла в семенах указанных видов растений приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

**Содержание жирного масла  
в семенах различных растений, %**

| Вид растения                                                                                                                                                                           | Содержание жирного масла в семенах |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Рыжик яровой ( <i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz.)                                                                                                                                    | 32,6-42,6                          |
| Борщевик обыкновенный ( <i>Heracleum sphondylium</i> L.),<br>борщевик сибирский ( <i>Heracleum sibiricum</i> L.)                                                                       | 11- 19,8                           |
| Сафлор красильный ( <i>Carthamus tinctorius</i> L.)                                                                                                                                    | 26-40 (60)                         |
| Дурнишник обыкновенный ( <i>Xanthium strumarium</i> L.),<br>дурнишник колючий ( <i>Xanthium spinosum</i> L.)                                                                           | 38-43                              |
| Амарант хвостатый ( <i>Amaranthus cruentus</i> L.)                                                                                                                                     | Не более 10                        |
| Гулявник Лёзеля ( <i>Sisymbrium loeselii</i> L.), гулявник<br>лекарственный ( <i>Sisymbrium officinalis</i> (L) Scop.),<br>гулявник высокий ( <i>Sisymbrium altissimum</i> (L.) Scop.) | 25-30                              |
| Ярутка полевая ( <i>Thlaspi arvense</i> L.)                                                                                                                                            | 20-30                              |
| Желтушник серый ( <i>Erysimum cheiranthoides</i> L.),<br>желтушник раскидистый ( <i>Erysimum diffusum</i> L.)                                                                          | 27,5-42,7                          |
| Клоповник полевой ( <i>Lepidium campestre</i> L.)                                                                                                                                      | 22,2-28,5                          |
| Конрингия восточная ( <i>Conringia orientalis</i> (L.) Dumort.)                                                                                                                        | 28,8-33,2                          |
| Цикорий обыкновенный ( <i>Cichorium inthybus</i> L.)                                                                                                                                   | До 28                              |
| Фенхель обыкновенный ( <i>Foeniculum vulgare</i> Mill.)                                                                                                                                | 12-18                              |
| Огуречник лекарственный ( <i>Borago officinalis</i> L.)                                                                                                                                | 32                                 |
| Чернушка посевная ( <i>Nigella sativa</i> L.), чернушка<br>дамасская ( <i>N. damascena</i> L.)                                                                                         | 30-40 (42)                         |

В основном перечисленные виды являются сорными однолетниками, некоторые обладают лекарственными свойствами и/или ядовиты. Всестороннее исследование масел и биологии сорных растений считается перспективным, поскольку затраты на выращивание перечисленных видов минимальны, семенная продуктивность их высока (50-80 тыс. семян на одном растении), а выход масла составляет 20-35 (60)%.

## **2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАКТОРОВ НА ТОПЛИВЕ С БИОДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

---

Стендовые испытания дизелей на топливе с биодобавками растительного происхождения проводились российскими и зарубежными учеными, в том числе РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ФГБНУ ВНИИТиН, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Пензенского ГАУ, Ульяновского ГАУ, ФГБНУ «Росинформагротех», Исследовательского центра «Vasola» (Финляндия), Университета штата Алабама (США). Исследовались различные смеси товарного дизельного топлива с растительными маслами, в том числе рапсовым, соевым, подсолнечным, редечным, сурепным, сафлоровым, хлопковым [21, 31-36, 55-59].

### **2.1. Биодобавки из рапсового масла**

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ проведены комплексные исследования по смесевому топливу с различным содержанием рапсового масла на двигателе Д-240 Минского моторного завода. Установлено что при работе двигателя на биотопливе с содержанием масла от 0 до 100% оптимальным составом смесевого топлива по параметрам рабочего процесса является содержание в нем 75% рапсового масла [62]. Анализ экологических показателей двигателей свидетельствует о снижении токсичных выбросов при работе на биотопливе. Содержание окиси углерода СО (угарный газ) на всех режимах по нагрузке и выбросы углеводородов СН сокращаются в 2 раза, количество твердых частиц (дымность) на режиме максимальной нагрузки снижается в 2 раза, а на режиме малой нагрузки дымность практически отсутствует. Исключение составляют окислы азота NOx, выбросы кото-



рых при работе на биотопливе возрастают на 8% при максимальной нагрузке двигателя. Это, по-видимому, происходит из-за наличия в биотопливе связанного кислорода. Полученные данные о значительном уменьшении выбросов токсичных веществ подтверждаются результатами исследований зарубежных специалистов. Следует отметить, что основным стимулирующим фактором применения биотоплива за рубежом является улучшение экологических показателей. Данные, полученные в ВИМе, были подтверждены результатами испытаний на Северо-Кавказской машиноиспытательной станции (МИС) [21, 62].

Проведенные в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева исследования по замене дизельного топлива биодизельной смесью с рапсовым маслом (при соотношении компонентов 1:1) показали существенное улучшение экологических качеств двигателя. Выбросы оксидов азота на номинальном режиме работы сократились на 15-20%, сажи – на 30-35, оксидов углерода и углеводов – на 10-15% [56]. Смесевое топливо с биодобавками можно заливать в бак как в чистом виде, так и в качестве добавки к дизельному топливу (биодизельная смесь) в количестве 5-35% объема. Мощность двигателя при работе на биодизельном топливе несколько снижается, и, как следствие, на 5-8% увеличивается расход горючего. Ресурс двигателя при этом не меняется. Смесевое топливо с биодобавками имеет хорошие смазывающие свойства, чем выгодно отличается от дизельного. К недостаткам такого топлива можно отнести более высокую «агрессивность» по отношению к резиновым деталям двигателя. При низких температурах на жиклерах, форсунках и других калиброванных отверстиях могут образовываться отложения в виде кристаллов воска, что ведет к их закупорке. Отмечаются случаи отказов насосов высокого давления и топливных фильтров. Чтобы адаптировать дизельные двигатели к использованию биотоплива, производители вносят в них конструктивные изменения [56].

Учеными МГТУ имени Н.Э. Баумана, ООО «ВНИИГАЗ», НПП «Агродизель» оценивались экономические и экологические показатели дизеля, работающего на смесевом биотопливе [55]. Результаты исследований показали, что при работе дизеля на смеси 80% дизельного топлива и 20% рапсового масла экологические показатели заметно улучшаются, например выброс легких углеводов

снижается на 3,8%. Однако выброс монооксида углерода, напротив, возрастает на 9,5% [55].

В ФГБНУ «Росинформагротех» для исследований товарное дизельное топливо (ДТ) смешивали с рапсовым маслом (РМ). На основании предварительно выполненных исследований и данных других работ готовили смесевые композиции в следующих пропорциях (%): 25РМ : 75ДТ, 50РМ : 50ДТ, 75РМ : 25ДТ. Для исследований был выбран дизель автомобиля КАМАЗ-43114 с двигателем мод.740 жидкостного охлаждения, V-образным расположением восьми цилиндров. Для исследований параметров системы топливоподачи дизеля применяли мотортестер МО 3-2. При испытаниях измеряли такие параметры, как давление впрыска, остаточное давление в трубопроводе высокого давления, длительность подачи топлива и угол опережения подачи топлива (УОПТ). Процедуры измерений на различных режимах повторяли по 5 раз с различными композициями содержания биодобавок в дизельном топливе, а также на товарном дизельном топливе и чистом рапсовом масле. Подробно методика испытания дизелей на смесевом топливе рассмотрена в работах [57, 58, 59].

Результаты испытаний дизелей показали, что содержание биодобавок из рапсового масла в смесевом топливе не влияет на угол опережения подачи топлива. Увеличение концентрации рапсового масла в дизельном топливе с 25 до 75% приводит к повышению длительности подачи топлива почти в 1,5 раза. Особенно характерно повышение длительности подачи топлива на режиме холостого хода. Увеличение концентрации рапсового масла от 25 до 75% в смесевом топливе приводит к повышению максимального давления впрыска топлива и остаточного давления в топливопроводе высокого давления в 1,2 раза [49]. Таким образом, увеличение концентрации биодобавок из рапсового масла в дизельном топливе приводит к повышению длительности подачи топлива, максимального давления впрыска и остаточного давления в топливопроводе высокого давления и снижению мощности дизеля. Для уменьшения вязкости смесевого топлива с биодобавками из рапсового масла разработано устройство для подогрева, на которое получен патент на полезную модель [60].

## 2.2. Биодобавки из микроводорослей

В ВНИИТиНе для получения биодобавки использовали исходный штамм микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 [10]. Для ее культивирования использовали специально сконструированный закрытый циркулирующий трубчатый фотобиореактор с искусственным освещением (рис. 2.1) [41, 61].

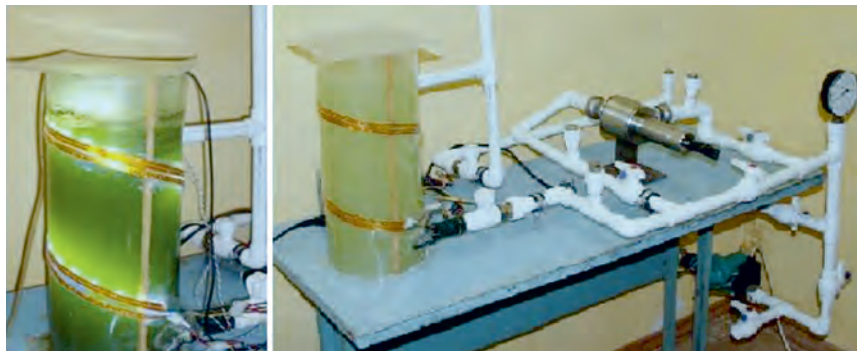


Рис. 2.1. Экспериментальный фотобиореактор для культивирования микроводоросли (разработка ВНИИТиН)

Для синтеза липидов микроводорослей использовали аппарат с частицами, совершающими сложное пульсационное движение под воздействием электромагнитного поля. Жирнокислотный состав биодобавки в смесевом моторном топливе контролировали по стандартной методике EN 14103 с помощью газового хроматографа Кристалл-2000м и программного обеспечения Хроматэк-Аналитик. Фракционный состав и кинематическую вязкость определяли по стандартным методикам. Для получения смесевого моторного топлива биодобавку смешивали с нефтяным дизельным топливом (рис. 2.2).

Определение экологических показателей дизеля при работе на смесевом моторном топливе проводили на стенде (дизель Д-243) и в полевых условиях с использованием дымомера КИД-2 и газоанализатора АВТОТЕСТ; полевые испытания – на операции вспашки трактором с дизелем Д-65Н плугом ПН-3-35 с регулировкой на глубину 0,22 м. Проведенный анализ полученных данных установил сходство свойств триацилглицеринов высших алифатических кислот микроводорослей и растительных масел. Этот факт свидетельствует

о возможности использования липидов микроводорослей в качестве исходного сырья для синтеза биодобавки к смесевому моторному топливу. В табл. 2.1 показаны физико-химические показатели дизельного топлива и биодобавки из микроводорослей (компонент смесового моторного топлива) [41, 61].



*Рис. 2.2. Установка для получения биодобавки из микроводорослей (разработка ВНИИТиН)*

Таблица 2.1

**Физико-химические показатели дизельного топлива  
и биодобавки из микроводорослей**

| Показатели                                           | Дизельное топливо | Биодобавка |
|------------------------------------------------------|-------------------|------------|
| Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>               | 860               | 875        |
| Кинематическая вязкость при 40°С, мм <sup>2</sup> /с | 2,5               | 4,3        |
| Цетановое число                                      | 48                | 58         |
| Содержание, мг/кг:                                   |                   |            |
| воды                                                 | 200               | 400        |
| серы                                                 | 400               | Менее 10   |
| Температура вспышки, °С                              | 50                | 130        |

В ходе стендовых исследований установлено, что увеличение содержания биодобавок из микроводорослей в смесевом моторном топливе приводит к снижению дымности и токсичности вредных веществ в отработавших газах (ОГ). Минимальные показатели дымности и токсичности получены при использовании смесевого моторного топлива с 40%-ной биодобавкой [41, 61]. В ходе проведенных испытаний установлено существенное улучшение экологических показателей дизеля при работе на топливе с биодобавками из микроводорослей. Результаты измерения дымности и состава отработанных газов дизеля при полевых испытаниях дизеля Д-65Н при работе на топливе с биодобавками из микроводорослей представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Экологические показатели дизеля Д-65Н  
на различных смесях дизельного топлива с биодобавками  
из микроводорослей**

| Показатели                        | Смеси топлива     |                                        |                                         |                                         |                                         |
|-----------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                   | дизельное топливо | дизельное топливо с 5%-ной биодобавкой | дизельное топливо с 10%-ной биодобавкой | дизельное топливо с 20%-ной биодобавкой | дизельное топливо с 40%-ной биодобавкой |
| Дымность:                         |                   |                                        |                                         |                                         |                                         |
| N, %                              | 56                | 53                                     | 53                                      | 50                                      | 47                                      |
| K <sup>m-1</sup>                  | 1,90              | 1,75                                   | 1,80                                    | 1,64                                    | 1,50                                    |
| C <sub>x</sub> O <sub>y</sub> , % | 0,60              | 0,50                                   | 0,49                                    | 0,48                                    | 0,45                                    |
| C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , % | 0,0017            | 0,0015                                 | 0,0015                                  | 0,0014                                  | 0,0012                                  |

Состав липидов микроводорослей сходен с аналогичным составом растительных масел. У биодобавок из микроводорослей плотность, вязкость и цетановое число выше, а содержание серы ниже, чем у дизельного топлива. Экспериментально доказано существенное снижение дымности и токсичности отработавших газов дизельных двигателей при увеличении содержания биодобавок в смесевом моторном топливе. Все это обуславливает перспективность широкого применения смесевого моторного топлива. Блочно-модульное аппаратное оформление технологии получения биодобавок из микроводорослей позволит создавать региональные автономные источ-



ники моторного топлива. Для этого в дальнейшем планируется расширить ассортимент возможного использования микроводорослей применительно к конкретному региону [41, 61].

### 2.3. Биодобавки из соевого масла

В Пензенском ГАУ по результатам стендовых исследований дизеля Д-243-648 при работе на нефтяном и бионефтяном топливе в режиме полных нагрузок установлено, что с увеличением процентного содержания соевого масла в нефтяном дизельном топливе с 25 до 75% эффективная мощность двигателя уменьшается с 59,9 до 57,2 кВт (на 4,5%), часовой и удельный эффективный расход смесового топлива возрастает соответственно с 15,3 до 15,8 кг/ч (на 3,3%) и с 256 до 276 г/кВт·ч (на 7,2%), максимальное давление цикла снижается с 7,34 до 6,62 МПа (на 9,8%).

При работе на смесовом бионефтяном топливе 50%ДТ+50% соевое масло по сравнению с работой на товарном нефтяном дизельном топливе часовой расход смесового топлива увеличивается с 14,6 до 15,5 кг/ч (на 6,2%), а удельный эффективный расход смесового топлива возрастает с 239 до 262 г/кВт·ч (на 9,6%). Содержание в отработавших газах оксида углерода уменьшается с 0,25 до 0,17%, углеводородов – с 0,004 до 0,001%, дымность отработавших газов снижается с 21 до 12%. При работе на бионефтяном топливе, обработанном ультразвуком, мощностные и топливно-экономические показатели двигателя улучшаются на 2-3, экологические – на 6-8%. Например, удельный эффективный расход смесового топлива при работе дизеля на топливе 50% ДТ+50% СояМ (УЗ) составил 253 г/кВт·ч, на топливе 50%ДТ+50% СояМ – 262 г/кВт·ч [33].

### 2.4. Биодобавки из редечного масла

В Ульяновской ГСХА в результате сравнительных моторных исследований двигателя Д-243 при работе на минеральном и смесовом редечно-минеральном топливе, в частности на режиме номинальной мощности при полных нагрузках, установлено, что

при увеличении содержания в смесевом топливе редечного масла (РедМ) до 50% эффективная мощность снижается с 56,1 до 53 кВт (на 5,5%), часовой расход топлива повышается с 14,3 до 14,8 кг/ч (на 3,5%), удельный эффективный расход топлива – с 252,4 до 279,3 г/кВт·ч, эффективный КПД – с 0,333 до 0,323 (на 3%), дымность отработавших газов – с 28 до 22% (на 21,4%) по сравнению с работой на минеральном топливе. При работе двигателя на редечно-минеральном топливе, обработанном ультразвуком, мощностные, топливно-экономические и экологические показатели улучшаются по сравнению с работой на необработанном топливе аналогичного состава. Так, эффективный КПД при работе на смесевом озвученном топливе 90% РедМ+10%ДТ (ультразвук) на 3% больше, чем при работе двигателя на смесевом «неозвученном» топливе 90%РедМ+10%ДТ [34].

Эксплуатационные исследования тракторного агрегата МТЗ-82 + ПЛН-3-35 показали, что при увеличении в смесевом топливе редечного масла до 50% погектарный расход топлива увеличивается с 14,62 до 16,04 кг/га (на 9,7%), производительность за 1 ч чистой работы уменьшилась с 1,06 до 1,05 га/ч (на 0,9%), эксплуатационная мощность снизилась с 54,3 до 53,8 кВт (на 0,9%), дымность уменьшается с 39 до 31% (на 20,5%) по сравнению с работой на минеральном топливе [34].

## 2.5. Биодобавки из рыжикового масла

Проведенные исследования ученых в работе [32] показывают, что плотность и вязкость смесевое рыжико-минерального топлива по мере увеличения содержания рыжикового масла повышаются [32]. При нагреве до температуры 60°C эти показатели близки к стандартным значениям плотности (830-850 кг/м<sup>3</sup>) и вязкости (3,0-6,0 мм<sup>2</sup>/с) летнего ДТ. Например, у ДСТ 50%РыжМ+50%ДТ плотность равна 839 кг/м<sup>3</sup>, а вязкость – 4,5 мм<sup>2</sup>/с и только при добавлении 80 и 90% рыжикового масла эти значения достигают 9,0 и 12,0 мм<sup>2</sup>/с, что, соответственно, в 1,5 и 2 раза выше. Трибологические исследования на универсальном трибометре показывают, что при использовании смесевое рыжико-минерального топлива средний диаметр пятна износа опытных образцов уменьшается с 0,37 до 0,26 мм

(в 1,4 раза) по сравнению с товарным ДТ. Причем с увеличением процентного содержания рыжикового масла в смесевом топливе до 40-50% средний диаметр пятна износа образцов уменьшается до 0,26 мм, а при дальнейшем увеличении доли рыжикового масла дизельное смесевое топливо стабилизируется. Трибологические исследования минерального дизельного и смесового рыжико-минерального топлива на машине трения 2070 СМТ-1 показывают, что при увеличении процентного содержания рыжикового масла суммарный износ сопряжения «ролик-колодка» снижается с 0,048 г (100%ДТ) до 0,013 г (50%РыжМ + 50%ДТ), что свидетельствует об увеличении смазывающей способности дизельного смесового топлива за счет повышенной вязкости и наличия ПАВ (линолевая, олеиновая, стеариновая кислоты) в смесовом топливе [32].

## 2.6. Биодобавки из сафлорового масла

В Пензенской ГСХА по результатам экспериментальных исследований дизеля Д-243-648 при работе на минеральном и сафлоро-минеральном топливе, например в режиме полных нагрузок при  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ , установлено, что с увеличением процентного содержания сафлорового масла в смесовом топливе с 20 до 50 % эффективная мощность дизеля снижается с 60,4 до 58,8 кВт (на 2,6%), часовой и удельный эффективный расход топлива возрастает соответственно с 15,1 до 15,6 кг/ч (на 3,3%) и с 250 г/кВт·ч (на 5,6%). Максимальное давление цикла и средняя скорость нарастания давления газов в цилиндрах двигателя уменьшаются соответственно с 7,4 до 7,1 МПа (на 4,1 %) и с 0,55 до 0,44 МПа/град (на 20%), что свидетельствует о более «мягкой» работе на сафлоро-минеральном топливе. При этом дымность отработавших газов снижается с 32 до 26%. Эффективный КПД двигателя при его работе на сафлоро-минеральном топливе с различным содержанием биологического и минерального компонентов составляет 0,343-0,348, на минеральном дизельном топливе – 0,355. При работе на сафлоро-минеральном топливе, обработанном ультразвуком, мощностные, топливно-экономические и экологические показатели улучшаются на 2-3% в режиме полных нагрузок и на 8-14% в режиме холостого хода по срав-

нению с работой дизеля на необработанном топливе аналогичного состава [35].

Результаты эксплуатационных исследований в Пензенской ГСХА машинно-тракторного агрегата (МТЗ-80+КПС-4+4БЗСС-1) на весенней предпосевной культивации зяби при работе на сафлоро-минеральном топливе (20%СафМ+80%ДТ и 50%СафМ+50%ДТ) по сравнению с работой на минеральном топливе свидетельствуют об увеличении погектарного расхода топлива с 3,5 соответственно до 3,65 (на 4,3%) и 3,9 кг/га (на 11,4%). При этом величина общих удельных энергозатрат возрастает с 148,4 до 151,2 (на 1,9%) и 155,3 МДж/га (на 4,6%), удельный эффективный расход энергии, снимаемой с к.в. дизеля, снижается с 49,6 до 49,3 (на 0,6%) и 48,5 МДж/га (на 2,3%) соответственно. Дымность отработавших газов уменьшается с 42 до 37 и 30%. Годовой экономический эффект от использования сафлоро-минерального топлива 20%СафМ+80%ДТ и 50%СафМ+50%ДТ составляет соответственно 28633 и 98918 руб. на один трактор тягового класса 1,4 [35].

## 2.7. Биодобавки из сурепного масла

В работе [31] проведены экспериментальные исследования двигателя типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) производства Минского моторного завода на биотопливе. По результатам моторных исследований установлено, что на нагрузочных режимах Д-243-648, характерных для условий эксплуатации, по мере увеличения доли сурепного масла в смесевом топливе с 25 до 90% по сравнению с работой на минеральном топливе наблюдаются снижение эффективной мощности на 0,8-4,1 кВт (1,3-6,7%), увеличение часового и удельного эффективного расходов топлива соответственно на 0,8-1,5 кг/ч (5,4-10,3%) и 10,9-39,9 г/кВт·ч (4,5-16,7%) при практически неизменном эффективном КПД двигателя (0,353-0,340). Максимальное давление цикла и средняя скорость нарастания давления газов снижаются соответственно на 0,25-0,68 МПа (3,5-9,5 %) и 0,09-0,2 МПа/град (14,5-32,3%), что обеспечивает более «мягкую» работу на смесевом топливе. Работа на смесевом топливе 25:75 и 50:50 обеспечивает снижение дымности отработавших газов на 20-31% по сравнению с работой на минеральном ДТ. При увеличении доли сурепного масла

в смесевом топливе свыше 50% дымность ОГ возрастает. Ультразвуковая обработка смесевое топлива 50:50 (УЗ) приводит к меньшему снижению эффективной мощности и повышению удельного эффективного расхода топлива по сравнению с работой дизеля на необработанном смесевом топливе одноименного соотношения его компонентов [31].

Эксплуатационные исследования трактора МТЗ-82 (дизель Д-243, насос УТН-5А) на вспашке, работающего на сурепно-минеральном топливе 25:75, по сравнению с работой на минеральном топливе свидетельствуют, что на VI рабочей передаче погектарный расход топлива возрастает с 17,3 до 18,2 кг/га (на 5,6%), производительность тракторного агрегата за 1 ч чистой работы, эксплуатационная мощность и дымность отработавших газов снижаются с 0,834 до 0,817 га/ч (на 1,5%), с 54,4 до 1953,1 кВт (на 2,5%) и с 47 до 36% соответственно, а общие удельные энергозатраты увеличиваются с 728,7 до 746,6 МДж/га (на 2,6%). За счет замещения минерального ДТ сурепным маслом в количестве 25% при работе на смесевом топливе 25:75 годовой экономический эффект в расчете на один трактор МТЗ-82 составляет 7525 руб. [31].

## 2.8. Биодобавки из льняного масла

Дизельный двигатель типа Д-245.12С (4ЧН 11/12,5) Минского моторного завода, устанавливаемый на малотоннажные грузовые автомобили ЗиЛ-5301 «Бычок», а также на автобусы Павловского автобусного завода (ПАЗ) и тракторы «Беларусь», исследован на моторном стенде АМО «ЗиЛ» на режимах внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН [38]. Настройки двигателя по установочному углу опережения впрыскивания топлива ( $13^\circ$  поворота коленчатого вала до ВМТ) и положению упора дозирующей рейки (упор максимальной подачи топлива) оставались неизменными при использовании всех рассматриваемых видов топлива. Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы «Hartridge» (Великобритания) с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ . Концентрации  $\text{NO}_x$ , CO, CH в ОГ определялись газоанализатором SAE-7532 япон-



ской фирмы «Уапасо» с погрешностью измерения указанных компонентов  $\pm 1\%$ .

На первом этапе исследований проведены испытания Д-245.12С на чистом дизельном топливе и на смеси 91% ДТ и 9% ЛМ (льняное масло) на режимах внешней скоростной характеристики. Исследуемое смесевое биотопливо имеет физические свойства, приближающиеся к свойствам ДТ, но его плотность и вязкость все-таки несколько выше аналогичных свойств ДТ, поэтому при переходе от ДТ к смесевому биотопливу отмечены небольшое увеличение часового расхода топлива и уменьшение коэффициента избытка воздуха. Однако крутящий момент двигателя и его эффективная мощность изменились незначительно [38].

## 2.9. Биодобавки из соснового масла

В работе [36] приведены результаты испытаний дизельного топлива в смеси с сосновым маслом (содержание терпеновых спиртов до 75%) в диапазоне 0,05-0,2 масс. %. Добавка 0,2 масс. % соснового масла в дизельное топливо при работе на дизель-генераторе 1ДТ12Т привела к улучшению КПД двигателя на 4%, снижению альдегидов на 83 и СО – на 21%. Было выдвинуто предположение, что добавка терпенов (скипидара) к смеси растительных масел с дизельным топливом обеспечит улучшение сгорания в камере сгорания [36]. Живичный скипидар (масло терпентинное) представляет собой продукт переработки сосновой живицы, имеет температуру вспышки 34°C, самовоспламенения – 300°C, что ниже, чем у растительных масел и дизельного топлива. При исследованиях наблюдалось полное растворение скипидара в смеси с различными растительными маслами. Для проверки возможности использования скипидара в качестве добавки в масла была приготовления смесь следующего состава: скипидар – 5 об. %, подсолнечное масло – 10, соевое – 5, кукурузное – 5, горчичное – 5, дизельное топливо 70 об. %. Результаты испытаний приведены в табл. 2.3 [36].

Экономичность дизеля при работе на смеси находится на уровне экономичности при работе на дизельном топливе, что подтверждает возможность использования скипидара в качестве присадки. Выявлена возможность работы двигателя при содержании скипидара,

равном 30 об. %. При этом наблюдаются снижение дымности и небольшое повышение содержания оксидов азота, что требует регулировки угла опережения впрыскивания топлива [36].

Таблица 2.3

**Физико-химические характеристики  
смесей с добавкой скипидара и результаты испытаний  
на дизеле**

| Показатели                                                  | ДТ    | Ск:ПМ : СоМ : КМ : ГМ:<br>ДТ – 5 : 10 : 5 : 5 : 5 : 70 | Ск :<br>ДТ – 30 : 70 |
|-------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------|----------------------|
| <i>Характеристика топлива</i>                               |       |                                                        |                      |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                | 0,832 | 0,854                                                  | 0,839                |
| Вязкость, мм <sup>2</sup> /с                                | 4,14  | 7,95                                                   | 3,4                  |
| Температура вспышки в закрытом тигле, °С                    | 85    | 80                                                     | 67                   |
| Низшая теплота сгорания, кДж/кг                             | 42700 | 40990                                                  | 40990                |
| <i>Результаты испытаний при мощности двигателя 1,64 кВт</i> |       |                                                        |                      |
| КПД                                                         | 0,223 | 0,222                                                  | 0,221                |

Влияние биодобавок на работу систем двигателя, в том числе топливной аппаратуры, рассмотрено также в работах [63-69]. В работе [63] установлено, что гигроскопичность топлива при хранении определяется его строением. Биодизельное топливо, получаемое при переработке растительного масла, поглощает при хранении больше воды, чем товарное нефтяное дизельное топливо [63]. В работе [64] приведены результаты испытаний форсунок топливной аппаратуры дизелей на топливе с биодобавками. Показано влияние биодобавок из рапсового масла в дизельное топливо на работоспособность фильтров тонкой очистки топливной аппаратуры [64]. В работе [65] приведены результаты исследований работоспособности фильтров тонкой очистки дизелей, работающих на биотопливе. Показаны отличительные особенности работы фильтров на товарном дизельном топливе и топливе с добавками рапсового масла [5].

## 2.10. Результаты зарубежных испытаний двигателей на топливе с биодобавками

В Финляндии исследовательский центр «Vasola» совместно с фирмой «Valmet» и исследовательской лабораторией по новым видам топлива проводил исследования по использованию рапсового масла в качестве топлива на тракторах мод. «Volvo BM Valmet 605-4». В качестве топлива брали смесь R-33, состоящую из 1/3 рапсового масла и 2/3 дизельного топлива.

Эксплуатационные испытания тракторов проводились при выполнении сельскохозяйственных и лесных работ, суммарная наработка трактора V605 составила 1056 ч, трактора V702 – 687 ч. Стендовые замеры по окончании испытаний трактора V605 показали уменьшение номинальной мощности при работе на смеси R33 и наработке 1056 ч на 0,2% при увеличении частоты вращения на  $100 \text{ мин}^{-1}$  и удельного расхода топлива на 0,4%. У трактора V702 при наработке 687 ч отмечено снижение мощности на 5,86% при увеличении расхода топлива на 4,3%.

Финскими исследователями проведен анализ состояния цилиндропоршневой и кривошипной групп, деталей клапанного механизма, распылителей форсунок дизеля трактора V605 после 1056 ч работы на смеси R-33. В течение испытаний не отмечались отказы двигателей и значительный износ деталей. На головках поршней слой нагара не более 1 мм, кольца подвижны, хорошо очищаются. Нагар накопился лишь в верхних частях гильз, распылителей форсунок, толщина его не превышает 1 мм. На клапанах износ не отмечен, дефекты также отсутствовали, имелись тонкие слои нагара на выпускных клапанах и сажи – на впускных клапанах и гнездах клапанов. Коленчатый вал, коренные и шатунные вкладыши – в хорошем состоянии.

Экспертиза деталей двигателя трактора V-702 после 700 ч работы показала отсутствие значительных износов, все детали кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов находились в исправном состоянии, слой нагара – 1-2 мм. Нагар тонкий, вязкий, темного цвета. Слой сажи формируется на впускном клапане и во всасывающем отверстии гнезда клапана. Износ вкладышей за период испытаний находился в пределах нормы. Двигатели тракторов V-605 и V-702 отработали без специальной доработки на выполне-

нии сельскохозяйственных и лесных работ на смеси рапсового масла и дизельного топлива соответственно 1000 и 700 ч. Техническое состояние деталей двигателей без видимых повреждений, значительных износов, толщина слоя нагара и сажи не превышает 1-2 мм. Действие смеси R33 примерно такое же, как и дизельного топлива. При применении смеси R33 нет необходимости вносить какие-либо изменения в двигатель.

Использование топлива из растительного рапсового масла в дизельных двигателях возможно при выполнении следующих условий: физические свойства, химический состав, чистота масла должны обеспечивать применение рабочей смеси в двигателях при запуске; топливные фильтры, топливный насос и распылители форсунок не засорены; качество распыла топливной смеси должно обеспечивать ее полное сгорание; скорость воспламенения – минимальная; поршневые кольца – без нагара, должны обеспечивать заданное рабочее давление при сжатии горючей смеси; рабочая смесь не должна оставаться на стенках цилиндров, что исключает ее перетекание в масляный картер и ухудшение качества смазочного масла и работы всей смазочной системы. Отмеченные условия определяют требования к маслу, используемому в качестве добавки к топливу, которым должно соответствовать дизельное топливо. Чтобы обеспечить полноту сгорания рабочей смеси, уменьшить нагар и сажевые наслоения, двигатели должны быть доработаны [21].

В работе [70] представлены результаты экспериментальных исследований четырехтактного одноцилиндрового дизельного двигателя без наддува типа Komatsu ID-105 (степень сжатия 17,5, мощность  $N_e = 16$  кВт при  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>). Исследовались три типа топлива: рапсовое масло (РМ), топливо утяжеленного фракционного состава (УФС) и дизельное топливо D-2. Плотность указанного топлива при  $t = 15^\circ\text{C}$  была равна соответственно 921, 909 и 820 кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость – 51,7; 51,6 и 4,8 мм<sup>2</sup>/с. Подогрев топлива производился в нагнетательном трубопроводе перед форсункой в диапазоне температур  $t = 40-400^\circ\text{C}$ . Исследовались влияние температуры подогрева на особенности формирования топливной струи, ее геометрических характеристик и мелкости распыливания при впрыскивании в среду без противодействия, а также на период задержки воспламенения (ПЗВ), характеристики процесса сгорания, показатели дымности и токсичности ОГ, удельный эффективный расход топлива  $g_e$  на различных

нагрузочных режимах. Показано, что для РМ повышение температуры подогрева с 50 до 300°C приводит к уменьшению среднего диаметра капель с 75 до 30 мкм, увеличению угла конуса факела с 6 до 13°, снижению ПЗВ, уменьшению длительности фазы гомогенного сгорания и, соответственно,  $g_e$  и шумности работы двигателя, а также дымности ОГ. Однако при этом возрастает содержание в ОГ оксидов азота  $NO_x$ . Указывается, что оптимальными температурами подогрева топлива D-2 является  $t = 90^\circ\text{C}$ , УФС –  $t = 240^\circ\text{C}$ , рапсового масла –  $t = 300^\circ\text{C}$ . Большие температуры подогрева приводят к заметному ухудшению большинства характеристик двигателя [70].

В работе [71] анализируются возможности использования рапсового масла (РМ) в качестве топлива для небольших вихрекамерных дизелей. Приведены результаты стендовых испытаний четырехцилиндрового дизеля типа NS-121 со степенью сжатия 22, мощностью  $N_e = 33$  кВт при  $n = 3600$  мин<sup>-1</sup>. Исследовалось влияние конструкции штифтовой форсунки, давления впрыскивания РМ и его температуры у штуцера форсунки на показатели дизеля на скоростных режимах  $n = 1400, 1800$  и  $2000$  мин<sup>-1</sup>. Также изучалось влияние семи вариантов штифта распылителя на экономические и экологические показатели. Найдено оптимальное соотношение высоты, угла распыливающего конуса, его выступа, обеспечивающее минимальные значения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  и дымности ОГ. Лучший вариант конструкции распылителя при давлении впрыскивания 16,7 МПа совместно с подогревом топлива с 20 до 80°C, обеспечивающим снижение его вязкости с 97,7 до 12,1 мм<sup>2</sup>/с, позволил увеличить эффективную мощность двигателя  $N_e$ , снизить расход топлива  $g_e$  и температуру ОГ [71].

В рамках работ, проводимых в Германии по проблемам энергетического использования сельскохозяйственного возобновляемого сырья, в частности рапсового масла (РМ), фирмой «Porsche» проведено исследование возможности применения его в качестве топлива для дизелей [72]. Испытания проведены на РМ и обычном дизельном топливе (ДТ). Результаты испытаний показали, что при переводе двигателя с ДТ на РМ снижение максимальных значений крутящего момента  $M_e$  и мощности  $N_e$  оказалось существенно меньше ожидаемого в соответствии с более низкой теплотой сгорания РМ. Это объясняется высокой вязкостью РМ, приведшей к увеличению подачи топлива, обеспечиваемой ТНВД распределительного типа.

При работе на РМ на всех режимах значения эффективного КПД, приведенного к теплоте сгорания РМ, и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  оказались всего на 2-3% ниже, чем при работе на ДТ. Использование РМ в исследуемых дизелях привело к увеличению выбросов монооксида углерода СО и несгоревших углеводородов СН<sub>x</sub>. Замена ДТ на РМ в исследуемых двигателях с разделенными камерами сгорания (КС) привела к снижению эмиссии твердых частиц на 30-50%, а в дизелях с неразделенной КС – к увеличению их выброса на 90-140%. Надежность работы двигателей на РМ оценивалась при стендовых испытаниях в 500-600 ч. Дизели с разделенными КС и большим объемом цилиндров успешно выдержали полный цикл испытаний. Испытания двигателей с неразделенными КС, а также с вихревыми КС (для легковых автомобилей) были остановлены соответственно через 155 и 255 ч из-за снижения их эффективных показателей и повышенной дымности ОГ. При этом отмечены чрезмерные углеродистые отложения на распылителях, стенках КС, в канавках поршневых колец. В целом проведенные исследования позволили сделать вывод: по энергетическим показателям двигатели, работающие на ДТ и РМ, близки между собой даже без внесения специальных конструктивных изменений. Токсичность ОГ зависит не только от вида применяемого топлива, но и от типа КС. Дизели большой размерности с разделенными КС способны работать на РМ длительное время при сохранении рабочих показателей; с неразделенными КС – приспособлены к работе на РМ в меньшей степени [72].

Фирмой «DMS Dieselmotoren und Geratebau GmbH» по лицензии фирмы «Elsbett» ведется разработка многотопливного двигателя, предназначенного для работы как на дизельном, так и на альтернативных видах топлива (масла растительного происхождения, получаемые из рапса или сои) [73]. Прототип трехцилиндрового двигателя рабочим объемом 5,6 л развивает мощность  $N_e = 88$  кВт при  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>. На режиме с полной нагрузкой двигателя расходуется 22,5 л/ч рапсового масла [73].

В работах [74, 75] сообщается о разработке новой концепции многотопливных двигателей со сдвоенными шатунами. Двигатель может работать на дизельном топливе, а также на растительных маслах, например рапсовом, подсолнечном, оливковом. При испытаниях нового двигателя отмечены увеличение мощности на 37%, сниже-



ние выбросов CO на 40, CO<sub>2</sub> – на 30, NO<sub>x</sub> – на 35, твердых частиц – на 70% по сравнению с прототипом [74, 75].

Фирмой «BMFT» при финансовой поддержке правительства ФРГ проводятся исследования работы автомобильных и тракторных дизельных двигателей мощностью Ne от 40 до 275 кВт на рапсовом масле (PM) в качестве альтернативного топлива [66]. Исследовались двигатели различных типов с неразделенной и разделенной КС, с турбонаддувом и без него. Разница в крутящем моменте Me и Ne при работе на PM и дизельном топливе (ДТ) двигателей всех типов была незначительной. Результатами исследований подтверждена возможность работы их с разделенной КС и большим рабочим объемом на PM. Для дизелей с малой и особенно неразделенной КС ресурс работы на таком топливе ограничен из-за образования углеродистых отложений на поршнях [76].

Фирмой «Volkswagen» проводятся исследования и испытания серийных автомобильных дизелей, работающих на топливе, получаемом из рапсового масла (PM), и на их смесях с дизельным топливом [77]. Основной задачей исследований является поиск решений проблемы снижения выбросов в атмосферу углекислого газа с ОГ автомобильных двигателей [77].

В статье [78] представлены результаты исследований нового дизельного двигателя фирмы «DMS Dieselmotoren und Gerätebau GmbH», работающего на рапсовом масле. Проводились испытания двигателя мод. MF-4RTA с непосредственным впрыскиванием топлива, турбонаддувом и охлаждением надвучного воздуха, работающего на рапсовом масле (PM) и дизельном топливе (ДТ). При работе на PM на номинальном режиме (Ne = 160 кВт при n = 2000 мин<sup>-1</sup>) удельный эффективный расход топлива составил g<sub>e</sub> = 240 г/кВт·ч, на режиме наилучшей экономичности – g<sub>e</sub> = 221 г/кВт·ч. Соответствующие значения удельного эффективного расхода дизельного топлива составили 206 и 190 г/кВт·ч [78].

В Южной Африке проведены исследования возможности использования подсолнечного масла (ПМ) в чистом виде или в смеси с нефтяным дизельным топливом (ДТ) в качестве топлива. При использовании смеси 20% ПМ и 80% ДТ углеродистые отложения на деталях КС и топливоподающей системе не влияли на характеристики двигателя. Для улучшения качества распыливания ПМ необходимо приблизить его физические свойства к свойствам ДТ или модифици-

ровать систему топливоподачи, либо найти компромиссное решение между изменением физических свойств ПМ и модификацией системы впрыскивания топлива. Кроме того, требуется подобрать присадки к минеральным моторным маслам, чтобы повысить их стабильность при попадании в них растительных масел [79].

Фирмой «John Deere» (США) исследованы возможности использования арахисового и подсолнечного масел (соответственно АМ и ПМ) в качестве моторного топлива. Исследования проводились на одноцилиндровом отсеке дизеля с степенью сжатия 17,2 и неразделенной КС. Со стандартным дизельным топливом (ДТ) сравнивались как чистые растительные масла, так и их 50%-ные смеси с ДТ. Во время испытаний дизеля при температуре окружающего воздуха  $t=25-30^{\circ}\text{C}$  на чистом ПМ на режимах с  $n=1000, 1500$  и  $2200 \text{ мин}^{-1}$  отмечено быстрое загрязнение топливного фильтра тяжелыми отложениями. При подогреве масла до  $t=70-90^{\circ}\text{C}$  выходы фильтра из строя не наблюдались, однако после остывания масла до  $t=30^{\circ}\text{C}$  запуск двигателя становился невозможным. При использовании чистого АМ отсутствовало интенсивное загрязнение топливного фильтра. Применение обоих сортов масла приводило быстрому закоксовыванию отверстий распылителей форсунки и отложению твердого нагара на стенках КС. Поскольку вязкость растительных масел в 12-14 раз больше, чем у ДТ (при температуре топлива в ТНВД), необходимо увеличивать давление в подкачивающей топливной магистрали [79, 80, 81].

Эффективность использования биодобавок растительного происхождения для дизельного топлива дизельных двигателей показана также в работах [82-101].

## **2.11. Сравнительная характеристика результатов испытаний дизельных двигателей на топливе с биодобавками растительного происхождения**

При испытаниях двигателей на топливе с биодобавками растительного происхождения большинством ученых отмечалось снижение их мощности [102-127].

Результаты исследований некоторых российских и зарубежных ученых приведены в табл. 2.4 и табл. 2.5.

Таблица 2.4

### Результаты испытаний дизельных двигателей на топливе с биодобавками растительного происхождения

| Соотношение топлива и растительного масла          | Организация                                                                                        | Марка двигателя, трактора               | Снижение мощности, % |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------|
| 75% дизельного топлива и 25% рапсового масла       | ВИМ                                                                                                | Д-240                                   | Не обнаружено        |
| 70% дизельного топлива и 30% рапсового масла       | РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева                                                                      | Д-243                                   | 4,2                  |
| 80% дизельного топлива и 20% масла микроводорослей | ВНИИТиН                                                                                            | Д-65Н                                   | Не обнаружено        |
| 75% дизельного топлива и 25% соевого масла         | Пензенский ГАУ                                                                                     | Д-243-648                               | 4,5                  |
| 50% дизельного топлива и 50% редечного масла       | Ульяновский ГАУ                                                                                    | Д-243                                   | 5,5                  |
| 50% дизельного топлива и 50% сурепного масла       | Пензенский ГАУ                                                                                     | Д-243                                   | 5,1                  |
| 50% дизельного топлива и 50% сафлорового масла     | Пензенский ГАУ                                                                                     | Д-243-648                               | 2,6                  |
| 70% дизельного топлива и 30% рапсового масла       | Исследовательский центр «Vacola» (Финляндия)                                                       | Трактор «Valmet-702»                    | 0,2                  |
| 70% дизельного топлива и 30% рапсового масла       | Исследовательский центр «Vacola» (Финляндия)                                                       | Трактор «Volvo bm valmet 605-4»         | 5,86                 |
| 70% дизельного топлива и 30% соевого масла         | Университет штата Алабама (США)                                                                    | Дизель мод. 6404 TE фирмы «John Deere»  | 15                   |
| 50% дизельного топлива и 50% хлопкового масла      | Юго-Западный исследовательский институт (США) совместно с фирмой «International Harvester Company» | Дизель шестицилиндровый с турбонаддувом | Не обнаружено        |

Таблица 2.5

### Изменение экологических показателей при работе дизельных двигателей на топливе с биодобавками растительного происхождения

| Тип двигателя                                 | Биодобавка      | Содержание                                                                  |                                                                                          |                                                                            |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                                               |                 | CO                                                                          | HC                                                                                       | NO <sub>x</sub>                                                            |
| Одноцилиндровый, мод. DAF 10                  | Ятрофа          | Более низкий уровень                                                        | Более низкие выбросы                                                                     | Повышается с увеличением нагрузки двигателя выше, чем у дизельного топлива |
| Одноцилиндровый, мод. TAF 1                   | Скипидар        | На 1-2% выше при нагрузке 75% и ниже – при 100%                             | Более высокая эмиссия CO, чем у дизельного топлива, возрастает с увеличением нагрузки    | Предельно высокий уровень при нагрузке 75 и 100%                           |
| Одноцилиндровый, 4S, AC, DI, CR               | Хлопковое масло | Снижается на 17-21%                                                         |                                                                                          | Увеличение на 6,5-7,4% при испытании двигателя                             |
| Одноцилиндровый с водяным охлаждением, 4S, Di | Льняное масло   | Снижается с увеличением нагрузки и концентрации биодизеля в топливной смеси | Увеличивается с ростом концентрации биодизеля в топливной смеси и на грузки на двигатель | Незначительно увеличивается по сравнению с дизельным топливом              |

Авторами работы установлено, что после 500 ч работы дизеля на смеси, содержащей 70% дизельного топлива и 30% рапсового масла, происходит частичное закоксовывание распылителей форсунок. В РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева также были проведены исследования смеси 50 % дизельного топлива и 50 % рапсового масла. Отмечено, что при низких температурах на жиклерах, форсунках и других калиброванных отверстиях образовывались отложения. Исследования некоторых зарубежных ученых подтверждают, что применение растительных масел в смесевом дизельном топливе приводит к закоксовыванию отверстий распылителей форсунки и отложению твердого нагара на стенках камеры сгорания. Например, при работе на смеси подсолнечного масла и дизельного топлива после 604 ч на верхней перемычке всех поршней образовалось большое количество нагара, вторые поршневые кольца пригорели. На носке форсунки и внутри распыливающих отверстий обнаружено большое количество нагара. Топливные фильтры приходилось менять через 20-40 ч работы двигателя. Чрезмерное образование нагара обнаружено во впускных окнах после 250 ч испытаний. Анализ моторного масла показал, что после 100 ч работы двигателя масло содержало большое количество нерастворимых продуктов [21].

## 2.12. Многокомпонентные смесевые биотоплива

В Тверской ГСХА проводятся исследования с целью оценки эффективности использования смесевое топлива для дизельных двигателей, в состав которого входит этиловый спирт. Предполагается обосновать соотношение компонентов и эффективность использования эмульсионного смесевое топлива, компонентами которого являются дизельное топливо, этиловый спирт, вода и рапсовое масло (рис. 2.4) [9].

В работе [51] для анализа свойств многокомпонентного смесевое биотоплива использованы данные исследования моторного топлива следующих составов: смесь 85% нефтяного дизельного топлива (ДТ), 5 – рапсового масла (РМ) и 10% бензина АИ-80; смесь 80% – ДТ, 10 – РМ и 10% – бензина АИ-80; смесь 70% ДТ, 20 – РМ и 10% бензина АИ-80. Разбавление смесей ДТ и РМ бензином АИ-80 позволило заметно снизить плотность и вязкость исходных смесей.

При оценке токсичности отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей использованы испытательные циклы, в той или иной степени отражающие реальные режимы работы в условиях эксплуатации. Определены основные показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), работающего по 13-режимному испытательному циклу ECE R49.

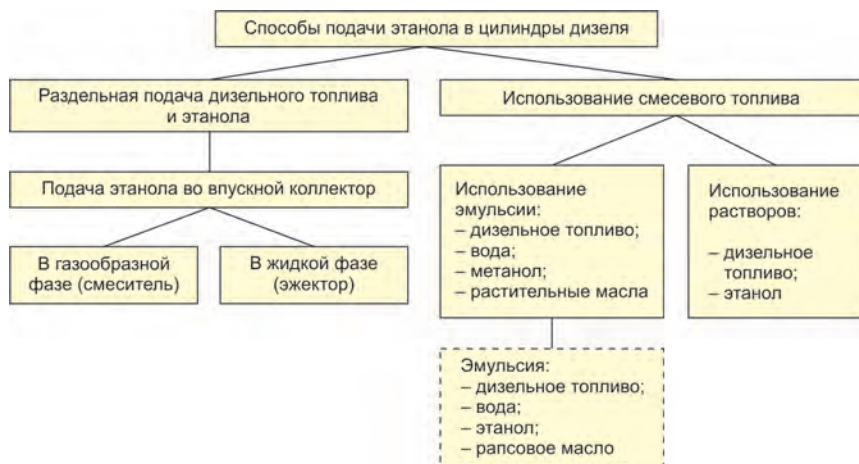


Рис. 2.4. Способы подачи этанола в цилиндры дизеля

Среди рассматриваемых видов смесового биотоплива наилучшее сочетание параметров топливной экономичности и токсичности ОГ обеспечивает смесь 85% ДТ, 5 – РМ и 10% АИ-80. В этом случае выброс оксидов азота снижается на 7,6%, монооксида углерода – увеличивается на 7,1, несгоревших углеводородов – возрастает на 4,3, эффективный КПД снижается на 0,6%. В дальнейшем предлагается при использовании многокомпонентных смесевых моторных топлив вместо автомобильного бензина в качестве компоненты топлива использовать экологически более чистый сложный эфир предельных алифатических кислот и спиртов меньшей молекулярной массы [51].

В работе [19] проводились эксперименты по оценке параметров сгорания и выбросов дизельного двигателя с использованием двойного топлива смеси: биодизельное топливо *Jatropha*, скипидарное масло и минеральное дизельное топливо. Двигатель был загружен в диапазоне холостого хода, а также 35%, 65% и полной нагрузки при постоянной частоте вращения 1500 мин<sup>-1</sup>. Выбросы NO<sub>x</sub> в режиме



холостого хода одинаковы как для стандартного дизельного топлива, так и для комбинаций биодизельного топлива *Jatropha* и скипидарного масла. По мере увеличения процентного содержания скипидарного масла в двухтопливной смеси выбросы  $\text{NO}_x$  уменьшаются. Обнаружено, что двухтопливные смеси производят более меньшие выбросы  $\text{CO}$  по сравнению с обычным дизельным топливом из-за наличия избытка  $\text{O}_2$  и полного сгорания двухтопливных смесей. Выбросы  $\text{CO}_2$  при работе на чистом дизельном топливе и двухтопливных смесях уменьшаются с увеличением нагрузки. При любых нагрузках выбросы  $\text{CO}_2$  у двухтопливных смесей выше, чем у чистого дизельного топлива [19].

В статье [52] проведен анализ физико-химических свойств нефтяного дизельного топлива и биотоплива различного состава. Разработана методика оптимизации состава многокомпонентного смесового биотоплива для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин. Определен оптимальный состав смеси дизельного топлива, рапсового масла и бензина АИ-80, обеспечивающий наилучшее сочетание показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов. Использование в дизеле типа Д-245.12С оптимального смесового топлива, содержащего 85% (по объему) нефтяного дизельного топлива, 5 – рапсового масла и 10% бензина АИ-80, позволило на 7,6% снизить выбросы наиболее значимого токсичного компонента отработавших газов – оксида азота [52]. В работе [53] определены плотность, вязкость, цетановые числа смесей дизельного топлива (ДТ) с арахисовым маслом (АМ). Для приготовления смесей использовались дизельное топливо летнего вида, нерафинированное арахисовое масло (ТУ 9141-001-0062499777-2016), керосин (КО-25 ТУ 38.401-58-10-01). Критериями применимости арахисового масла в качестве компонента горючего были значения плотности, вязкости, цетановые числа дизельного топлива. Установлено, что у смесей с содержанием арахисового масла не более 20% они идентичны параметрам дизельного топлива [53].

В Уральском ГАУ в качестве добавок к рапсовому маслу применяли дизельное топливо, керосин, бензин, этанол. Проведены расчеты по влиянию смесевых топлив на базе рапсового масла различного состава на мощностные, экономические и показатели рабочего цикла тракторного дизеля Д-144. Результаты расчетов представлены в табл. 2.6 [54].

Таблица 2.6

**Мощностные, экономические и показатели рабочего цикла  
дизельного двигателя при использовании смесевых топлив  
различного состава**

| Показатели                                    | ДТ     | 50% РМ +<br>+50% ДТ | 60% РМ +<br>+40% К | 60% РМ+40%<br>C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH |
|-----------------------------------------------|--------|---------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| Теплота сгорания, МДж/кг                      | 41,8   | 39,5                | 39,12              | 33,217                                         |
| Теоретическое количество<br>воздуха:          |        |                     |                    |                                                |
| кмоль/кг топлива                              | 0,502  | 0,4752              | 0,4681             | 0,39457                                        |
| кг/кг топлива                                 | 14,56  | 13,78               | 13,57              | 11,4426                                        |
| Коэффициент<br>молекулярного изменения        | 1,043  | 1,06368             | 1,0474             | 1,829                                          |
| Температура сгорания °К                       | 2140,0 | 2134,37             | 2135,0             | 2124,6                                         |
| Среднее давление, МПа:                        |        |                     |                    |                                                |
| индикаторное                                  | 0,952  | 0,95905             | 0,9626             | 0,97664                                        |
| эффективное                                   | 0,7336 | 0,76105             | 0,7373             | 0,75094                                        |
| Индикаторный КПД                              | 0,473  | 0,4991              | 0,4735             | 0,4698                                         |
| Эффективный КПД                               | 0,382  | 0,396               | 0,3821             | 0,3805                                         |
| Эффективный удельный<br>расход топлива, г/кВт | 225,5  | 230,15              | 240,84             | 284,83                                         |
| Эффективная мощность,<br>кВт                  | 45,77  | 45,5                | 46,01              | 46,86                                          |
| Изменение, %:                                 |        |                     |                    |                                                |
| мощности                                      | -      | -0,6                | +0,52              | +2,38                                          |
| удельного расхода<br>топлива                  |        | +6,4                | +6,80              | +24,34,3%                                      |

Анализ полученных данных показывает, что теплота сгорания исследуемых смесей ниже, чем дизельного топлива, и уменьшается при добавлении спирта. Количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания смесевое топлива, меньше, особенно для спирто-рапсовых смесей. Как показали расчеты, при использовании дизельно- и керосино-рапсовых смесей имеет место незначительное снижение максимальной температуры рабочего цикла (на 5°) и более существенное (на 15°) – при использовании спирто-рапсовых. Индикаторные и эффективные показатели двигателя существенно не изменяются. Отмечены уменьшение мощности двигателя при

использовании дизельно-рапсовых смесей и тенденция увеличения мощности при использовании керосино- и спирто-рапсовых смесей на 0,5-2,4%. Экономичность двигателя снижается при использовании дизельно- и керосино-рапсовых смесей на 6,4-6,8% и значительно (на 24,3%) при использовании спирто-рапсовых смесей.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что при использовании в тракторном дизеле смесевое топлива на базе рапсового масла отмечено увеличение мощности двигателя на 0,5-2,4% по сравнению с дизельным топливом. Наблюдается тенденция повышения мощности при использовании спирта в смеси. Экономичность двигателя значительно снижается при использовании всех смесей по сравнению с традиционным топливом, но наиболее значительно (на 24,3%) – при использовании спирто-рапсовых смесей [54].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сельскохозяйственное производство – один из основных потребителей дизельного топлива. Только в 2019 г. в сельскохозяйственные организации России его поступило свыше 4223 тыс. т. Важным резервом экономии топлива являются совершенствование технологий обеспечения топливосмазочных материалов, техническое перевооружение службы, введение автоматических систем их контроля и учета. Показано, что одно из направлений экономии товарного дизельного топлива – его замена альтернативным, в том числе смешевым. К тому же при сгорании топлива нефтяного происхождения за счет выбросов вредных веществ, таких как оксид углерода, оксиды серы и азота, сажа, свинец и его соединения, несгоревшие углеводороды и продукты их окисления, происходит загрязнение окружающей среды. Выявлено, что перспективным источником тепловой энергии, используемой в двигателях автотракторной техники, является биоминеральное топливо, получаемое смешиванием растительного масла и товарного минерального дизельного топлива. Установлено, что в качестве биокомпонента такого смешевого топлива в России и за рубежом наиболее широко используются растительные масла. Показано, что биодобавки для смешевого дизельного топлива могут быть произведены из более чем 50 масличных культур.

Применительно к условиям Европейской части России наиболее перспективной масличной культурой считается рапс. С 1 га посевов рапса можно получить до 1 т масла. Сырьем для получения биотоплива из растительных масел служат: в Европе – рапс, США – соя, Канаде – канола, в Индонезии и на Филиппинах – пальмовое и кокосовое масло, в Индии – ятрофа, Африке – соя и ятрофа, Бразилии – касторовое масло. Выбор масла в основном обусловлен его распространенностью в данной стране.

Установлено, что наиболее изученным сырьем для биодобавок в смешевое топливо является рапсовое масло. Вязкость чистого рапсового масла в 25 раз выше дизельного топлива, содержание серы – в 10 раз меньше, температура застывания на 17° выше, чем у зимнего топлива и на 10° ниже, чем у летнего. Жиры (глицериды), входящие в состав растительных масел, представляют собой сложные эфиры трехатомного спирта глицерина и высших карбоновых кислот. Эти отличия необходимо учитывать при адаптации топливной аппара-

туры дизелей для работы на дизельном топливе с биодобавками из рапсового масла.

Испытания дизелей на топливе с биодобавками растительного происхождения проводились российскими и зарубежными учеными, в том числе РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, ФГБНУ ВНИИТиН, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Пензенского ГАУ, Ульяновского ГАУ, ФГБНУ «Росинформагротех», Исследовательского центра «Vasola» (Финляндия), Университета штата Алабама (США) и др. Исследовались различные смеси товарного дизельного топлива с растительными маслами, в том числе рапсовым, соевым, подсолнечным, редечным, сурепным, сафлоровым. При испытаниях дизелей на топливе с биодобавками растительного происхождения большинство отечественных и зарубежных ученых отмечали снижение их мощности.

При замене дизельного топлива биодизельной смесью с рапсовым маслом (при соотношении в ней компонентов 1:1), по данным некоторых исследователей, существенно улучшились экологические показатели работы двигателя. Выбросы оксидов азота на номинальном режиме работы двигателя сократились на 15-20%, сажи – на 30-35, оксидов углерода и углеводов – на 10-15%. Смесевое топливо с биодобавками можно заливать в бак в чистом виде и в качестве добавки к дизельному топливу (биодизельная смесь). Установлено, что мощность двигателя при работе на биодизельном топливе несколько снижается, и, как следствие, увеличивается расход топлива. Смесевое топливо с биодобавками имеет хорошие смазывающие свойства, чем выгодно отличается от дизельного.

В результате сравнительных моторных исследований дизеля Д-243 выявлено, что при увеличении в смесевом топливе редечного масла до 50% дымность отработавших газов уменьшается на 21,4% по сравнению с работой на минеральном топливе. В ходе стендовых исследований дизеля Д-243-648 установлено, что при работе дизеля на смесевом топливе (50% ДТ + 50% соевого масла) по сравнению с работой на товарном нефтяном дизельном топливе содержание в отработавших газах оксида углерода снижается, соответственно, с 0,25 до 0,17%, углеводов – с 0,004 до 0,001, дымность отработавших газов – с 21 до 12%. По результатам экспериментальных исследований дизеля Д-243-648 при работе на минеральном и сафлоро-минеральном топливе установлено, что с увеличением процентного содержания сафлорового масла в смесевом топливе с 20 до 50%

дымность отработавших газов снижается с 32 до 26%. Эксплуатационные показатели использования скипидарного масла, такие как удельный расход топлива, температура выхлопных газов и выброс дыма, оказываются ниже, чем у товарного дизельного топлива. Выявлено, что у биодобавок из микроводорослей плотность, вязкость и цетановое число выше, а содержание серы ниже, чем у дизельного топлива. Экспериментально получено существенное снижение дымности и токсичности отработавших газов дизелей при увеличении содержания биодобавок в смесевом моторном топливе. При испытании дизеля типа Д-245.12С на чистом дизельном топливе и на смеси 91 – ДТ и 9% льняного масла отмечено небольшое увеличение расхода топлива. Однако крутящий момент двигателя и его эффективная мощность изменились незначительно.

В целом смесевое топливо с биодобавками улучшает экологические характеристики дизельных двигателей. Однако их использование в дизельных двигателях имеет и недостатки, в числе которых высокая вязкость смесевое топлива, полимеризация при хранении и сжигании топлива, кислотный состав, содержание свободных жирных кислот в топливе, загущение смазочного масла.

К недостаткам такого топлива также можно отнести *«агрессивность» по отношению к резиновым деталям двигателя*. При низких температурах на жиклерах, форсунках и других калиброванных отверстиях могут образоваться отложения в виде кристаллов воска, что ведет к их закупорке. Отмечены случаи отказов насосов высокого давления и топливных фильтров, поэтому производители дизельных двигателей вносят в них конструктивные изменения, чтобы адаптировать к использованию биотоплива.

По некоторым данным, после 500 ч работы дизеля на смеси, содержащей 70% дизельного топлива и 30% рапсового масла, происходит частичное закоксовывание распылителей форсунок; при низких температурах на жиклерах, форсунках и других калиброванных отверстиях образовывались отложения. В исследованиях некоторых зарубежных ученых также указано, что применение растительных масел в смесевом дизельном топливе приводит к закоксовыванию отверстий распылителей форсунки и отложению твердого нагара на стенках камеры сгорания. Например, после 604 ч работы на смеси подсолнечного масла и дизельного топлива на верхней перемычке всех поршней образовалось большое количество нагара, вторые



поршневые кольца пригорели. На носке форсунки и внутри распыливающих отверстий было обнаружено большое количество нагара. Топливные фильтры приходилось менять через 20-40 ч работы двигателя. Чрезмерное образование нагара обнаружено во впускных окнах после 250 ч испытаний. Анализ моторного масла показал, что после 100 ч работы двигателя масло содержало большое количество нерастворимых продуктов. В настоящее время в ряде организаций проводятся исследования для оценки эффективности использования многокомпонентного смесового топлива для дизелей, в состав которого входит этиловый спирт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утв. Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642).

2. Агропромышленный комплекс России в 2019 году. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 562 с.

3. **Остриков В.В., Ерохин Г.Н., Тишанинов Н.П., Доровских В.И., Балашов А.В., Нагорнов С.А., Шувалов А.М., Петрашев А.И., Зазуля А.Н., Шулаев Г.М., Филиппова О.Б.** Научные основы использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве.– Тамбов: Студия печати Галины Золотовой, 2020. – 216 с.

4. **Нагорнов С.А., Романцова С.В., Зазуля А.Н., Голубев И.Г.** Повышение качества хранения светлых нефтепродуктов. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 256 с.

5. **Нагорнов С.А., Романцова С.В., Зазуля А.Н., Голубев И.Г.** Эффективное использование нефтепродуктов в сельском хозяйстве. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 192 с.

6. **Зазуля А.Н., Романцова С.В., Голубев И.Г., Нагорнов С.А.** Повышение эффективности работы нефтехозяйств в АПК. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 168 с.

7. **Зазуля А.Н., Нагорнов С.А., Сапьян Ю.Н., Голубев И.Г.** Анализ направлений экономии топливно-смазочных материалов путем модернизации – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 168 с.

8. **Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Голубев И.Г., Нагорнов С.А.** Перспективы использования цифровых решений на нефтескладах и заправочных станциях // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: сб. матер. XII Междунар. науч.-практ. интернет-конф. – 2020. – С. 268-271.

9. **Голубев В.В., Кокорев Ю.А., Виноградов А.В.** Анализ способов использования этилового спирта в качестве одного из компонентов смесового топлива для дизелей // Цифровизация в АПК: технологические ресурсы, новые возможности и вызовы времени: сб. науч. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. (11-13 февраля 2020 г., г. Тверь). – Тверь: ФГБОУ ВО «Тверская ГСХА», 2020. – С. 222-223.

10. **Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Голубев И.Г.** Использование биологических добавок в дизельное топливо – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. – 50 с.

11. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Зазуля А.Н., Нагорнов С.А., Голубев И.Г., Романцова С.В., Бодягина С.В., Коноваленко Л.Ю. Инновационные технологии производства биотоплива второго поколения. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 68 с.

12. Бижаев А.В., Деянин С.Н., Фомин В.М., Ибрагим А.С.Х., Ходяков А.А. Использование арахисового масла в качестве присадки к дизельному топливу // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12. – № 6. – С. 45-50.

13. Загородских Б.П., Тохиян М.К., Кожевников А.А., Чугунов В.А. Биотопливо для дизелей на основе сафлорового масла // Нива Поволжья. – 2009. – № 4 (13). – С. 71-74.

14. Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Мещерякова Ю.В., Федоренко В.Ф., Голубев И.Г. Тенденции развития технологий производства биодизельного топлива. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – 172 с.

15. Сайдахмедов А.И. Карпов С.А., Капустин В.М. Исследование влияния добавок хлопкового масла и продуктов его этерификации на характеристики дизельного топлива // Химия и технология топлив и масел. – 2011. – № 5. – С. 3-6.

16. Уханов А.П., Голубев В.А. Перспективы использования биотоплива из горчицы // Вестн. Ульяновской ГСХА. – 2011. – № 1 (13). – С. 88-90.

17. Уханов А.П., Уханов Д.А., Голубев В.А., Сафаров Р.К., Шемелев Д.С. Результаты моторных исследований горчичного биотоплива // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2011. – № 5. – С. 7-10.

18. Уханов А.П., Хохлов А.А., Хохлов А.Л., Голубев В.А., Хохлов Е.А. Физические свойства рыжиково-минерального топлива // Междунар. науч.-исслед. жур. – 2017. – № 5-3(59). – С. 124-128.

19. Dubey P., Gupta R. Research Paper Effects of dual bio-fuel (Jatropha biodiesel and turpentine oil) on a single cylinder naturally aspirated diesel engine without EGR . Department of Mechanical Engineering, MANIT Bhopal, M.P. – India, 2017. – P. 1137-1147.

20. Нагорнов С.А., Корнев А.Ю., Романцова С.В., Ликсутина А.П., Бусин И.В., Ложкина Е.Б. Эксплуатация транспортного дизеля на смешанном топливе // Проблемы и перспективы инновационного развития АПК: сб. науч. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию ФГБНУ ВНИИТиН. – Тамбов: ВНИИТиН, 2020. – С. 217-220.

21. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Голубев И.Г., Ликсутина А.П. Результаты испытаний и перспективы эксплуатации дизелей на биотопливе. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 133 с.

22. **Зазуля А.Н., Нагорнов С.А., Романцова С.В., Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Голубев И.Г.** Сравнительный анализ технологий получения биотоплива для дизельных двигателей. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2013. – 94 с.

23. **Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М.** Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания. – М.: НИЦ «Инженер», 2016. – 291 с.

24. **Плотников С.А., Кантор П.Я., Козлов И.С.** Оценка экологических свойств рапсовых масел для применения в качестве моторного топлива сельскохозяйственного трактора // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30. – № 1. – С. 43-59.

25. **Плотников С.А., Кантор П.Я., Козлов И.С.** Исследование моторных свойств смесей дизельного топлива с рапсовым маслом // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 169-174.

26. **Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Бовзнь С., Маркова И.Г.** Вязкостные характеристики биотоплив на основе растительных масел // Грузовик. – 2017. – № 3. – С. 40-46.

27. **Савельев Г.С.** Производство и использование дизельного топлива из рапса. – М.: ВИМ, 2007. – 94 с.

28. **Голубев И.Г., Руденко И.И.** Влияние биодобавок из рапсового масла в дизельное топливо на работоспособность фильтров тонкой очистки // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: сб. матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. «ИнформАгро-2012». – М: Минсельхоз России, ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. – С. 318-319.

29. **Руденко И.И., Голубев И.Г.** Работоспособность топливной аппаратуры дизелей на топливе с биодобавками из рапсового масла // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 8. – С. 53-54.

30. **Голубев И.Г., Руденко И.И., Панферов В.И.** Влияние биодобавок на работоспособность топливной аппаратуры дизелей // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: сб. науч. докл. XVII Междунар. науч.-практ. конф. – 2013. – С. 171-172.

31. **Крюков В.В.** Оценка эксплуатационных показателей сельскохозяйственного трактора при работе на сурепно-минеральном топливе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2014. – 16 с.

32. **Хохлов А.А.** Обеспечение работоспособности топливной системы тракторных дизелей при использовании смесового рыжико-минерального топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. – Пенза, 2018. – 24 с.

33. **Уханова Ю.В.** Обоснование использования соевого масла в качестве биодобавки к нефтяному дизельному топливу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Пенза, 2019. – 20 с.

34. **Сидорова Л. И.** Применение редечного масла в качестве биокompонента смесового топлива для дизелей тракторной техники: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Пенза, 2016. – 20 с.

35. **Адгамов И. Ф.** Оценка эффективности функционирования машинно-тракторного агрегата при работе на сафлоро-минеральном топливе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. – Пенза, 2015. – 20 с.

36. Растительные топлива для дизелей [Электронный ресурс]. URL: [https://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=974](https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=974) (даты обращения: 20.01.2020, 20.12.2020).

37. **Марков В.А.** Горчичное масло как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу / В.А. Марков, С.А. Бовэнь, В.А. Неверов, С.А. Зыков // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2017. – №10. – С. 10-21.

38. **Марков В.А.** Экспериментальные исследования дизеля, работающего на смесях нефтяного дизельного топлива и льняного масла / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Л.В. Спиридонова // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 3(45). – С. 55-64.

39. **Иванкин А.Н.** Определение минорных компонентов биотоплива, изготовленного на основе таллового масла, влияющих на экологическую безопасность при сгорании / А.Н. Иванкин, А.Н. Зарубина, А.С. Кулезнев, А.Н. Зенкин, А.В. Куликовский // Лесной вестник. – 2021. – № 1. – С. 89-100.

40. Талловое масло: состав, получение, применение [Электронный ресурс]. URL: <https://fb.ru/article/435723/tallovoye-maslo-sostav-poluchenie-primenenie> (дата обращения: 11.03.2021).

41. **Нагорнов С.А., Корнев А.Ю., Романцова С.В., Ликсутина А.П., Бусин И.В., Мещерякова Ю.В.** Получение биодобавок к дизельному топливу из микроводоросли хлорелла // Проблемы и перспективы инновационного развития АПК: сб. науч. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию ФГБНУ ВНИИТиН. – 2020. – С. 213-217.

42. **Мещерякова Ю.В.** Разработка технологического процесса получения биодобавок из липидных компонентов микроводоросли хлорелла для улучшения свойств дизельного топлива: дис. ... канд. техн. наук. – Тамбов, 2016. – 171 с.

43. **Нагорнов С.А. Корнев А.Ю. Мещерякова Ю.В.** Основные этапы получения биодизельного топлива из микроводорослей // Повышение

эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: сб. науч. докл. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. (23-24 сентября 2015 г., г. Тамбов). – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2015. – С. 243-246.

44. **Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Мещерякова Ю.В., Голубев И.Г.** Использование микроводорослей в качестве сырья для получения биодизельного топлива // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: сб. матер. XI Междунар. науч.-практ. интернет-конф. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – С. 437-440.

45. Горчичное масло [Электронный ресурс]. URL: <https://foodandhealth.ru/maslo/gorchichnoe-maslo/> (дата обращения: 11.04.2021).

46. **Феррейра Батиста А. К.** и др. Использование масла алепского сорго (*Dipteryx alata* Vog.) для получения биодизеля и исследование физико-химических характеристик его смесей с нефтяным дизельным топливом // Химия и технология топлив и масел. – 2012. – №1. – С. 11-13.

47. Исследование топливных композиций на основе кукурузного масла в качестве моторного топлива для дизелей [Электронный ресурс]. URL: <http://min.usaca.ru/uploads/article/attachment/2524/> (дата обращения: 11.04.2021).

48. **Golubev I.G., Bolotina M.N., Golubev M.I., Bykov V.V.** Use of coniferous bio additives for diesel fuel mixture. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 723 (2021) 022015. IOP Publishing ESDCA 2021. doi:10.1088/1755-1315/723/2/022015.

49. **Романцова С.В., Нагорнов С.А., Корнеев А.Ю.** Присадки на основе возобновляемого сырья для современных топлив. – Lap Lambert Academic Publishing, 2017. – 141 с.

50. **Roy M.M., Islam M.S., Alam M.N.** Biodiesel from Crude Tall Oil and Its NO<sub>x</sub> and Aldehydes Emissions in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel-Diesel Blends with Water Emulsions. – Processes 2021. – № 9. – P. 126.

51. **Нагорнов С.А., Романцова С.В., Корнеев А.В., Ликсутина А.П.** Использование многокомпонентных смесевых моторных топлив // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для АПК: сб. науч. докл. XX Междунар. науч.-практ. конф. (26-27 сентября 2019 г., г. Тамбов). – Тамбов: ФГБНУ ВНИИТиН, 2019. – С. 259-261.

52. **Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И.** Оптимизация состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизельных двигателей



сельскохозяйственных машин // Транспортное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 12. – С.12-16.

53. **С. Салим, Сатер Абдель Х.И., Ходяков А.А., Хлопков С.В.** Разработка многокомпонентного смесового биоуглеводородного топлива для дизелей // Изв. МГТУ МАМИ. – 2019. – № 31. – С. 60-66.

54. **Денежко Л.М., Новопашин Л.А., Кочетков П.В.** Исследование применения смесовых топлив различного состава в автотракторных дизелях // Вестн. науки Костанайского социал.-техн. ун-та им. акад. Зулхарнай Алдамжар. – 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://articlekz.com/article/28597>.

55. **Марков В.А., Гайворонский А.И., Девянин С.Н., Пономарев Е.Г.** Рапсовое масло как альтернативное топливо для дизеля // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 2. – С.13-15.

56. **Слепцов О.Н.** Эффективность применения топлив растительного происхождения в АПК: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05. 20.01. – М: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2007. – 18 с.

57. **Голубев И.Г., Руденко И.Г.** Влияние биодобавок в смесовое топливо на работоспособность топливной аппаратуры дизельных двигателей // Техника и оборуд. для села. – 2017. – № 5. – С. 45-47.

58. **Голубев И.Г., Руденко И.И., Панферов В.И.** Методика и результаты испытания дизелей на смесовом топливе // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК. сб. матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. «ИнформАгро-2014». – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – С. 357-359.

59. **Голубев И.Г., Руденко И.И.** Испытание дизелей на топливе с биодобавками // Тр. ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 114. – № 1. – С. 66-68.

60. Устройство для подогрева смесового топлива: патент на полезную модель RU 129564 U1/ В.И. Панферов, И.Г. Голубев, И.И. Руденко 27.06.2013. Заявка № 2012155533/06 от 21.12.2012.

61. **Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Мещерякова Ю.В., Голубев И.Г.** Экологические показатели работы дизелей на моторном топливе с биодобавками из микроводорослей // Техника и оборуд. для села. – 2021. – № 2. – С. 40-43.

62. **Савельев Г.С.** Производство и использование дизельного топлива из рапса. – М.: ВИМ, 2007. – 94 с.

63. **Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Голубев И.Г.** Гигроскопичность био-дизельного топлива // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: сб. матер. X Междунар. науч.-практ. интернет-конф. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. – С. 309-312.

64. **Голубев И.Г., Руденко И.И., Панферов В.И.** Работоспособность топливной аппаратуры дизелей на топливе с биодобавками // Тр. ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 112. – № 2. – С. 51-52.

65. **Голубев И.Г., Руденко И.И.** Работоспособность фильтров тонкой очистки дизелей, работающих на биотопливе // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: сб. матер. Междунар. науч.-технич. конф. в 3 т./ под ред. П.П. Казакевича, О.О. Дударева. – 2012. – С. 243-245.

66. **Голубев И.Г., Руденко И.И.** Испытание форсунок топливной аппаратуры дизелей на смесевом топливе // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: сб. матер. Междунар. науч.-практич. конф. в 2 т. / под ред. П.П. Казакевича, О.О. Дударева. – 2010. – С. 221-224.

67. **Марков В.А., Лобода С.С., Бирюков В.В., Блинов А.С., Деянин С.Н.** Оптимизация состава смесевого биотоплива // Двигатель-2017: матер. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 110-летию специальности «Поршневые двигатели» (МГТУ им. Н.Э. Баумана). – 2017. – С. 45-46.

68. **Голубев И.Г., Руденко И.И.** Результаты испытания дизелей на смесевом топливе // Тр. ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107. – №1. – С. 72-73.

69. **Марков В.А., Деянин С.Н., Нагорнов С.А.** Оптимизация состава смесевых биотоплив для дизелей // Автомобильная промышленность. – 2016. – № 3. – С. 22-29.

70. **Murayama T., Oh Y., Kido A., Chikahisa T., Miyamoto N., Itow K.** Effects of Super Heating of Heavy Fuels on Combustion and Performance in DI Diesel Engines // SAE Technical Paper Series. – 1986. – № 860306. – P. 1-8.

71. **Hamasaki K., Tanaka Y., Kuwamitsu K., Takada M.** Рапсовое масло в качестве топлива для дизелей // Кагосима дангаку когакубу кэнкю хококу = Research Reports of the Faculty of Engineering Kagoshima University. – 1987. – № 29. – P. 17-24. – Яп. (рез. -Англ).

72. **Hemmerlein N., Korte V., Richter H., Schroder G.** Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil // SAE Technical Paper Series. – 1991. – № 910848. – P. 1-16. – Англ.

73. **Oko-Vielstoffmotor** // Antriebstechnik. – 1991. – Jg. 30. – № 9. – S. 95.

74. **Pak M., Alexi A.** Kaltgepresstes Rapsol im Test // Landtechnik. – 1992. – Jg. 47. – № 7/8. – S. 372-374. – Нем.

75. **Neues Motorenkonzept** // Deutsche Maschinenwelt. – 1992. – Jg. 69. – № 4. – S. 20. – Нем.

76. **Rapsol ist grundsätzlich als Ersatz für Dieselkraftstoff geeignet** // BMT: Baumaschinen Technik. – 1992. – Jg. 39. – № 1. – S. 34. – Нем.

77. Volkswagen testet Rapsol-Diesel // Steinbruch und Sandgrube. – 1992. – Jg. 85. – № 6. – С. 472. – Нем.

78. Neue Pflanzenolmotoren von DMS // MTZ. – 1993. – Jg. 54. – № 7/8. – С. 365. – Нем.

79. **Barsic N.J., Humke A.L.** Performance and Emissions Characteristics of a Naturally Aspirated Diesel Engine with Vegetable Oil Fuels // SAE Technical Paper Series. – 1981. – № 810262.

80. Vegetable Oils: Diesel Fuel Supplements? // Automotive Engineering. – 1981. – Vol. 89. – № 4. – P. 37-41.

81. **Humke A.L., Barsic N.J.** Performance and Emission Characteristics of a Naturally Aspirated Diesel Engine with Vegetable Oils (Part 2) // SAE Technical Paper Series. – 1981. – № 810955. – 7 p.

82. **Богданович В.П., Громаков А.В., Бырько С.И.** Растительное масло – сырье для моторного топлива // Сел. механизатор. – 2010. – № 11. – С. 30.

83. **Бубнов Д.Б.** Адаптация дизеля сельскохозяйственного трактора для работы на рапсовом масле: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. – М.: ВНИИ механизации сельского хозяйства, 1996. – 17 с.

84. **Вальехо П.** Применение раздельной подачи топлива растительного происхождения в малоразмерный дизель с целью улучшения его экологических показателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. – М.: РУДН, 2000. – 16 с.

85. **Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н., Абелян А.М.** Экспериментальные исследования дизеля ÜMЗ-238 при его работе на смесевых топливах // Вестн. РУДН (инженерные исследования). – 2003. – № 1. – С. 5-10.

86. **Грехов Л.В., Марков В.А., Девянин С.Н.** Параметры процесса топливоподачи и показатели дизеля, работающего на смесевых биотопливах // Грузовик. – 2009. – № 7. – С. 39-47.

87. **Девянин С.Н., Путан А.А.** Улучшение смесеобразования в дизеле при использовании рапсового масла // Сел. механизатор. – 2009. – № 9. – С. 28-29.

88. **Девянин С.Н., Белов В.М., Слепцов О.Н.** Применение в дизелях топлива растительного происхождения // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. – 2003. – №4. – С. 15-21.

89. **Девянин С.Н., Быковская Л.И., Маркова В.В.** Метод оценки экологических показателей дизельных двигателей, работающих на различных топливах // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Машиностроение). – 2011. – № 4. – С. 124.

90. **Девянин С.Н., Быковская Л.И., Маркова В.В.** Сравнительный анализ показателей дизеля при его работе на смесях дизельного топлива с рапсовым и подсолнечным маслом // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Машиностроение). – 2010. – № 3. – С. 125.

91. **Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г.** Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. – 340 с.

92. **Коршунов Д.А.** Улучшение эксплуатационных показателей транспортного дизеля путем использования биотоплив на основе рапсового масла: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 16 с.

93. **Краснощеков Н.В. Савельев Г.С., Бубнов Д.Б.** Адаптация тракторов и автомобилей к работе на биотопливе // Тракторы и с.-х. машины. – 1994. – № 12. – С. 1-4.

94. Кукурузное масло – экологическая добавка к дизельному топливу / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Л.И. Быковская и др. // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Машиностроение). – 2012. – № 3. – С. 123.

95. **Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И.** Использование в дизелях многокомпонентных смесевых биотоплив // Грузовик. – 2010. – № 5. – С. 41-47.

96. **Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И.** Исследование работы дизеля на многокомпонентных биотопливах // Актуальные проблемы развития поршневых ДВС: матер. межотраслевой науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок и 120-летию проф. В.А. Ваншейдта. – СПб.: СПбГМТУ, 2010. – С. 59-63.

97. **Марков В.А., Девянин С.Н., Шустер А.Ю.** Работа транспортного дизеля на многокомпонентных биотопливах // Автомобильная промышленность. – 2010. – №4. – С. 12-15.

98. **Девянин С.Н.** Рапсовое масло в смеси с дизельным топливом / С.Н. Девянин, Л.И. Быковская, В.А. Марков и др. // Техника и оборуд. для села. – 2010. – № 9. – С.45-46.

99. **Савельев Г.С., Краснощеков Н.В.** Биологическое моторное топливо для дизелей на основе рапсового масла // Тракторы и с.-х. машины. – 2005. – № 10. – С. 11-16.

100. **Фомин В.М., Ермолович И.В., Сатер Х.А.** Использование рапсового масла в качестве моторного топлива для дизелей // Тракторы и с.-х. машины. – 1997. – № 5. – С. 11-12.

101. **Шашев А.В.** Совершенствование рабочего процесса дизеля с объемно-пленочным смесеобразованием при использовании в качестве топлива рапсового масла: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. – Барнаул: Алтайский гос. техн. ун. им И.И. Ползунова, 2007. – 16 с.

102. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А.** Применение смесевых биотоплив на основе метиловых эфиров растительных масел в транспортных дизелях // Безопасность в техносфере. – 2011. – № 6 (ноябрь-декабрь). – 2011. – С. 26-33.

103. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А.** Состав и теплота сгорания биотоплив, получаемых из растительных масел // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Естественные науки). – 2012. – № 2. – С. 65-80.

104. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Иващенко Н.А.** Сравнительный анализ показателей дизельного двигателя, работающего на смесях нефтяного дизельного топлива и растительных масел // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. (Машиностроение). – 2012. – № 7. – С. 59-73.

105. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Иващенко Н.А.** Использование биотоплив на основе растительных масел в дизельных двигателях // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. (Машиностроение). – 2012. – № 7. – С. 74-81.

106. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А.** Применение смесевых биотоплив на основе метиловых эфиров растительных масел в транспортных дизелях // Изв. Волгоградского гос. техн. ун.-та. – 2012. – Т. 12. – № 4. – С. 9-14.

107. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Иващенко Н.А.** Сравнительный анализ показателей дизельного двигателя, работающего на смесях нефтяного дизельного топлива и растительных масел // Инженерный журнал: наука и инновации (электрон. науч.-техн. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана). – 2012. – № 10. – С. 7-22.

108. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Иващенко Н.А.** Использование биотоплив на основе растительных масел в дизельных двигателях // Инженерный журнал: наука и инновации (электрон. науч.-техн. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана). – 2012. – № 10. – С. 8-15.

109. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Лобода С.С.** Использование смесей дизельного топлива и метилового эфира подсолнечного масла в качестве топлива для транспортных дизелей // Инженерный журнал: наука и инновации (электрон. науч.-техн. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана). – 2013. – № 5. – С. 8-24.

110. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Быковская Л.И.** Оптимизация состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизелей сельскохозяйственных машин // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: сб. науч. докл. XVII Междунар. науч.-практич. конф. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2013. – С. 281-286.

111. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Маркова В.В.** Оценка экологической безопасности автотракторных дизелей // Там же. – С. 286-289.

112. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Быковская Л.И.** Оптимизация состава многокомпонентных биотоплив для дизелей сельскохозяйственных машин // Наука в Центральной России. – 2013. – № 3. – С. 36-53.

113. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Маркова В.В.** Оценка экологической безопасности силовых установок с автотракторными двигателями // Наука в Центральной России. – 2013. – № 3. – С. 53-72.

114. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А.** Работа транспортного дизеля на смесях дизельного топлива и метилового эфира подсолнечного масла // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 3 (33). – С. 56-62.

115. **Нагорнов С.А., Калинин В.Ф., Марков В.А., Зазуля А.Н.** Оптимизация состава биотоплива для дизелей // Транспорт, экология, устойчиво развитие: сб. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф. (15-17 мая 2014 г.). – Еко Varna, 2014. – С. 156-162.

116. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю.** Использование водно-биотопливных эмульсий в автотракторных дизелях // Наука в Центральной России. – 2015. – № 1(13). – С. 71-78.

117. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю.** Влияние состава водно-биотопливной эмульсии на работу дизельного двигателя // Тракторы и с-х машины. – № 12. – 2015. – С. 7-8.

118. **Марков В.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю.** Улучшение экологических характеристик дизельного двигателя при работе на водно-биотопливной эмульсии // Тракторы и с-х. машины. – № 12. – 2015. – С. 7-8.

119. **Нагорнов С.А., Калинин В.Ф., Марков В.А., Зазуля А.Н.** Эксплуатация тракторного дизеля на смесевом топливе // Транспорт, экология, устойчиво развитие: сб. докл. XXI Междунар. научно-техн. конф. (14-16 мая 2015 г.). – Еко Varna, 2015. – С. 415-420.

120. **Марков В.А., Десянин С.Н., Нагорнов С.А.** Оптимизация состава смесевых биотоплив для дизелей // Автомобильная пром-ть. – 2016. – № 3. – С. 22-29.

121. **Нагорнов С.А., Калинин В.Ф., Марков В.А., Зазуля А.Н., Левина Е.Ю.** Перспективы использования водобиотопливной эмульсии в дизельных двигателях // Транспорт, экология, устойчиво развитие: сб. докл. XXIII Междунар. научн.-техн. конф. (15-17 июня 2017 г.). – Eko Varna, 2017. – С. 253-264.

122. **Марков В.А., Нагорнов С.А., Романцова С.В., Неверова В.В., Са Бовэнь.** Метиловый эфир рапсового масла как дизельное топливо // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 6. – С. 17-30.

123. **Нагорнов С.А., Корнев А.Ю., Романцова С.В., Синютина С.Е.** Структура присадок для современных дизельных топлив // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. науч. тр. матер. Междунар. науч.-практ. конф. (25-27 октября 2017 г.) – Мичуринск: МичГАУ, 2017. – С. 152-157.

124. **Марков В.А., Нагорнов С.А., Романцова С.В.** Использование эфирных смесей в качестве альтернативных моторных топлив для дизелей. Ч. 1. // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. – 2018. – № 3. – С. 38-45.

125. **Марков В.А., Нагорнов С.А., Романцова С.В.** Использование эфирных смесей в качестве альтернативных моторных топлив для дизелей. Ч. 1. // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. – 2018. – № 4. – С. 43-51.

126. **Марков В.А., Нагорнов С.А., Романцова С.В., Синютина С.Е., Корнев А.Ю.** Присадки к нефтяным дизельным топливам // АвтоГазо-Заправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2018. – Т. 17. – № 5. – С. 212-218.

127. **Болотина М.Н.** Биодобавки из растительного сырья для смесового топлива дизелей сельскохозяйственной техники // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: матер. XI Междунар. науч.-практ. интернет-конф. «ИнформАгро-2019». – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – С. 447-449.



## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                                                                                  | 3  |
| 1. СЫРЬЕВАЯ БАЗА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОДОБАВОК<br>РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ .....                                                               | 5  |
| 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАК-<br>ТОРОВ НА ТОПЛИВЕ С БИОДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНОГО<br>ПРОИСХОЖДЕНИЯ .....                      | 26 |
| 2.1. Биодобавки из рапсового масла.....                                                                                                         | 26 |
| 2.2. Биодобавки из микроводорослей .....                                                                                                        | 29 |
| 2.3. Биодобавки из соевого масла .....                                                                                                          | 32 |
| 2.4. Биодобавки из редечного масла.....                                                                                                         | 32 |
| 2.5. Биодобавки из рыжикового масла .....                                                                                                       | 33 |
| 2.6. Биодобавки из сафлорового масла.....                                                                                                       | 34 |
| 2.7. Биодобавки из сурепного масла.....                                                                                                         | 35 |
| 2.8. Биодобавки из льняного масла.....                                                                                                          | 36 |
| 2.9. Биодобавки из соевого масла .....                                                                                                          | 37 |
| 2.10. Результаты зарубежных испытаний двигателей на топливе<br>с биодобавками .....                                                             | 39 |
| 2.11. Сравнительная характеристика результатов испытаний<br>дизельных двигателей на топливе с биодобавками растительного<br>происхождения ..... | 44 |
| 2.12. Многокомпонентные смесевые биотоплива .....                                                                                               | 47 |
| Заключение .....                                                                                                                                | 52 |
| Литература .....                                                                                                                                | 56 |

**Голубев И.Г. (ФГБНУ «Росинформагротех»);**  
**Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Корнев А.Ю. (ФГБНУ ВНИИТиН);**  
**Мишуров Н.П., Болотина М. Н. (ФГБНУ «Росинформагротех»)**

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ  
ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАКТОРОВ  
НА ТОПЛИВЕ С БИОДОБАВКАМИ  
РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

*Аналитический обзор*

Редакторы: *М.А. Обознова, Л.Т. Мехрадзе*

Обложка художника *П.В. Жукова*

Компьютерная верстка *Т.П. Речкиной*

Корректор *В.А. Белова*

[fgnu@rosinformagrotech.ru](mailto:fgnu@rosinformagrotech.ru)

---

Подписано в печать 04.06.21 Формат 60×84/16

Печать офсетная Бумага офсетная Гарнитура шрифта «Times New Roman»

Печ. л. 4,5 Тираж 500 экз. Изд. заказ 123 Тип. заказ 303

---

Отпечатано в типографии ФГБНУ «Росинформагротех»,  
141261, пос. Правдинский Московской обл., ул. Лесная, 60

**ISBN 978-5-7367-1627-2**



9 785736 716272 >

