

БИОДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО, ПРОИЗВЕДЕННОЕ ИЗ МАСЕЛ МАКА И КАНОЛЫ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И УРОВНЕЙ ВЫБРОСОВ У ПРОБ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ ДОБАВЛЕНИЯ НОВЫХ ТИПОВ НАНОЧАСТИЦ

© 2022 г. Ahmet Beyzade Demirpolat¹, Muhammed Mustafa Uyar², Hasan Arslanoğlu^{3,*}

¹ Department of Electronics and Automation, Vocational School of Arapgir, Turgut Ozal University, Malatya, 44800 Turkey

² Department of Electricity and Energy, Vocational School of Arapgir, Turgut Ozal University, Malatya, 44800 Turkey

³ Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Çanakkale, 17100 Turkey

*E-mail: hasan.arslanoglu@comu.edu.tr

Поступила в редакцию 24 мая 2021 г.

После доработки 6 июля 2021 г.

Принята к публикации 23 марта 2022 г.

Для получения биодизельного топлива изучалась реакция межмолекулярной этерификации масел сельскохозяйственных культур мака и канолы, катализируемая кислотами и основаниями. Кроме того, для сравнения были проведены испытания стандартного дизельного и биодизельного топлив без добавок. Для определения эксплуатационных характеристик и уровня вредных выбросов исследуемые топлива были подвергнуты испытаниям в трехцилиндровом дизельном двигателе с прямым впрыском. Полученные значения сравнивали со значениями стандартного дизельного топлива. Обнаружено, что увеличение доли биодизеля в дизельном топливе увеличивает удельный расход топлива и повышает температуру выхлопных газов на выходе; при этом уровень выбросов СО и углеводородов (УВ) уменьшился, а уровень выбросов NO_x, CO₂ и O₂ увеличился. Были также получены и испытаны пробы биодизельного топлива с добавками наночастиц CuO. Сравнение проб биодизеля и топлива, созданного путем добавления наночастиц, показало, что добавка наночастиц в биодизель и дизельное топливо способствует снижению уровня выбросов СО примерно на 20%, уровня выбросов УВ на 27%, дыма (сажи) на 29%, удельного расхода топлива на 16%. Таким образом, в результате исследований было впервые отмечено улучшение характеристик сгорания и производительности биодизельного топлива с добавкой наночастиц, снижение значений выбросов, что положительно сказалось на чистоте окружающей среды.

Ключевые слова: биодизель, наночастицы, маковое масло, каноловое масло, дизельный двигатель, дизельно топливо

DOI: 10.31857/S0028242122020095, **EDN:** ERZGES

Современные темпы развития привели к тому, что сектор промышленного использования дизельных топлив не может удовлетворить свои потребности, используя только нефтепродукты. По этим причинам на первый план выходят возобновляемые источники энергии, которые смогут удовлетворить энергетические потребности мира в дизельном топливе. Исследования в области альтернативных видов энергии и топлива заняли важное место в мире. Альтернативным топливом, пригодным для

использования в дизельных двигателях, следует считать такое топливо, которое является экономичным, возобновляемым, экологически безопасным и легко доступным. Биодизель считается альтернативным видом топлива для дизельных двигателей, обладающим свойствами, которые могут соответствовать этим требованиям [1].

В процессе данного исследования было замечено, что для производства биодизеля используются

растительные масла, животные жиры, отработанные фритюрные и моторные масла. Хотя биодизель широко применяется в сельском хозяйстве и транспортном секторе, очевидно, что имеется не так много исследований и разработок, которые можно было бы использовать для производства энергии. Испытания для определения условий горения и рабочих характеристик были проведены с использованием топлива, состоящего из смеси биодизеля из рыбьего жира (10%) и дизельного топлива (90%), которое подавали в дизельный двигатель методом прямого впрыска при частоте вращения 2200 об/мин и нагрузках двигателя 3.75, 7.5, 11.25 и 15 Нм [2]. В результате эксперимента было показано, что указанную смесь можно использовать в дизельном двигателе без каких-либо изменений [2]. Методы производства биодизеля рассматриваются в исследованиях G. Knothe и L.F. Razon, которые изучали влияние типов жирных кислот и сырья, используемых при производстве биодизеля, на его характеристики [3]. M. Balat и H. Balat показали в своих исследованиях, что растительные масла значительно отличаются от дизельного топлива, полученного из нефти, с точки зрения их свойств, влияющих на впрыск и распыление. Причиной этого они указали высокую вязкость растительных масел. Используемые сегодня дизельные двигатели имеют систему впрыска топлива, чувствительную к изменению вязкости. По этим причинам ими были проведены различные исследования по снижению вязкости растительного масла для улучшения характеристик топлива [4].

В настоящей статье дается обзор исследований по экономике производства биодизеля. Помимо методов оценки и определения общих инвестиционных затрат, в ней приводится оценка экономически эффективных технологий, катализаторов и альтернативного сырья. Кроме того, рассматриваются основные системные переменные, влияющие на рентабельность и экономическую целесообразность производства биодизеля [5]. M. Mathiyazhagan и A. Ganapathi определили, что биодизель можно производить из растительных и животных масел с помощью реакции межмолекулярной переэтерификации. Они исследовали влияние факторов, участвующих в этой реакции, на производство биодизеля [6]. G.R. Moradi и др.

изучили реакцию межмолекулярной переэтерификации соевого масла с получением биодизельного топлива с использованием КОН при различных условиях обработки. Затем они создали модель прогнозирования получаемых результатов с помощью искусственной нейронной сети и проанализировали точность полученных результатов [7]. M. Gülüm и др. в своих исследованиях обнаружили, что факторами, препятствующими широкому использованию биодизеля, являются высокая стоимость производства и вязкость топлива. Чтобы преодолеть эти недостатки, исследовали условия реакции межмолекулярной переэтерификации при сжигании отходов с обводненной нефтью (WCO), применяя метод Тагучи (Taguchi) и подход с использованием полного факторного планирования эксперимента [8]. Kalaimurugan K. и др. добавляли наночастицы оксида меди к биодизельному топливу. Они исследовали эксплуатационные характеристики горения и уровень выбросов такого топлива, используемого в дизельном двигателе с фиксированной частотой вращения [9]. S.X. Tan и др. исследовали уровень выбросов, испытывая смесь спирта и биодизеля в дизельном двигателе [10]. R. Siva и др. испытывали в экспериментальном двигателе биодизель, полученный из масла апельсиновой корки [11]. S. Manigandan и др. изучали свойства выбросов и впрыска биодизеля, произведенного из кукурузного масла, в экспериментальной установке [12]. K. Kalaimurugan и др. проводили исследования смеси оксида церия (CeO_2) с чистым дизельным топливом и наночастицами; полученные экспериментальные результаты показали увеличение теплового КПД тормоза (brake thermal efficiency) и сокращение уровня выбросов выхлопных газов [13].

Основная цель исследования – изучение характеристики и уровня выбросов биодизельного топлива, полученного из растительных масел мака и канолы, при его использовании в дизельных двигателях и сравнение их с соответствующими значениями стандартного дизельного топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследуемое биодизельное топливо производили из указанных масел в присутствии катализаторов NaOH и метанола. Затем были получены

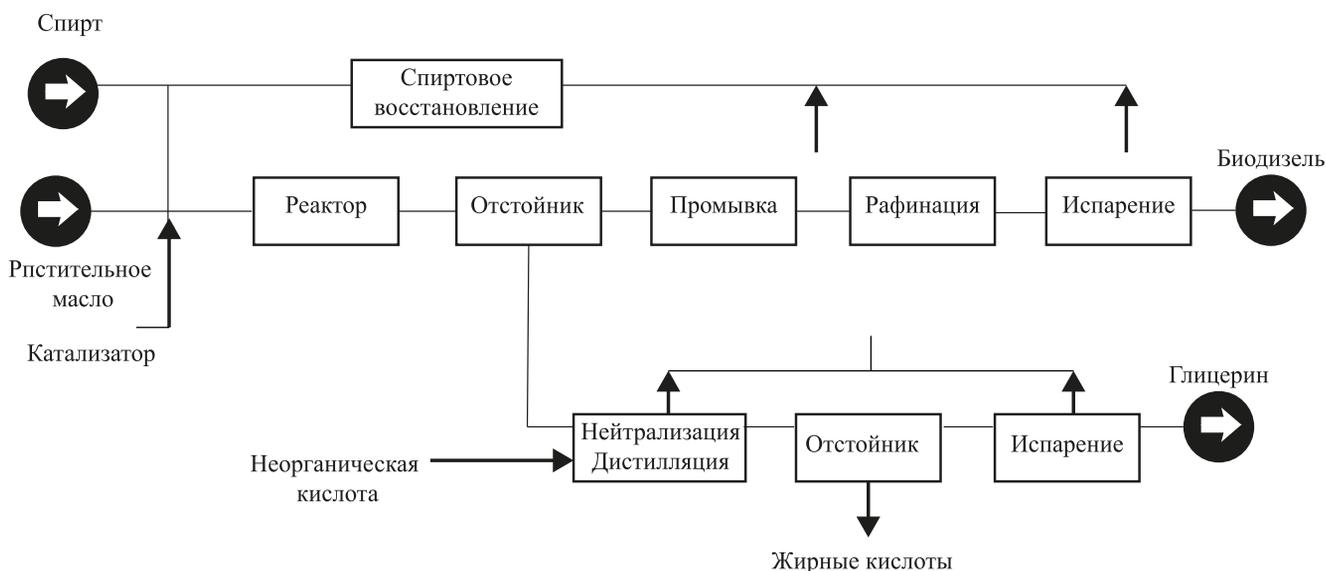


Рис. 1. Схема производства биодизеля [14].

наночастицы CuO с использованием ацетата меди, этанола, очищенной воды и гидроксида натрия. Новые пробы для испытаний, названные B5, B10 и B20, были получены путем смешения биодизельных топлив с дизельным топливом в концентрации 5, 10 и 20% по объему. Наночастицы в количестве 50 и 100 ppm были добавлены в B20 и подвергнуты испытаниям для определения эксплуатационных характеристик и уровня выбросов в дизельном двигателе. Результаты исследования – улучшение характеристик горения и эксплуатационных характеристик биодизеля с добавкой наночастиц, снижение уровня выбросов и положительное влияние этого снижения на окружающую среду – получены впервые.

ПОЛУЧЕНИЕ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ

Производство биодизеля. В этом исследовании биодизельное топливо было произведено из масел мака и канолы путем применения реакции межмолекулярной переэтерификации с кислотным и основным катализом. Чтобы различные растительные масла можно было без проблем использовать в качестве топлива в дизельных двигателях, их необходимо подвергнуть некоторой предварительной обработке. Эти процессы можно перечислить в порядке предпочтения следующим образом: ме-

жмолекулярная переэтерификация, разбавление, микроэмульсия и пиролиз. Схема производства биодизеля представлена на рис. 1.

Межмолекулярная переэтерификация – реакция, применяемая для снижения вязкости масел (триглицеридов). В этом процессе масло реагировало с одноатомным спиртом (метанол, этанол, изопропил) в присутствии катализатора (кислотных и основных катализаторов и ферментов (биокатализаторов)). В результате этой реакции получаются жирные кислоты. Производство биодизеля проходит такие технологические этапы, как смешивание спирта и катализатора, реакция, удаление спирта, нейтрализация глицерина, промывка метиловым эфиром. Масла, используемые в процессе реакции, не должны содержать влаги, потому что известно, что вода вызывает образование новых свободных жирных кислот и отрицательно влияет на реакцию. Поскольку поставляемые масла получают методом холодного отжима, они могут содержать влагу. По этой причине перед запуском процесса межмолекулярной переэтерификации потенциально присутствующая в масле влага была удалена в устройстве (рис. 2) под вакуумом при температуре 72°C.

1000 мл макового и канолового масла смешивали в трехгорлой колбе с использованием магнитной



Рис. 2. Процесс испарения.



Рис. 3. Реакция межмолекулярной переэтерификации.

мешалки при 500 об/мин и 60°C. В другой магнитной мешалке 20% (200 мл) используемого масла смешивали в метаноле до полного растворения в нем 0.4% (4 г) соли гидроксида натрия (NaOH), содержащейся в масле. После того как соль NaOH полностью растворялась в метаноле, ее постепенно добавляли в маковое или каноловое масло, перемешивая при постоянной температуре 60°C. Реакцию межмолекулярной переэтерификации продолжали в течение 2 ч в системе с обратным холодильником, как показано на рис. 3. По истечении 2 ч, как показано на рис. 4а, материал переносили в делительную воронку и подвергали 24-часовому пери-

оду выдержки, чтобы гарантировать фазовое разделение глицерина и метиловых эфиров. В конце периода выдержки было обнаружено, что глицерин высокой плотности образовал нижнюю (глицериновую) фазу, которую удаляли через клапан делительной воронки.

Хотя в конце реакции происходит отделение глицериновой фазы, глицерин, соль и остаточный метанол находятся в метиловом эфире. Эти вещества, гомогенно смешанные с биодизелем, подлежат процессу промывки, чтобы отделить их от метилового эфира. Процесс промывки показан на рис. 4б. Общей особенностью глицерина, соли и метанола является то, что они растворимы в воде. В процессе промывки эти вещества растворяются в воде и переходят в нижнюю фазу. Таким образом, они отделяются от метилового эфира. В конечном итоге очищенный биодизель подвергали испарению, а содержащуюся в нем влагу удаляли. После того как продукт принимал окончательную форму, его фильтровали и передавали на хранение.

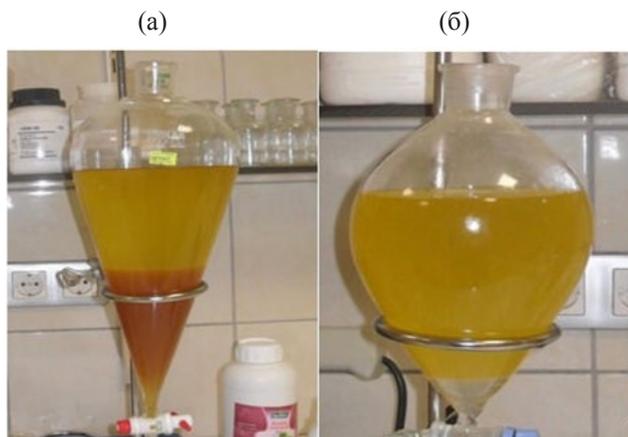


Рис. 4. Фазовое разделение (а) и процесс промывки (б) при получении биодизеля из макового масла.

В результате реакции межмолекулярной переэтерификации был отделен глицерин, входящий в состав макового масла. В результате этого разделения были получены метиловый эфир макового масла (POME) и метиловый эфир канолового масла (COMe). На рис. 5 видно, что после отделения глицерина от жирных кислот вязкость пробы сни-

Таблица 1. Физико-химические свойства дизельного и биодизельного топлива

Тип топлива	Плотность, г/см ³	Вязкость, мм ² /с	Цетановое число, SS	Низшая теплотворная способность, кДж/кг
Дизельное топливо	0.832	3.720	53.10	42.700
100% COME	0.879	5.328	58.8	39.950
100% POME	0.884	5.525	56.8	39.500

жается, а цвет становится в значительной степени более прозрачным. Были исследованы физико-химические свойства полученных проб топлива. Результаты этого исследования приведены в табл. 1.

Новые пробы топлива с различным химическим составом были получены путем добавления 5, 10 и 20% топлива, полученного из канолового и макового масел, к стандартному дизельному топливу (B5, B10, B25).

Производство наночастиц. При производстве наночастиц CuO 1.82 г (0.01 моль) ацетата меди добавляли в 50 мл этанола и растворяли в ультразвуковой ванне в течение 20 мин, как показано на рис. 6а, с образованием первой смеси. Затем 4 г (0.1 моль) NaOH (гидроксида натрия) добавляли в 100 мл дистиллированной воды и получали вторую смесь растворением в ультразвуковой ванне в течение 30 мин. Как показано на рис. 6б, на следующем этапе эти смеси объединяли и перемешивали в мешалке в течение 1 ч до готовности раствора. Наконец, полученному раствору давали отстояться в течение 20 ч. По завершении процесса отстаивания укладывали в воронку фильтровальную бумагу, как показано на рис. 6в, и фильтровали раствор, после чего подвергали материал процессу сушки при 45°C. Как видно на рис. 6г, сформированный материал был подвергнут термообработке при 460°C в течение 1 ч до готовности. Как видно на рис. 6д, получение наночастиц было признано успешным по результатам анализа изображений, сделанных с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) и различных аналитических измерений полученного материала, чтобы понять, обладает ли полученный материал свойствами наночастиц.

Перед дозированием добавок к топливу полученное биодизельное топливо смешивали со стандартным топливом в количестве 20%. Затем в то-

пливо были добавлены две различные пропорции добавок наночастиц, 50 и 100 ppm, и в ультразвуковой ванне была получена желаемая смесь топлива. Физико-химические свойства биодизеля, полученного с использованием наночастиц B20 + 50 ppm CuO и B20 + 100 ppm CuO, были протестированы по стандартам автомобильного топлива TS-EN 14214 и исследована их пригодность для использования в двигателях. Кроме того, для сравнения были проведены испытания стандартного дизельного топлива и биодизеля без добавок.

ИСПЫТАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ

Экспериментальная установка состоит из дизельного двигателя, синхронного генератора, прецизионных весов, нагрузочной группы переменного тока, анализатора выхлопных газов и прибора для измерения дыма. Экспериментальные исследования проводились на дизельном двигателе марки Genpower. Было проанализировано биодизельное топливо, произведенное с использованием нанодобавок к маслу мака и канолы. Вид экспериментальной установки представлен на рис. 7.

**Рис. 5.** Маковое масло и полученный биодизель.

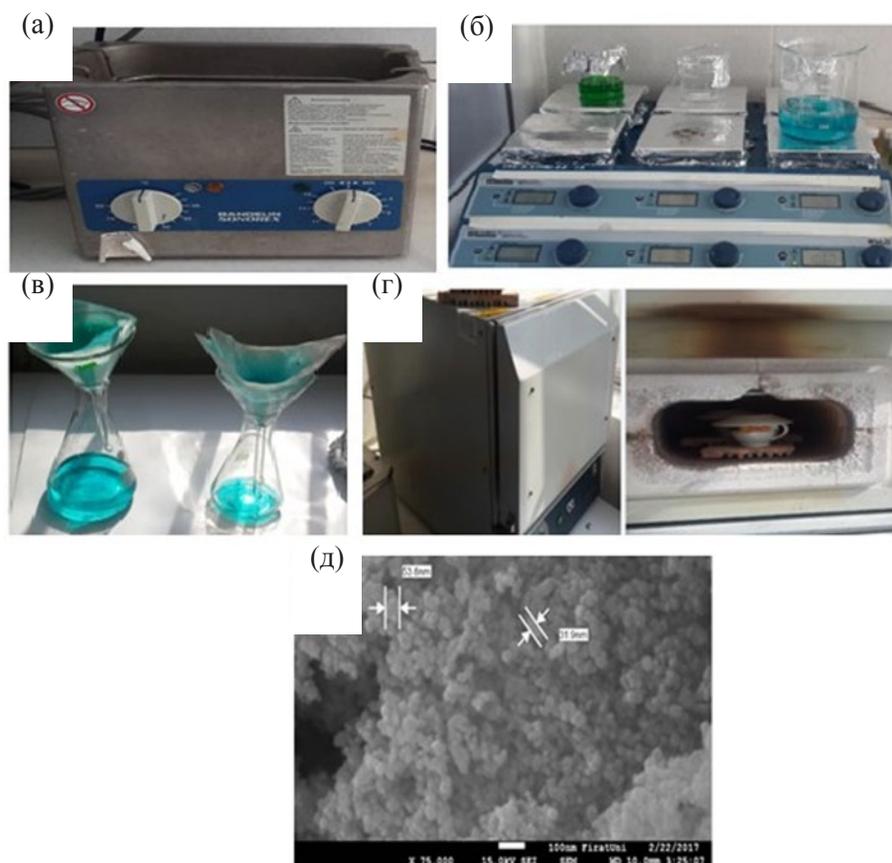


Рис. 6. Устройства, использованные в экспериментах, и СЭМ-изображение полученных наночастиц: а – ультразвуковая ванна; б – электронная мешалка; в – химический стакан и воронка; г – высокотемпературная печь для сушки; д – СЭМ-изображение наночастиц CuO.



Рис. 7. Вид экспериментальной установки.

Перед началом экспериментов было выполнено текущее техническое обслуживание двигателя: замена смазочного масла и очистка воздушного фильтра. Были сняты и проверены топливные форсунки двигателя. Все испытания топлива проводились без каких-либо модификаций двигателя. Двигатель некоторое время работал на стандартном дизельном топливе без нагрузки, а затем, после того как двигатель достиг оптимальной рабочей температуры, в 4 этапа была приложена нагрузка 2.5 кВт (25%) – 5 кВт (50%) – 7.5 кВт (75%) – 10 кВт (100%). Этот процесс повторяли трижды с регистрацией среднего измеренного значения. После завершения измерений для одного типа топлива двигатель останавливали, а через некоторое время вновь запускали в работу с другим типом топлива. Были измерены удельный расход топлива (г/кВт·ч), УВ (ppm), CO (%), CO₂ (%), O₂ (%), NO_x

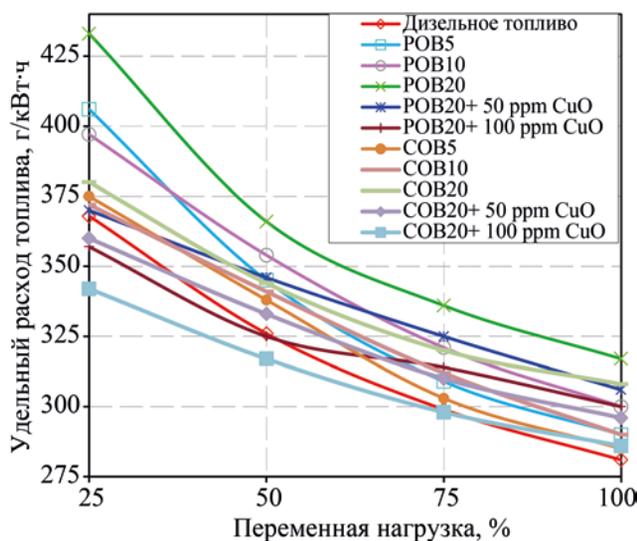


Рис. 8. Изменения значений удельного расхода топлива (SFC) для проб топлива при переменной нагрузке.

(ppm), температура выхлопных газов на выходе ($^{\circ}\text{C}$) и уровень выброса дыма (сажи).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были определены значения удельного расхода топлива (SFC) и уровня выбросов отработанных газов испытываемых образцов топлива COB5, COB10, COB20, COB20 + 50 ppm CuO, COB20 + 100 ppm CuO, полученных из канолового масла, и POB5, POB10, POB20, POB20 + 50 ppm CuO, POB20 + 100 ppm CuO, полученных из макового масла. Измерения в процессе испытаний проводили при постоянной скорости 1500 об/мин и в условиях переменной нагрузки дизельного генератора. Измеренные и рассчитанные значения SFC, NO_x , CO, UV уровня выбросов дыма (сажи) и темпера-

туры выхлопных газов при этих измерениях сравнивали с соответствующими значениями для стандартного дизельного топлива.

Анализ значений удельного расхода топлива.

Удельный расход топлива (SFC) определяется как количество топлива, потребляемого на единицу мощности. Значения SFC, рассчитанные в процессе испытаний, показаны в табл. 2 и на рис. 8.

Было замечено, что значения SFC для всех проб топлива уменьшались с увеличением нагрузки. Учитывая все условия нагрузки, было определено, что самые низкие значения SFC были у дизельного топлива, а самые высокие – для топлива COB20 + 100 ppm CuO. Было замечено, что значения вязкости и плотности тестовых топлив, содержащих биодизель, высокие, а значение тепловой энергии низкое, что приводит к более высоким значениям SFC по сравнению со стандартным дизельным топливом. Эта проблема была решена с помощью добавки наночастиц. При сравнении биодизеля на основе канолового масла с биодизелем на основе макового масла было определено, что первый потребляет меньше топлива на единицу мощности. Установлено, что основной причиной этого различия было высокое значение тепловой энергии канолового биодизеля по сравнению с маковым. Плотность, вязкость и теплотворная способность топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания, являются наиболее фундаментальными факторами, которые напрямую влияют на значения удельного расхода топлива (SFC) [15–17].

Анализ уровня выбросов NO_x . Анализ уровня выброса важен, так как оксиды азота (NO_x) составляют 79% воздуха, поступающего в камеру сгорания. Такой выброс происходит во время работы

Таблица 2. Значения SFC проб топлива при переменной нагрузке

Эфир POME	Значение SFC, г/кВт·ч				Эфир COME	Значение SFC, г/кВт·ч			
DF	368	326	299	281	DF	368	326	299	281
B5	406	345	309	290	B5	375	338	303	285
B10	397	354	321	300	B10	372	341	312	290
B20	433	366	336	317	B20	380	344	320	308
B20 + 50 ppm CuO	370	346	325	306	B20 + 50 ppm CuO	360	333	310	296
B20 + 100 ppm CuO	357	325	314	300	B20 + 1000 ppm CuO	342	317	298	286

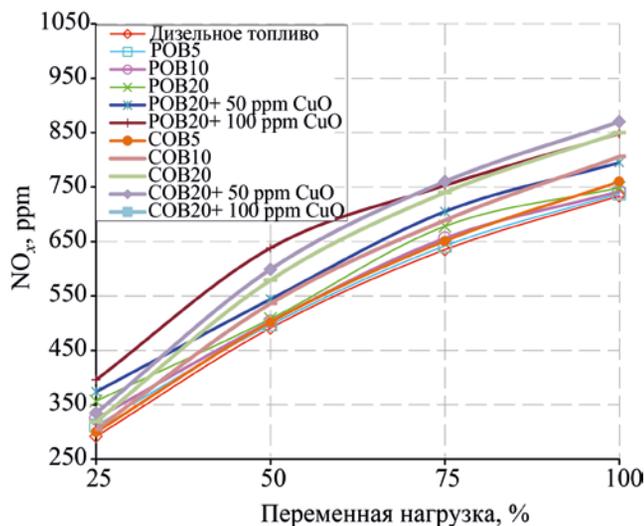


Рис. 9. Изменение уровня выбросов NO_x у проб топлива при переменной нагрузке.

двигателя при высоких температурах. В общем случае термин NO_x выражает общую плотность NO и NO₂ в атмосфере. Кислород в используемом воздухе вступает в реакцию с азотом в условиях чрезвычайно высоких рабочих температур и при наличии достаточного времени для горения. Образование NO_x существенно зависит от температуры

цилиндра, давления, задержки момента зажигания и времени горения. Уровни выбросов NO_x для испытываемых проб топлива показаны в табл. 3 и на рис. 9.

Было замечено, что значения выбросов NO_x у всех испытываемых проб топлива увеличивались по мере увеличения нагрузки на двигатель. Учитывая все условия нагрузки, было определено, что самые низкие значения выбросов NO_x присущи дизельному топливу. В химический состав биодизеля входит кислород. Это увеличивает давление в цилиндре и температуру в камере сгорания. Значения температуры выхлопных газов также подтверждают это. Данной причиной объясняются высокие уровни выбросов NO_x при испытании биодизельного топлива. Можно показать, что увеличение пропорции биодизеля в дизельном топливе до высоких уровней давления и температуры в цилиндрах, задержки момента зажигания и времени сгорания приводят к образованию выбросов NO_x [18].

Анализ уровня выбросов CO. Основная причина выброса CO – недостаток кислорода в камере сгорания. Значения выбросов CO для испытываемых проб топлива показаны в табл. 4 и на рис. 10.

Было обнаружено, что уровень CO в топливе, содержащем биодизель, ниже, чем в стандартном

Таблица 3. Уровень выбросов NO_x у проб топлива при переменной нагрузке

Эфир POME	Выброс NO _x , ppm				Эфир COME	Выброс NO _x , ppm			
	292	491	635	734		292	491	635	734
DF	292	491	635	734	DF	292	491	635	734
B5	312	497	642	738	B5	300	502	651	760
B10	325	503	656	742	B10	305	536	689	806
B20	357	508	678	749	B20	319	579	740	850
B20 + 50 ppm CuO	374	544	705	795	B20 + 50 ppm CuO	335	599	760	870
B20 + 100 ppm CuO	396	638	753	848	B20 + 100 ppm CuO	352	675	831	899

Таблица 4. Уровень выбросов CO у проб топлива при переменной нагрузке

Эфир POME	Выброс CO, %				Эфир COME	Выброс CO, %			
	0.040	0.080	0.170	0.290		0.040	0.080	0.17	0.29
DF	0.040	0.080	0.170	0.290	DF	0.040	0.080	0.17	0.29
B5	0.040	0.050	0.150	0.250	B5	0.030	0.055	0.14	0.22
B10	0.035	0.040	0.110	0.230	B10	0.035	0.040	0.10	0.20
B20	0.040	0.050	0.080	0.200	B20	0.030	0.045	0.08	0.15
B20 + 50 ppm CuO	0.025	0.030	0.055	0.095	B20 + 50 ppm CuO	0.026	0.038	0.06	0.12
B20 + 100 ppm CuO	0.020	0.022	0.045	0.055	B20 + 100 ppm CuO	0.0220	0.030	0.05	0.10

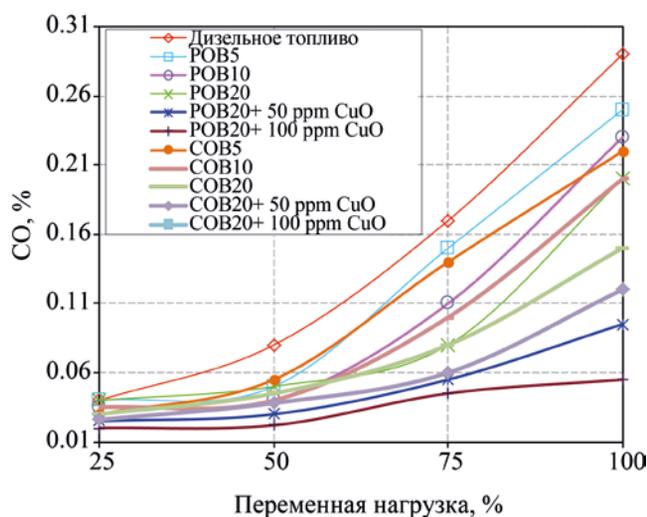


Рис. 10. Изменение уровня выбросов CO у проб топлива при переменной нагрузке.

дизельном топливе при всех условиях нагрузки. Самый высокий уровень выбросов CO был отмечен в дизельном топливе, а самый низкий – в топливе POB20 + 100 ppm CuO. Когда значения CO во всех испытываемых пробах топлива оценивались в целом, было замечено, что уровень выбросов CO снижался обратно пропорционально увеличению содержания кислорода в пробе топлива. Было замечено, что с добавлением присадок к биодизелю в виде наночастиц это снижение получило дальнейшее развитие в положительном направлении. Появление выбросов CO в дизельных двигателях можно объяснить многими причинами. Неполное сгорание из-за низкой температуры газа, недостатка кислорода и недостаточного времени для конверсии CO в CO₂ увеличивает уровень выбросов CO. Содержание кислорода в биодизельном топливе,

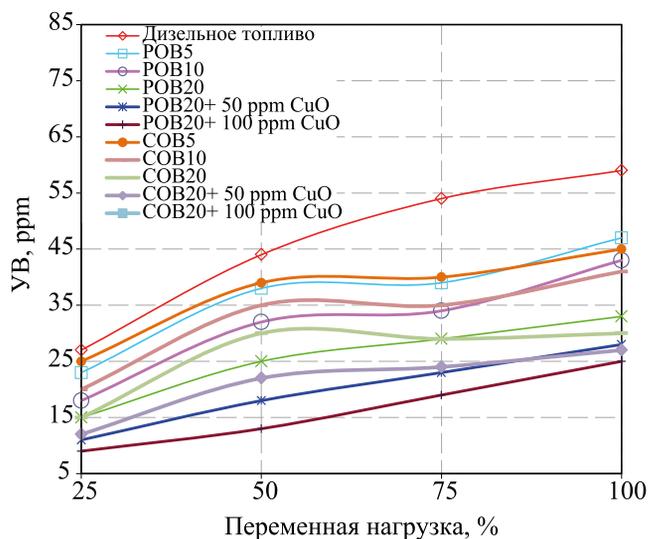


Рис. 11. Изменение уровня выбросов углеводородов у проб топлива при переменной нагрузке.

низкое содержание свободного углерода и высокое цетановое число являются основными причинами снижения выбросов CO [19].

Анализ уровня выбросов углеводородов. Если кратко, причиной выбросов УВ является неполное сгорание. Уровни выбросов УВ испытываемого топлива показаны в табл. 5 и на рис. 11.

У всех испытываемых проб топлива причиной образования выбросов УВ было увеличение количества используемого топлива по мере увеличения нагрузки. Принимая во внимание все условия нагрузки, было замечено, что самые высокие уровни выбросов УВ были обнаружены при использовании дизельного топлива, а самые низкие – при использовании топлива POB20 + 100 ppm CuO. Было установлено, что высокое цетановое число и содер-

Таблица 5. Уровень выбросов углеводородов в пробах топлива при переменной нагрузке

Эфир POME	Выбросы УВ, ppm				Эфир COME	Выбросы УВ, ppm			
DF	27	44	54	59	DF	27	44	54	59
B5	23	38	39	47	B5	25	39	40	45
B10	18	32	34	43	B10	20	35	35	41
B20	15	25	29	33	B20	15	30	29	30
B20 + 50 ppm CuO	11	18	23	28	B20 + 50 ppm CuO	12	22	24	27
B20 + 100 ppm CuO	9	13	19	25	B20 + 1000 ppm CuO	6	16	20	25

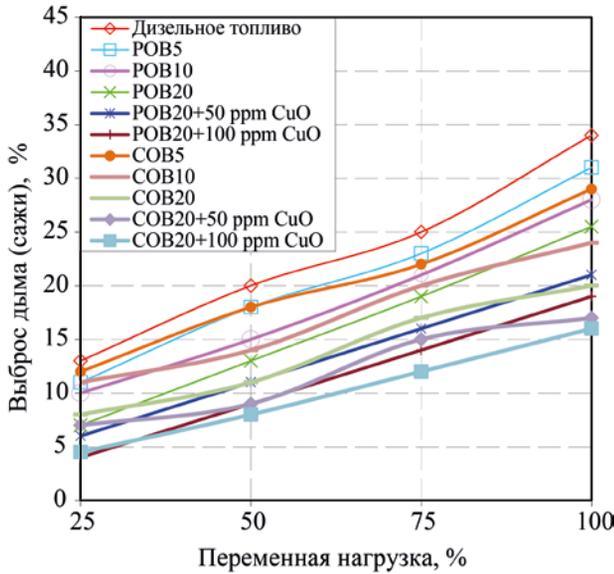


Рис. 12. Выбросы дыма (сажи) у проб топлива при переменной нагрузке.

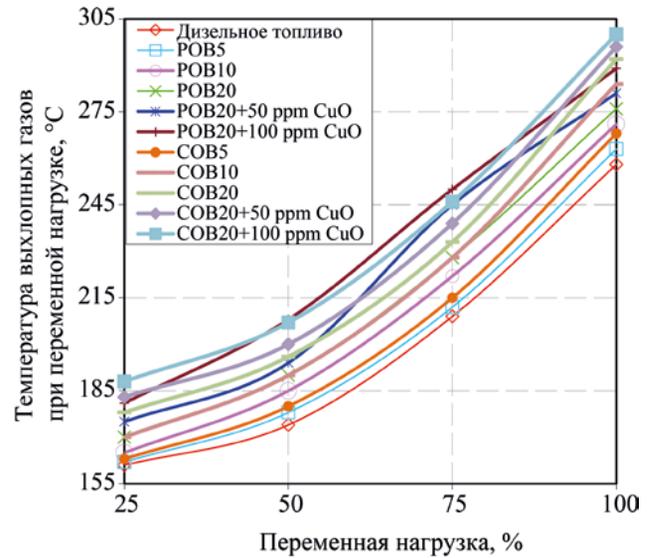


Рис. 13. Изменение температуры проб топлива на выходе выхлопных газов при переменной нагрузке.

жание кислорода в пробах биодизельного топлива создают условия для хороших характеристик горения, что ведет к снижению уровня выбросов УВ. Кроме того, было замечено, что добавление наночастиц существенно снижает уровень выбросов УВ.

Анализ уровня выбросов дыма (сажи) Важными параметрами, влияющими на образование сажи, являются зоны турбулентного перемешивания и температура пламени. Уровни выброса дыма (сажи) у испытываемых проб топлив показаны в табл. 6 и на рис. 12.

Увеличение количества используемого топлива с увеличением нагрузки повышало уровень вы-

бросов дыма для всех испытываемых проб топлива. При всех условиях нагрузки было определено, что самые высокие уровни выбросов дыма имеют место при использовании дизельного топлива, а самые низкие – при использовании топлива COB20 + 100 ppm CuO. Было замечено, что с добавлением присадок в виде наночастиц к биодизелю это снижение получило дальнейшее развитие в положительном направлении. Кислородсодержащие виды топлива повышают температуру внутри цилиндра. Считается, что это повышение положительно влияет на полноту сгорания и предотвращает изменение температуры в данной зоне. Зональное изменение температуры и распределение концентрации кис-

Таблица 6. Уровни выбросов дыма (сажи) у проб топлива при переменной нагрузке

Эфир POME	Выброс дыма (сажи), %				Эфир COME	Выброс дыма (сажи), %			
	13	20	25	34.0		13.0	20	25	34
DF	13	20	25	34.0	DF	13.0	20	25	34
B5	11	18	23	31.0	B5	12.0	18	22	29
B10	10	15	21	28.0	B10	11.0	14	20	24
B20	7	13	19	25.5	B20	8.0	11	17	20
B20 + 50 ppm CuO	6	11	16	21.0	B20 + 50 ppm CuO	7.0	9	15	17
B20 + 100 ppm CuO	4	9	14	19.0	B20 + 1000 ppm CuO	4.5	8	12	16

Таблица 7. Значения температуры выхлопных газов проб топлива при переменной нагрузке

Эфир POME	Температура выхлопных газов при переменной нагрузке, °C				Эфир COME	Температура выхлопных газов при переменной нагрузке, °C			
	161	174	209	258		161	174	209	258
DF	161	174	209	258	DF	161	174	209	258
B5	162	178	212	263	B5	163	180	215	268
B10	165	185	222	271	B10	170	190	228	284
B20	170	190	228	276	B20	178	196	233	292
B20 + 50 ppm CuO	175	194	245	281	B20 + 50 ppm CuO	183	200	239	296
B20 + 100 ppm CuO	181	208	250	289	B20 + 1000 ppm CuO	188	207	246	300

лорода являются основными механизмами, запускающими образование сажи [20].

Анализ значений температуры выхлопных газов. Высокая тепловая энергия в камере сгорания вызывает высокую температуру выхлопных газов. Значения температуры выхлопных газов испытываемых проб топлива показаны в табл. 7 и на рис. 13.

Было определено, что по мере увеличения нагрузки значения температуры выхлопных газов увеличились при всех тестируемых пробах топлива. Было замечено, что самая низкая температура выхлопных газов на выходе имела место при использовании дизельного топлива. Высокое цетановое число и содержание кислорода в испытываемых пробах топлива, содержащих биодизель, являются основной причиной высоких значений температуры выхлопных газов. В [21] установлено, что в случае использования биодизеля в качестве топлива в дизельных двигателях температура выхлопных газов выше из-за более длительного горения. Хорошие характеристики горения всегда приводят к тому, что температура выхлопных газов на выходе достигает высоких значений.

Таким образом, в настоящем исследовании получали биодизель из канолового и макового масла и смешивали его в пропорции 5, 10 и 20% со стандартным дизельным топливом. Пробы биодизельного топлива с присадками были получены путем добавления производимых нами наночастиц CuO к пробам топлив, содержащим биодизель. Затем к топливу PОВ20 и COB20 были добавлены наночастицы CuO в количестве 50 и 100 ppm, после чего в ультразвуковой ванне была получена требуемая топливная смесь.

Были измерены технические свойства этих видов топлива и исследовано их соответствие стандартам. Замечено, что значения вязкости и плотности испытываемого биодизельного топлива являются высокими, а значение тепловой энергии низкое, что приводит к более высоким значениям удельного расхода топлива (SFC) по сравнению со стандартным дизельным топливом. Однако добавление наночастиц привело к снижению этих значений по сравнению со значениями у дизельного топлива, что оказало положительное действие на топливо. Было замечено, что с увеличением доли биодизеля в дизельном топливе уровни выбросов CO, УВ и дыма, которые являются наиболее опасными выбросами для окружающей среды, уменьшаются. Введение наночастиц положительно сказалось на этом снижении. Было замечено, что биодизельное топливо с наночастицами имеет высокое цетановое число, содержание кислорода в нем положительно влияет на характеристики сгорания, поэтому выбросы CO, УВ и дыма (сажи) у этого топлива ниже, чем у стандартного дизельного топлива. Из полученных результатов видно, что добавление наночастиц к топливу положительно влияет на показатели выхлопа и выбросов. Сравнение проб биодизеля и топлива, созданного путем добавления наночастиц к этим пробам, показало, что добавление наночастиц способствует снижению уровня выбросов CO примерно на 20%, УВ на 27%, дыма (сажи) на 29%, удельного расхода топлива на 16%.

В результате исследования получен новый результат: найдено, что с добавлением наночастиц произошло улучшение процесса горения и повышение эксплуатационных свойств биодизельного то-

плива, сопровождающиеся снижением количества выхлопа и выбросов. То есть при использовании биодизельного топлива с наночастицами наблюдается положительное влияние на окружающую среду. Также было определено, что наночастицы CuO можно использовать в качестве добавки к топливу.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией настоящей статьи.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ahmet Beyzade Demirpolat, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-3381>

Muhammed Mustafa Uyar, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9897-6279>

Hasan Arslanoğlu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3132-4468>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alptekin E., Çanakç M.* Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat // *Fuel*. 2010. V. 89. P. 4035–4039. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.04.031>
2. *Yılmaz E., Aksoy F.* An investigation of combustion and performance characteristics of a direct injection Diesel engine fuelled with the blends of 10% fish oil biodiesel and 90% Diesel fuel // *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. Part C*. 2019. V. 7. № 1. P. 12–24. <https://doi.org/10.29109/gujsc.466544>
3. *Knothe G., Razon L.F.* Biodiesel fuels // *Prog. Energy and Combust. Sci.* 2017. V. 58. P. 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
4. *Balat M., Balat H.* Progress in biodiesel processing // *Appl. Energy*. 2010. V. 87. № 6. P. 1815–1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.012>
5. *Gebremariam S.N., Marchetti J.M.* Economics of biodiesel production: Review // *Energy Convers. Manage.* 2018. V. 168. P. 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>
6. *Mathiyazhagan M., Ganapathi A.* Factors affecting biodiesel production // *Research in Plant Biology*. 2011. V. 1. № 2. P. 01–05.
7. *Moradi G.R., Dehghani S., Khosravian F., Arjmandzadeh A.* The optimized operational conditions for biodiesel production from soybean oil and application of artificial neural networks for estimation of the biodiesel yield // *Renew. Energy*. 2013. V. 50. P. 915–920. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.070>
8. *Gülüm M., Yesilyurt M.K., Bilgin A.* The modeling and analysis of transesterification reaction conditions in the selection of optimal biodiesel yield and viscosity // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. V. 27. P. 10351–10366. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07473-0>
9. *Kalaimurugan K., Karthikeyan S., Periyasamy M., Mahendran G., Dharmaprabakaran T.* Experimental studies on the influence of copper oxide nanoparticle on biodiesel-diesel fuel blend in CI engine // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1679290>
10. *Tan S.X., Lim S., Ong H.C., Pang Y.* State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production // *Fuel*. 2019. V. 235. P. 886–907. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.021>
11. *Siva R., Munuswamy D.B., Devarajan Y.* Emission and performance study emulsified orange peel oil biodiesel in an aspirated research engine // *Pet. Sci.* 2019. V. 16. P. 180–186. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0288-0>
12. *Manigandan S., Gunasekar P., Devipriya J., Nithya S.* Emission and injection characteristics of corn biodiesel blends in diesel engine // *Fuel*. 2019. V. 235. P. 723–735. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.071>
13. *Kalaimurugan K., Karthikeyan S., Periyasamy M., Mahendran G.* Emission analysis of CI engine with CeO₂ nanoparticles added neochloris oleoabundans biodiesel-diesel fuel blends // *Mater. Today: Proc.* 2020. V. 33. P. 2877–2881. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.777>
14. *Güler K.* Biodiesel technology, system design an experimental biodiesel production. Yüksek Lisans Tezi S.D.Ü. Fen Bilimler Enstitüsü, Isparta. 2008.
15. *Keskin A., Gürü M., Altıparmak D.* Biodiesel production from tall oil synthesized Mn and Ni based additives: effects of the additives on fuel consumption and emissions // *Fuel*. 2007. V. 86. P. 1139–1143. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.021>
16. *Ali Y., Hanna M.A.* Physical properties of tallow ester and diesel fuel blends // *Bioresour. Technol.* 1994. V. 47. P. 131–134. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90110-4)
17. *Pugazhavadivu M., Jeyachandran K.* Investigations on the performance and exhaust emissions of a diesel engine

- using preheated waste frying oil as fuel // *Renew. Energy*. 2005. V. 30. P. 2189–2202. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.02.001>
18. *Usta N.* An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester // *Energy Convers. Manage.* 2005. V. 46. P. 2373–2386. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.002>
19. *Altiparmak D., Keskin A., Koca A., Gürü M.* Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends // *Bioresour. Technol.* 2007. V. 98. P. 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.033>
20. *Lapuerta M., Rodriguez-Fernandez J., Agudelo J.R.* Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel // *Bioresour. Technol.* 2008. V. 99. P. 731–740. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.033>
21. *Puhan S., Vedaraman N., Ram B.V.B., Sankarnarayanan G., Jeychandran K.* Mahua oil (*Madhuca Indica* seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics // *Biomass and Bioenergy*. 2005. V. 28. P. 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.06.002>