

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА**

Дараков Денис Сергійович



УДК536.46

**СПАЛАХУВАННЯ ТА ГОРІННЯ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНИХ
БЮПАЛИВ**

01.04.17 – хімічна фізика, фізика горіння та вибуху

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі загальної та хімічної фізики Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Копійка Олександр Кузьмич,

професор кафедри загальної та хімічної фізики

Одеського національного університету

імені І. І. Мечникова

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор

Роганков Віталій Борисович,

професор кафедри прикладної фізики та

електротехнологій Одеської національної академії

харчових технологій

кандидат фізико-математичних наук,

Кіро Сергій Анатолійович,

провідний науковий співробітник Фізико – хімічного

інституту захисту довколишнього середовища і

людини МОН і НАН України

Захист відбудеться «27» листопада 2015р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.051.01 Одеського національного університету імені І. І. Мечникова за адресою: 65082, м. Одеса, вул. Пастера, 42, ОНУ ім. І. І. Мечникова, фізичний факультет, аудиторія 22.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного університету імені І. І. Мечникова за адресою: 65082, Одеса, вул. Преображенська, 24.

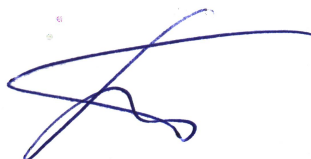
Автореферат розісланий «26» жовтня 2015 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Д 41.051.01,

доктор фізико-математичних наук



О. В. Тюрін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження процесів спалахування та горіння рідких вуглеводних палив на сьогоднішній день є одним з фундаментальних напрямків фізики горіння. Актуальність цього напрямку забезпечується постійним прогресом в галузі хімічної фізики, результатом якого є синтез нових, альтернативних, відновлюваних біопалив, які за своїми властивостями перевершують традиційні моторні палива нафтового походження.

Незважаючи на це, застосування рідких біопалив в якості однокомпонентних палив для двигунів внутрішнього згоряння широкого поширення поки не отримало, насамперед через проблеми експлуатаційного та економічного характеру. Складнощі з реалізацією ідеї заміни нафтопродуктів (бензин, дизельне паливо) на відновлювані біопалива обумовлені розходженням в їх фізико - хімічних властивостях. В деяких випадках це розходження виявилось досить істотним і не могло не позначитися на якості організації процесів спалахування і горіння в камері згоряння сучасних двигунів. Тому на практиці часто використовуються двокомпонентні суміші - палива нафтового походження з невеликими добавками біопалив. Однак, застосування такого суто емпіричного підходу, за відсутності уявлень про механізм впливу добавок біопалив на основні характеристики процесів, що мають місце в камері згоряння ДВЗ, роблять неефективним будь-який подальший науковий пошук, спрямований на збільшення частки біопаливної компоненти в паливній суміші. У зв'язку з цим, через складність характеру процесів, одночасно протікаючих при горінні рідких паливних сумішей, дослідження механізму впливу добавок біопалив на ці процеси не втратили своєї актуальності.

Вирішенню деяких окремих задач, пов'язаних з дослідженням процесів спалахування і горіння рідких палив, присвячені теоретичні та експериментальні роботи Г. А. Варшавського, Б. І. Хайкіна, Ю. М. Григор'єва, В. А. Федосєєва, Ф. А. Вільямса, У. І. Гольдшрегера та інших. Слід зазначити, що у роботах цих та інших авторів не розглядалися процеси спалахування двох і трикомпонентних палив. Також в літературі представлено вкрай мало інформації щодо впливу вигорання окислювача при горінні різних горючих, що необхідно для розуміння проблеми в цілому. Вочевидь, що перспективи розвитку теорії спалахування краплі рідких палив пов'язані з урахуванням параметру мультикомпонентності пального, а в теорії горіння – дослідження впливу вигорання окислювача на основні характеристики процесу, що є необхідним для розвитку моделі горіння сукупності крапель.

У дисертації сформульовані задачі, спрямовані на детальне вивчення критичних умов спалахування, виявлення особливостей процесів високотемпературного спалахування та горіння крапель сумішей дизельного

палива (MD) з рапс-метиловим ефіром (RME) та біоетанолом (А). Для вирішення цих задач було використано відомі та вдосконалені експериментальні методики, розроблені теоретичні моделі процесів спалахування та горіння крапель біопаливних сумішей у критичних та надкритичних умовах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження було виконано на кафедрі загальної і хімічної фізики та Інституті горіння та нетрадиційних технологій ОНУ імені І. І. Мечникова, в рамках держбюджетної науково – дослідної роботи (теми № 218 «Оптимізація процесів спалахування і горіння біопалив та їх сумішів з мінеральними паливними», номер державної реєстрації 0111U006700).

Мета роботи: з'ясування основних особливостей процесів спалахування і горіння крапель (RME) і його сумішей з (MD) та (А), встановлення механізму і ступеню впливу різних факторів на найбільш важливі характеристики процесів спалахування і горіння крапель біопалив, розробка рекомендацій щодо складу мультикомпонентних паливних сумішей з оптимальними моторними та екологічними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети було потрібно розв'язати наступні **задачі** дослідження:

- створення експериментального стенду для проведення досліджень процесів спалахування і горіння крапель досліджуваних палив в широкому температурному інтервалі;
- експериментальне визначення критичних умов спалахування індивідуальних крапель біопалив та проведення оцінки величини ефективної енергії активації реагування пари (RME) і його сумішей з (MD) у повітрі;
- встановлення механізму та ступеню впливу складу суміші на тривалість затримки спалахування крапель мультикомпонентних біопалив;
- розроблення моделі горіння аерозавису крапель біопалив і з'ясування впливу коефіцієнта надлишку окислювача, як одного з керуючих параметрів, на величину часу і температури горіння аерозавису;
- проведення порівняльного аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесів спалахування і горіння крапель досліджуваних палив та розроблення рекомендації щодо оптимального складу мультикомпонентних сумішей біопалив.

Об'єкт дослідження: процеси спалахування та горіння крапель дизельного пального з добавками рапс-метилового ефіру та біоетанолу.

Предмет дослідження: вплив фізико-хімічних властивостей біопалив на процеси спалахування та горіння крапель мультикомпонентних біопалив.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі задач використовувалися теоретичні - при побудові моделей спалахування і горіння

крапель вуглеводневих палив і експериментальні методи - метод підвішеної краплі для виявлення основних особливостей процесів спалахування і горіння крапель біопаливних сумішей. Крім того, для перевірки отриманих результатів використовувалися методи комп'ютерного моделювання процесу спалахування краплі рідкого палива в широкому діапазоні параметрів задачі.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Вперше проведені експериментальні та теоретичні дослідження процесу спалахування сумішевих біопалив. Аналіз даних, отриманих в результаті дослідження критичних умов спалахування індивідуальних крапель (RME), (MD), а також їх сумішей, дозволив провести оцінки величини ефективної енергії активації реагування парів досліджених палив з киснем повітря. Показано, що при збільшенні частки рапс-метилового ефіру в біопаливній суміші, величина ефективної енергії активації палива знижується. Проте використання невеликих добавок (не більших за 10%) рапс-метилового ефіру до дизельного палива не впливає суттєво на значення ефективної енергії активації сумішевого біопалива.
- В рамках квазістаціонарного підходу досліджено вплив теплофізичних властивостей компонентів паливних сумішей та їх складу на час затримки спалахування краплі. Встановлено, що в умовах інертного прогріву краплі, добавки легкокиплячого етанолу до дизельного палива зменшують тривалість періоду що передує спалахуванню, а добавки метилового ефіру рапсової олії навпаки, збільшують її. На підставі цього був запропонований оптимальний для найбільш економічної роботи дизельного двигуна склад паливної суміші.
- Розроблено нову теоретичну модель горіння аерозавису крапель рідких біопалив. Детально досліджена залежність часу горіння аерозавису від початкового значення коефіцієнта надлишку окислювача. Проаналізовано вплив коефіцієнта надлишку окислювача в діапазоні значень від 1,7 до 4 на величину температури горіння крапель в рамках моделі горіння краплі в адіабатичній оболонці з урахуванням стефанівської течії.
- Вперше проведені експериментальні дослідження з визначення впливу коефіцієнта надлишку окислювача на час горіння біопалив. Має місце добре якісне і кількісне узгодження експериментальних даних по визначенню залежності часу горіння крапель від величини коефіцієнта надлишку окислювача, і даних теоретичного розрахунку. Показано, що час горіння крапель рапс-метилового ефіру виявився менше, ніж для крапель дизельного палива, за інших однакових умов.
- Отримані в рамках модельних уявлень припущення щодо способу вдосконалення паливних сумішей, шляхом зміни їхнього складу, знайшли своє експериментальне підтвердження в стендових випробуваннях. А саме,

найменше значення питомої паливної витрати має місце для трикомпонентної суміші (MD) з 5% добавками (RME) і (A).

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути використані при вирішенні широкого спектру завдань в галузі альтернативної енергетики, оскільки використання рідких біопалив є одним з найбільш важливих і перспективних напрямків останньої. Практична цінність цих результатів полягає в тому, що, змінюючи склад паливної суміші, можна впливати на основні характеристики процесів спалахування та горіння рідких мультикомпонентних біопалив, і, як наслідок цього, мінімізувати витрату палива і покращити екологічні показники продуктів згоряння двигунів без застосування до них будь-яких конструктивних змін.

Особистий внесок здобувача. Спільно з науковим керівником сформульована мета і завдання досліджень. Внесок автора полягає у розвитку існуючих та розробці нових методологічних підходів до досліджень процесів спалахування і горіння рідких палив, у плануванні та проведенні експериментів, розробці експериментальних методик і теоретичних моделей, аналізі отриманих результатів. Інтерпретація та узагальнення експериментальних результатів, а також формулювання висновків проведені спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на XX, XXII, XXIV та XXVI конференціях країн СНД «Дисперсные системы» (м. Одеса, 2002 р., 2006 р., 2010 р., 2014 р.), V, VI, XIV Мінських міжнародних форумах по тепло- і масообміну (Білорусь, м. Мінськ, 2004 р. 2008 р. 2012 р.), міжнародній науковій конференції «Ломоносовские чтения» (м. Севастополь, 2007 р.), XII International Conference «Development Of Agricultural Technologies And Technical Means In Ecological And Energetic Aspects» (Raudondvaris, Lithuania, 2007), V Російській національній конференції по теплообміну (м. Москва, 2010 р.) XV міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики і екології» (м. Одеса, 2013 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 16 публікаціях. Серед них 6 статей у фахових журналах, визнаних ДАК України та закордонних журналах, 10 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм становить 137 сторінок машинописного тексту, який ілюстрований 48 рисунками та 14 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована важливість та актуальність дослідження, сформульовані його мета і задачі, вказані об'єкт, предмет, методи досліджень, визначені наукова новизна і практична цінність результатів роботи.

У **першому розділі** надано огляд основних теоретичних та експериментальних робіт за темою дисертації. Приведена загальна класифікація біопалив, наведені економічні та екологічні переваги біопалив перед паливами нафтового походження. Представлений аналіз динаміки зростання виробництва біопалив в країнах Євросоюзу за останнє десятиріччя. Розглянуто вплив відмінностей в основних фізико-хімічних та реологічних властивостях біопалив з рослинних олій, (RME) та (MD), на процеси які протікають в дизельних двигунах під час їх роботи. Проаналізовані причини негативних наслідків від застосування рапс-метилового ефіру як основного монокомпонентного палива для дизельних двигунів. Наведено огляд та аналіз результатів класичних робіт з теоретичних та експериментальних досліджень процесів спалахування та горіння крапель рідких вуглеводних палив.

Другий розділ присвячений дослідженням процесу спалахування крапель двох та трьохкомпонентних біопалив. Наведено експериментальні методики з визначення критичних умов спалахування та залежності періоду затримки спалахування крапель сумішевих біопалив від температури навколишнього середовища в надкритичних умовах.

Аналіз даних експериментальних досліджень по визначенню критичної температури спалахування в залежності від початкового розміру крапель чистих та сумішевих палив показав, що найвищу критичну температуру спалахування має (MD), а добавки (RME) до (MD) знижують цю величину. За відомою методикою [1], проведена оцінка величини ефективної енергії активації реагування парів досліджуваних палив з киснем повітря та показано що найбільше значення E характерно для (MD), а найменше - для (RME) (табл. 1). Показано, що для сумішевих біопалив експериментальні оцінки величини ефективної енергії активації непогано корелюють з даними розрахунку E_{add} за адитивною властивістю.

Таблиця 1.

Ефективні значення енергії активації досліджуваних палив

Паливо	E_{add} , ккал/моль	$E_{експ.}$, ккал/моль
100%(RME)	-	30,1
100%(MD)	-	49,9
50%(MD)+50%(RME)	40,0	39,4
70%(MD)+30%(RME)	43,9	42,3
90%(MD)+10%(RME)	47,9	47,0

У цьому ж розділі розглянута квазістаціонарна модель спалахування індивідуальних крапель вуглеводних палив. Якщо відмовитися від використаного в [2] розкладання в ряд експоненційної залежності для температури поверхні краплі у момент спалахування, то більш точний, порівнянно з класичним, вираз для визначення величини часу затримки спалахування τ_{ign} , має наступний вигляд:

$$\tau_{ign} = \frac{\rho_l c_{pl} r_0^2}{3\lambda_2} \ln \left(\frac{T_\infty - T_0}{T_\infty - T_b} \right), \quad (1)$$

де індекс 1 відноситься до рідкої фази, а індекс 2 до парів, r_0 – початковий радіус краплі; ρ_l – густина рідини; c_{pl} – питома теплоємність рідини; λ_2 – коефіцієнт теплопровідності парів палива; T_0 – температура краплі в початковий момент часу; T_b – температура кипіння палива; T_∞ – температура навколишньої середи.

Оскільки значення теплофізичних властивостей, які входять в (1) не приведені в літературі, вони були розраховані за відомими методами [3].

Аналіз оцінок за виразом (1) для крапель сумішевих біопалив з початковим розміром $r_0 = 1,125 \text{ мм}$ показав, що введення домішок (RME) до (MD) збільшує, а (A) до (MD) – навпроти, зменшує час затримки спалахування біопаливної суміші.

Також у цьому розділі наведені результати експериментальних досліджень залежності величини періоду затримки спалахування крапель (MD) та його сумішей з (RME) та (A) від температури навколишньої середи. Дані експериментів при температурі $T_\infty = 965 \text{ K}$ для початкового розміру крапель $r_0 = 1,125 \text{ мм}$ наведені для порівняння з даними розрахунку за виразом (1) в табл.2.

Таблиця 2.

Порівняльний аналіз значень величин τ_{ign} для крапель сумішевих біопалив

Паливо	$\tau_{ign}, \text{ C}$ розрахунок за (1)	$\tau_{ign}, \text{ C}$ експеримент
100%(MD)	4,39	3,13
100%(RME)	7,67	3,68
100%(MD)+5%(A)	4,23	2,68
90%(MD)+10%(RME)	4,57	3,29
90%(MD)+10%(RME)+5%(A)	4,39	3,06

Аналіз цих даних показав, що спільне використання (A) і (RME) як добавки до (MD), наближає час затримки спалахування крапель сумішевого біопалива до значення характерних для чистого (MD).

З метою перевірки результатів отриманих в рамках квазістаціонарної моделі спалахування крапель рідких палив була розглянута нестационарна задача з нелінійними рівняннями тепло-масопереносу [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_1}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) - k_0 c_1 c_2 \exp \left(-\frac{E}{RT} \right); \\ \frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q \frac{k_0 c_1 c_2}{\rho_1 c_p^{gas}} \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \end{cases}; \quad (2)$$

з крайовими умовами:

$$t = 0; r \geq r_0; T(r, 0) = T_\infty, c_1(r, 0) = 0; r \rightarrow \infty; T(\infty, t) \rightarrow T_\infty, c_1(\infty, t) \rightarrow 0;$$

$$r = r_0; T_1 = T_\infty \left[1 - \left(1 - \frac{T_0}{T_\infty} \right) \exp \left(-\frac{3\lambda^{liq} t}{\rho c_p^{liq} r_0^2} \right) \right]; c_{10} = \frac{P_0}{RT_1} \exp \left[\frac{H}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_1} \right) \right],$$

де c_1 – концентрація палива; c_{10} – концентрація палива на поверхні краплі; c_2 – концентрація окислювача; c_p^{gas} – питома теплоємність пари палива; c_p^{liq} – питома теплоємність краплі; λ^{liq} – коефіцієнт теплопровідності краплі; H – молярна теплота випаровування палива; k_0 – предекспоненційний множник; T_b – температура кипіння; T_1 – температура краплі; T_0 – температура краплі в початковий момент часу; P_0 – повний тиск в системі; Q – тепловий ефект реакції; a – коефіцієнт температуропровідності; D – коефіцієнт дифузії; ρ – густина краплі.

Показано, що результати розрахунків величини періоду затримки спалахування краплі (RME) за квазістаціонарною (1) та нестационарною (2) моделями якісно добре збігаються одне з одним, та з даними експериментів (рис. 2). Це дає підстави вважати правомірним використанню виразу для оцінки часу затримки спалахування крапель біопаливних сумішей.

У **третьому розділі** наведені результати теоретичного та експериментального досліджень процесу горіння крапель (RME) та (MD).

Розроблена квазістаціонарна модель дифузійного горіння аерозависих крапель рідких біопалив у наближенні адіабатичної оболонки з урахуванням стефанівського потоку та без нього [4]. Аерозавис моделюється умовою, що

кожна крапля знаходиться в адіабатичній оболонці в оточенні подібних до себе (рис. 3).

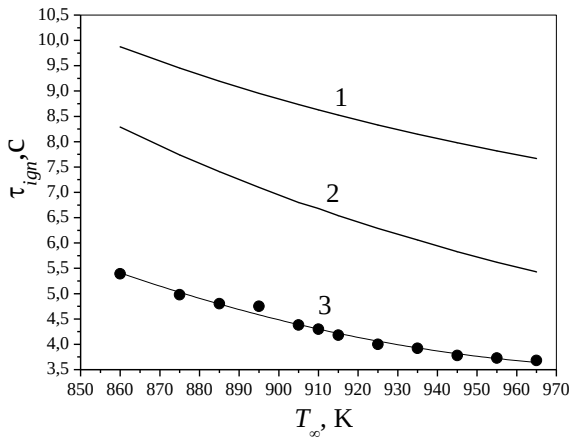


Рис. 2. Залежність періода затримки спалахування краплі (RME), $r_0=1,125$ мм. 1 – розрахунок за виразом (1); 2 – розрахунок за виразом (2); 3 – експеримент.

Газовий простір всередині адіабатичної оболонки умовно розділяється зоною горіння на дві області. В першій області має місце дифузія пари пального з поверхні краплі до зони хімічної реакції. В другій області потік окислювача направлений до фронту горіння.

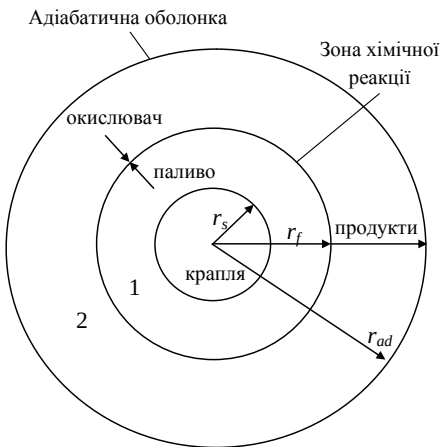


Рис. 3. Модель горіння краплі рідкого пального в адіабатичній оболонці. r_s , r_f , r_{ad} – радіус краплі, зони горіння та адіабатичної оболонки відповідно.

В рамках квазістаціонарної моделі дифузійного горіння аерозавису крапель рідких біопалив у наближенні адіабатичної оболонки були отримані вирази для часу t_b та температури T_f горіння крапель палив в залежності від початкового значення коефіцієнту надлишку окислювача α^* :

$$t_b = \frac{r_s}{r_f} \frac{\rho_d}{\rho_g} \frac{L}{2D_2 m_2^\infty \left(1 - \frac{1}{\alpha^*}\right)} r_0^2; \quad (3)$$

$$T_f = T_{g0} + \frac{Q}{LC_{p2}} \frac{D_2}{a_2} m_2^\infty \left(1 - \frac{1}{\alpha^*}\right), \quad (4)$$

де індекс 1 відноситься до палива, 2 – до окислювача, L – стехіометричний коефіцієнт, m_2^∞ - масова частка окислювача в газі, T_{g0} – температура газу на границі адіабатичної оболонки.

Як впливає з аналізу представлених в оглядовій частині дисертації класичних робіт, неоднозначною є роль яку відіграє стефанівська течія при моделюванні процесів горіння крапель або частинок пального. З огляду на це було враховано вплив стефанівського потоку на залежності часу і температури горіння від початкового значення коефіцієнта надлишку окислювача. Внаслідок чого, ці вирази мають наступний вигляд:

$$t_b = \frac{r_s}{r_f} \frac{v_2}{v_1} \frac{\rho_d \gamma_f}{2M_1 \frac{pD_2}{RT} \ln \left(\left(1 - 0,21 \cdot \gamma_f \left(1 - \frac{1}{\alpha^*} \right) \right)^{-1} \right)} r_0^2; \quad (5)$$

$$T_f = T_{g0} - \frac{v_1}{v_2} \frac{QLe}{\gamma_f C_{p2}} \ln \left(1 - 0,21 \cdot \gamma_f \left(1 - \frac{1}{\alpha^*} \right) \right), \quad (6)$$

де γ_f - відносна зміна числа молей газу внаслідок хімічної реакції, γ_s - відносна зміна числа молей внаслідок випаровування.

Із порівняння даних розрахунків по виразам (3) - (6), проведена оцінка впливу стефанівської течії на час та температуру горіння (RME) та (MD). Відповідні дані для залежності часу горіння від початкового значення коефіцієнта надлишку окислювача представлені на рис. 5 та 6, а для залежності температури горіння від коефіцієнта надлишку окислювача – на рис. 7 та 8.

Приведене пояснення перетину розрахункових кривих 1 і 2 на рис. 5, 6 для обох досліджених палив. А саме, при відносно невеликих значеннях

коефіцієнта надлишку окислювача, як видно рис. 7 і рис. 8, зона горіння має досить низьку температуру, що призводить до наявності малого теплового потоку від зони горіння до краплі, та як наслідок, збільшення часу горіння крапель в цих умовах. Окрім іншого, стефанівський потік відносить тепло від зони горіння в область 2 і перешкоджає дифузії окислювача до зони горіння. Це ще в більший мірі збільшує час горіння (область $\alpha^* < 2,2 \div 2,5$). Із збільшенням значення α^* температура зони горіння зростає, тепловий потік від зони горіння до краплі збільшується, відбувається інтенсифікація процесу дифузії парів палива до зони горіння, і час горіння крапель зменшується.

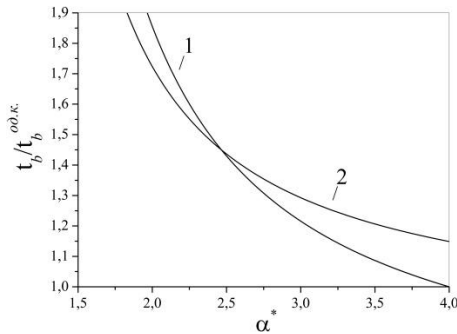


Рис. 5. Залежність величини $t_b/t_b^{од.к.}$ від α^* для (RME). 1 – розрахунок за (3), 2 – розрахунок за (5).

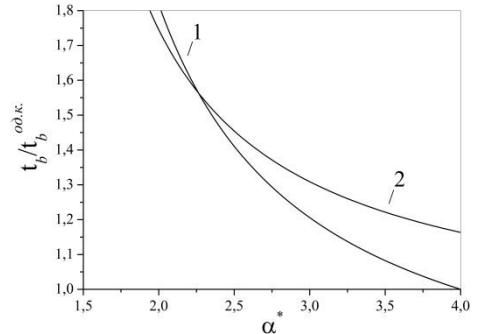


Рис. 6. Залежність величини $t_b/t_b^{од.к.}$ від α^* для (MD). 1 – розрахунок за (3), 2 – розрахунок за (5).

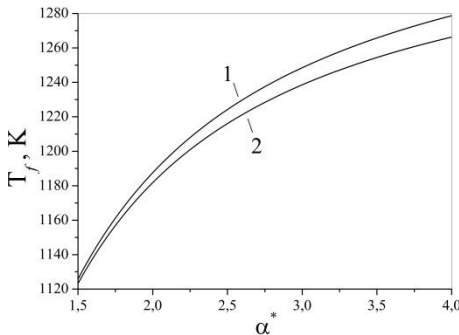


Рис. 7. Залежність величини T_f від α^* для (RME). 1 – розрахунок за (4), 2 – розрахунок за (6).

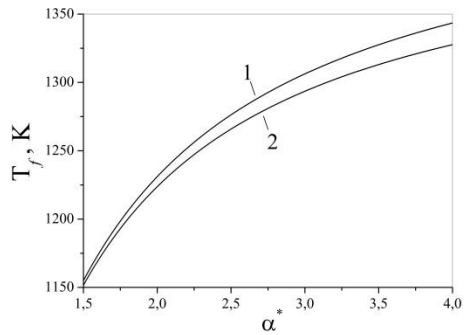


Рис. 8. Залежність величини T_f від α^* для (MD). 1 – розрахунок за (4), 2 – розрахунок за (6).

При $\alpha^* > 2,2 \div 2,5$, із подальшим зростанням температури горіння, збільшується прогрів області 2, що призводить до збільшення коефіцієнта дифузії окислювача до зони горіння і, відповідно, до зменшення часу горіння крапель.

Також у цьому розділі наведені результати експериментальних досліджень залежності величини часу горіння від початкового значення коефіцієнта надлишку окислювача для (RME) і (MD) (рис. 9). Як видно з аналізу цих даних, час горіння для крапель (RME) виявилися меншим, ніж для (MD) приблизно на 10% при рівних значеннях коефіцієнта надлишку окислювача. Це ймовірно пов'язано з наявністю атомів кисню в складі молекули (RME), що фактично підвищує реальне значення коефіцієнта надлишку окислювача в суміші.

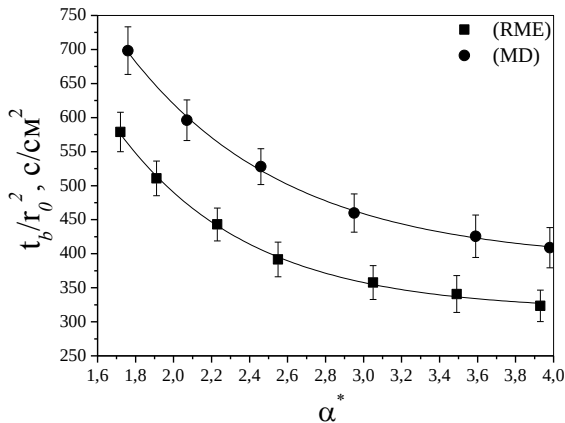


Рис. 9. Залежність величини t_b/r_0^2 від початкового значення коефіцієнта надлишку окислювача α^* для (RME) и (MD).

Приведені результати співставлення даних теоретичних і експериментальних досліджень процесів спалахування і горіння біопалив з даними натурних випробувань на дизельному стенді KI5542. Показано, що скорочення витрати паливної суміші при 5% добавці біопалив в порівнянні з витратою для базової паливної компоненти суміші – $\Delta g_c / g_c$, становило, залежно від типу суміші і навантаження на двигун, від 4 до 11%. Найсильніше цей ефект був виражений при роботі двигуна із середнім навантаженням ($P_e = 18 \text{кВт}$) на сумішах, які містять (А) в якості добавки, що забезпечило економію паливної суміші на рівні 10-11%.

Було встановлено, що при порівнянні питомої витрати паливних сумішей, які містять в якості добавок біопалива, з витратою пального при роботі двигуна на (MD) без домішок, як видно з рис. 10, п'ятивідсоткова добавка до (MD) як (RME), так і (А), кожна окремо, зменшує питому витрату

двокомпонентної суміші (перша точка даних (1) і дані (5), відповідно) в порівнянні з чистим (MD) (пунктирна лінія). Аналіз цих же даних показав, що при подальшому збільшенні вмісту добавки біопалива в суміші з дизельним паливом така тенденція порушується, питома витрата палива зростає (дані (5)) – 10% добавка (A) до (MD) вже ніякого ефекту не дає.

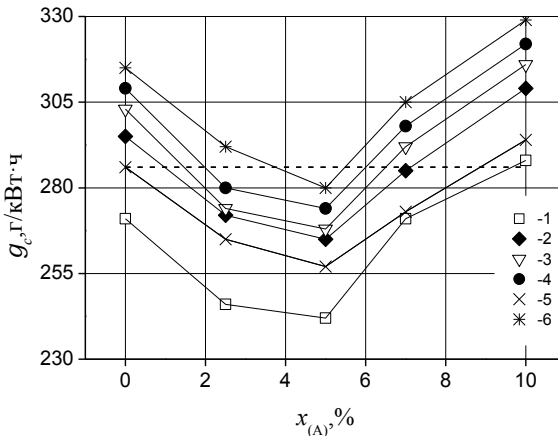


Рис. 10. Залежність питомої витрати трикомпонентних паливних сумішей g_c від об'ємної концентрації добавки (A) при ефективній потужності двигуна $P_e = 18$ кВт: (1) - суміш 95% (MD) + 5%(RME); (2) - суміш 70% (MD) + 30%(RME); (3) - суміш 50% (MD) + 50% RME; (4) - суміш 20% (MD) + 80%(RME) з добавками (A); (5) - суміш (MD) з добавками (A); (6) - суміш (RME) з добавками (A). Пунктирна лінія - витрата пального при роботі двигуна на (MD) без домішок.

У той-же час, збільшення вмісту біопалива в трикомпонентній суміші за рахунок добавки 5% (A) до суміші 95% (MD) + 5% (RME), навпаки, дозволило досягти найбільшого ефекту економії палива – (15%). В умовах, коли величина кута випередження вприскування палива не змінювалася, такий ефект виглядає цілком передбачуваним на фоні спрогнозованої розрахунками і виявленої в модельних експериментах компенсаторної дії добавок (RME) і (A) до (MD) на час затримки спалахування трикомпонентної суміші.

Такий результат опосередковано збігається з висновками, отриманими при аналізі розрахункових оцінок і експериментальних даних для часу затримки спалахування і часу горіння крапель досліджуваних горючих, що дозволяє вважати задовільною їх ступінь кореляції з реальними процесами, що відбуваються в камері згоряння.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що при збільшенні процентного вмісту рапс-метилового ефіру (RME) у біопаливній суміші, критична температура спалахування і величина ефективної енергії активації реагування парів палив з киснем повітря знижується в порівнянні зі значеннями аналогічних величин для чистого дизельного палива (MD). Виявлено, що величина ефективної енергії активації для сумішевих палив має адитивну властивість.

2. Теоретично передбачена і експериментально підтверджена роль складу паливної суміші в процесі спалахування крапель мультикомпонентних біопалив. А саме, добавки (RME) до (MD) підвищують, а добавки біоетанолу (A) до (MD) навпаки, знижують час затримки спалахування крапель паливної суміші. Найбільш близьке до (MD) значення тривалості періоду, що передуює спалахуванню, має місце при одночасному використанні (RME) і (A) як добавки до (MD), що дає можливість використання цієї біопаливної суміші без внесення конструктивних змін до серійних дизельних двигунів.

3. Хороша якісна і цілком задовільна кількісна відповідність між даними розрахунку часу затримки спалахування краплі палива по моделі в рамках нестационарного і квазістационарного підходів та експериментальними результатами, говорить на користь використання достатньо простого аналітичного виразу, запропонованого для оцінки величини періоду затримки спалахування в умовах температур, які приблизно на 100 градусів перевищують критичну температуру спалахування крапель палива.

4. В рамках запропонованої моделі горіння аерозавису крапель рідких палив встановлено вплив початкового значення коефіцієнта надлишку окислювача на величину часу і температури горіння аерозавису біопалив. Показано, що в інтервалі значень коефіцієнта надлишку окислювача від 2,5 до 4, вклад стефанівського потоку в розрахунки значення часу горіння крапель досліджуваних палив стає більш істотним внаслідок інтенсифікації процесу перенесення окислювача до зони горіння.

5. Вперше проведені експериментальні дослідження з визначення залежності часу горіння крапель (MD) і (RME) від величини початкового значення коефіцієнта надлишку окислювача α^* . Передбачене в розрахунках і спостережуване в експерименті незначне кількісне розходження в часі горіння крапель досліджуваних палив (при постійному значенні α^*), дозволяє рахувати неістотним вплив варіацій складу паливної суміші на величину часу горіння.

6. Отримані в рамках модельних уявлень припущення щодо способу оптимізації експлуатаційних характеристик паливних сумішей, шляхом варіації їх складу, знайшли своє експериментальне підтвердження в натурних

випробуваннях. А саме, найменше значення питомої паливної витрати мас трьохкомпонентна суміш (MD) з 5% добавками (RME) і (A). Цей результат дозволяє вважати цілком задовільною ступінь кореляції висновків, отриманих при аналізі розрахункових оцінок і експериментальних даних для часу затримки спалахування і часу горіння крапель досліджуваних палив, з реальними процесами, що протікають в камерах згоряння дизельних двигунів.

СПИСОК ЦИТОВАНИХ РОБІТ

1. Григорьев Ю. М. Испарение и воспламенение *n*-гептана в окислительной среде / Ю. М. Григорьев // Горение дисперсных систем: материалы 3-го Всесоюзного Симпозиума по горению и взрыву. – М.: Наука, 1972. – С. 221–226.
2. Варшавский Г. А. Квазистационарная теория воспламенения капли жидкого топлива / Г. А. Варшавский, Д. В. Федосеев, А. Д. Франк – Каменецкий // Физика аэродисперсных систем. – 1969. – № 1. – С. 101–107.
3. Бретшнайдер С. Теплофизические свойства газов, жидкостей и твердых тел / С. Бретшнайдер, А. М. Шеломенцев, М. Г. Рудин. – М.: Гостоптехиздат, 1964. – 537 с.
4. Хайкин Б.И. Гетерогенное горение / Б. И. Хайкин // Тепломассообмен в процессах горения. – Черноголовка, 1980.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Копейка А. К. Воспламенение одиночной капли рапсово – метилового эфира / А. К. Копейка, В. В. Головки, В. И. Бровченко, **Д. С. Дараков** // Физика аэродисперсных систем. – 2002. – № 39. – С. 103–108.
2. **Дараков Д. С.** Горение капель рапс-метилового эфира в воздухе / Д. С. Дараков, А. Н. Золотко, А. К. Копейка, П. О. Павлюк // Горение и плазмохимия. – 2012. – Т. 10, № 4. – С. 299–304.
3. **Дараков Д. С.** О пределе воспламенения капель смесевых биотоплив в окислительной среде / Д. С. Дараков, А. К. Копейка, А. Н. Золотко, П. О. Павлюк // Горение и плазмохимия. – 2013. – Т. 11, вып. 2. – С. 3–7.
4. **Darakov D. S.** Combustion of a Suspension of Biofuel Droplets in Air / D. S. Darakov, A. N. Zolotko, A. K. Kopeika, P. O. Pavlyuk // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2014. – V. 50, № 5 – P. 523–526.
5. Копейка А. К. Воспламенение капель одноатомных спиртов и метиловых эфиров растительных масел / А. К. Копейка, **Д. С. Дараков**, Ю. А. Олифиренко, Л. Раславичус // Физика аэродисперсных систем. – 2014. – №51. – С. 73–78.

6. Kopeika A. K. Influence of Biofuel Additions on the Ignition Delay of Single Diesel Fuel Drops / A. K. Kopeika, **D. S. Darakov**, V. V. Golovko, A. N. Zolotko, L. Raslavičius, V. M. Lubarskii // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – V. 88, № 4. – P. 948–957.

7. Копейка А.К. Воспламенение капли моторного топлива биодизель / А. К. Копейка, В. В. Головки, В. И. Бровченко, **Д. С. Дараков** // *Дисперсные системы, XX научная конференция стран СНГ: материалы науч. конф., г. Одесса*. – Одесса: Астропринт. – 2002. – С. 146–147.

8. Копейка А.К. Воспламенение и горение одиночной капли рапсово-метилового эфира и его топливных смесей с дизельным топливом / А. К. Копейка, В. В. Головки, В. И. Бровченко, О. Г. Олешко, **Д. С. Дараков** // *V Минский международный форум по тепло- и массообмену, Тезисы докладов и сообщений*. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. – 2004. – Т. 4. – С. 4–14.

9. Копейка А. К. Влияние добавок этанола и рапсо-метилового эфира на процесс воспламенения одиночных капель дизельного топлива / А. К. Копейка, В. В. Головки, А. Н. Золотко, **Д. С. Дараков**, В. М. Любарский, Л. Раславичус // *Дисперсные системы, XXII научная конференция стран СНГ: материалы науч. конф., г. Одесса*. – Одесса: Астропринт. – 2006. – С. 194–195.

10. **Дараков Д. С.** Воспламенение капель биотоплив и их смесей с дизельным топливом / Д. С. Дараков, А. К. Копейка // *Международная научная конференция «Ломоносовские чтения»: материалы конф., г. Севастополь* – 2007. – С. 159–160.

11. Kopeika A. K. The influence of rapeseed methyl ester addition on viscosity of diesel fuel / A. K. Kopeyka, V. V. Golovko, **D. S. Darakov**, D. Y. Zhernovoi // *Development Of Agricultural Technologies And Technical Means In Ecological And Energetic Aspects: 12th International Conference Institute of Agricultural Engineering LUA, Sep. 20-21, 2007, Raudondvaris, Lithuania: Proceedings* – Raudondvaris, 2007. – ISSN 1822-2706. – P. 234–236.

12. Копейка А. К. Воспламенение и горение мультикомпонентных биотоплив / А. К. Копейка, В. В. Головки, А. Н. Золотко, **Д. С. Дараков**, В. М. Любарский, Л. Раславичус // *Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. VI Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докл. и сообщ., г. Минск*. – 2008. – Т. 2. – С. 338–339.

13. **Дараков Д. С.** Критические условия воспламенения одиночных капель рапс-метилового эфира и его смесей с минеральным дизельным топливом / Д. С. Дараков, А. К. Копейка, М. М. Харитова // *Дисперсные системы. XXIV научная конференция стран СНГ: материалы. конф. г. Одесса*. – Одесса: Астропринт. – 2010. – С. 95–96.

14. **Darakov D. S.** Combustion of rapeseed methyl ether droplets in air / D. S. Darakov, A. N. Zolotko, A. K. Kopeika, P. O. Pavlyuk // *XIV Minsk*

International Heat and Mass Transfer Forum MIF 2012, Sep. 10-13, 2012, Minsk, Belarus. – 2012. – P. 5–9.

15. Копейка А. К. Горение газозвесей капель биотоплив / А. К. Копейка, Ю. А. Олифиренко, Д. С. Дараков // Актуальні проблеми енергетики і екології: XV міжнародна науково – технічна конф., 9-11 жовтня 2013 р., м. Одеса: зб. наук. праць. – Одеса: ОНАХТ, 2013. – 248 с.

16. Дараков Д. С. Численное моделирование процесса воспламенения капли рапс-метилового эфира / Д. С. Дараков, А. К. Копейка, Ф. К. Буланін, Ю. А. Олифиренко // Дисперсные системы. XXVI научная конференция стран СНГ: материалы конф., г. Одесса. – 2014. – С. 55.

АНОТАЦІЯ

Дараков Д. С. Спалахування та горіння мультикомпонентних біопалив. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.17 – хімічна фізика, фізика горіння і вибуху. Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, 2015.

В дисертаційній роботі наведені результати експериментальних та теоретичних досліджень процесів спалахування та горіння мультикомпонентних біопаливних сумішей.

Експериментально досліджені критичні умови спалахування індивідуальних крапель рапс-метилового ефіру (RME) та його сумішей з дизельним паливом (MD), проведені оцінки величини ефективної енергії активації реагування пари досліджуваних палив в повітрі.

Значне місце в роботі приділено вивченню впливу теплофізичних властивостей біопаливних сумішей на величину періоду затримки спалахування. В рамках квазістаціонарних моделі інертного прогріву краплі запропонований вираз для розрахунку часу затримки спалахування краплі рідкого палива, яке дозволяє оцінити ступінь впливу основних параметрів задачі на тривалість періоду, що передує спалахуванню. Результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню часу затримки спалахування крапель сумішевих біопалив показали, що спільне використання біоетанолу (A) і (RME) як добавки до (MD), наближає час затримки спалахування краплі суміші до значення для чистого (MD).

Розроблено квазістаціонарну модель дифузійного горіння аерозависю крапель біопалив в наближенні адіабатичної оболонки. В рамках моделі проаналізовано вплив величини коефіцієнта надлишку окислювача в діапазоні значень від 1,7 до 4 на час горіння крапель досліджуваних палив. Проаналізований вплив стефанівської течії на тривалість часу та значення температури горіння крапель досліджуваних палив.

Наведено результати експериментальних досліджень горіння нерухомої краплі пального в повітрі з різним початковим значенням коефіцієнта надлишку окислювача. Показано, що передбачена в розрахунках і спостережувана в експерименті незначна відмінність в часі горіння крапель досліджуваних палив, дозволяє не враховувати вплив складу паливної суміші на величину часу горіння.

Проаналізовано вплив добавок (A) і (RME) до (MD) на величину питомої витрати сумішевого пального, що дозволило оптимізувати паливну рецептуру, використовуючи ефект компенсаторної дії добавок (A) і (RME) до (MD). Було показано, що найбільш суттєве зниження питомої витрати пального має місце для сумішей дизельного палива з невеликими, до 5 -10% за об'ємом добавками біопалив.

Ключові слова: біопаливо, дизельне паливо, біопаливна суміш, крапля, аерозавис, енергія активації, спалахування, горіння.

АННОТАЦИЯ

Дараков Д. С. Воспламенение и горение мультикомпонентных биотоплив. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, физика горения и взрыва. Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, Одесса, 2015.

В диссертационной работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов воспламенения и горения мультикомпонентных биотопливных смесей.

Экспериментально исследованы критические условия воспламенения одиночных капель рапс-метилового эфира (RME) и его смесей с дизельным топливом (MD), проведены оценки величины эффективной энергии активации реагирования паров исследуемых топлив в воздухе. Показано, что небольшие (до 10%) добавки (RME) к (MD) незначительно изменяют величину эффективной энергии активации смесевых биотоплив.

Значительное место в работе уделено изучению влияния теплофизических свойств биотопливных смесей на величину периода задержки воспламенения. В рамках квазистационарной модели инертного прогрева капли предложено выражение для расчета времени задержки воспламенения капли жидкого топлива, которое позволяет оценить степень влияния основных параметров задачи на длительность предвоспламенительного периода. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению времени задержки воспламенения капель смесевых биотоплив показали, что совместное

использование биоэтанола (А) и (RME) в качестве добавок к (MD) приближает время задержки воспламенения капли смеси к значению для чистого (MD).

Разработана квазистационарная модель диффузного горения аэрозвеси капель биотоплив в приближении адиабатической оболочки. В рамках модели проанализировано влияние величины коэффициента избытка окислителя в диапазоне значений от 1,7 до 4 на время горения капель исследуемых топлив. Проанализировано влияние стефановского течения на длительность времени и значение температуры горения капель исследуемых топлив.

Приведены результаты экспериментальных исследований горения неподвижной капли горючего в воздухе с различным начальным значением коэффициента избытка окислителя. Показано, что предсказанное в расчетах и наблюдаемое в эксперименте незначительное отличие во временах горения капель исследуемых топлив, позволяет не учитывать влияние состава топливной смеси на величину времени горения.

Обнаружено влияние добавок этанола и метилового эфира рапсового масла к минеральному дизельному топливу на величину удельного расхода трехкомпонентного смесового горючего, что позволило оптимизировать топливную рецептуру, используя эффект компенсаторного действия добавок (А) и (RME) к (MD). Выявлено, что наиболее существенное уменьшение удельного расхода горючего имеет место для смесей дизельного топлива с небольшими, до 5 -10% по объему добавками биотоплив.

Ключевые слова: биотопливо, дизельное топливо, битопливная смесь, капля, аэрозвесь, энергия активации, воспламенение, горение.

SUMMARY

Darakov D. S. Ignition and combustion of multicomponent biofuels. – Manuscript.

Thesis for the physical and mathematical sciences candidate degree on specialty 01.04.17 - chemical physics, physics of combustion and explosion. – I. I. Mechnikov Odessa National University, Odessa. - 2015.

The thesis presents multicomponent biofuel blends ignition and combustion experimental and theoretical research results.

Combustion critical conditions of rapeseed methyl ester (RME) and it's blends with diesel fuel (MD) individual droplets were experimentally investigated, the effective activation energy value for studied fuels vapor in air chemical reaction was evaluated.

Within the quasi-stationary approach framework, mathematical expression for droplet ignition delay time was proposed, which allows to estimate the main problem parameters influence degree on the preignition period length, with reasonable for situation analysis certainty. The results of theoretical and

experimental studies have shown that sharing bioethanol (A) and (RME) additives to (MD) brings the mixture droplets ignition delay time to the pure (MD) value.

As a part of the proposed quasi-stationary diffusion combustion model of biofuel drops spray, the excess oxidant coefficient influence on droplet combustion time and temperature was analyzed.

Experimentally it was shown, that because of (RME) and (MD) combustion time slight difference, there is no need taking into account the fuel mixture composition effect.

As a bench testing result, it was found that the most pronounced effect of reducing the specific fuel consumption occurs for diesel fuel mixtures with small, up to 5 -10% by volume biofuel additives.

Keywords: biofuel, diesel, biofuel blend, droplet, spray, activation energy, ignition, combustion.

Підп. до друку 23.10.2015. Формат 60х84/16.
Гарн. Таймс. Умов.-друк. арк. 1,16. Тираж 100 прим.
Зам. № 1254.

Видавець і виготовлювач:
Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова

65082, Україна, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12
Тел.: (048) 723 28 39. E-mail: druk@onu.edu.ua
Свідоцтво ДК № 4215 від 22.11.2011 р.