

Экологически чистое дизельное топливо, полученное из растительного сырья и углеводородной нефти

А.М. ЕРЕМЕЕВА ✉, Н.К. КОНДРАШЕВА, А.Ф.ХАСАНОВ, И.Л. ОЛЕЙНИК

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ eremeevaanzhelika@yandex.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Eremeeva, A.M.; Kondrasheva, N.K.; Khasanov, A.F.; Oleynik, I.L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude. *Energies* 2023, 16, 2121. <https://doi.org/10.3390/en16052121>

Аннотация: В настоящее время глобальной проблемой для стран является поиск сырья и производство биоэнергии на территории своей страны, к биоэнергии относятся и биодизельное топливо. Одним из наиболее перспективных видов биодизельного топлива является экологически чистое дизельное топливо, получаемое путем гидрогенизации растительных масел. Для получения высококачественного биодизеля и экологически чистого дизельного топлива предложено три метода: компаундирование зеленого дизеля с гидроочищенным дизельным топливом, композиции улучшенного топлива «зеленый дизель» с биодобавками и двухкомпонентные смеси экологически чистого дизельного топлива с биодобавками. Используя эти методы, можно получить топливо для дизельных двигателей с улучшенными смазывающими свойствами, диаметр рубца износа снижен до 232 мкм, согласно стандарту EN 590: 2009, это значение стандартно составляет до 460 мкм. Установлен оптимальный количественный состав трехкомпонентного экологически чистого дизельного топлива с улучшенными смазывающими свойствами. Установлена зависимость изменения смазывающих свойств экологически чистого дизельного топлива от количественного и качественного состава. Выведено математическое уравнение, описывающее зависимость изменения скорректированного пятна износа от количества противозносной присадки в экологичном дизельном топливе. Трехкомпонентные составы экологически чистого дизельного топлива позволяют получить топливо, соответствующее требованиям стандарта EN 590: 2009, расширить ресурсы получения топлива, а также улучшить экологические и эксплуатационные характеристики топлива.

Ключевые слова: биодизель; экологически чистое дизельное топливо; биодобавка; смазывающие свойства; дизель.

Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude

Anzhelika M. EREMEEVA ✉, Natalia K. KONDRASHEVA, Artyom F. KHASANOV and Ivan L. OLEYNIK

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ eremeevaanzhelika@yandex.ru

Abstract: Currently, the global issue for countries is the search for raw materials and the production of bioenergy within their country; bioenergy also includes biodiesel fuels. One of the most promising biodiesel fuels is the green diesel fuel produced by the hydrogenation of vegetable oils. Three methods have been proposed to obtain high-quality biodiesel and environmentally friendly diesel fuel: compounding green diesel with hydro-treated diesel fuel, compositions of the improved fuel «green diesel» with bio-additives, and two-component mixtures of environmentally friendly diesel fuel with bio-additives. Using these methods, it is possible to produce fuel for diesel engines with improved lubricating properties, the wear scar diameter is reduced to 232 microns, according to EN 590: 2009, this value standard is up to 460 microns. The optimal quantitative composition of three-component environmentally friendly diesel fuel with improved lubricity was established. The dependence of the change in the lubricating properties of environmentally friendly diesel fuel on the quantitative and qualitative composition are established. A mathematical equation describing the dependence of the change in the corrected wear spot on the amount of anti-wear additive in the green diesel fuel is derived. Three-component compositions of environmentally friendly diesel fuel make it possible to obtain fuel that meets the requirements of the EN 590: 2009 standard and to expand the resources for obtaining fuel, as well as to improve the environmental and operational characteristics of the fuel.

Keywords: biodiesel; green diesel; fuel; bio-additive; lubricating properties; diesel.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Введение

Во всем мире одной из наиболее актуальных проблем является загрязнение воздуха и снижение концентрации вредных выбросов в атмосфере до минимальных значений. Наибольшее влияние на здоровье человека и природу оказывают угарный газ, оксиды азота и пары углеводородов, входящие в состав выхлопных газов [1-3]. Угарный газ попадает в организм человека и накапливается в кровеносной системе, где молекулы газа связываются с молекулами гемоглобина. Эта связь сильнее, чем связь молекул кислорода с молекулами гемоглобина, поэтому чем больше угарного газа содержится в воздухе рабочей зоны, тем меньше кислорода может удерживаться в крови человека, в результате чего может возникнуть кислородная недостаточность [4]. Оксиды азота ядовиты, раздражают слизистые оболочки и могут вызвать отек легких [5].

Не забывая о проблеме парниковых газов, во всем мире разрабатываются программы по декарбонизации и сокращению выбросов CO₂ до минимума [6,7].

Другой популярной проблемой для многих стран является нехватка нефтяных ресурсов для производства топлива. Из-за отсутствия запасов нефти и низкого уровня ее переработки (85 %) европейские страны [8, 9] нуждаются в создании технологий для производства альтернативных видов топлива [10-12]. Поскольку большая часть транспорта в этих странах оснащена дизельными двигателями, тип биотоплива, который может быть использован в них, является наиболее востребованным [13]. Биодизель не влияет на растения и животных при контакте с водой. Кроме того, оно подвергается практически полному биоразложению: в почве или в воде микроорганизмы перерабатывают 99 % биодизеля за 28 дней [14-16], что означает уменьшение загрязнения водных путей [17]. Это топливо на 75 % чище нефтяного дизельного топлива [18, 19].

В последние годы количество биодизельного топлива постоянно растет. За последнее десятилетие производство биодизеля увеличилось примерно в два раза (рис. 1) [20].

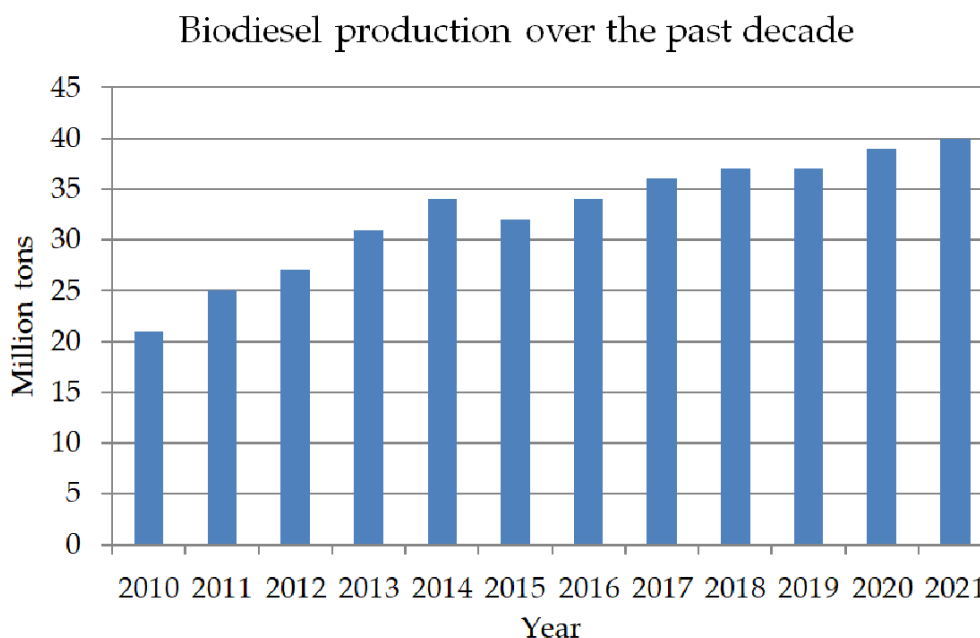


Рис. 1. Производство биодизеля за последнее десятилетие

В последнее время дизельные автомобили завоевали популярность в России и Европе [21] благодаря очевидным преимуществам возобновляемого биодизеля, таким как улучшенные экологические свойства (снижение выбросов твердых частиц и летучих органических соединений при сгорании) [22,23], улучшенная смазывающая способность и высокое цетановое число.

2. Обзор темы исследования

В ноябре 2022 года Организация Объединенных Наций объявила, что население Земли перешагнуло порог в 8 миллиардов человек [24]. Постоянно растущие потребности рынка заставляют производителей увеличивать объемы производства, что приводит к росту грузоперевозок и, как следствие, к повышению уровня потребления нефтепродуктов [25]. Однако запасы легкоизвлекаемой нефти практически исчерпаны. Добыча трудноизвлекаемой нефти (нефти на основе парафинов) сложна как технологически, так и экономически [26, 27]. Именно поэтому поиск альтернативных видов топлива уже давно является предметом пристального интереса. Так, в работах [28, 29] авторы рассмотрели общие принципы получения биодизеля из рапсового сырья. В работе [30] авторы проанализировали рынок синтетического топлива на период 2020-2023 гг. включительно. В книге [31] проанализирован технологический процесс получения видов биодизельного топлива. Приведены их сравнительные характеристики и оценки перспектив. Важно отметить, что технологический процесс получения биодизельного топлива технологически очень сложен. Например, сушка рапса должна происходить в очень ограниченном температурном диапазоне, так как пересушивание или ошибки при транспортировке могут привести к снижению процентного содержания масла в зернах, что может привести к значительному ухудшению объема получаемого топлива. Для такой настройки, как правило, используются численные методы распределенных систем управления [32, 33] или аналитические методы [34, 35]. Используя описанные выше методы [36], можно реализовать полную технологическую цепочку производства видов биодизельного топлива [37, 38]. Улучшению качества видов биодизельного топлива посвящено достаточно небольшое количество работ. Большое количество публикаций направлено на один компонент улучшения качества топлива. Однако они не видят полной картины. Многие ученые [39, 40] склонны считать, что это имеет экономическую основу: нерентабельность топлива на рынке – главная причина отсутствия необходимых улучшений. Другие [41, 42] склонны считать главной проблемой отсутствия спроса низкий уровень химической промышленности в развивающихся странах. Страны, лидирующие в производстве биодизельного топлива, представлены на рисунке 2 [14, 17, 20].

Leading producing countries of biodiesel fuel

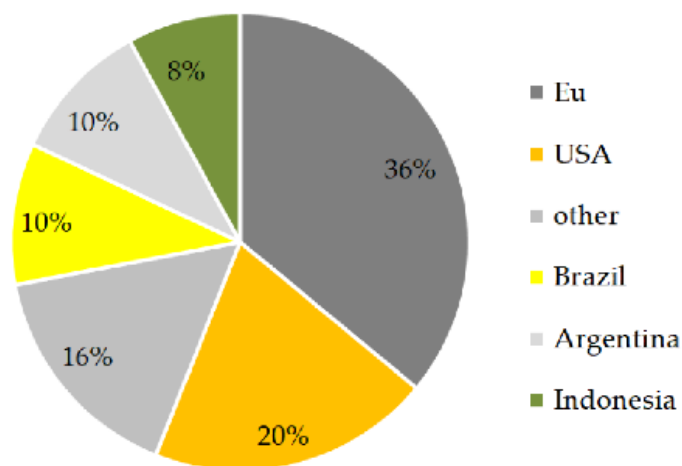


Рис. 2. Ведущие страны-производители биодизельного топлива

Смазочные свойства биодизельного топлива рассматриваются в [43–45]. Важно отметить, что смазывающую способность нельзя получить аналитически. Она может быть получена только экспериментально. Поэтому для ее получения в этих работах проводятся многочисленные эксперименты. Однако ни в этих, ни в других проанализированных работах поиск закономерностей смазывающей способности не проводится. В рамках данного исследования была рассмотрена задача оценки смазывающей способности биодизельного топлива и поиска закономерностей.

3. Материалы и методы

Существует несколько методов получения экологически чистых компонентов дизельного топлива, таких как глубокая гидроочистка прямогонной дизельной фракции, переэтерификация растительных масел со спиртами, этерификация жирных кислот со спиртами, гидроочистка растительных масел на катализаторе, каталитический крекинг растительных масел, применение растительных масел в чистом виде. Для получения высококачественных продуктов наиболее рационально использовать лишь некоторые из них, а именно переэтерификацию растительных масел со спиртами и гидроочистку растительных масел на катализаторе. В первом случае получается смесь эфиров карбоновых кислот, преимуществами которой являются повышенное цетановое число, повышенная температура вспышки в закрытом тигле и улучшенная смазывающая способность. К серьезным недостаткам данного вида топлива можно отнести повышенную окислительную стабильность топлива за счет того, что в составе присутствуют кислородсодержащие соединения. Во втором случае получают смесь парафинов нормального и изо-строения. Преимуществом такой композиции является высокое цетановое число и сходство по физико-химическим свойствам с дизельным топливом, однако сам процесс является дорогостоящим, а низкотемпературные и смазывающие свойства не соответствуют требованиям стандартов и требуют доработки. С экономической стороны наиболее выгодно использовать растительное масло в чистом виде, не требуется привлечения дополнительного капитала и производственных инвестиций на сырье, оборудование и т.д., но из-за высокой вязкости и образования большого количества сажи и твердых частиц происходит неполное сгорание масел, что быстро засоряет и выводит из строя двигатель.

Таким образом, в дальнейшей части работы было исследовано биодизельное топливо, полученное путем гидроочистки, а также переэтерификации растительного масла.

Экспериментальная часть

Зеленое дизельное топливо было получено в процессе гидроочистки растительных масел [46, 47]. Образование смеси жидких углеводородов $C_{15} - C_{18}$, выкипающих в составе дизельных фракций, осуществляется за счет протекания реакций декарбоксилирования, гидродекарбонилирования и «восстановления» и сопровождается выделением оксидов углерода (CO_2 , CO) и воды [48, 49]. В условиях гидрокрекинга в результате разрыва связей $C - C$ наряду с пропаном образуются и другие легкие алканы (метан, этан, бутаны). При этом жидкие углеводородные продукты обогащаются алканами C_{5+} с температурами кипения в диапазоне кипения бензинов и реактивных топлив.

С помощью газового хромато-масс-спектрометра GCMS-QP2010 SE Shimadzu [50] был получен количественный и качественный состав биотоплива. Образец зеленого дизельного топлива содержит всего 88 соединений.

Биотопливо состоит в основном из n -алканов и изо-алканов (рис. 3). Такой состав объясняет более высокую температуру застывания топлива по сравнению с ГОДТ. Разница в температурах застывания объясняется тем, что температура застывания дизельного топлива зависит от содержания парафиновых углеводородов, которые в основном содержатся в зеленом дизельном топливе и имеют высокую температуру плавления. ГОДТ содержит смесь различных углеводородов, и доля парафинов в нем значительно меньше, чем в зеленом дизельном топливе. Кроме того, этот состав обладает плохими смазывающими свойствами, так как в нем отсутствуют гетероатомные соединения, способные снижать трение в деталях двигателя [51]. Однако этот состав обуславливает высокое цетановое число топлива и экологическую безопасность – минимальное количество вредных выбросов при сгорании топлива в двигателях. Цетановое число – одна из важнейших эксплуатационных характеристик дизельного топлива, которая определяется в первую очередь составом и показывает промежуток времени от впрыска топлива в цилиндр до начала сгорания. Чем выше цетановое число, тем меньше задержка и тем спокойнее и ровнее горит топливная смесь, а высокое цетановое число также обеспечивает полное сгорание топливной смеси, быстрое воспламенение и образование небольшого количества нагара. Наибольшим цетановым числом обладают парафиновые углеводороды, которые в больших количествах содержатся в зеленом дизельном топливе.

The composition of the sample "Green diesel"

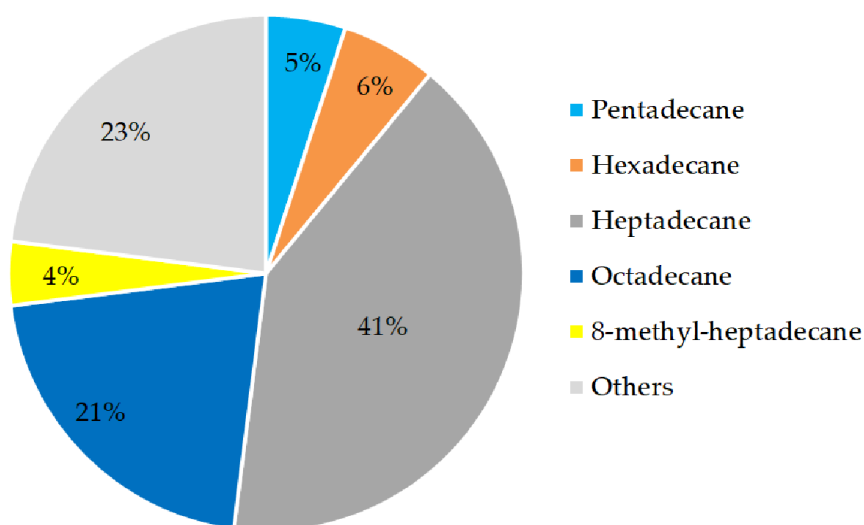


Рис. 3. Качественный и количественный состав зеленого дизельного топлива

Также были определены основные физико-химические и эксплуатационные свойства биодизельного топлива, представленные в таблице 1. Исходя из физико-химических характеристик зеленого дизельного топлива (таблица 2), можно сделать вывод, что для использования данного вида топлива в дизельном двигателе необходимо улучшить, в первую очередь, смазывающие свойства топлива. Одной из основных задач исследования было улучшение смазывающих свойств зеленого дизельного топлива. Существует несколько способов улучшения смазывающих свойств дизельных топлив [52], основными из которых являются:

- компаундирование компонентами с улучшенными смазывающими свойствами;
- использование биодобавок с улучшенными смазывающими свойствами [53, 54].

Вторым способом улучшения смазывающих свойств топлива является введение в топливо противоизносных биодобавок.

Таблица 1

Физико-химические характеристики ГОДТ и образца «зеленого дизеля»

| № | Название показателя | «Зеленый дизель» | ГОДТ 1 |
|----|--|------------------|--------|
| 1 | Плотность при 15 °С, кг/м ³ | 777,1 | 854,8 |
| 2 | Содержание серы, мг/кг | 36 | 8 |
| 3 | Температура вспышки в закрытом тигле, °С | 90 | 80 |
| 4 | Смазываемость: диаметр пятна износа при 60 °С, мкм | 595 | 443 |
| 5 | Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с | 3,48 | 2,79 |
| 6 | Фракционный состав: | | |
| | - при температуре 250 °С, % (по объему) | 4 | 123 |
| | - при температуре 350 °С, % (по объему), | 94 | 213 |
| | - 95 % (по объему) перегоняется при температуре, °С | 298 | 330 |
| 7 | Метод расчета цетанового числа | 70 | 51 |
| 8 | Температура застывания, °С | 18 | 17 |
| 9 | Содержание метиловых эфиров жирных кислот, % (по объему) | - | - |
| 10 | Содержание золы, % по весу | 0,008 | - |
| 11 | Содержание воды, мг/кг | - | - |
| 12 | Общее загрязнение, мг/кг | - | - |
| 13 | Коррозия медной ленты, рейтинг | 1 | 1 |
| 14 | Устойчивость к окислению, г/м ³ | 11 | 16 |

Противоизносные присадки за рубежом

| Производитель | DF | ГОДТ | Противоизносные добавки | | | | | Наш образец |
|---------------------------|-----|------|--|----------|-------|----------------------------|-------------------------|-------------|
| | | | Kerokorr LA 99C Dodilube 4940 PC 32 Hitec 4140A R690 | | | | | |
| | | | BASF | Clariant | Total | Afton Chemical Corporation | Infineum | |
| Содержание серы, ч. / млн | 220 | 5 | 12 | 9 | 15 | 7 | 2 | 10 |
| СДПИ, мкм | 300 | 650 | 400 | 307 | 330 | 382 | 201 | 113 |
| Состав | | | Кислоты таловых масел | | | | Сложные эфиры глицерина | |

В качестве основных компонентов, призванных улучшить смазывающие свойства топлива, чаще всего используются карбоновые кислоты и их производные (эфиры и амиды). Их состав зависит от природы перерабатываемого сырья. Жирные кислоты представляют собой смесь нормальных насыщенных и преимущественно ненасыщенных кислот с углеродной цепью $C_{16} - C_{24}$ (олеиновая, линоленовая, линолевая и др.).

Для улучшения смазывающих свойств была разработана биодобавка на основе подсолнечного масла и дигидрического спирта [55, 56]. При получении присадок в качестве сырья могут быть использованы различные растительные масла (как пищевые, так и непищевые), поскольку триглицериды в основном содержат линолевую, линоленовую и олеиновую кислоты в различных пропорциональных соотношениях. Выбор авторов был обусловлен доступностью сырья и низкой стоимостью. В качестве спирта можно использовать моногидрические, дигидрические и тригидрические спирты. Наш окончательный выбор был обусловлен максимальной степенью конверсии сырья, а также экономической целесообразностью.

В мире основными видами противоизносных присадок являются Kerokorr LA 99C и Dodilube 4940 [57-59]. Как видно, основными компонентами этих присадок являются талловые масла, что значительно снижает затраты на технологию и стоимость готового продукта, и эфиры глицерина [21, 60-64]. Однако кислоты, даже в небольших количествах, негативно влияют на окислительную способность топлива [65-67] (табл. 2).

Основными компонентами полученной нами присадки являются эфиры жирных кислот, содержащиеся в растительном масле. С помощью хромато-масс-спектрометра Agilent 5973 на неполярной колонке DB-Petro длиной 100 м был получен количественный и качественный состав синтезированных соединений (табл. 3). Количество эфиров составляет 77,78 % массы.

Таблица 3

Состав эфирной части биодобавки

| № | Название эфира | Содержание, % |
|----|---|---------------|
| 1 | Метиловый эфир линолевой кислоты | 1,21 |
| 2 | Метиловый эфир олеиновой кислоты | 0,49 |
| 3 | Этиловый эфир линолевой кислоты | 1,05 |
| 4 | Линолевая кислота 2,3-дигидроксипропиловый эфир | 38,75 |
| 5 | Гидроксиэтиловый эфир элаидовой кислоты | 24,48 |
| 6 | Глицериновый эфир элаидовой кислоты | 6,53 |
| 7 | Гидроксиэтиловый эфир стеариновой кислоты | 2,75 |
| 8 | Линолевая кислота 2,3-дигидроксипропиловый эфир | 1,37 |
| 9 | Цетиловый эфир транксамовой кислоты | 0,73 |
| 10 | Этиловый эфир линолевой кислоты | 0,42 |

Из таблицы 3 видно, что основными кислотами, вступающими в реакцию этерификации, являются олеиновая (или ее изомер) и линолевая.

4. Результаты и обсуждение

Для создания композиций экологически чистого дизельного топлива с улучшенными смазывающими свойствами зеленое дизельное топливо компаундировали с другими компонентами.

4.1. Компаундирование «зеленого дизеля» с гидроочищенным дизельным топливом

Как упоминалось ранее, одним из способов уменьшения диаметра пятна износа топлива является компаундирование зеленого дизельного топлива с гидроочищенным дизельным топливом (ГДТ) [55], которое обладает лучшими смазывающими свойствами (595 мкм против 443 мкм, соответственно). Характеристики используемого гидроочищенного дизельного топлива представлены в таблице 1.

Были подобраны следующие составы смеси экологически чистого дизельного топлива и определены их корректировочные диаметры пятна износа (табл. 4).

Таблица 4

Двухкомпонентные составы для дизельного топлива высшего качества

| Компонент | Объем компонента, % | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| «Зеленый дизель», % | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| ГОДТ, % | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 80 | 90 | 10 |
| СДПИ *, микроны | 595 | 590 | 583 | 572 | 568 | 550 | 492 | 420 | 370 | 443 |
| СДПИ, EN 590: 2009, микроны | 460 | | | | | | | | | |

* СДПИ – скорректированный диаметр пятна износа, мкм

Исходя из полученных результатов (табл. 2), можно сделать вывод, что ни одна смесь ГОДТ с зеленым образцом дизельного топлива в качестве компонента топлива не проходит по требованиям стандарта EN 590: 2009 «Дизельное топливо EURO. Технические условия», поэтому для использования данного вида топлива в дизельных двигателях необходимо введение противоизносных биодобавок. Большинство авторов в своих статьях [28, 38-40] предлагают использовать в качестве основного топлива или компонента зеленое дизельное топливо. Чаще всего гидроочищенное дизельное топливо, являющееся вторым компонентом в смеси с зеленым дизельным топливом, имеет индекс смазывающей способности выше максимального значения, указанного в требованиях стандартов, поэтому для таких смесей необходимо применение противоизносных присадок. В нашем случае показатель смазывающей способности гидрообработанного дизельного топлива удовлетворяет требованиям стандарта и находится несколько ниже указанного максимального значения, следовательно, данный метод может быть использован для улучшения смазывающей способности, однако, как показывают результаты, он недостаточен для достижения желаемого результата.

Зависимость смазывающей способности от количественного содержания гидроочищенного дизельного топлива в смеси с зеленым дизельным топливом описывается степенной функцией пятой степени, представленной ниже (1). Значение достоверности результата составляет 99,93 %.

$$y = 1 \cdot 10^{-6} \cdot x^5 - 0,0003 \cdot x^4 + 0,026 \cdot x^3 - 0,9223 \cdot x^2 + 13,25 \cdot x + 526,58 \quad (1)$$

4.2. Составы улучшенного топлива, содержащего «зеленое дизельное топливо» и биодобавки

Биодобавки в зеленое дизтопливо вводились в количестве от 5 до 50 %, и результаты сравнивались со стандартом на дизельное топливо EN 590: 2009 (табл. 5).

Таблица 5

Зависимость смазывающей способности от содержания биодобавок в зеленом дизельном топливе

| Компонент | Содержание, % | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 100 | 95 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| «Зеленый дизель» | 100 | 95 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| Биодобавка | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| СДПИ, мкм | 595 | 232 | 327 | 247 | 294 | 335 | 238 | 298 | 273 | 267 | 324 | 536 |
| СДПИ, EN 590: 2009, мкм | 460 | | | | | | | | | | | |

Наилучшие результаты показали составы, содержащие 5 и 50 % биодобавок (232 и 238 мкм соответственно). Тем не менее, наиболее эффективно использовать образец с содержанием БАД 5 %, так как SDPI находится практически на том же уровне, а количество БАД в смеси на порядок меньше. Кроме того, для нормальной работы дизельного двигателя без существенных изменений в его конструкции рекомендуется использовать биодобавку в топливе в небольшом количестве, не превышающем 5 %. Эта зависимость не может быть описана степенной функцией с достаточной степенью достоверности результатов. Графически зависимость смазывающей способности топлива от количества биодобавки в зеленом дизельном топливе представлена на рисунке 4. Большинство авторов считают, что эта зависимость имеет либо гиперболический характер с увеличением количества биодобавок, при этом скорректированный диаметр рубца износа уменьшается [68-70], либо экстремальный характер с одним минимумом [71]. В большинстве случаев не имеет значения, какое сырье используется для получения биодобавок [72, 73].

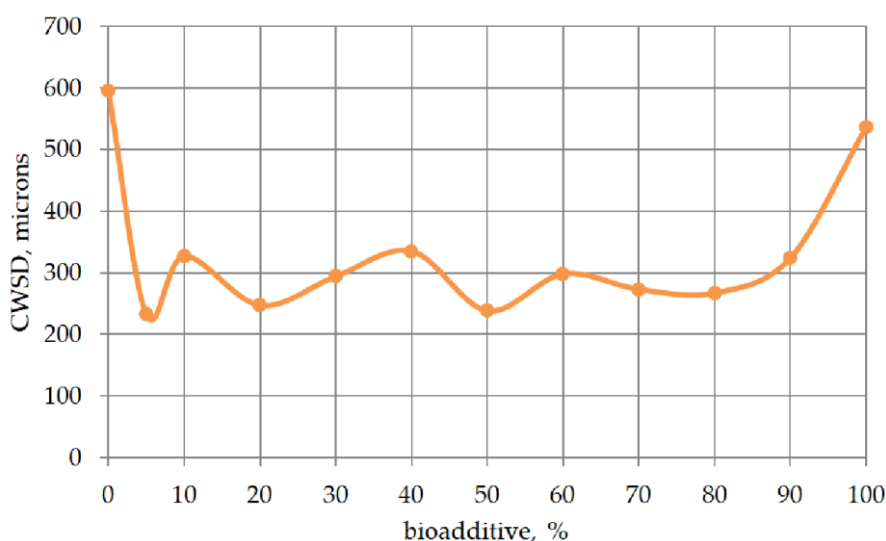


Рис. 4. Зависимость смазывающей способности от содержания биодобавок в зеленом дизельном топливе

Таким образом, график зависимости смазывающей способности экологически чистого дизельного топлива «зеленый дизель» от содержания в нем биодобавок является экстремальным (рис. 4), с минимумом в диапазоне от 5 до 50 % содержания биодобавок, так как с увеличением концентрации биотоплива до 5 % в смеси с зеленым дизельным топливом, адсорбция гетероатомов (молекул кислорода с неспаренными электронами) происходит на металлической поверхности трущейся пары металлический шар-пластина, погруженной в испытуемое топливо, и усиливается за счет межмолекулярного взаимодействия на границе фаз металл-жидкость. При увеличении концентрации биотоплива в смеси более 50 % граница раздела фаз металл-жидкость пересыщается гетероатомами, происходит коагуляция (огрубление) и десорбция более крупных молекул в объем раствора, и, как следствие, снижение интенсивности межмолекулярного взаимодействия топлива с металлом и увеличение СДПИ.

4.3. Двухкомпонентные смеси экологически чистого дизельного топлива с биодобавками

После этого для одновременного улучшения других характеристик топлива (температуры застывания, кинематической вязкости и т.д.) было решено составить смеси экологически чистого дизельного топлива (ЭЧДТ), состоящие из двух основных компонентов (зеленого дизеля и ГОДТ) и синтезированных биодобавок.

Для представления результатов экспериментальных исследований были построены несколько графических зависимостей смазывающей способности различных топливных композиций с биодобавками, в которых количество одного или двух компонентов оставалось неизменным.

Были разработаны составы экологически чистого дизельного топлива с биодобавками, содержащие 5 % и 10 % биодобавки, причем количество зеленого образца дизельного топлива варьировалось от 25 до 45 %, а остальное топливо представляло собой ГОДТ.

Как видно из таблицы 6, все полученные смеси удовлетворяют требованиям стандарта EN 590: 2009 (не более 460 мкм) по смазывающей способности, но наилучший результат для двухкомпонентной композиции с биодобавкой в количестве 10 % показала топливная композиция, состоящая из 30 % зеленого дизеля и 60 % ГОДТ, а также чистых исходных компонентов базового топлива с 5 % биодобавки и ГОДТ (95 %)-113 мкм.

Таблица 6

Зависимость смазывающей способности от изменения компонентного состава смесевое топлива с количеством биодобавки 5 % и 10 %

| «Зеленый дизель», % | ГОДТ, % | СДПИ, мкм | СДПИ, EN 590: 2009, км |
|----------------------------|---------|-----------|------------------------|
| Количество биодобавки 5 % | | | |
| 95 | 0 | 232 | 460 |
| 45 | 50 | 326 | |
| 35 | 60 | 267 | |
| 25 | 70 | 279 | |
| 0 | 95 | 113 | |
| Количество биодобавки 10 % | | | |
| 90 | 0 | 327 | 460 |
| 40 | 50 | 270 | |
| 30 | 60 | 233 | |
| 0 | 90 | 133 | |

Таким образом, при увеличении количества зеленого дизельного компонента (то есть при уменьшении количества ХТДФ) в составе ЭФДФ (с содержанием биодобавки 5 мас. %) наблюдается общая тенденция к ухудшению смазывающей способности смесевое топлива (то есть к увеличению ХВСД) с небольшим экстремумом в диапазоне концентраций 50-70 % ХТДФ в смесевом топливе.

5. Выводы

В условиях быстро развивающейся экономики остро стоит вопрос получения альтернативных, экологически чистых видов топлива. В данной работе рассмотрено решение важной научно-технической проблемы – повышение качества биодизельного топлива. В качестве объекта исследования выбрана смазочная способность.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что образец зеленого дизельного топлива не может использоваться без противоизносных биодобавок, как в чистом виде, так и в качестве компонента экологически чистого топлива, смешанного с гидроочищенным дизельным топливом, так как смазывающая способность полученных смесей не соответствует требованиям стандарта EN 590: 2009, поскольку с увеличением количества зеленого дизельного топлива смазывающая способность топлива ухудшается, а диаметр пятна износа топлива увеличивается.

При введении противоизносных присадок и увеличении их концентрации в зеленом дизельном топливе и в смешанном экологически чистом дизельном топливе (гидроочищенное дизельное топливо с зеленым дизельным топливом) смазывающие свойства образцов улучшаются (диаметр пятна износа уменьшается с 595 до 233 мкм).

Оптимальный состав зеленого дизельного топлива и биодобавки содержит 95 и 5 % соответственно. Диаметр пятна износа в этом случае составляет 232 мкм. Наилучший состав смешанного экологически чистого дизельного топлива с биодобавкой содержит 60 % ХТДФ, 30 % зеленого дизельного топлива и 10 % биодобавки, а диаметр пятна износа составляет 233 мкм.

Разработанная технология производства экологически чистого дизельного топлива из растительного и нефтяного сырья с улучшенными смазывающими свойствами расширит сферу использования топливных ресурсов для производства моторных топлив для дизельных двигателей, а также даст возможность производить биодизельное и экологически чистое дизельное топливо,

соответствующее международным стандартам. Производство высококачественного экологически чистого дизельного топлива позволит снизить зависимость между странами от уровня и количества добычи нефти.

В статье представлены возможные решения проблемы продления срока службы дизельных двигателей.

Вклад авторов: концептуализация, А.М.Е.; методология, А.М.Е. и И.Л.О.; исследование, А.М.Е.; написание – подготовка первоначального варианта, рецензирование и редактирование, А.М.Е., Н.К.К. и А.Ф.К. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: все данные доступны в основном тексте.

Конфликты интересов: авторы не заявляют о конфликте интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arteconi, A.; Mazzarini, A.; Nicola, G.D. Emissions from ethers and organic carbonate fuel additives: A review. *Water Air Soil Pollut.* 2011, 221, 405–423. <http://doi.org/10.1007/s11270-011-0804-y>
2. Strizhenok, A.V.; Korelskiy, D.S. Estimation and reduction of methane emissions at the scheduled and repair outages of gascompressor units. *J. Ecol. Eng.* 2019, 20, 46–51. <http://doi.org/10.12911/22998993/93943>
3. Cherepovitsyn, A.; Lebedev, A. Drill Cuttings Disposal Efficiency in Offshore Oil Drilling. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 317. <http://doi.org/10.3390/jmse11020317>
4. Baj, J.; Buszewicz, G.; Przygodzka, D.; Forma, A.; Flieger, J.; Teresiński, G. Diffusion of Carbon Monoxide and Hydrogen Cyanide to Muscles and Blood – An Experimental Study. *Toxics* 2022, 10, 707. <http://doi.org/10.3390/toxics10110707>
5. Matijošius, J.; Orynych, O.; Kovbasenko, S.; Simonenko, V.; Shuba, Y.; Moroz, V.; Gutarevych, S.; Wasiak, A.; Tucki, K. Testing the Indicators of Diesel Vehicles Operating on Diesel Oil and Diesel Biofuel. *Energies* 2022, 15, 9263. <http://doi.org/10.3390/en15249263>
6. Dzhhevaga, N.V.; Borisova, D.D. Analysis of Air Monitoring System in Megacity on the Example of St. Petersburg. *J. Ecol. Eng.* 2021, 22, 175–185. <http://doi.org/10.12911/22998993/134076>
7. Kazamia, E.; Smith, A.G. Assessing the environmental sustainability of biofuels. *Trends Plant Sci.* 2014, 19, 615–618. <http://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.08.001>
8. Litvinenko, V. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas. *Resources* 2020, 9, 59. <http://doi.org/10.3390/resources9050059>
9. Dvoynikov, M.V.; Leusheva, E.L. Modern trends in hydrocarbon resources development. *J. Min. Inst.* 2022, 258, 879–880.
10. Bezergianni, S.; Dimitriadis, A. Comparison between different types of renewable diesel. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 21, 110–116. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.042>
11. Belyaev, A.I.; Semenyutina, A.V.; Khuzhakhmetova, A.S.; Semenyutina, V.A. Analysis of Bioresource Collections on Climatic Rhythms and Phenological Processes. *Ecol. Eng. Environ. Technol.* 2022, 23, 87–94. <http://doi.org/10.12912/27197050/147152>
12. Al-Ezzi, A.; Chaichan, M.; Majdi, H.; Al-Waeli, A.; Kazem, H.A.; Sopian, K.; Fayad, M.; Dhahad, H.; Yusaf, T. Nano-Iron Oxide-Ethylene Glycol-Water Nanofluid Based Photovoltaic Thermal (PV/T) System with Spiral Flow Absorber: An Energy and Exergy Analysis. *Energies* 2022, 15, 3870. <http://doi.org/10.3390/en15113870>
13. Aghbashlo, M.; Tabatabaei, M.; Khalife, E.; Shojaei, T.R.; Dadak, A. Exergoeconomic analysis of a DI diesel engine fueled with diesel/biodiesel (B5) emulsions containing aqueous nano cerium oxide. *Energy* 2018, 149, 967–978. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.082>
14. Brady, S.; Tam, K.; Leung, G.; Salam, C. Zero waste biodiesel: Using glycerin and biomass to create renewable energy. *UCR Undergrad. Res. J.* 2008, 2, 5–11.
15. Halim, R.; Danquah, M.K.; Webley, P.A. Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnol. Adv.* 2012, 30, 709–732. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.001>
16. Petrova, T.A.; Rudzisha, E.; Alekseenko, A.V.; Bech, J.; Pashkevich, M.A. Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge. *Minerals* 2022, 12, 376. <http://doi.org/10.3390/min12030376>
17. Hajjari, M.; Tabatabaei, M.; Aghbashlo, M.; Ghanavati, H.J.R. A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 72, 445–464. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.034>
18. Ereemeeva, A.M.; Ilyashenko, I.S.; Korshunov, G.I. The possibility of application of bioadditives to diesel fuel at mining enterprises. *MIAB* 2022, 10, 39–49. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_39
19. Kobylkin, S.S.; Kharisov, A.R. Design features of coal mines ventilation using a room-and-pillar development system. *J. Min. Inst.* 2020, 245, 531–538. <http://doi.org/10.31897/PML.2020.5.4>
20. Mirnyy, M. Motor fuel in Russia and the world was discussed at an industry conference in Moscow. Summing up 2017, Mplast. Available online: <https://mplast.by/novosti/analitika/2017-04-25-motornoe-toplivo-v-rossii-i-mire-obsudili-na-otraslevoykonferentsii-v-moskve-podvodim-itogi/> (accessed on 7 February 2023).
21. Caliskan, H.; Yildiz, I.; Mori, K. Production and Assessment of New Biofuels from Waste Cooking Oils as Sustainable Bioenergy Sources. *Energies* 2023, 16, 463. <http://doi.org/10.3390/en16010463>
22. Fakas, S.; Papanikolaou, S.; Galiotou-Panayotou, M.; Komaitis, M.; Aggelis, G. Biochemistry and biotechnology of single cell oil. In *New Horizons in Biotechnology*; Asiatech Publishers: New Delhi, India, 2009; pp. 38–60.
23. Mattson, J.; Burnete, N.V.; Depcik, C.; Moldovanu, D.; Burnete, N. Second law analysis of waste cooking oil biodiesel versus ULSD during operation of a CI engine. *Fuel* 2019, 255, 115753. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115753>

24. World Population to Reach 8 Billion on 15 November 2022. Available online: <https://www.un.org/en/desa/world-populationreach-8-billion-15-november-2022> (accessed on 7 February 2023).
25. Oil Consumption by Country 2023. Available online: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/oil-consumption-by-country> (accessed on 7 February 2023).
26. Litvinenko, V.; Bowbrick, I.; Naumov, I.; Zaitseva, Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *J. Clean. Prod.* 2022, 338, 130530. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>
27. Litvinenko, V.S.; Dvoynikov, M.V.; Trushko, V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2022, 32, 113–119. <http://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.010>
28. Tirumareddy, P.; Esmi, F.; Masoumi, S.; Borugadda, V.B.; Dalai, A.K. Introduction to Green Diesel. In *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*; Aslam, M., Shivaji Maktedar, S., Sarma, A.K., Eds.; Advances in Sustainability Science and Technology; Springer: Singapore, 2022. http://doi.org/10.1007/978-981-19-2235-0_1
29. Esmi, F.; Masoumi, S.; Dalai, A.K. Comparative Catalytic Performance Study of 12-Tungstophosphoric Heteropoly Acid Supported on Mesoporous Supports for Biodiesel Production from Unrefined Green Seed Canola Oil. *Catalysts* 2022, 12, 658. <http://doi.org/10.3390/catal12060658>
30. Tuli, D.; Kasture, S. Chapter 5 – Biodiesel and green diesel. In *Advanced Biofuel Technologies*; Tuli, D., Kasture, S., Kuila, A., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2022; pp. 119–133. <http://doi.org/10.1016/B978-0-323-88427-3.00010-6>
31. Kumar, H.; Aslam, M.; Sarma, A.; Kushwaha, P. Current status of the green diesel industry. In *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*; Springer: Cham, Switzerland, 2022. http://doi.org/10.1007/978-981-19-2235-0_9
32. Ilyushin, Y.V.; Afanasieva, O.V. Synthesis of a distributed control system. *Int. J. Control Theory Appl.* 2016, 9, 41–60.
33. Ilyushin, Y.; Mokeev, A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2017, 12, 1500–1510.
34. Kukharova, T.V.; Pershin, I.M. Conditions of Application of Distributed Systems Synthesis Methods to Multidimensional Object. In *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 3–4 October 2018; p. 8602749. <http://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602749>
35. Martirosyan, K.V.; Chernyshev, A.B.; Martirosyan, A.V.; Tatyana, K.V. Formation of the Anterior Heating Function under the Action of Uniformly Distributed Sources. In *Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg/Moscow, Russia, 27–30 January 2020; pp. 755–760. <http://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038947>
36. Yenumala, S.R.; Sarkhel, B.; Maity, S.K. Technological advancements in the production of green diesel from biomass BT. In *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*; Aslam, M., Shivaji Maktedar, S., Sarma, A.K., Eds.; Springer Nature: Singapore, 2022; pp. 219–248. http://doi.org/10.1007/978-981-19-2235-0_7
37. Cavalcanti, J.; Ravagnani, M.; Stragevitch, L.; Carvalho, F.; Pimentel, M. Simulation of the soybean oil hydrotreating process for green diesel production. *Clean. Chem. Eng.* 2022, 1, 100004. <http://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100004>
38. Shamsuddin, M.R.; Khalit, W.N.A.W.; Mahmud, S.; Safa-Gamal, M.; Ujai, T.I.A.; Lahuri, A.H.; Marliza, T.S. Biodiesel, green diesel and petrodiesel: A comparison BT. In *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*; Aslam, M., Shivaji Maktedar, S., Sarma, A.K., Eds.; Springer Nature: Singapore, 2022; pp. 285–307. http://doi.org/10.1007/978-981-19-2235-0_10
39. Ansari, K.B.; Hassan, S.Z.; Farooqui, S.A.; Hasib, R.; Khan, P.; Rahman, A.R.S.; Khan, M.S.; Trinh, Q.T. Policies, techno-economic analysis and future perspective of green diesel BT. In *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*; Aslam, M., Shivaji Maktedar, S., Sarma, A.K., Eds.; Springer Nature: Singapore, 2022; pp. 351–375. http://doi.org/10.1007/978-981-19-2235-0_14
40. Mansyur, Y.; Aprianingsih, A. Proposed Development Strategy for Green Diesel Product in Industrial Fuel Market. *Eur. J. Bus. Manag. Res.* 2022, 7, 148–153. <http://doi.org/10.24018/ejbm.2022.7.4.1527>
41. Upadhyay, P.R.; Das, P. Catalytic materials for green diesel production BT. In *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*; Aslam, M., Shivaji Maktedar, S., Sarma, A.K., Eds.; Springer Nature: Singapore, 2022; pp. 55–108. http://doi.org/10.1007/978-981-19-2235-0_3
42. Al-Dawody, M.F.; Rajak, U.; Jazie, A.; Al-Farhany, K.; Saini, G.; Verma, T.; Nashine, P. Production and performance of biodiesel from *Cladophora* and *Fucus* green diesel. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2022, 53, 102761. <http://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102761>
43. Saxena, V.; Kumar, N.; Gautam, R. Comparative assessment of unmodified diesel engine characteristics with commercial diesels BT. In *Recent Trends in Thermal and Fluid Sciences*; Mishra, D.P., Dewangan, A.K., Singh, A., Eds.; Springer Nature: Singapore, 2023; pp. 209–217.
44. Wadumesthrige, K.; Ng, S.; Salley, S. Properties of Butanol-Biodiesel-ULSD Ternary Mixtures. *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2010, 3, 660–670. <http://doi.org/10.4271/2010-01-2133>
45. Araujo, M.; Pasa, V.; Corgozinho, C. Simultaneous optimization on biolubricants obtained through a quaternary mixture of vegetable oils: Application of the desirability function. *J. Eng. Exact Sci.* 2022, 8, 13798–01e. <http://doi.org/10.18540/jcecvl8iss2pp13798-01e>
46. Bartoccia, P.; Pergolarib, M.; Beatricec, C.; Frusterid, F.; Bidinia, G.; Fantozzia, F. Batch pyrolysis of pellet made of biomass and crude glycerol: Mass and energy balances. *Renew. Energy* 2018, 124, 172–179. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.049>
47. Raza, M.; Ali, L.; Inayat, A.; Rocha-Meneses, L.; Ahmed, S.F.; Mofijur, M.; Jamil, F.; Azimoh, C.L. Sustainability of biodiesel production using immobilized enzymes: A strategy to meet future bio-economy challenges. *Int. J. Energy Res.* 2022, 46, 19090–19108. <http://doi.org/10.1002/er.8231>
48. Mohammad, M.; Hari, T.K.; Yaakob, Z.; Sharma, Y.C.; Sopian, K. Overview on the production of paraffin based-biofuels via catalytic hydrodeoxygenation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 22, 121–132. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.026>
49. Dubovikov, O.; Beloglazov, I.; Alekseev, A. Specific features of the use of pulverized coal fuel in combined chemical processing. *Obogashchenie Rud* 2022, 6, 32–38. <http://doi.org/10.17580/or.2022.06.06>
50. Sultanbekov, R.; Schipachev, A. Manifestation of incompatibility of marine residual fuels: A method for determining compatibility, studying composition of fuels and sediment. *J. Min. Inst.* 2022, 257, 843–852. <http://doi.org/10.31897/PMI.2022.56>
51. Orjuela Abril, S.; Fonseca-Vigoya, M.D.S.; García, C.P. Study of the Cylinder Deactivation on Tribological Parameters and Emissions in an Internal Combustion Engine. *Lubricants* 2022, 10, 60. <http://doi.org/10.3390/lubricants10040060>

52. Rathore, D.; Seveda, S.; Prasad, S.; Venkatramanan, V.; Chandel, A.K.; Kataki, R.; Bhadra, S.; Channashettar, V.; Bora, N.; Singh, A. Bioengineering to Accelerate Biodiesel Production for a Sustainable Biorefinery. *Bioengineering* 2022, 9, 618. <http://doi.org/10.3390/bioengineering9110618>
53. Kim, G.; Ha, G.; Kurade, M.B.; Saha, S.; Khan, M.A.; Park, Y.-K.; Chung, W.; Chang, S.W.; Yadav, K.K.; Jeon, B.-H. Integrating fermentation of *Chlamydomonas mexicana* by oleaginous *Lipomyces starkeyi* and switchable ionic liquid extraction for enhanced biodiesel production. *Chem. Eng. J.* 2022, 446, 137285. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137285>
54. Dabbagh, H.; Ghobadi, F.; Ehsani, M.; Moradmand, M. The influence of ester additives on the properties of gasoline. *Fuel* 2013, 104, 216–223. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.056>
55. Gómez-Cuenca, F.; Gómez-Marín, M.; Folgueras-Díaz, M.B. Effects of ethylene glycol ethers on diesel fuel properties and emissions in a diesel engine. *Energy Convers. Manag.* 2011, 52, 3027–3033. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.017>
56. Eremeeva, A.M.; Korshunov, G.I.; Kondrasheva, N.K. Method to reduce harmful emissions when diesel locomotives operate in coal mines. In *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; Volume 1, pp. 10–16. <http://doi.org/10.1201/9781003014577-2>
57. Athar, M.; Imdad, S.; Zaidi, S.; Yusuf, M.; Kamyab, H.; Klemeš, J.; Chelliapan, S. Biodiesel production by single-step acid-catalysed transesterification of *Jatropha* oil under microwave heating with modelling and optimisation using response surface methodology. *Fuel* 2022, 322, 124205. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124205>
58. Saengarun, C.; Petsom, A.; Tungasmita, D.N. Etherification of Glycerol with Propylene or 1-Butene for Fuel Additives. *Sci. World J.* 2017, 2017, 4089036. <http://doi.org/10.1155/2017/4089036>
59. De Torres, M.; Jimenez-Oses, G.; Mayoral, J.A.; Pires, E.; Santos, M. Glycerol ketals: Synthesis and profits in biodiesel blends. *Fuel* 2012, 94, 614–616. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.062>
60. Ulanov, V.; Skorobogatko, O. Impact of EU carbon border adjustment mechanism on the economic efficiency of Russian oil refining. *J. Min. Inst.* 2022, 257, 865–876. <http://doi.org/10.31897/PMI.2022.83>
61. Lapuerta, M.; Rodríguez-Fernández, J.; García-Contreras, R. Effect of a glycerol-derived advanced biofuel – FAGE (fatty acid formal glycerol ester) – on the emissions of a diesel engine tested under the New European Driving Cycle. *Energy* 2015, 93, 568–579. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.070>
62. Fernando, S.; Adhikari, S.; Kota, K.; Bandi, R. Glycerol based automotive fuels from future biorefineries. *Fuel* 2007, 86, 2806–2809. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.030>
63. Quispe, C.A.; Coronado, C.J.; Carvalho, J.A. Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 27, 475–493. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.017>
64. Decarpigny, C.; Aljawish, A.; His, C.; Fertin, B.; Bigan, M.; Dhulster, P.; Millares, M.; Froidevaux, R. Bioprocesses for the Biodiesel Production from Waste Oils and Valorization of Glycerol. *Energies* 2022, 15, 3381. <http://doi.org/10.3390/en15093381>
65. Nibin, T.; Sathiyagnanam, A.; Sivaprakasam, S.; Saravanan, C. Investigation on emission characteristics of a diesel engine using oxygenated fuel additive. *J. Inst. Eng. Part MC Mech. Eng. Div.* 2005, 86, 51–54.
66. Ben Bacha, A.; Alonazi, M.; Alharbi, M.G.; Horchani, H.; Ben Abdelmalek, I. Biodiesel Production by Single and Mixed Immobilized Lipases Using Waste Cooking Oil. *Molecules* 2022, 27, 8736. <http://doi.org/10.3390/molecules27248736>
67. Ronzhin, A.L.; Savel'ev, A.I. Artificial Intelligence Systems for Solving Problems of Agro-Industrial Complex Digitalization and Robotization. *Agric. Mach. Technol.* 2022, 16, 22–29. <http://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29>
68. ElAhmadi, M.Y.; Maiz, S.; Muhammad, A.K.; Abd, Z.A.; Sawalha, A.; Sleiman, A.G.; Omar, A.I.; Hassan, J.B. Effects of palm oil biodiesel on the lubricity of Cummins 4BTA diesel engine. *Energies* 2021, 14, 1742.
69. Stanaite, D.I.; Vrečiauskas, E. Combustion and lubrication characteristics of spark ignition diesel engine fuelled with treated waste cooking oil biodiesel and its blends with diesel. *Fuel* 2020, 259, 117068.
70. Asadulagi, M.M.; Ioskov, G.V. Simulation of the control system for hydrodynamic process with random disturbances. In *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources, Proceedings of The International Forum-Contest of Young Researchers, Saint Petersburg, 18–20 April 2018*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; pp. 399–405.
71. Maiz, S.; ElAhmadi, M.Y.; Muhammad, A.K.; Sleiman, A.G.; Sawalha, A.; Abd, Z.A.; Omar, A.I.; Hassan, J.B. The evaluation of lubricity characteristics of vegetable biodiesel-diesel blends in a four-cylinder diesel engine. *Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff.* 2020, 42, 1227–1237.
72. Kulkarni, V.N.; Saidutta, R.K.; Changappa, R.S.; Mahadik, K.G. Experimental investigations on lubricity characteristics of waste frying oil and its blends with diesel in a direct injection diesel engine. *Fuel* 2018, 233, 92–101.
73. Yadav, V.; Asthana, A. Effect of engine operating conditions on lubrication-related fuel components of biodiesel-diesel blends. *Fuel* 2018, 216, 248–257.