

А.М. Левтеров, А.А. Левтеров

ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ БИОКОМПОНЕНТОВ И НАНОМАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Очевидность конечности энергетических ресурсов планеты заставляет постоянно заботиться о поиске новых источников энергии и рачительного их использования. Основной преобразователь энергии – ДВС вопреки прогнозам продолжает занимать лидирующие позиции, поэтому вопросы совершенствования его рабочих процессов, улучшения показателей токсичности, сокращение потребления минерального топлива и возможность применения альтернативных топлив, повышение качества моторного топлива продолжают рассматриваться во всем энергетическом мире. Широкое развитие получила концепция использования для этих целей наночастиц с повышенными энергетическими свойствами. Улучшение показателей двигателя, работающего на штатном нефтяном и смесевых моторных топливах, диспергированных наноматериалами различного типа, сомнений не вызывает. В статье приводится анализ современных исследований влияния биодизельных топлив на эксплуатационные показатели двигателей и анализ результатов внедрения практики насыщения нефтяного и биотоплива наночастицами в качестве потенциального энергоносителя. Представлены результаты выполненного в лаборатории ИПМаш НАН Украины исследования показателей дизеля 1Ч 8,5/11 при его работе на дизельном топливе, диспергированном углеродными сфероидальными нанодобавками разной концентрации, и некоторые сравнительные результаты исследований показателей дизельных двигателей с прямым впрыском 2Ч 10,5/12 и 4ЧН 7,9/7,5 ALH, работающих на штатном и на смесевых топливах с биокомпонентами, синтезированными из рапсового, подсолнечного, горчичного и кукурузного масел. Теплофизические свойства топлива (теплота сгорания, теплопроводность, теплоемкость, плотность, кинематическая вязкость, конвективная теплопередача, температура воспламенения, цетановое число) в случае введения в него наночастиц претерпевают значительные изменения. Оптимальное количество наночастиц металлов, оксидов металлов, углеродных трубок, графена в минеральном, биодизельном или смесевом топливе способствует более полному сгоранию, значительно улучшает характеристики двигателя и снижает уровень вредных выбросов.

Ключевые слова: биотопливо; нанодобавки; токсичность; сложные эфиры; растительные масла.

Введение

Уровень потребления энергии на фоне развития различных индустриальных технологий, особенно цифровых, неуклонно растет, вопрос конечности ресурсов планеты очевиден, истощаются и запасы углеводородных топлив, которые используются различными видами основного преобразователя энергии – ДВС. Все чаще говорят о «списании» до сего времени незаменимых силовых установок. Однако традиционная автомобильная промышленность не замедлила своего производства, а потенциальные носители энергии не получили широкого распространения в силу отсутствия краткосрочной перспективы в организации соответствующей инфраструктуры, снижения стоимости материалов и ограниченности ресурса.

Двигатели внутреннего сгорания продолжают занимать доминирующее положение в качестве силовой установки транспортных средств и сельскохозяйственных машин разного типа. Если предположить полную замену ДВС на транспорте, они, несомненно, останутся незаменимыми в составе электрогенерирующих и когенерационных установок. Поэтому тенденция последовательного совершенствования ДВС наблюдается во всем мире. Основная цель исследований – поиск решений в вопросах сокращения расхода минерального топлива, повышения цилиндровой мощности, снижения токсичности отработавших газов, улучшения техноло-

гий процессов сгорания и систем управления, в том числе создание комбинированных силовых установок.

Анализ современных исследований модификации моторных топлив

Совершенствование рабочих процессов цикла двигателя наряду с инновациями конструкторских и технологических решений, модификацией всех его систем и агрегатов, предусматривает возможность использования вторичной энергии и новых альтернативных видов топлива – биотоплива, биогаза. Биотопливо (биодизельное топливо, биоэтанол) одно из перспективных видов моторного топлива, альтернативных минеральному, используется как в чистом виде, так и в качестве добавок к базовому топливу [1,2,3]. Биодизельное топливо представляет собой смесь химически связанных сложных метиловых и этиловых эфиров жирных кислот. Теплофизические свойства, химический состав и структура биотоплива как в чистом виде, так и при его добавлении в любых пропорциях к нефтяному изменяют процесс смесеобразования и воспламенения топлива, развитие процесса горения, изменение количества выбросов с отработавшими газами двигателя.

Биотоплива из растительного сырья обладают свойствами, сравнимыми со свойствами нефтяного топлива, однако отличаются температурой вспышки, температурой помутнения, вязкостью, тепло-

творной способностью, цетановым числом, плотностью и другими теплофизическими свойствами [4,5,6]. Использование биотоплив в качестве моторного, кроме всего прочего, способствует уменьшению вредного влияния на окружающую среду с точки зрения сохранения углекислотного баланса. Результаты исследования работы дизельных двигателей на смесевом топливе подробно систематизированы в работе [7], где обсуждается влияние доли биодизельного топлива на экономические и токсические характеристики двигателей. Делается вывод, что на обычных двигателях (без или с малой модификацией) использование доли биокомпонента в смесевом топливе до определенной величины способствует к существенному сокращению твердых частиц, сопровождающих эмиссию HC и CO с отработавшими газами (ОГ), с незначительной потерей мощности, увеличением удельного расхода топлива и эмиссии NO_x [8,9,10]. Эти сопутствующие проблемы решаются разными методами: изменением регулировки двигателя, его частичной модификацией, использованием нейтрализаторов и фильтров разного типа, эмульгированием части биокомпонента топлива. Так, водная эмульсия биокомпонента смесевого топлива в объеме 5 – 15 % [11] позволяет одновременно снизить содержание в отработавших газах сажи и оксидов азота по сравнению с дизельным топливом и смесевыми топливами B5 и B20.

В лаборатории ИПМаш выполнена серия экспериментальных исследований нескольких видов биодизельного топлива, синтезированного по оригинальной технологии в ИБОНХ НАН Украины из рапсового, кукурузного, горчичного и подсолнечного масел [12,13].

Негативные аспекты влияния биодизельной составляющей в смесевом топливе на показатели дизельных двигателей Д21А (2Ч 10,5/12), VW 1,9TDI ALH и 1Ч 8,5/11 (повышение удельного расхода, увеличение содержания в отработавших газах NO_x) в каждом конкретном случае устранялись путем оптимального выбора угла опережения впрыска топлива, т.е. изменением штатной регулировки систем управления.

Некоторые показатели (коэффициент полезного действия (КПД) и токсичность) двигателей, работающих на смесевых топливах с добавками биокомпонентов (B20 – B100) разных растительных масел, приводятся на рисунках 1 и 2. Полученные результаты подтверждают влияние на показатели двигателя условий и метода переэтерификации масел, происхождения растительного сырья и состава сложных эфиров жирных кислот в конкретном биодизельном топливе.

Математическое моделирование рабочего процесса дизельного двигателя, работающего на биодизельном или смесевом топливах, обеспечено созданием базы данных теплофизических и термодинамических свойств сложных метиловых и этиловых эфиров высших жирных кислот. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов термодинамических свойств 22 сложных эфиров 11 высших жирных кислот представлены в работе [14].

С помощью различных добавок и присадок к топливу токсичные выбросы с отработавшими газами двигателя можно сократить. Исследование влияния на характеристики топлива и на характеристики двигателя различных добавок к топливу представлены во многих работах [15,16,17], но даже в микромасштабах они имеют ограничения по применению, связанные с седиментацией (оседанием частиц), агрегацией (укрупнением) и неравномерным распределением в топливной смеси. Новые возможности решения этих проблемных задач появились с появлением нанотехнологий, процессов создания частиц на уровне размеров атома и манипулирования ими и их структурами. Концепция использования наноприсадок основывается на введении в моторное топливо дополнительного потенциального энергоносителя в виде чистых наночастиц или в виде суспензий наночастиц в жидком носителе.

Наночастицы – искусственные материалы, функциональные свойства которых отличаются от свойств базового материала нанометрическими размерами (от 1 до 100 нм (1 нм = 10⁻⁹ м)) и специфическим проявлением теплофизических и (или) химических свойств. Характерным свойством наносистем является самоорганизация пространственно-временных структур, высокая реактивность, пониженная температура плавления и фазовых переходов, увеличение термического расширения и теплоемкости по сравнению с базовым макроматериалом. В связи с этим интерес вызывает термодинамический аспект влияния разного рода наночастиц на рабочий процесс (цикл) двигателя. С добавлением наночастиц в топливо общая поверхность раздела, участвующая в процессе, в том числе и в процессе горения, увеличивается, и чем мельче частицы, тем больше площадь реагирования. Химическое превращение вещества в ходе химических реакций характеризуется основной термодинамической величиной – химическим или термодинамическим потенциалом, представляющим изменение энергии системы. О протекании химических реакций горения судят по соотношению энтальпийных и энтропийных процессов согласно потенциалу Гиббса $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ о полной

химической энергии. Очевидно, что присутствие металлических наночастиц меняет режим сгорания,

так как энтальпия поверхностей раздела увеличивает энтальпийную составляющую.

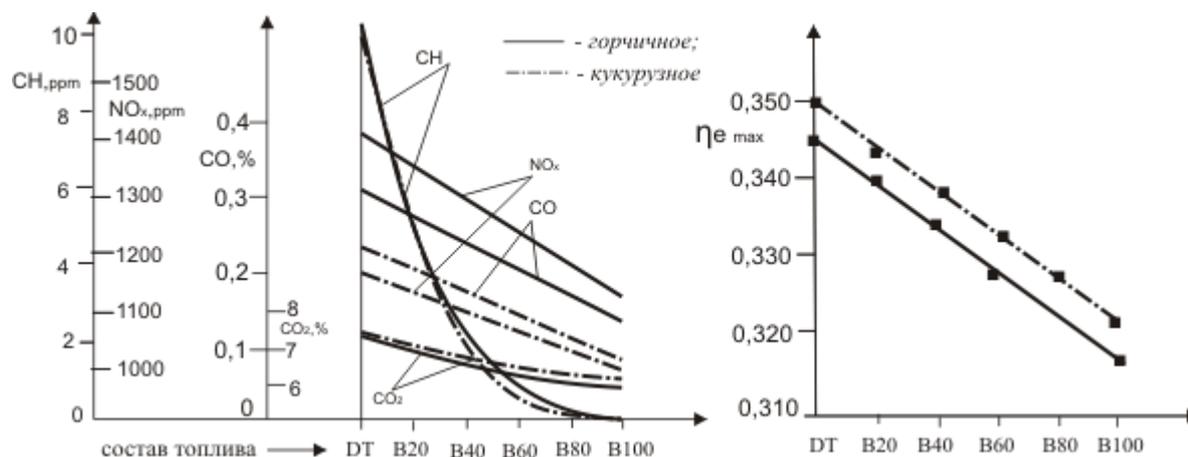


Рис. 1. Усредненные значения выбросов вредных веществ с ОГ и максимальные значения КПД двигателя 2С10,5/12

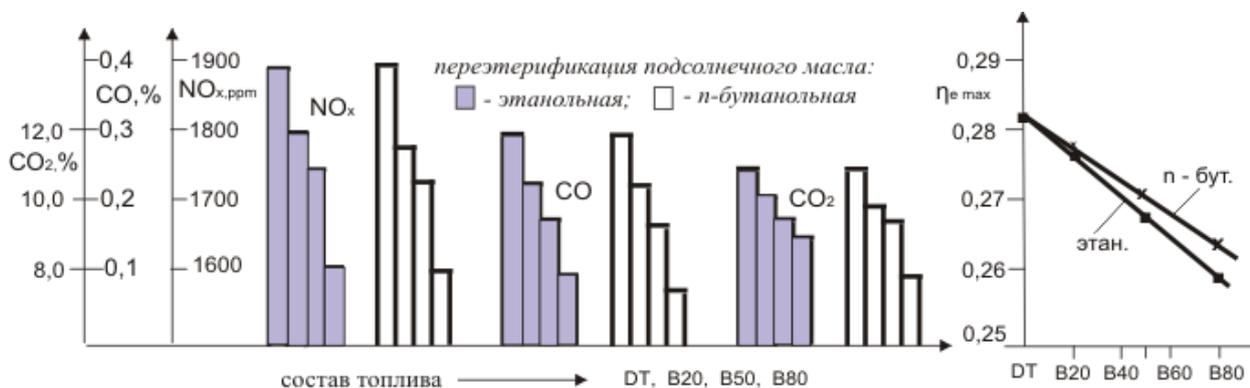


Рис. 2. Усредненные значения выбросов вредных веществ с ОГ и максимальные значения КПД двигателя 4СН 7,9/7,5 (VW)

У топлива при добавлении наноразмерных материалов со специфическими свойствами появляется много преимуществ: сокращается время задержки воспламенения и полного сгорания в ограниченном рабочем объеме двигателя; повышается уровень теплопередачи; появляется большая гибкость в синтезировании топлив с желательными физическими свойствами; создается возможность повышения эффективности силовой установки за счет увеличения полноты сгорания топлива. Появление дополнительных поверхностей раздела в смеси ведет к увеличению энергии системы, а размеры наночастиц не препятствуют взаимодействию с базовым материалом не только с точки зрения пространственного измерения, но также и с точки зрения физико-химических свойств [18,19]. На рисунке 3 представлена гравиметрическая (весовая) и объемная теплота сгорания некоторых металлов и этанола [20].

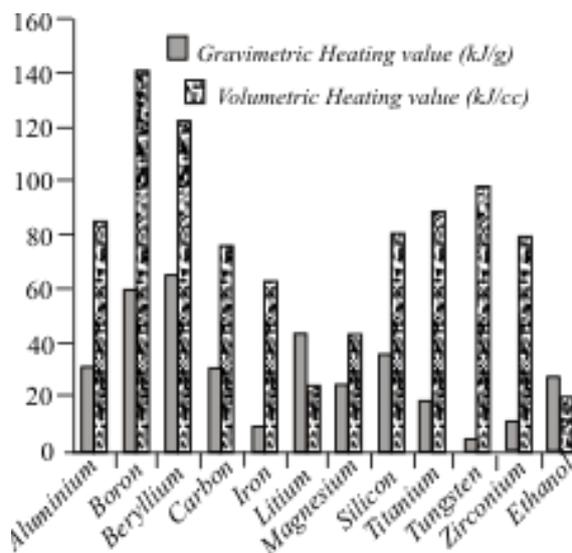


Рис. 3. Гравиметрическая и объемная теплота сгорания некоторых металлов и этанола

Теоретические и экспериментальные исследования термодинамики малых частиц показывают, что размер частиц является дополнительной активной термодинамической переменной, определяющей вместе с другими термодинамическими переменными общее состояние системы, ее реакционную и каталитическую способность, фазовые превращения, физико-химическую активность, кинематическую вязкость, термическую диффузность, конвективную теплопередачу, теплопроводность, плотность, цетановое число, теплотворную способность [21,22]. Характеристики горения капель топлива, содержащих нано- и микрочастицы алюминия, позволили понять влияние размера частиц на механизм столкновения частиц и скорость агрегации, сделан вывод, что в наножидкостях (что представляет из себя смесь базового топлива и наноматериала в концентрации менее 10 %) преобладает случайное броуновское движение [23].

Большинство исследователей наблюдали повышение теплопроводности наножидкостей в диапазоне 5 – 50 %, отмечали тесную связь теплопроводности и вязкости и, кроме того зависимость результата от концентрации и размера наночастиц. В качестве примера можно рассмотреть результаты по тестированию теплопроводности жидкостей (этиленгликоль, этанол) при диспергировании в них различного типа наночастиц более теплопроводного материала (Al_2O_3 и CuO , Cu , Au или др.) [24,25,26]. Во-первых, отмечается большое расхождение результатов, полученных расчетным и экспериментальным путем. Данные, полученные экспериментально, оказываются значительно ниже расчетных. Во-вторых, об аномальном увеличении теплопроводности речь не идет. Так, приводится максимум увеличения теплопроводности (до 40%) при определенном сочетании размера наночастиц CuO (≤ 10 нм) и их доли 0,3 % об. в этиленгликоле [(24)]; и увеличение теплопроводности всего на 1,3 – 0,8 % при содержании в этаноле частиц Au размером 4 нм [26].

В работах [27,28] установлено, что повышение теплопроводности и снижение пиковой (максимальной) температуры в камере сгорания двигателя способствуют снижению образования оксидов азота NO_x . Даже самые низкие концентрации наночастиц в качестве добавок к обычным углеводородным топливам или смазочным материалам, или катализаторам могут улучшить воспламеняемость, изменить характеристики процесса горения, трибологический и охлаждающий эффекты с вытекающими последствиями для рабочих показателей двигателя.

В качестве нанодобавок в различные топлива

используются наноразмерные материалы в виде металлов (Al , Zn , Fe , Ag , Mg , Zr , Ti , Ni , бор), кремниевых порошков и пластин, углеродных трубок и графена; оксидов металлов (CuO , MnO , Fe_3O_4 , TiO_2 , Al_2O_3 , CeO_2 , MgO , ZrO_2 , ZnO , Co_3O_4); других соединений ($CuCl_2$, $CoCl_2$, $FeCl_3$, $CuSO_4$). Много исследований проводится с эмульгированием как собственно нанодобавок, так и доли биодизельного топлива.

Опираясь на множество литературных источников (в основном зарубежных), проведем анализ исследований характеристик дизельных двигателей, работающих на различных базовых топливах с добавлением наноматериалов разного типа.

Надо отметить, что практически все публикации касаются экзотических, как правило, непищевых масел, используемых для получения биодизельного топлива. Растения и плоды для производства масел принадлежат просторам Азии и Океании, где интенсивно исследуется возможность их применения в качестве альтернативного топлива. Насколько серьезно для этих стран производство биотоплива и его успешное применение в качестве моторного свидетельствует факт тщательного исследования качества каждого вида топлива, в том числе самостоятельного выбора и синтеза наноматериалов. Наряду с укреплением спроса на биотопливо внутри азиатских государств и в Китае, предполагается экспортирование сырья и готовой продукции в страны Европы [29]. Однако в этой же публикации высказывается предположение, что в Европе вопреки планам начала века изменившийся курс далек от увеличения потребления биотоплива. Согласно отчету ЕС 2015 года о воздействии потребляемого биотоплива на изменение землепользования, выбросы в результате изменения тропических ландшафтов при выращивании маслосодержащих культур были в три раза выше, чем от эквивалентного количества ископаемых топлив. [30].

Несмотря на обилие публикаций, представляющих результаты своих исследований, однозначные выводы сделать трудно, так как заявляемые утверждения касаются в основном экспериментальных исследований, когда на входе в объект есть однозначно задаваемые параметры, а на выходе – просто регистрация полученного отклика. Дозированное введение в базовое топливо наночастиц, как отмечено в большинстве рассмотренных работ, способствует улучшению рабочих характеристик двигателя и снижению уровня вредных выбросов с отработавшими газами независимо от испытываемого топлива. И это неоспоримый эффект. Однако, несомненно, что объяснение результатов невозможно без глубоких теоретических исследо-

ваний кинетики и газодинамических характеристик процесса сгорания наножидкостей, перспективного моделирования процессов, происходящих в ДВС.

Можно очертить направление положительной тенденции влияния наноматериалов разного типа на базовое топливо и получаемый при этом эффект его использования. Топливные наножидкости активно изучаются последние два десятка лет и позволяют успешно решать многие проблемы, связанные с органичными недостатками биодизельных и дизельных топлив. Декларируемый эффект от добавления разного вида наночастиц в чистое и смесевое базовые топлива можно свести к нескольким практическим результатам. Авторами отмечается увеличение КПД и уменьшение удельного расхода топлива, изменения теплофизических свойств топлива, увеличение теплотворной способности модифицированного топлива и сокращение периода задержки воспламенения, снижение эмиссии вредных веществ с ОГ. Причем, как правило, делается ссылка на соответствие физико-химических свойств всех топливных смесей стандартам Американского общества испытаний и материалов (ASTM). При получении топливных смесей применяются методы ультразвуковой, гомогенизирующей обработки и малой доли сурфактантов.

Введение нанодобавок в биодизельное топливо помогает устранить его серьезные недостатки, связанные с потерей цилиндрической мощности, увеличением удельного расхода и оксидов азота, снижением КПД и, таким образом, основательно рассматривать его как альтернативное топливо.

Высокая вязкость биодизельного топлива метиловых эфиров жирных кислот масла Karanja компенсируется добавлением в него наночастиц оксида церия. Испытывается 12-цилиндровый, 585 кВт, военный дизель CIDI [31]. Результат испытаний двигателя показал увеличение его цилиндрической мощности на 5 % при работе на биодизельном топливе с наночастицами оксида церия. Показаны улучшенные гранулометрические показатели и уменьшение концентрации твердых частиц, наблюдалась более низкая концентрация CO, CO₂, HC, в том числе и NO_x на 14 – 26%. Правда, концентрация и наноразмеры частиц оксида церия в базовом топливе не оговариваются. Этими же авторами проведено 100-часовое испытание военного 12-цилиндрового дизеля, мощностью 720 кВт и рабочим объемом 38,8 литра при работе на биодизельных топливах масел Jatropha (JOME) и (КОМЕ). Установлено влияние на характеристики ДВС 12% рециркуляции ОГ (EGR), диагностировано уменьшение износа в цилиндропоршневой группе на 9–27 %. Эффективность работы двигате-

ля на биодизельных топливах уменьшилась на 2–3%, но уменьшилась и эмиссия NO_x на 20–24% по сравнению с работой на дизельном топливе (ДТ) наряду с уменьшением концентрации твердых макрочастиц на 12% [32].

Биодизельное топливо сложных метиловых эфиров масла Jatropha в качестве базовой жидкости тестируется с добавками наночастиц оксида алюминия и оксида церия в одинаковой концентрации – 30 ppm в одноцилиндровом дизеле [33]. Диспергирование в чистое биодизельное топливо осуществляется с помощью ультразвукового аппарата с частотой 50 Гц в течение 30 минут. Свойства тестируемых топлив показаны в таблице 1. Для биодизельного топлива с наночастицами Al₂O₃ (JBD30A) характерно снижение выбросов NO_x на 9%, дымности – на 17%, несгоревших углеводородов – на 33%, оксида углерода – на 20%, и соответственно для биодизельного топлива с частицами оксида церия (JBD30C) – 7%, 20%, 28%, 20%. Сравнение проводилось с результатами работы на ДТ. Для обоих тестируемых топлив наблюдалось увеличение КПД на 5 % относительно ДТ (32,4 %). Значение КПД для JBD30A составило 30,2% , для JBD30C – 30,1% против 28,5% для чистого биодизельного топлива. Удельный расход на JBD30A составил 0,301кг/кВтч, на JBD30C – 0,303 кг/кВтч против 0,318 кг/кВтч на чистом биотопливе.

Численный анализ эффекта присутствия наночастиц Al₂O₃ в разных концентрациях (25, 50 и 100 ppm) на характеристики дизеля, питаемого биодизельным топливом касторового масла, прогнозирует незначительное увеличение КПД и уменьшение удельного расхода топлива, максимального давления и периода задержки воспламенения. Кроме того, наблюдается некоторое комплексное сокращение эмиссии вредных выбросов на 6,58 % [34].

Таблица 1. Свойства тестируемых топлив

Топливо	Плотность, 15°C (кг/м ³)	Кинематическая вязкость, 40 °C cSt)	Температура вспышки, °C	Теплотворная способность, МДж/кг
Дизельное топливо	835	2,20	48	42,3
Биотопливо	873	2,10	85	39,5
JBD30A	875	4,25	78	38,9
JBD30C	876	4,30	76	38,7

Исключительная каталитическая способность наночастиц оксида церия позитивно действует и на дизельное топливо, приводя к одновременному сокращению выбросов оксида азота и углеводородов в отработавших газах дизеля [35]. Устойчивая

суспензия ДТ и 25 – 35 ppm оксида церия способна снизить NO_x почти в 6 раз, особенно при высокой нагрузке двигателя. Важно, что при этом наблюдается увеличение до 6 % КПД и снижение удельного расхода топлива. Усиливает эффект влияния оксида церия добавление в топливную суспензию 2 % додеценилантарного ангидрида $\text{C}_{16}\text{H}_{28}\text{O}_3$ (сурфактанта).

В исследовании [36] безнаддувный, 4-х тактный, с прямым впрыском дизельный двигатель работает на минеральном топливе, диспергированном ультразвуковым аппаратом наночастицами оксида церия. Приводятся результаты испытаний 4 образцов топлива с различной молярной концентрацией наночастиц (5 ppm, 7,5 ppm, 10 ppm, 15 ppm). Лучший результат получен при концентрации 10 ppm: при несколько сниженной теплотворной способности топлива КПД увеличился на 3,6% со снижением удельного расхода; на 3,63% снизилось количество выбросов углеродсодержащих компонентов ОГ, а эмиссия NO_x увеличилась на 9,11 %.

Физико-химические свойства наноокисных алюминиевых сферических частиц диаметром ≈ 10 нм благоприятно влияют на процесс горения дизельного топлива. Добавление в ДТ 40 ppm наночастиц окиси алюминия [37] приводит к повышению КПД на 5,5 % и снижению дымности, HC, CO и NO_x на 17%, 25%, 30% и 33% соответственно. Средний удельный расход топлива при дозировании в топливо 20, 30 и 40 ppm снижается на 3,5%, 4,5% и 5,5% при полной нагрузке. Отмечается увеличение максимального давления в цилиндре двигателя, но сокращение периода задержки воспламенения и потерь теплоты. Дисперсия частиц оксида алюминия в базовом топливе осуществляется методом обработки ультразвуком частотой 40 кГц в течение 30 минут.

Влияние оксида алюминия на процесс горения в дизеле, в том числе на кинетику окисления топлива и образование сажи, изучается с помощью мощного инструмента – CFD-моделирования газодинамики реагирующего потока на 2D-модели двигателя внутреннего сгорания [38]. Таким образом исследовалось дизельное топливо с нанодобавлением 25 ppm, 50 ppm и 75 ppm Al_2O_3 . Результаты расчета верифицированы экспериментом на одноцилиндровой дизельной установке. Получено разумное согласие между расчетными и экспериментальными результатами. Модифицированное топливо дает лучшие результаты и для КПД, и для показателей токсичности на всех режимах нагрузки.

Развитие объектов наноиндустрии выдвинуло на особое место углеродные наноматериалы с упо-

ряченной структурой: углеродные нанотрубки (УНТ) и графен, обладающие уникальными свойствами. В сочетании с дизельным и биодизельным топливом углеродные нанодобавки оказывают эффективное влияние на характеристики двигателя и его показатели токсичности. В работе [39] приводятся экспериментальные данные, полученные на одноцилиндровом четырехтактном двигателе, работающем на ДТ с добавлением УНТ. Эксперимент проводился с постоянной частотой вращения 1500 об/мин при различных нагрузках с различной концентрацией УНТ – (25, 50, 100 и 200 ppm). Результат впечатляющий – при полной нагрузке КПД двигателя увеличился на 6,5 % при концентрации УНТ 200 ppm, выбросы углеводородов HC составили 13, 12, 10 и 8 ppm соответственно концентрации УНТ (против 15 ppm HC при работе на базовом ДТ). Выбросы NO_x на режиме полной нагрузки составляют 90, 84, 80 и 72 ppm против 95 ppm для чистого ДТ. Отмечается рост выбросов углекислого газа для всех модификаций по сравнению с ДТ, уменьшение выбросов CO на 35 % при концентрации УНТ 100 и 200 ppm. Для достижения оптимальных характеристик двигателя рекомендуется уровень дозирования УНТ в диапазоне 200 ppm.

Характеристики дизеля с прямым впрыском исследуются при добавлении УНТ в биодизельное топливо [40]. В работе подробно излагается способ приготовления и проверка устойчивости модифицированных видов топлива из сложных метиловых эфиров масла *Jatropha* (JME) – смеси JME2S5W в пропорции 93 % JME, 5 % воды, 2 % сурфактантов (по объему) с последующим добавлением углеродных нанотрубок в концентрации (25, 50 и 100 ppm). Приводятся свойства топлив, тестируемые по соответствующим стандартам ASTM, способы и инструменты измерений результатов испытаний. Лучшие результаты получены для эмульсии, содержащей 100 ppm наноуглеродных трубок, отмечено значительное уменьшение эмиссии NO_x и дымности, рост КПД, но увеличение углеродсодержащих компонентов ОГ.

Биодизельное топливо (HOME), полученное из масла *Honge* экспериментально исследуется на одноцилиндровом дизеле [41], эффективность работы и токсичность ОГ которого фиксируется для чистого топлива (ДТ и биодизельного) и при добавлении графеновых наночастиц к биодизельному топливу в двух вариантах – 25 и 50 ppm. Теплотворная способность модифицированного топлива оказывается ниже показателей исходного топлива (35,0 и 35,5 МДж/кг против 43 и 36,016), но дает повышение мощности мотора для обоих вариантов модификации. По значениям КПД показатели для

(НОМЕ 50GRAPHENE) приближаються к результатам работы на ДТ. Получено существенное сокращение вредных выбросов по сравнению с чистым биодизельным топливом, но по дымности результаты значительно уступают ДТ.

Влияние наночастиц на основе углерода (графен, УНТ) и оксиды металлов в смеси биодизельного и дизельного топлив показывают улучшение характеристик сгорания, таких как давление в цилиндре, скорость тепловыделения, средняя температура газа, сокращение периода задержки воспламенения. Мощность, расход топлива, выбросы вредных веществ конкретизируются для каждого случая. Чаще всего влияние различных нанодобавок проверяется на базовых топливах, представляющих смесь ДТ и биодизельного топлива в различных концентрациях. Исследование [42] направлено на выявление характеристик одноцилиндрового дизеля (VCR) с переменной степенью сжатия (18,5 и 21,5) при работе на смесевом топливе (25% био + 75% ДТ) и синтезированными в него ассиметричными наночастицами ZnO при трех уровнях дозировки (25, 50 и 75 ppm). Подробно излагается определение формы и размера частиц ZnO и их характеристик, методика получения топливных смесей. В качестве биодизельного топлива SBME использовалась смесь сложных метиловых эфиров 5 жирных кислот соевого масла. Физико-химические свойства всех топливных смесей приведены в работе и представляют интерес для наших исследований, так как масло традиционное. Лучшие показатели продемонстрировала топливная смесь SBME25ZnO50 при степени сжатия 21,5: на 23,2% повышен эффективный КПД, снижен удельный расход топлива на 26,66%, значительно сократились выбросы HC, CO, дымность и CO₂ – на 32,2%, 28,21%, 22,55% и 21,66% соответственно, но увеличились на всех смесях выбросы NO_x, как полагают из-за повышения температуры в цилиндре.

Аналогичные результаты получаются с другим смесевым топливом: дизельное топливо, 25% биодизельного топлива NSME масла nigelly (черный тмин), 10% n-бутанола, 30, 60, 90 и 120 ppm оксида графена. Варианты смесевых топлив испытываются на двигателе CRDI с тороидальной камерой сгорания и топливным распылителем с 6-ю отверстиями. Нанодобавки увеличивают теплотворную способность топлива, приближая ее уровень к результатам ДТ, повышается КПД (для смеси NSME25B10GO90 увеличение составляет 18,37% по отношению к NSME25). К сожалению, наблюдается устойчивое повышение выбросов оксидов азота при снижении CO₂, HC, дымности и

CO [43].

Использование драгоценных металлов тоже нашло своего исследователя: наночастицы серебра использовались в качестве добавок в чистое дизельное топливо [44]. Серебряный порошок (30 – 50 нм) с добавлением активного вещества для обеспечения стабильности тестируемого топлива смешивали с ДТ в пропорции 10, 20 и 40 ppm. Надо сказать, получен хороший результат. Для всех уровней нагрузки значительно снижается концентрация CO и NO_x до 20,5% и 13% соответственно, HC на 28% на нагрузке меньше максимальной. При этом показатели расхода снизились на 3% при увеличении мощности на 6%.

Углеродные нанотрубки, графен и серебро были выбраны в качестве наночастиц для биодизельного топлива (НОМЕ) масла Honge с дозой по 50 ppm для каждого тестируемого топлива [45]. Определена теплотворная способность, температура вспышки, кинематическая вязкость и плотность каждого топлива, в том числе чистых ДТ и НОМЕ. Характеристики дизеля показали больший КПД для ДТ, меньший – для НОМЕ. Топлива с нанотрубками и наносеребром мало отличаются по показателям КПД друг от друга и занимают промежуточный результат чистых топлив. Странно, но HC и дымность минимальны для ДТ, максимальны для чистого биодизеля НОМЕ, а вот CO – максимален для ДТ. В результате получено: оксиды азота традиционно выше, чем для ДТ, несколько ниже для биодизельного топлива и еще ниже для топлив с нанодобавками.

Представляем результаты и наших исследований влияния модификации ДТ добавлением углеродных сфероидальных наночастиц на показатели двигателя 1Ч 8,5/11 [46]. Наноматериалы получены в ИБОНХ НАН Украины методом высокочастотного разрядно-импульсного синтеза на вольфрамовых электродах. Продукт синтеза модифицирован бромом, средний размер бромированных и экстрагированных в этаноле наноматериалов составляет 5 – 15 нм. Исходным сырьем для синтеза наночастиц являются углеводородные газы, готовый нанопродукт представлен в виде жидкой суспензии. Исследования показателей дизеля проводятся при работе на штатном дизельном топливе и на топливе с содержанием наночастиц в концентрации (N1– 1 мл/л), (N2– 3 мл/л) и (N3– 5 мл/л) соответственно, на режиме нагрузки Ne = 3 кВт при частоте вращения коленчатого вала двигателя n = 1300 мин⁻¹. Влияние концентрации, так мало отличающейся по величине, оказывает неожиданно значительные результаты, которые в сжатом виде представлены на рис. 4.

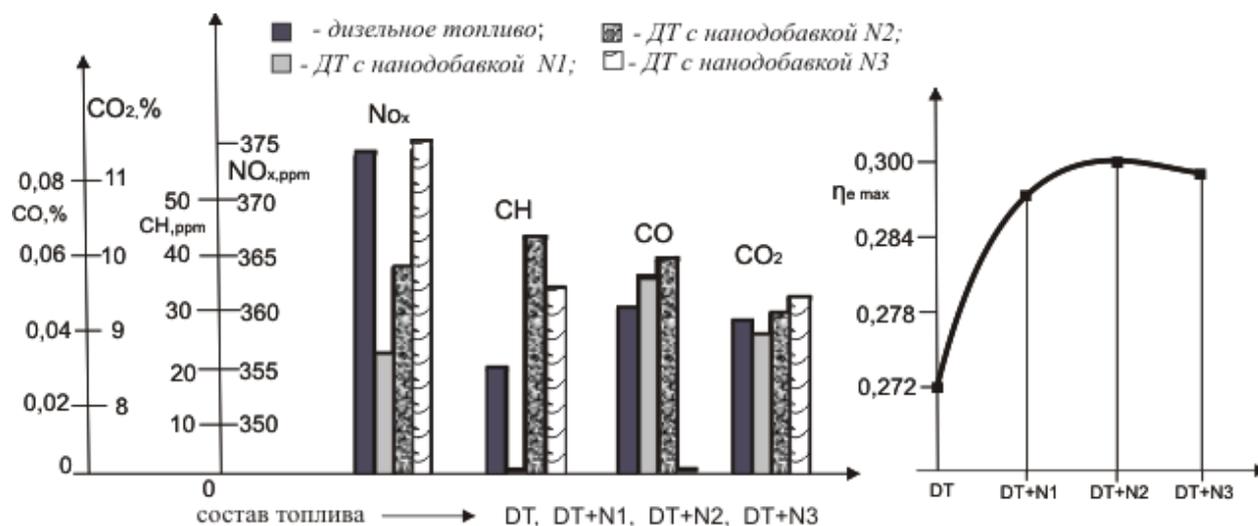


Рис. 4. Влияние концентрации наночастиц в ДТ на показатели токсичности и максимального КПД дизеля 1С 8,5/11 (режим $N_e = 3$ кВт, $n = 1300$ мин⁻¹)

Можно сделать вывод, что влияние диспергирования наночастиц в дизельное топлива зависит не только от их концентрации, но и от сочетания определенных факторов, и это, конечно, требует дополнительных исследований и анализа. Для дальнейших исследований интерес представляет влияние этих же наночастиц на биодизельное и смешанное топлива.

Выводы

Биодизельное топливо, получаемое из возобновляемых чаще внутренних источников сырья, заняло определенную нишу в качестве доли (разной величины) в смеси с минеральным моторным топливом. Для двигателя без или с незначительными модификациями при использовании смешанного топлива характерна некоторая потеря цилиндрической мощности, увеличение удельного расхода топлива и повышение уровня выбросов оксидов азота, часть которых можно снизить оптимизацией регулировок двигателя. Следует отметить значительное сокращение в отработавших газах СО и углеводородов, в том числе твердых частиц, а также ароматических и полиароматических соединений.

Существенного повышения эффективности использования минерального и биодизельного топлива можно достичь применением наноматериалов с повышенными энергетическими свойствами, диспергированием их в базовое топливо. Теплофизические свойства топлива (теплота сгорания, теплопроводность, теплоемкость, плотность, кинематическая вязкость, конвективная теплопередача, температура воспламенения, цетановое число и т. д.) в случае введения в него наночастиц претерпевают

значительные изменения. Оптимальное количество наночастиц металлов, оксидов металлов, углеродных трубок, графена в минеральном, биодизельном или смешанном топливе способствует более полному сгоранию, значительно улучшает характеристики двигателя и снижает уровень вредных выбросов. Как следствие это увеличивает альтернативу биотоплив и расширяет поиск возможных комбинаций различных смешанных топлив. В некоторых случаях можно получить нулевой или отрицательный результат, ключ к достижению положительного результата сосредотачивается в оптимальном выборе как самого наноматериала, так и размера, формы и концентрации его наночастиц, способа получения и диспергирования. Естественно, что стоимость такого топлива увеличивается. Кроме того, нельзя исключать возможность потенциально опасного влияния на окружающую среду токсичности и реакционной способности использования в моторных топливах наноматериалов различного типа и это актуальная задача экологической токсикологии.

Почти в каждом исследовании делается попытка объяснения эффекта использования наноматериалов (вплоть до микровзрывов). На наш взгляд, ответы на такие вопросы могут дать только специалисты – химики, физхимики и научно обоснованное рассмотрение процессов горения топлива с учетом кинетики и динамики процесса.

Список литературы:

1. Peng D. Exhaust emission characteristics of various types of biofuels/ D. Peng // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 7 (7). – pp. 1–7. doi.org/10.1177/168781401

5593036. 2. Shah A.P. Performance, Emission and Combustion Analysis of Biodiesel Extracted from Acidic oil: A By-product of Soybean Oil Refining Process / A.P. Shah // *AMSE JOURNALS-AMSE IIETA publication-2017-Series: Modeling C.* – 2017. – Vol. 78. – №3. – pp. 337–350. doi.org/10.18280/mmc_c.780306. 3. Chaudhary, A., Panchal, S.H., Surana, A. et al. Performance, emission and combustion characteristics of various biodiesel blends / A. Chaudhary, S. Panchal, A. Surana, et al. // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2021. doi.org/10.1007/s10973-021-10642-4. 4. Puzun A., Wanchen S., Guoliang L. Characteristics of particle size distributions about emissions in a common-rail diesel engine with biodiesel blends / A. Puzun, S. Wanchen, L. Guoliang // *Procedia Environmental Sciences.* – 2011. – №11. – Part (C). – pp. 1371–1378. doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.206. 5. Ramadhas A., Jayaraj S., Muraleedharan C. Use of Vegetable Oils as I.C. Engine Fuels: A Review / A. Ramadhas, S. Jayaraj, C. Muraleedharan // *Renewable Energy.* – 2004. – Vol. 29. – №. 5. – pp. 727–742. doi:10.1016/j.renene.2003.09.008. 6. Murugesan A., Umarani C., Subramanian R. et al. Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines – A review / A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2009. – № 13(3). – pp. 653–662. DOI:10.1016/j.rser.2007.10.007. 7. Jinlin X., Tony E., Alan H. Effect of biodiesel on engine performances and emissions / Jinlin X., Tony E., Alan C. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2011. – 15(2). – pp. 1098–1116. DOI:10.1016/j.rser.2010.11.016. 8. Chiatti G., Chiavola O., Recco E. Effect of Waste Cooking Oil Biodiesel Blends on Performance and Emissions from a CRDI Diesel Engine / G. Chiatti, O. Chiavola, E. Recco // *Improvement Trends for Internal Combustion Engine.* – 2017. – pp. 20–36. doi.org/10.5772/intechopen.69740. 9. EL-Kasaby M., Nemit-Allah M. Experimental Investigations of Ignition Delay Period and Performance of a Diesel Engine Operated with *Jatropha* Oil Biodiesel / M.EL-Kasaby, M. Nemit-Allah // *Alexandria Eng. J.* – 2013. – № 52. – pp. 141–149. https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.12.006. 10. S. Park, H. Kim, B. Choi Emission characteristics of exhaust gases and nanoparticles from a diesel engine with biodiesel-diesel blended fuel (BD20) / S. Park, H. Kim, B. Choi // *Journal of Mechanical Science and Technology.* – 2009. – № 23(9). – pp. 2555–2564. DOI:10.1007/s12206-009-0704-x. 11. Koc A. B., Abdullah M. Performance and NOx Emissions of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel–Diesel–Water Nano Emulsions / A. B. Koc, M. Abdullah // *Fuel Process. Technol.* – 2013. – № 109. – pp. 70–77. doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.039. 12. Patrylak L. K., Okhrimenko M.V., Levterov A. M. Engine performance and emission of biodiesel fuel prepared from different Ukrainian natural oils / L. K. Patrylak, M. V. Okhrimenko, A. M. Levterov // *Chemical Papers.* – 2019. – Vol. 73. – pp. 1823–1832. doi:10.1007/s11696-019-00755-4. 13. Konovalov S., Patrylak L., Zubenko S., Alkalisyn the sisofattyacid butyl and ethylesters and comparative bench motor testing of blended fuels on their basis / S. Konovalov, L. Patrylak, S. Zubenko // *Chemistry and chemical technology.* – 2021. – Vol. 15. – № 1. – pp. 105–117. doi.org/10.23939/chcht15.01.105. 14. Levterov A.M., Levterov A.A. Thermodynamic properties of fatty acid esters in some biodiesel fuels / Levterov A.M., Levterov A.A. // *Functional Materials.* – 2018. – Vol. 25 – №. 2. – pp. 308–312. doi.org/10.15407/fm25.02.308. 15. Fangsuwannarak Karoon, Triratanasirichai Kittichai Effect of Metalloid Compound and Bio-Solution Additives on Biodiesel Engine Performance and Exhaust Emissions / Karoon Fangsuwannarak, Kittichai Triratanasirichai // *American Journal of Applied Sciences.* – 2013. – №10 (10). – pp. 1201–1213. DOI:10.3844/ajassp.2013.1201.1213. 16. Bertola A., Li R., Boulouchos K. Influence of water-diesel fuel emulsions and EGR on combustion and exhaust emissions of heavy duty DI-diesel engines equipped with common-rail injection system / A. Bertola, R. Li, K. Boulouchos // *SAE Technical Paper 2003-01-3146*, 2003. https://doi.org/10.4271/2003-01-3146. 17. Jung H., Kittelson D. B., Zachariah M. R. The influence of a cerium additive on ultrafine diesel particle emissions and kinetics of oxidation / H. Jung, D. B. Kittelson, M. R. Zachariah // *Combust Flame.* – 2005. – Vol.142(3). – pp. 276–288. doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.11.015. 18. Zarschler K., Rocks L. et al. Ultrasmall inorganic nanoparticles: State-of-the-art and perspectives for biomedical applications / K. Zarschler, L. Rocks et al. // *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine.* – 2016. – Vol. 12(6). – pp. 1663–1701. https://doi.org/10.1016/j.nano.2016.02.019. 19. Yetter R.A., Risha G.A., Son, S.F. Metal particle Combustion and Nanotechnology / R.A. Yetter, G.A. Risha, S.F. Son // *Proceedings of the Combustion Institute.* – 2009. – № 32(2). – pp. 1819–1838. https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.013. 20. Kuo, K.K., Risha, G.A., Evans, B.J., Boyer, E. Potential Usage of Energetic Nano-sized Powders for Combustion and Rocket Propulsion / K.K. Kuo, G.A. Risha, B.J. Evans, E. Boyer // *MRS Online Proceedings Library (OPL).* – 2003. – Vol. – 800. – pp. 39 – 50. DOI: https://doi.org/10.1557/PROC-800-AA1.1. 21. Наноматериалы: технологии и материаловедение: Обзор / Г.П. Ковтун, А.А. Веревкин // Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 73 с. 22. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. I. Особенности структуры. Термодинамика. Фазовые равновесия. Кинетические явления / Р.А. Андриевский, А.М. Глезер // *ФММ.* – 1999. – т. 88. – № 1. – С. 50–73. 23. Yanan Gan, Li Qiao Combustion characteristics of fuel droplets with addition of nano and micron-sized aluminum particles / Gan Yanan, Qiao Li // *Combustion and Flame.* – 2011. – Vol. 158(2). – pp. 354–368. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.005. 24. Eastman J., Choi S. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles / J. Eastman, S. Choi // *Applied Physics Letters.* – 2001. – Vol. 78. – №. 6. – pp. 718–720. https://doi.org/10.1063/1.1341218. 25. Xinwei Wang, Xianfan Xu, S. Choi/ Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture // *Journal of thermophysics and heat transfer.* – 1999. – Vol. 13. – №. 4. – pp. 474–481. 26. Putnam S. A., Cahill D. G Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions / S. A. Putnam, D. G Cahill // *Journal of Applied Physics.* – 2006. – Vol. 99. – №8. – pp. 1–6. https://doi.org/10.1063/1.2189933. 27. Khan S., Dewang Y. Nanoparticles as fuel additive for improving performance and reducing exhaust emissions of internal combustion engines / S. Khan, Y. Dewang // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry.* – 2020. DOI: 10.1080/03067319.2020.1722810. 28. Khan S., Dewang Y., Raghuwansh, J. Nanoparticles Exceptional Properties: Applications in Internal Combustion Engines / S. Khan, Y. Dewang, J. Raghuwansh // *AIP Conference Proceedings.* – 2019. – Vol. 2100 (1). – 020146–3. https://doi.org/10.1063/1.5098700. 29. Coca N. As Palm Oil for Biofuel Rises in Southeast Asia, Tropical Ecosystems Shrink / N. Coca // *Chinadialogue China:Beijing.* – 2020. – https://chinadialogue.net/en/energy/11957-as-palm-oil-for-

- biofuel-rises-in-southeast-asia-tropical-ecosystems-shrink/30. Hugo Valin (IIASA), Daan Peters (Ecofys), Maarten Berg (E4tech) et al. The land use change impact of biofuels consumed in the EU. Quantification of area and greenhouse gas impacts / Valin Hugo, Peters Daan, Berg Maarten et al. // ECOFYS Netherlands B.V. – A cooperation of Ecofys, IIASA and E4tech. –2015. – 261 p. 31. Pandey A., Nandgaonkar M., Pandey U., Suresh S., et al., (2018). The effect of cerium oxide nanoparticles fuel additive on performance and emission of Karanja biodiesel fueled compression ignition military 585kW heavy duty diesel engine / Pandey A., Nandgaonkar M., Pandey U., Suresh S., et al. // SAE Technical Paper. – 2018. – 2018-01-1818. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1818>. 32. Pandey A., Nandgaonkar M., Pandey U., Suresh S., et al., Comparison and Evaluation of Engine Wear, Performance, NOx Reduction and Nano Particle Emission of Diesel, Karanja and Jatropa Oil Methyl Ester Biodiesel in a Military720 kW, heavy duty CIDI Engine Applying EGR with Turbo Charging / A. Pandey, M. Nandgaonkar, U. Pandey, S. Suresh, et al. // SAE Technical Paper. – 2020. – 2020-01-0618. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0618>. 33. Arockiasamy P., Anand R. B. Performance, Combustion and Emission Characteristics of a D.I. Diesel Engine Fuelled with Nanoparticle Blended Jatropa Biodiesel / P. Arockiasamy, R. B. Anand // Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering. –2015. – Vol. 59 (2). – pp. 88–93. doi.org/10.3311/PPme.7766. 34. Edam M. S., Al –Dawody M. F. Effect of Nano Fuel Additives on the Characteristics of Diesel Engine Fed with Biodiesel Blended Fuel / M. S. Edam, M. F. Al –Dawody // Journal of University of Babylon for Engineering Sciences. – 2019. – Vol. 27. – №. 4. – pp. 124 – 141. 35. Ajin C. Sajeevan, V. Sajith Diesel Engine Emission Reduction Using Catalytic Nanoparticles: An Experimental Investigation / C. Ajin, V. Sajeevan // Journal of Engineering. – 2013. – Article ID 589382. – 9 p.. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/589382>. 36. Prakash R., Murugesan A., Kumaravel A. Influence of Nano Fuel Additives to Control Environmental Pollution from Naturally Aspirated Di-Ci Engine / R. Prakash, A. Murugesan, A. Kumaravel // Bull. Sci. Res. – 2019. – Vol 1. – Iss 2. – pp. – 45–54. DOI:10.34256/bsr1926. 37. Gad M. S., Abdel Razeq S. M., Manu P.V., Jayara S. Experimental investigations on diesel engine using alumina nanoparticle fuel additive / M. S Gad, S. M Abdel Razeq, PV Manu, S. Jayara // Advances in Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 13 (2). – pp. 1–16. DOI: 10.1177/1687814020988402. 38. Ramesh Babu K., Bharathi Raja R. Theoretical and experimental validation of performance and emission characteristics of nanoadditive blended diesel engine / K. Ramesh Babu, R. Bharathi Raja // International journal of research in aeronautical and mechanical engineering. – 2015. – Vol. 3. – Issue. 5. – pp. 18–31. 39. Gad M. S., Khaled Ahmed Ali Yehia, Abdelhakeem A.A. Effect of multi carbon nanosheet on diesel engine performance and emissions / M. S. Gad, Khaled Ahmed Ali Yehia, A.A. Abdelhakeem // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2018. –Vol. 26 (11). – pp. 722–728. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2018.1485660>. 40. Basha Sadhik J., Anand R.B. Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine using carbon nanotubes blended jatropa methyl ester emulsions / J. Sadhik Basha, R.B. Anand // Alexandria Engineering Journal. –2014. – Vol. 53.–Is. 2. – pp. 259–273. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.04.001>. 41. Bhagwat V.A., Pawar C., Banapurmath N.R. Graphene Nanoparticle - Biodiesel Blended Diesel Engine / V. A. Bhagwat, C. Pawar, N. R. Banapurmath // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2015. – Vol. 4. – Is. 02. – pp. 75–78. ISSN: 2278-0181. 42. Gavhane R. S., Kate A. M., Pawar A. et al., Effect of Zinc Oxide Nano-Additives and Soybean Biodiesel at Varying Loads and Compression Ratios on VCR Diesel Engine Characteristics / R. S. Gavhane, A. M. Kate, A. Pawar et al. // Journals Symmetry. – 2020. –Vol. 12(6). – pp. 1042–1073. doi:10.3390/sym1206104. 43. Hurmathulla Khan, Manzoore Elahi M. Soudagar, Rajagopal Harish Kumar et al., Effect of Nano-Graphene Oxide and n-Butanol Fuel Additives Blended with Diesel-Nigella sativa Biodiesel Fuel Emulsion on Diesel Engine Characteristics / Hurmathulla Khan, Manzoore Elahi M. Soudagar, Rajagopal Harish Kumar et al. // Symmetry. – 2020. – 12 (6). – pp. 961–988. doi:10.3390/sym12060961. 44. Soukht Saraee H., Jafarmadar S., Taghavifar H., Ashrafi S. J. Reduction of emissions and fuel consumption in a compression ignition engine using nanoparticles / H. Soukht Saraee, S. Jafarmadar, H. Taghavifar, S. J. Ashrafi // Int. J. Environ. Sci. Technol. –2015. – Vol. 12 (7). – pp. 2245–2252. DOI:10.1007/s13762-015-0759-4. 45. Banapurmath N.R., Radhakrishnan Sankaran, Tumbal A.V., Narasimhalu T. N Experimental investigation on direct injection diesel engine fuelled with graphene, silver and multiwalled carbon nanotubes-biodiesel blended fuels /N. R. Banapurmath, Sankaran Radhakrishnan, A.V. Tumbal, T. N Narasimhalu // International Journal of Automotive Engineering and Technologies. –2014. – Vol. 3 (4). – pp. 129 – 138. DOI:10.18245/ijaet.59113. 46. Полункін Є.В., Пилявський В.С., Березницький Я.О. та ін. Покращення хімматологічних властивостей дизельного палива мікродобавкою вуглецевих сфероїдальних наночастинок / Є.В. Полункін, В.С. Пилявський, Я.О. Березницький та ін. //Каталіз та нафтохімія. – 2020. – № 29. – С.– 59–65. doi.org/10.15407/kataliz2020.29.059

Bibliography (transliterated):

- Peng, D. (2015), «Exhaust emission characteristics of various types of biofuels», *Advances in Mechanical Engineering* № 7(7), pp.1–7. doi.org/10.1177/1687814015593036.
- Shah, A. P., Sharad Patil. (2017), «Performance, Emission and Combustion Analysis of Biodiesel Extracted from Acidic oil: A By-product of Soybean Oil Refining Process», *AMSE JOURNALS-AMSE IIETA, Series: Modeling C*, Vol. 78, №.3, pp. 337-350. doi.org/10.18280/mmc_c.780306.
- Chaudhary, A., Panchal S. H., Surana A., et al. (2021), «Performance, emission and combustion characteristics of various biodiesel blends», *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10642-4>.
- Puzun, A., Wan-chen, S., Guoliang, L., et al. (2011), «Characteristics of particle size distributions about emissions in common-rail diesel engine with biodiesel blends», *Procedia Environmental Sciences* №.11(C), pp. 1371–1378. doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.206.
- Ramadhass, A. S., Jayarajand, S., Muraleedharan, C. (2004), «Use of Vegetable Oils as I.C. Engine Fuels: A Review», *Renewable Energy*, Vol. 29, №. 5, pp. 727–742. doi:10.1016/j.renene.2003.09.008. doi:10.1016/j.renene.2003.09.008.
- Murugesan, A., Umarani, C., Subramanian, R. and Nedunchezian N. (2009), «Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines – a review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, №. 13, pp. 653-62. DOI:10.1016/j.rser.2007.10.007.
- Jinlin, X., Tony, E., Grift Alan, Hansen, C. (2011), «Effect of biodiesel on engine performances and emissions», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, №.15, pp.1098–1116. DOI:10.1016/j.rser.2010.11.016.
- Chiatti, G., Chiavola, O., Recco, E. (2017) «Effect of Waste Cooking Oil Biodiesel Blends on Performance and Emissions from a CRDI Diesel Engine», *Improvement Trends for Internal Combustion Engine*, pp. 20–36, doi.org/10.5772/intechopen.69740.
- EL-Kasaby, M., Nemit-Allah, M. A. (2013), «Experimental Investigations of Ignition Delay Period and Performance of a Diesel Engine Operated with Jatropa Oil Biodiesel», *Alexandria Eng. J.* №. 52, pp. 141–149.

- <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.12.006>. 10. Park S., Kim, H., Choi, B. (2009), «Emission characteristics of exhaust gases and nanoparticles from a diesel engine with biodiesel-dieselblended fuel (BD20)», *Journal of Mechanical Science and Technology*, №. 23, pp. 2555-2564. DOI:10.1007/s12206-009-0704-x. 11. Koc, A. B., Abdullah, M. (2013), «Performance and NOx Emissions of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel–Diesel–Water Nano Emulsions», *Fuel. Process. Technol.*, №. 109, pp. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.039>. 12. Patrylak, L. K., Okhrimenk, M. V., Levterov, A. M. (2019). «Engine performance and emission of biodiesel fuel prepared from different Ukrainian natural oils», *Chemical Papers*, Vol. 73, pp. 1823–1832. doi:10.1007/s11696-019-00755-4. 13. Konovalov, S., Patrylak, L., Zubenko, S., et al. (2021), «Alkalisyn the sisofattyacid butyl and ethyl esters and comparative bench motor testing of blended fuels on their basis», *Chemistry and chemical technology*, Vol. 15, № 1, pp. 105–117. doi.org/10.23939/chcht15.01.105. 14. Levterov, A. M., Levterov, A. A. (2018), «Thermodynamic properties of fatty acid esters in some biodiesel fuels», *Functional Materials* Vol. 25, №. 2, pp. 308–312. doi.org/10.15407/fm25.02.308. 15. Karoon Fungsuwanarak, Kittichai Triratanasrichai. (2013), «Effect of Metalloid Compound and Bio-Solution Additives on Biodiesel Engine Performance and Exhaust Emissions», *American Journal of Applied Sciences*, №. 10 (10), pp. 1201–1213. DOI:10.3844/ajassp.2013.1201.1213. 16. Bertola, A, Li R, Boulouchos, K. (2003), «Influence of water-diesel fuel emulsions and EGR on combustion and exhaust emissions of heavy duty DI-diesel engines equipped with common-rail injection system», *SAE Trans*, №. 112(4), pp. 2244–2260. <https://doi.org/10.4271/2003-01-3146>. 17. Jung, H., Kittelson, D. B., Zachariah, M. R. (2005), «The influence of a cerium additive on ultrafine diesel particle emissions and kinetics of oxidation», *Combust Flame*, №. 142(3), pp. 276–288. doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.11.015. 18. Zarschler, K., Rocks, L, et al. (2016), «Ultra smallin organic nanoparticles: State-of-the-art and perspectives for biomedical applications», *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, Volume 12, Issue 6, pp. 1663-1701. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2016.02.019>. 19. Yetter, R.A., Risha, G.A., Son, S.F. (2009), «Metal particle Combustion and Nanotechnology», *Proceedings of Combustion Institute*, №. 32, pp. 1819–1838. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.013>. 20. Kuo, K.K., Risha, G.A., Evans, B.J., Boyer, E. (2003), «Potential Usage of Energetic Nano-sized Powders for Combustion and Rocket Propulsion», *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, Vol. 800, pp. 39 – 50. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-800-AA1.1>. 21. Kovtun, G.P., Verevkin, A.A. (2010), *Nanomaterials: Technologies and Materials Science. A Review.* – Khar'kov: NNTSKHFT. [Nanomaterialy: Tekhnologii i materialovedeniye, Obzor], Khar'kov: NNTSKHFTI, 73 p. 22. Andrievsky, R. A., Glaser, A. M. (1999), «Size effects in nanocrystalline materials. I. Features of the structure. Thermodynamics. Phase equilibria. Kinetic phenomena», *FMM [«Razmernyye efekty v nanokristallicheskih materialakh. I. Osobennosti struktury. Termodinamika. Fazovyye ravnovesiya. Kineticheskiye yavleniya.»]*, *FMM*, vol. 88, №. 1, pp. 50–73. 23. Yanan Gan, Li Qiao. (2011), «Combustion characteristics of fuel droplets with addition of nano and micron-sized aluminum particles», *Combustion and Flame*, №. 158, pp.354–368. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.005>. 24. Eastman, J., Choi, S. (2001), «Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles», *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, №. 6, pp. 718–720. <https://doi.org/10.1063/1.1341218>. 25. Xinwei, Wang, Xianfan Xu, Choi, S. (1999), «Thermal conductivity of nanoparticle–fluidmixture», *JOURNAL OF THERMOPHYSICS AND HEAT TRANSFER*, Vol. 13, №. 4, pp. 474–481. 26. Putnam S. A., Cahill D. G. (2006), «Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions», *J. Appl. Phys.*, №. 99(084308), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.2189933>. 27. Khan, S., Dewang, Y. (2020), «Nanoparticles as fuel additive for improving performance and reducing exhaust emissions of internal combustion engines», *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, DOI: 10.1080/03067319.2020.1722810. 28. Khan, S., Dewang, Y., J. Raghuvansh, J. (2019), «Nanoparticles Exceptional Properties: Applications in Internal Combustion Engines», *AIP Conference Proceedings* 2100, 020146–3. <https://doi.org/10.1063/1.5098700>. 29. Coca, N. (2020), «As Palm Oil for Biofuel Rises in Southeast Asia, Tropical Ecosystems Shrink; Chinadialogue China:Beijing, China», available at: <https://chinadialogue.net/en/energy/11957-as-palm-oil-for-biofuel-rises-in-southeast-asia-tropical-ecosystems-shrink>. 30. Hugo, Valin (IIASA), Daan, Peters (Ecofys), Maarten, Berg (E4tech) et al., (2015), «The land use change impact of biofuels consumed in the EU. Quantification of area and greenhouse gas impacts. A cooperation of Ecofys, I IASA and E4tech, ECOFYS Netherlands B.V, 261 p. 31. Pandey, A., Nandgaonkar, M., Pandey, U., Suresh, S., et al. (2018), «The effect of cerium oxide nanoparticles fuel additive on performance and emission of Karanja biodiesel fuel decompression ignition military 585kW heavy duty diesel engine», *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2018-01-1818. 32. Pandey, A., Nandgaonkar, M., Pandey, U., Suresh S., et al. (2020), «Comparison and Evaluation of Engine Wear, Performance, NOx Reduction and Nanoparticle Emission of Diesel, Karanja and Jatropa Oil Methyl Ester Biodiesel in a Military 720 kW, heavy duty CIDI Engine Applying EGR with Turbo Charging», Published April 14, by SAE International in United States, <https://doi.org/10.4271/2020-01-0618>. 33. Prabu Arockiasamy, Anand, R.B. (2015), «Performance, Combustion and Emission Characteristics of a D.I. Diesel Engine Fuelled with Nanoparticle Blended Jatropa Biodiese», *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering* VOL. 59, №. 2. doi.org/10.3311/PPme.7766. 34. Mohammed, S. Edam, Mohamed, Al –Dawody F. (2019), «Effect of Nano Fuel Additives on the Characteristics of Diesel Engine Fed with Biodiese Blended Fuel», *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, Vol.27, №. 4. 35. Ajin, C., Sajeevan Sajith, V. (2013), «Diesel Engine Emission Reduction Using Catalytic Nanoparticles: An Experimental Investigation», *Journal of Engineering*, Volume 2013, Article ID 589382, 9 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/589382>. 36. Prakash, R., Murugesan, A., Kumaravel, A. (2019), «Influence of Nano Fuel Additives to Control Environmental Pollution from Naturally Aspirated Di-Ci Engine», *Bull. Sci. Res*, Vol.1, Iss 2, pp. 45–54. doi.org/10.34256/bsr1926. 37. Gad, M., Abdel Razeq, S., Manu, P., Jayara, S. (2021), «Experimental investigations on diesel engine using alumina nanoparticle fuel additive», *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 13(2), pp.1–16. DOI: 10.1177/1687814020988402. 38. Ramesh Babu, K., Bharathi Raja, R. (2015), «Theoretical and experimental validation of performance and emission characteristics of nano additive blended diesel engine», *International journal of research in aeronautical and mechanical engineering*, Vol.3, Issue. 5, pp.17–30. 39. Gad, M., Khaled, S., Ahmed Ali Yehia & Amer Abdelhakeem, A. (2018), «Effect of multi carbon nano sheet on diesel engine performance and emissions», *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, Vol. 53, Is. 2, pp. 259–273. DOI: 10.1080/1536383X.2018.1485660. 40. Basha, J.S., Anand, R.B. (2014), «Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine using carbon nano tubes blended jatropa methyl ester emulsions», *Alex. Eng. J.*, №. 53, pp.259–273. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.04.001>. 41. Bhagwat, V.A., Pawar, C., Banapurmath, N.R. (2015), «Graphene Nanoparticle – Biodiesel Blended Diesel Engine», *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN: 2278-0181, Vol. 4, Issue 02, pp. 75–78. 42. Gavhane, R.S., Kate, A.M., Pawar, A. et al. (2020), «Effect of Zinc Oxide Nano-Additives and Soybean Biodiesel at Varying Loads and Compression Ratios on VCR Diesel Engine Characteristics», *Symmetry* №. 12(6), pp.1042–1073. doi:10.3390/sym1206104. 43. Hurmathulla Khan, Manzoore Elahi Soudagar, M., Rajagopal Harish Kumar et al., (2020), «Effect of Nano-Graphene Oxide and n-Butanol Fuel Additives Blended with Diesel-Nigella sativa Biodiesel Fuel Emulsion on Diesel Engine Characteristics», *Symmetry* Vol. 12(6), pp. 961–988. doi:10.3390/sym12060961. 44. Soukht Saraee, H., Jafarmadar, S., Taghavifar, H., Ashrafi, S. J. (2015), «Reduction of emissions and fuel consumption in a compression ignition engine using nanoparticles», *Int. J. Environ. Sci. Technol.* №. 12, pp. 2245–2252. DOI 10.1007/s13762-015-0759-445. Banapurmath N. R., Radhakrishnan

Sankaran, Tumbal A. V., Narasimhalu T. N. (2014), «Experimental investigation on direct injection diesel engine fuelled with graphene, silver and multiwalled carbon nanotubes-biodiesel blended fuels», *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, Vol. 3, Issue 4, pp. 129 – 138. DOI:10.18245/ijaet.5911346. Polunkin, E.V. Pylyavsky, Ya.O. Bereznytsky, T.M. et al. (2020), «Improv-

ing the chemical properties of diesel fuel with a microadditive of carbon from ferrioidal nanoparticles», *Catalysis and petrochemistry [«Pokrashchennya khimnotolohichnykh vlastyvostey dyzel'noho palyva mikroobavkoyu vuhletsevykhs feroyidal'nykh nanochastok»]*, *Catalysis and petrochemistry*, № 29, pp. 59–65. doi.org/10.15407/kataliz2020.29.059.

Поступила в редакцію 29.06.2021 г.

Левтеров Антон Михайлович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: antmix 1947@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5308-1375>

Левтеров Александр Антонович – доктор техн. наук, ст. науч. сотр., доцент Национального университета гражданской защиты, г. Харьков, Украина, e-mail: alionterra@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5926-7146>

ВПЛИВ НА ПОКАЗНИКИ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ БІОКОМПОНЕНТІВ ТА НАНОМАТЕРІАЛІВ РІЗНОГО ТИПУ

А.М. Левтеров, А.А. Левтеров

Очевидна вичерпність енергетичних ресурсів планети спонукає до постійних пошуків нових джерел енергії та заощадливого їх використання. Основний перетворювач енергії – ДВЗ всупереч прогнозам залишається на лідируючих позиціях, тому питання удосконалення його робочих процесів, покращення показників токсичності, скорочення споживання палив із вичерпної сировини та можливість використання альтернативних палив, підвищення якості моторних палив залишаються у розгляді усього енергетичного світу. У цьому контексті поширеного розвитку досягає концепція використання наночастинок з підвищеними енергетичними властивостями. Покращення показників двигуна, що працює на штатному нафтовому та сумішевих моторних паливах, диспергованих наноматеріалами різного типу, не підлягає сумнівам. В статті наводиться аналіз сучасних досліджень впливу біодизельних палив на експлуатаційні показники двигунів та аналіз результатів впровадження практики модифікації нафтового та біопалива наноприсадками у якості потенційного енергоносія. Представлені результати виконаного в лабораторії ІПМаш НАН України дослідження показників дизельного двигуна 1Ч 8.5/11, при його роботі на штатному дизельному паливі, диспергованому вуглецевими сфероїдальними нанодобавками різної концентрації, та деякі порівняльні результати досліджень показників дизельних двигунів з прямим впорскуванням 2Ч 10,5/12 та 4ЧН 7,9/7,5 ALH, що працювали на штатному та сумішевих паливах з біокомпонентами, синтезованими із ріпакової, соняшникової, гірчичної та кукурудзяної олій. Теплофізичні властивості палива (теплота згоряння, теплопровідність, теплоємність, густина, кінематична в'язкість, конвективна теплопередача, температура займання, метанове число) у разі введення в нього наночастинок отримують значні зміни. Оптимальна кількість наночастинок металів, оксидів металів, вуглецевих трубок и графена в мінеральному, біологічному, або сумішевому паливі сприяє більш повному згорянню, значному покращенню економічних характеристик двигуна та зниженню рівня шкідливих викидів з відпрацьованими газами.

Ключові слова: біопаливо; нанодобавки; токсичність; складні ефіри; рослинні олії.

INFLUENCE ON PISTON ENGINE PERFORMANCE BY THE BIOCOMPONENTS AND DIFFERENT TYPES OF NANO MATERIALS

A.M. Levterov, A.A. Levterov

The obviousness of the finiteness of the planet's energy resources makes us constantly concern ourselves with the search for new energy sources and their rational use. The main energy converter is the internal combustion engine and contrary to forecasts, continues to occupy a leading position. Therefore, the issues of improving its working processes, reducing the consumption of mineral fuel, the possibility of using all kinds of alternative fuels and improving the quality of motor fuel continue to be considered throughout the energy world. On the agenda is the dissemination of advances in nanotechnology to the propulsion industry. Improvement of engine performance when using fuel dispersed with nanomaterials of various types is beyond doubt and is used both for pure petroleum and biodiesel and for their mixtures. In the article, against the background of the analysis of studies on the use of alternative biofuels and the introduction of the practice of introducing nanoparticles into petroleum fuel and biofuels as a potential energy carrier to improve the characteristics of toxicity and engine performance, the results of studies of a number of biofuels have been presented. Presented are the results of a study of the performance of a 1Ch 8.5 / 11 diesel engine carried out in the laboratory of IPMash NAS of Ukraine when operating on diesel fuel dispersed with carbon spheroidal nanoadditives of various concentrations, and some comparative results of studies of the indicators of diesel engines with direct injection 2Ch 10.5 / 12 and 4ChN 7.9 / 7.5 ALH, operating on standard and mixed fuels with biocomponents synthesized from rapeseed, sunflower, mustard and corn oils. The thermophysical properties of the fuel (heat of combustion, thermal conductivity, heat capacity, density, kinematic viscosity, convective heat transfer, ignition temperature, cetane number, etc.) undergo significant changes when nanoparticles are introduced into it. The optimal amount of metal nanoparticles, metal oxides, carbon tubes, graphene in mineral, biodiesel or mixed fuel promotes more complete combustion, significantly improves engine performance, and reduces harmful emissions.

Key words: biofuel, nanomaterials, toxicity, esters, vegetable oils