

10.31653/smf49.2024.69-80

Латиш О.М. Мельник О.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ПАЛИВА ТА ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСАДОК НАНОМАТЕРІАЛІВ ДО ПАЛЬНОГО

Постановка проблеми в загальному вигляді. Викопне паливо залишається основним джерелом енергії для роботи двигунів та виробництва електроенергії для промислових та побутових цілей, однак продукти його згоряння та збільшення використання автомобілів створюють негативний вплив на навколишнє середовище. Нафта як паливо – ресурс, який не відновлюється і вичерпується, а її ціна є нестабільною через збільшення обсягів її використання.

Наслідки використання викопного палива спричиняють небезпечне підвищення рівня незгорілих вуглеводнів (УВНС), оксиду вуглецю (СО) та оксидів азоту (NO_x), двоокису вуглецю (СО₂), метану (СН₄), двоокису сірки (SO₂), що призводить до несприятливих екологічних змін. Крім того, вихлопні гази спричиняють забруднення повітря, а гази, що виділяються, значною мірою впливають на клімат, утримуючи тепло.

Проблема глобального потепління вже зараз, а особливо у майбутньому, буде одним із найбільших викликів двадцять першого століття. За останні сто років середня температура Землі зросла приблизно на 0,4-0,8°C. Експерти зі зміни клімату прогнозують, що якщо тенденція збережеться, то до кінця сторіччя середня глобальна температура зросте на 2-5 °С.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Таким чином, стало дуже важливим питання вивчення можливостей і перспектив використання технологічно доступних і глобально придатних відновлюваних джерел енергії в якості альтернативного палива. Серед різних альтернативних видів палива привертають велику увагу відновлювальні джерела енергії, включаючи біопаливо, паливні елементи та сонячні технології, щоб зменшити споживання викопного палива та отримати можливість контролювати викиди парникових газів в атмосферу.

Окрім використання екологічно чистих альтернативних видів палива, для зменшення викидів парникових газів та підвищення ефективності енергетичних систем необхідно розробляти нові двигуни з

пристроями контролю викидів після згоряння палива. Застосування двигунів, які використовують біодизель у транспортному та енергетичному секторах отримало розвиток в останні десятиліття, і відстежується тенденція розвитку досліджень, спрямованих на пошук нових ДВЗ з низьким рівнем викидів, енергозбереженням та високими показниками ефективності.

Постановка завдання. ДВЗ широко використовуються як джерела енергії та електроенергії у багатьох сферах завдяки високому ККД, меншому споживанню палива, а також значній екологічності. ДВЗ залишаються основним джерелом для забезпечення енергією транспорту. Надійність, довговічність та паливна ефективність дизельних двигунів роблять їх найпоширенішим типом двигунів у різних галузях. Двигуни, які використовують біодизель мають відмінну репутацію завдяки високій надійності та довговічності.

Біодизель є одним із альтернативних джерел енергії для транспортної галузі через швидке зменшення запасів нафти та збільшення попиту на енергію, з іншого боку, використання біодизеля зменшує забруднення навколишнього середовища. За своїми властивостями біодизель подібний до дизельного палива, але відрізняється вмістом кисню, що забезпечує краще згоряння. Тим не менш, при спалюванні біодизеля виділяється менше енергії, ніж при спалюванні дизельного палива. Основна перевага біодизеля полягає в тому, що двигун не потребує жодних змін, зберігаючи майже таку саму продуктивність, що й існуючий дизельний двигун, з майже нульовими викидами негорілих вуглеводнів, оксиду вуглецю та твердих частинок.

Основною проблемою спалювання біодизельного пального, при вмісті біодизеля в суміші понад 20 %, є значні викиди у вигляді оксиду азоту (NOx), що призводить до погіршення характеристик згоряння.

Для управління рівнем викидів оксидів азоту (NOx), ключовими технологічними факторами роботи двигуна є: ступінь стиснення палива (CR), час впрыскування палива (FIT), тиск з яким впрыскується паливо (FIP). Змінюючи і контролюючи ці фактори, можна покращити характеристики двигуна при роботі на біодизельному паливі [1].

Виклад основного матеріалу дослідження

Застосування наночастинок у ДВЗ та їх вплив на фізико-хімічні властивості палива. Додавання наночастинок до дизельного або наночастинок до біодизельного пального - це новий спосіб покращити характеристики згоряння та ефективно зменшити викиди парникових

газів для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) без негативного впливу на вихідну потужність.

Нанорідина - це двофазна колоїдна суміш, що складається з нанорозмірних частинок, диспергованих у базовій рідині, її називають ще нанофлюїд. Наночастинки - це частинки з розмірами приблизно від 1 до 100 нм.

Нанопаливо - це суспензія наночастинок (принаймні один розмір менше 100 нм) в базовому паливі з властивостями, що покращують згоряння палива. На властивості нанопалива, особливо на стабільність, значною мірою впливає тип наночастинок, розміри та концентрація, які додаються в рідину, а також спосіб приготування цієї суміші. Диспергування наночастинок у базовому паливі суттєво впливає на реологічну поведінку та теплофізичні властивості нанопалива. Нанопаливо має високу поверхневу енергію завдяки своїй великій площі поверхні, що сприяє агломерації палива з наночастинками та формуванню мікрочастинок.

Додавання наночастинок до біодизельного палива скорочує затримку займання, покращує швидкість окислення та зменшує викиди вихлопних газів, атоми кисню, що містяться в наночастинках, покращують горіння. Наночастинки диспергуються в паливі і сприяють кращому змішуванню повітря з паливом та покращенню хімічної реактивності під час горіння, що підвищує продуктивність двигуна, покращує згоряння та якість викидів.

Основними цілями додавання наночастинок до дизельного та біодизельного палива є сприяння високому співвідношенню площі поверхні до об'єму та збільшення кількості реакційно здатних поверхонь. Це дозволяє наночастинкам діяти як ефективний хімічний каталізатор, який покращує схему змішування палива з повітрям і ефективність згоряння палива, що згодом призводить до повного згоряння хімічного каталізатора. Нанодобавки слугують носіями вторинної енергії в рідинах та інтенсифікують процес горіння.

Існує багато варіантів наноприсадок на основі металів це: залізо (Fe), алюміній (Al), магній (Mg), марганець (Mn), срібло (Ag), золото (Au), мідь (Cu), бор (B), графен, кремнезем (Si), тощо. Наночастинки оксидів металів добре сумісні з біопаливом, такі як оксид алюмінію (Al_2O_3), оксид кобальту (Co_3O_4), оксид церію (CeO_2), оксид титану (TiO_2), оксид цинку (ZnO), оксид міді (CuO), тощо, додаються в нанорозмірах до рідкого палива для покращення його якості. Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) також є прикладами наночастинок, які покращу-

ють експлуатаційні характеристики палива шляхом модифікації фізико-хімічних властивостей.

Нанофлюїди - це новий тип твердо-рідинних композитів, що складаються з твердих частинок розміром в декілька нанометрів, диспергованих в будь-якій базовій рідині [2]. Аналогічно наночастинки можна додавати до біодизельних сумішей як до базового пального. Це нове паливо називається нано-дизель-біодизель. Покращувачі палива, як правило, поділяються на речовини для диспергування та речовини, що підвищують продуктивність двигунів. Вони також поділяються на антиоксиданти, присадки для підвищення цетанового числа, антидетонатори, проти замерзаючі присадки, присадки для підвищення стабільності, антикорозійні присадки, присадки для поліпшення холодного потоку, каталізатори на паливній основі, проти-зносні присадки і т.д. [3].

Присадки - це речовини на основі металів та їх окислів, які додаються в паливо і основною метою яких є покращення якості суміші за рахунок надання корисних властивостей. Діапазон кількості паливних присадок обмежений від 25 ppm. до декількох тисяч ppm. (Мільйонна частка — одиниця вимірювання концентрації та інших відносних величин, аналогічна за змістом відсотку або проміле, та являє собою одну мільйонну частку. Позначається скороченням ppm або млн^{-1}). Межа дозування присадок залежить лише від коефіцієнта викидів сажі та типу двигуна. Наночастинки покращують ефективність процесу згоряння, а отже, збільшують потужності двигуна. Використання двох різних наночастинок в якості паливних добавок може досягти комплексного впливу наночастинок і поліпшити експлуатаційні характеристики та викиди двигунів.

Додавання різних наночастинок до біодизеля покращує якість рідини, яка є стабільною в широкому діапазоні умов, а також фізико-хімічні властивості палива, підвищує концентрацію кисню в сажовому фільтрі (DPF). Крім того, додавання наночастинок до біодизеля знижує рівень викидів вихлопних газів, дає змогу більшій кількості палива контактувати з атомами повітря, покращує індекс в'язкості, зменшує час ідентифікації та покращує хімічну взаємодію.

Суміші нано-біодизеля показали себе як високоефективне та перспективне паливо [4]. Через велику кількість енергії, депонованої в металевих частинках, високе співвідношення площі поверхні до об'єму, підвищену кількість активних центрів, збільшену швидкість каталітичної реакції, високу каталітичну активність, здатність під-

вищити теплотворність рідкого палива, а отже, поліпшити характеристики двигуна.

Диспергування наноматеріалів оксида церію CeO_2 , оксида алюмінію Al_2O_3 , вуглецевих нанотрубок ВНТ, алюмінію Al і оксиду графену GO в чистому біодизельному паливі знижує значення температури спалаху при одночасному підвищенні значень в'язкості і густини [5], [6],[7], [8], [9], [10]. Крім того, теплотворна здатність чистого біодизеля зростає при додаванні вуглецевих нанотрубок CNT, графену та наночастинок алюмінію Al [7],[10], [11]. Використання наночастинок оксид цинку ZnO підвищує значення температури спалаху, в'язкості, густини та теплоти згоряння палива. Тоді як наночастинки марганця Mn , магнія Mg , алюмінія Al у різних співвідношеннях знижують значення температури спалаху [12].

Приготування та стабільність нанопалива .

Стабільна і однорідна суспензія нанопалива є надзвичайно важливою характеристикою, оскільки вона впливає на її продуктивність як теплоносія та теплофізичні властивості. Стабільну колоїдну суміш, що складається з різного палива та наночастинок, готують одним із методів або комплексними методами з використанням мішалки, ультразвукової ванни, ультразвукового руйнівника та гомогенізатора високого тиску. Стабільність [13] нанопалива може бути підвищена за допомогою більш тривалого часу ультразвукової обробки. Подовження часу обробки ультразвуком допомагає зменшити агрегацію частинок і сприяти стабільній і кращій дисперсії наночастинок у базових рідинах [14]. Результати залежать від часу ультразвукової обробки. Оптимальний час обробки ультразвуком відрізнявся для різних типів наночастинок і базових рідин.

Поверхнево-активні речовини - це хімічні сполуки, що додаються до наночастинок, які допомагають зменшити поверхневий натяг нанорідини і збільшити поглинання частинок. Деякі типи поверхнево-активних речовин , такі як: гексадецилтриметиламоній бромід, цетилтриметиламоній бромід , додецилбензолсульфонат натрію , поліоксіетилен, нонілфеніловий ефір , широко використовуються [15],[16].

За однакових концентрацій поверхнево-активних речовини при зменшенні розмірів частинок теплопровідність збільшується [17]. Додавання поверхнево-активної речовини широко застосовується для покращення дисперсності наночастинок у базовій рідині та мінімізації коагуляції та агрегації частинок. Для запобігання агрегації

частинок під час формування нанопалива часто використовують диспергатор.

Для оцінки стабільності нанопалива використовують різні методи, включаючи седиментаційний метод, аналіз дзета-потенціалу, УФ-спектроскопія, растровий електронний мікроскоп, метод рівноваги, метод динамічного розсіювання світла. Метод седиментації є найкращим методом для оцінки стабільності нанопалива. Стабільне нанопаливо утворюється тоді, коли концентрація частинок не змінюється з плином часу. У цьому методі седиментаційні фотографії нанопалива роблять за допомогою камери в пробірках і спостерігають за стабільністю нанопалива. (Седиментація - осідання або спливання частинок дисперсної фази в рідкому або газоподібному дисперсійному середовищі в гравітаційному полі або полі відцентрових сил). Недоліком цього методу є тривалий час спостереження для контролю осадження частинок. Дзета-потенціал - це різниця потенціалів між основною рідиною і нерухомим шаром рідини, прикріпленим до наночастинок. Високий дзета-потенціал (негативний або позитивний) вказує на стабільність суспензійної системи, тоді як нанорідина з нижчим дзета-потенціалом призводять до швидшої седиментації наночастинок, УФ-спектроскопія вимірює поглинання світла, що падає на наночастинок.

Вплив нанодобавок до дизельного та біодизельного пального.

Властивості процесу згоряння палива можна покращити шляхом додавання до палива наночастинок металів або оксидів металів у нанорозмірному діапазоні в проміле або ваговому відсотковому співвідношенні. Мета використання наночастинок металів - підвищення стабільності роботи двигуна, покращення процесу згоряння та характеристик продуктів згоряння за рахунок покращення властивостей та розчинності паливної суміші.

Оксиду алюмінію Al_2O_3 . Серед доступних варіантів все більшої уваги набувають нанодобавки оксиду алюмінію Al_2O_3 . Переваги при його використанні наступні: економія палива, підвищення продуктивності двигуна при одночасному зменшенні викидів шкідливих парникових газів, оксидів азоту та твердих частинок. Наночастинок оксидів металів мають високе співвідношення площі поверхні до об'єму та збільшення кількості реакційно здатних поверхонь. Перевагою оксидів металів є покращення розпилення, що дозволяє більшій кількості палива реагувати з киснем, покращує швидке випаровування і забезпечує краще середовище для змішування повітря і палива.

Результати додавання наночастинок оксиду алюмінію Al_2O_3 розміром 50 нм та 40 нм 0,5 г наночастинок оксиду алюмінію Al_2O_3 , які були змішані з 1 л дизельного палива в чотиритактному одноциліндровому дизельному двигуні за різних умов навантаження і паливних сумішей, вказують на те, що розмір частинок має значний вплив на запалювання і горіння. Чим менший розмір частинок, тим більша інтенсивність реакції [18].

Суміш (PBD)- біодизеля Поланга та 25 ppm оксида алюмінію Al_2O_3 в порівнянні з біодизелем Поланга дали такі результати: питома витрата палива зменшилась на 7,4 %, ККД збільшився на 4,2%, вуглеводні (НС) зниження до 30,3 %, зниження оксиду вуглецю CO до 37,3% [19].

Наночастинки оксиду алюмінію Al_2O_3 , дисперговані в біодизельній суміші метилового ефіру олії насіння тамаринду (TSME20) та 60 ppm оксиду алюмінію забезпечили прозорість диму на 87,4 % і викиди оксиду вуглецю CO на 56,6 % нижчі, ніж у дизельного палива при повному навантаженні двигуна, знизився рівень викидів чадних газів на 24 % і рівень викидів оксидів азоту на 9 % [20].

Використання суміші НОМЕ20 та 40 ppm оксида алюмінію на дизельному двигуні показало покращення ККД на 10,6 %, питома витрата палива зменшилася на 11,7% та знизився рівень вуглеводнів (НС) на 26,7 %, оксиду вуглецю (CO) на 48,4 %, та диму та 22,8 %, в той час як було зафіксовано збільшення викидів оксидів азоту NO_x до 11,3 % [21].

Найбільша механічна потужність була досягнута при додаванні оксиду алюмінію Al_2O_3 40 мг/л до біодизельного палива з жожоба (JB20), де питома витрата палива зменшилася на 12 %, ККД збільшився на 15 %, тиск P_{max} збільшилася на 4,5 %. Пік зниження рівнів продуктів вихлопу був зафіксований при дозуванні 20 мг/л, де викиди оксиду азоту NO_x зменшилися на 70%, оксиду вуглецю (CO) - на 80%, незгорілих вуглеводнів - на 60%, а прозорість диму - на 35%. Запропонований рівень дозування оксиду алюмінію Al_2O_3 для значного покращення характеристик двигуна та викидів становив 30 мг/л [22].

Суміш паливо JB20 та наноприправок оксиду алюмінію Al_2O_3 при дозуванні 30 мг/л дає оптимальні характеристики двигуна. При цій дозі питома витрата палива зменшилася на 6%, ККД двигуна збільшився приблизно на 7%, а також було зафіксовано зменшення ок-

сиду азоту NO_x на 70%, зменшення оксиду вуглецю (CO) на 75%, незгорілих вуглеводнів на 55%, прозорість диму на 25% [23].

Оксиду церію CeO_2 . Додавання наночастинок оксиду церію CeO_2 в біодизельне паливо зменшують викид токсичних вихлопних газів у процесі згоряння вуглеводневого палива та покращують паливну економічність. Кількість кисню, що подається і відновлюється в газовій фазі, допомагає регенерувати сажовий фільтр дизеля. Оксид церію CeO_2 діє як донорний каталізатор кисню, що призводить до зменшення викидів оксиду азоту NO_x , забезпечуючи необхідну кількість кисню для окислення оксиду вуглецю CO та поглинання кисню. Енергія активації оксиду церію CeO_2 спалює запас вуглецю в циліндрі двигуна, це знижує рівень незгорілих вуглеводнів.

Суміш біодизельного палива (B5), що складається з 5% чистого біодизеля та 95% нафтового дизельного палива та 90 ppm оксиду церію CeO_2 дала такі результати: питома витрата палива BSFC зменшилася на 16%. ККД збільшився на 11%. Шкідливі викиди зменшились: оксиду вуглецю CO на 51%, HC - незгорілих вуглеводнів на 45%, оксиду азоту NO_x на 27% у порівнянні з викидами чистого біодизельного палива [24].

Додавання в біодизельне паливо наночастинок CeO_2 в концентраціях 20-80 ppm підвищують ККД двигуна. Максимально ККД двигуна збільшився при додаванні 80 ppm. наночастинок. Викиди вуглеводнів скоротилися приблизно на 25 % - 40 %.

Оксиду міді CuO . Наночастинок оксиду міді CuO використовуються як каталізатори, що характеризуються своєю активністю для різних реакцій газ-тверде тіло. Така висока каталітична активність оксиду міді CuO зумовлена його відновлюваністю та поверхневою реакційною здатністю. Крім того, завдяки своїй низькій вартості та екзотермічним реакціям відновлення як з вуглецем, так і з метаном CH_4 . Тому наночастинок оксиду міді CuO використовуються як каталізатор для переробки ароматичних вуглеводнів.

Паливо РОМЕ20, що містить 100 ppm наночастинок оксиду міді CuO , показало такі результати: питома витрата палива - зниження на 1 %, ККД збільшився на 4 %, HC - вуглеводні - зниження на 8%, оксид вуглецю - зниження на 29 %, оксиди азоту -зниження на 10%, диму- зниження на [25].

Діоксиду титану TiO_2 . При використанні суміші метилового ефіру апельсинової олії з 100 ppm діоксиду титану TiO_2 в порівняно з чистим паливом метилового ефіру апельсинової олії при найвищому

навантаженні двигуна отримали збільшення ККД двигуна 3 %, значне зниження рівня викидів вихлопних газів : для диму на 24,2 %, для оксиду азоту на 9,7 %, для оксиду вуглецю на 18,4 % і для вуглеводнів на 16 %, при найвищому навантаженні двигуна [26].

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ). ВНТ використовуються як добавка до біодизеля для підвищення ефективності згоряння. Вуглецеві нанотрубки - це порожнисті циліндри, що складаються з атомів вуглецю. Два типи нанотрубок, відрізняються порядком розташування графенових циліндрів: лише один шар графенових циліндрів, або мають багато шарів (приблизно 50). ВНТ додають для покращення процесу горіння суміші та зменшення кількості шкідливих продуктів у вихлопних газах. ВНТ мають здатність затримувати вільні радикали, а вуглецеві волокна можуть діяти як антидетонаційна добавка. Додавання ВНТ в дизельні двигуни призводить до збільшення цетанового числа та прискорення згоряння.

Суміш JBD20 з 50 ppm ВНТ показала збільшення ККД на 34,9 % і зменшення питомої витрати палива на 20,8 % порівняно з дизельним паливом. Крім того, помітно знизився рівень незгорілих вуглеводнів, оксиду азоту, оксиду вуглецю [27].

Висновки

Застосування суміші металевих енергетичних частинок на нанорівні в біодизельних сумішах є перспективним напрямком. Додавання нанорозмірних наночастинок у різних кількостях до дизельного палива або біодизельного палива сприяє зниженню питомих витрат палива, покращенню ККД та подальшому зменшенню викидів оксиду вуглецю, незгорілих вуглеводнів та оксиду азоту. Це допомагає подолати недоліки експлуатації двигунів на дизельному та суміші дизельного палива з чистим біодизельним паливом.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Pířtřek V., Kuřcera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 224. 120221.
2. Choi S.U., Eastman J.A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Developments and Application of Non-Newtonian Flows. *ASME Journal of Heat Transfer*. 1995. Vol. 66. P. 99-105.
3. Venkatesan H. et al. A comprehensive review on the effect of nano metallic additives on fuel properties, engine performance and emission

characteristics. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2017. Vol. 7(2). P. 825-843.

4. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації судових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива. *Суднові енергетичні установки: наук-техн. зб. Одеса: НУ «ОМА»*. 2024. Вип. 48. С. 100-113.

5. Arockiasamy P., Anand R.B. Performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine fuelled with nanoparticle blended jatropha biodiesel. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 59 (2). P. 88-93.

6. Sadhik Basha J., Anand R. The influence of nano additive blended biodiesel fuels on the working characteristics of a diesel engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2013. Vol. 35 (3). P. 257-264.

7. Banapurmath N., et al. Effect of silver nano-particle blended biodiesel and swirl on the performance of diesel engine combustion. *Int J Sustain Green Energy*. 2014. Vol. 3 (6). P. 150-157.

8. Banapurmath N., Sankaran R., Tumbal A., Narasimhalu N., Hunshyal A., Ayachit N. Experimental investigation on direct inj. diesel engine fuelled with graphene, silver and multiwalled carbon nanotubes-biodiesel blended fuels. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*. 2014. Vol. 3 (4). P. 129-138.

9. Bhagwat V.A., Pawar C., Banapurmath N. Graphene nanoparticle-biodiesel blended diesel engine. *International journal of engineering research and technology*. 2015. Vol. 4 (2).

10. Kannan G., Karvembu R., Anand R. Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel. *Appl. Energy*. 2011. Vol. 88. P. 3694-3703.

11. Balaji G., Cheralathan M. Effect of CNT as additive with biodiesel on the performance and emission characteristics of a DI diesel engine. *International Journal of ChemTech Research*. 2015. Vol. 7 (3). P. 1230-1236.

12. Aalam C.S., Saravanan C. Effects of nano metal oxide blended Mahua biodiesel on CRDI diesel engine. *Ain Shams Eng. J.* 2017. Vol. 8 (4). P. 689-696.

13. Hong K.S., Hong T.K., Yang H.S. Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles. *Appl Phys Lett*. 2006. Vol. 88(3). 031901.

14. Amrollahi A., Hamidi A.A., Rashidi A.M. The effects of temperature, volume fraction and vibration time on the thermo-physical properties of a carbon nanotube suspension (carbon nanofluid). *Nanotechnol.* 2008. Vol. 19(31). 315701.

15. Li X., Zhu D., Wang X. Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions. *J Colloid Interf Sci.* 2007. Vol. 310(2). P. 456–463.

16. Shanbedi M., Heris S.Z., Maskooki A. Experimental investigation of stability and thermophysical properties of carbon nanotubes suspension in the presence of different surfactants. *J Therm Anal Calorim.* 2015. Vol. 120(2). P. 1193–201.

17. Xia G., Jiang H., Liu R., Zhai Y. Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/de-ionized water nanofluids. *Int J Therm Sci.* 2014. Vol. 84. P. 118–124.

18. Sathiamurthi P., Vinith K.S.K., Sivakumar A. Performance and emission test in CI engine using magnetic fuel conditioning with nano additives. *Int J Rec Technol Eng.* 2019. Vol. 8(3). P. 7823–6.

19. Venu H., Appavu P. Al₂O₃ nano additives blended Polanga biodiesel as a potential alternative fuel for existing unmodified DI diesel engine. *Fuel.* 2020. Vol. 279. 118518.

20. Raju V.D., et al. An experimental study on the effect of nanoparticles with novel tamarind seed methyl ester for diesel engine applications. *Energy conversion and management.* 2018. Vol. 164. P. 655–666.

21. Soudagar M.E.M., et al. An investigation on the influence of aluminium oxide nano-additive and honge oil methyl ester on engine performance, combustion and emission characteristics *Renew. Energy.* 2020. Vol. 146. P. 2291–2307.

22. El-Seesy A.I., Attia A.M., El-Batsh H.M. The effect of Aluminum oxide nanoparticles addition with Jojoba methyl ester-diesel fuel blend on a diesel engine performance, combustion and emission characteristics. *Fuel.* 2018. Vol. 224. P. 147–166.

23. Attia A.M., et al. Effects of alumina nanoparticles additives into jojoba methyl ester-diesel mixture on diesel engine performance. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers.* 2014.

24. Khalife E., Tabatabaei M., Najafi B., Mirsalim S.M., Gharehghani A., Mohammadi P., et al. A novel emulsion fuel containing aqueous nano cerium oxide additive in diesel–biodiesel blends to improve diesel engines

performance and reduce exhaust emissions: Part I – Experimental analysis. *Fuel*. 2017. Vol. 207. P. 741–750.

25. Perumal V., Ilangkumaran M. The influence of copper oxide nano particle added pongamia methyl ester biodiesel on the performance, combustion and emission of a diesel engine. *Fuel*. 2018. Vol. 232. P. 791-802.

26. Kumar A.M., Kannan M., Nataraj G. A study on performance, emission and combustion characteristics of diesel engine powered by nano-emulsion of waste orange peel oil biodiesel. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 146. P. 1781-1795

27. Badawy T., et al. Selection of second-generation crop for biodiesel extraction and testing its impact with nano additives on diesel engine performance and emissions. *Energy*. 2021. Vol. 237. 121605.