

## ТРАНСПОРТНІ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАРОВУВАННЯ КРАПЕЛЬ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Виконано детальний порівняльний аналіз транспортних та термодинамічних властивостей біодизельного палива. Розглянуто п'ять типів біодизельного палива: метиловий ефір пальмової олії, метиловий ефір соєвої олії, метиловий ефір з конопляної олії виробництва України та Євросоюзу та метиловий ефір ріпакової олії. Розглянуто фізичні властивості біля 16 молекул, з яких складається біодизельне паливо. Результати були використані для моделювання нагрівання та випаровування крапель біодизельного палива в умовах, що мають місце у двигунах внутрішнього згоряння.

**Ключові слова:** біодизельне паливо; метиловий спирт, двигун внутрішнього згоряння; термодинамічні властивості біодизельного палива; в'язкість; щільність.

**Постановка проблеми. Аналіз досліджень.** Біодизельне паливо застосовується у двигунах внутрішнього згоряння як альтернатива дизельному [1]. Найбільш розповсюджена олія для виробництва біодизельних палив – ріпакова в Європі, соєва олія в США та пальмова олія в Азії [2]. «Біопалива другого покоління» виробляються з неїстівних олій та водоростей [3]. Наприклад, з відходів конопляного виробництва може бути вироблений конопляний біодизель [4] (використовуються ті сорти коноплі, які не мають наркотичних властивостей). Більшість досліджень зроблено для ріпакового, соєвого та пальмового біодизелів [5]. Ця стаття присвячена дослідженню транспортних та термодинамічних властивостей біодизельного палива для моделювання нагрівання та випаровування крапель палива.

### Викладення основного матеріалу.

#### Біодизельні палива

Були розглянуті п'ять типів біодизельного палива: пальмовий метиловий ефір, що вироблений з пальмової олії (PME) [6]; конопляний метиловий ефір, що вироблений з конопляної олії в Україні (HME1) [4] та Євросоюзі [7]; ріпаковий метиловий ефір, що вироблений з ріпакової олії в Україні (RME) [5], та соєвий метиловий ефір, що вироблений з соєвої олії (SME) [8]. Діаметри Заутера (SMD) крапель дизельного та біодизельних палив за температури 80 °C, які були знайдені в роботах [9, 10], показані у таблиці 1.

Таблиця 1

Середній діаметр Заутера (SMD) для крапель дизельного та біодизельного палива за температури 80 °C.

Джерело	PME	HME1	HME2	RME	SME	Дизель
[9]	25,1 $\mu m$	–	–	28,8 $\mu m$	25,7 $\mu m$	17,7 $\mu m$
[10]	–	23,55 $\mu m$	23,55 $\mu m$	26,69 $\mu m$	23,87 $\mu m$	18,3 $\mu m$

Середній діаметр крапель біодизельного палива (25,32 мікрон) є більшим, ніж для крапель дизельного палива, що, як правило, пов'язано з більшою в'язкістю біодизельного палива [10].

Хімічні формули та молярні частки компонентів (складових молекул) біодизельного палива показані у таблиці 2.

Число атомів вуглецю в жирній кислоті ( $n_{acid}$ ) та число подвійних зв'язків (DB) показні числом зліва та справа від ':' відповідно. Буква M показує, що дана молекула є метиловим ефіром кислоти. Наприклад, C18:2 M має  $n_{acid} = 18$  та  $DB = 2$ . Загальне число атомів у метиловому ефірі кислоти складає  $n_{acid} + 1$ .

Таблиця 2

Молярні частки та хімічні формули компонентів (чистих метилових ефірів)  
для біодизельних палив

Компонент	Хімічна формула	PME	HME1	HME2	RME	SME
C1T:0 M	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}_2$	0,00T6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C14:0 M	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}_2$	0,01T9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C16:0 M	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$	0,451y	0,066T	0,0651	0,0495	0,109
C17:0 M	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	0,0000	0,00T1	0,0000	0,0000	0,0000
C18:0 M	$\text{C}_{19}\text{H}_{38}\text{O}_2$	0,0447	0,0T06	0,0T46	0,0167	0,044
п T0:0 M	$\text{C}_{21}\text{H}_{42}\text{O}_2$	0,00y5	0,0045	0,0090	0,0056	0,004
п TT:0 M	$\text{C}_{23}\text{H}_{46}\text{O}_2$	0,0000	0,00T5	0,0000	0,0000	0,0000
CT4:0 M	$\text{C}_{25}\text{H}_{50}\text{O}_2$	0,0000	0,00Ty	0,0000	0,0000	0,0000
C16:1 M	$\text{C}_{17}\text{H}_{32}\text{O}_2$	0,00T1	0,00yy	0,0000	0,0000	0,0000
C18:1 M	$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$	0,y8y9	0,1188	0,1188	0,T671	0,T40
п T0:1 M	$\text{C}_{21}\text{H}_{40}\text{O}_2$	0,0017	0,00T7	0,0090	0,0000	0,0000
п TT:1 M	$\text{C}_{23}\text{H}_{44}\text{O}_2$	0,0000	0,0017	0,0000	0,TT04	0,00y
CT4:1 M	$\text{C}_{25}\text{H}_{48}\text{O}_2$	0,0000	0,0015	0,0000	0,0077	0,0000
C18:T M	$\text{C}_{19}\text{H}_{34}\text{O}_2$	0,0916	0,5671	0,548T	0,T484	0,5T8
C18:y M	$\text{C}_{19}\text{H}_{32}\text{O}_2$	0,0019	0,T067	0,T007	0,097y	0,07T
Інші		0,00y8	–	0,0T46	0,087y	–

Число атомів вуглецю в жирній кислоті ( $n_{acid}$ ) та число подвійних зв'язків ( $DB$ ) показні числом зліва та справа від ':' відповідно, Буква  $M$  показує, що дана молекула є метиловим ефіром кислоти, Наприклад, C18:2 M має  $n_{acid} = 18$  та  $DB = 2$ , Загальне число атомів у метиловому ефірі кислоти складає  $n_{acid} + 1$ ,

*Транспортні та термодинамічні властивості компонентів у рідкому стані*

У таблиці 2 показана густина метилових ефірів, що розраховувалася за наступними формулами, що дійсні за температури  $288,15 \leq T \leq T_{cr}$  [11]:

$$\rho_l = \rho_{l0} - \alpha_T(T - 288.15), \quad (1)$$

де

$$\rho_{l0} = 851.471 + \frac{250.718DB + 280.899}{1.214 + n_{acid}}, \quad \alpha_T = \frac{7.536}{\ln(n_{acid}) + 3.584} - 0.446,$$

Кінематична в'язкість метилових ефірів у діапазоні температур  $T \leq 0,7T_{cr}$  у випадку насичених молекул ( $DB = 0$ ) оцінювалася, використовуючи [12]:

$$\ln[\nu_l \times 10^6] = -2.177 - 0.202n_{acid} + \frac{403.66}{T} + \frac{109.77n_{acid}}{T}. \quad (2)$$

У випадку ненасичених молекул ( $DB > 0$ ), кінематична в'язкість оцінювалася, використовуючи Орік та Ербар (Orrick & Erbar) метод [13]:

$$\ln \frac{\nu_l \rho_l 10^6}{\rho_{l(20)} M} = A_k + \frac{B_k}{T}, \quad (3)$$

де  $\rho_{l(20)}$  – густина рідини за  $T = 293,15$  К.

Молярна латентна теплота випаровування компонентів оцінювалася, використовуючи [14]:

$$L = (a_L + b_L M) \Phi_L, \quad (4)$$

де

$$T_{cr} = a_{cr} + b_{cr} M, \quad T_b = a_b + b_b M, \quad (5)$$

$$\Phi_L = \left( \frac{T_{cr} - T}{T_{cr} - T_b} \right)^{0.38}. \quad (6)$$

Рівняння (4) дає добре узгодження з експериментальними даними, що наведені в [15] для насичених молекул, що показано на рисунку 1.

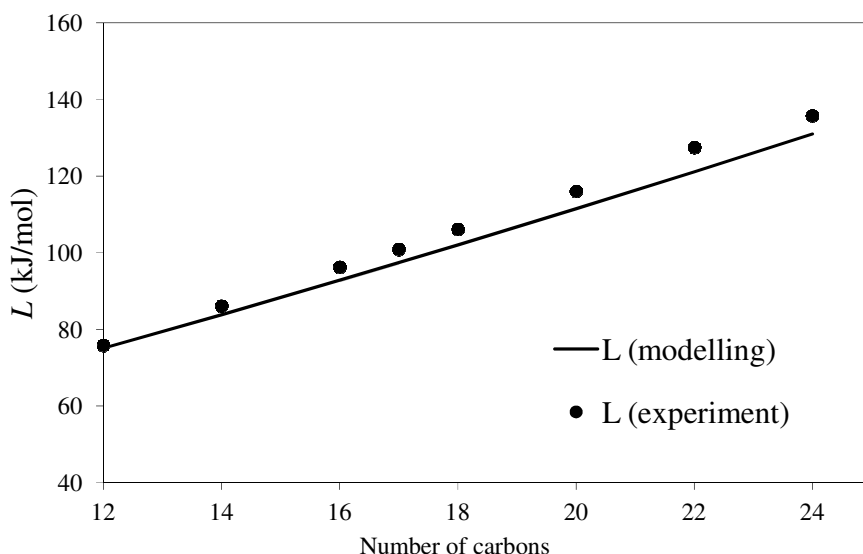


Рис. 1. Скрита теплота випаровування при 298,15 К для насичених молекул метилового ефіру, порівняно з експериментальними даними [15], залежно від кількості атомів вуглецю в жирній кислоті

Питома теплоємність та теплопровідність (теплова провідність) метилових ефірів у рідкому стані оцінювалася, використовуючи такі формули [13, 14]:

$$c_l = (a_{pl} + b_{pl}T + c_{pl}T^2)10^3, \quad (7)$$

$$k_l = \frac{A^* T_b^{1.2} (1 - T_r)^{0.38}}{M T_{cr}^{0.167} T_r^{1/6}}, \quad (8)$$

де  $T_r = \frac{T}{T_{cr}}$ .

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів, що використані у (3)–(7)

Коефіцієнт	C12:0 М – C24:0 М	C16:1 М – C24:1 М	C18:2 М	C18:3 М
$A_k$	-	-10,83	-9,93	-9,03
$B_k$	-	2099	1721	1343
$a_b$	348,7	350,4	352,1	353,82
$b_b$	0,8478	0,8463	0,8463	0,8472
$a_{cr}$	534,3	538,5	542,6	546,8
$b_{cr}$	0,784	0,777	0,772	0,7711
$a_L$	$1.506 \times 10^7$	$1.389 \times 10^7$	$1.270 \times 10^7$	$1.154 \times 10^7$
$b_L$	$1.814 \times 10^5$	$1.822 \times 10^5$	$1.834 \times 10^5$	$1.843 \times 10^5$
$(T_{cr} - T_b)^{0.38}$	7,027	7,047	7,067	7,087
$a_{pl}$	1,816	1,915	2,018	2,115
$b_{pl}$	$-1.462 \times 10^{-3}$	$-2.163 \times 10^{-3}$	$-2.878 \times 10^{-3}$	$-3.580 \times 10^{-3}$
$c_{pl}$	$7.51 \times 10^{-6}$	$8.29 \times 10^{-6}$	$9.09 \times 10^{-6}$	$9.92 \times 10^{-6}$

Рівняння (4), (7), (8) використовувались в розрахунках для діапазону температури від 300 К включно до критичної температури. Коефіцієнт  $A^*$  у (8) був встановлений  $A^* = 0.0713$ , що відрізнявся від  $A^* = 0,0415$ , що був запропонований Латині (Latini) [13]. Значення коефіцієнтів в рівняннях (3)–(7) показані в таблиці 3 [16, 17]. Значення коефіцієнтів для C18:3М в рівняннях (4), (7) були одержані за допомогою лінійної екстраполяції коефіцієнтів, що наведені для C18:1М та C18:2 М.

Коефіцієнт дифузії біодизельного палива у рідкому стані  $D_l$  оцінювався, використовуючи Вілке–Чанг (Wilke–Chang) апроксимацію [13], допускаючи, що коефіцієнт дифузії рідини однаковий для всіх компонентів:

$$D_l = \frac{7.4 \times 10^{-15} \sqrt{\bar{M}_v T}}{\mu_l V_v^{0.6}}, \quad (9)$$

де  $\bar{M}_v$  – середнє значення молярної маси компонентів,  $\mu_l$  – динамічна в'язкість рідини,  $\text{кг м}^{-1} \text{с}^{-1}$ .

Молярний об'єм  $V_v$  для нормальної точки кипіння та довжини Леонарда–Джонса (Lennard–Jones)  $\sigma_v$  для індивідуальних компонентів оцінювалася, використовуючи [18, 19]:

$$V_v = (\sigma_v / 1.18)^3, \quad (10)$$

де

$$\sigma_v = 1.486M^{0.297}. \quad (11)$$

Графік для коефіцієнта дифузії для палив PME, SME та HME2 у рідкому стані, що були розраховані, базуючись на (9), показані на рисунку 2.

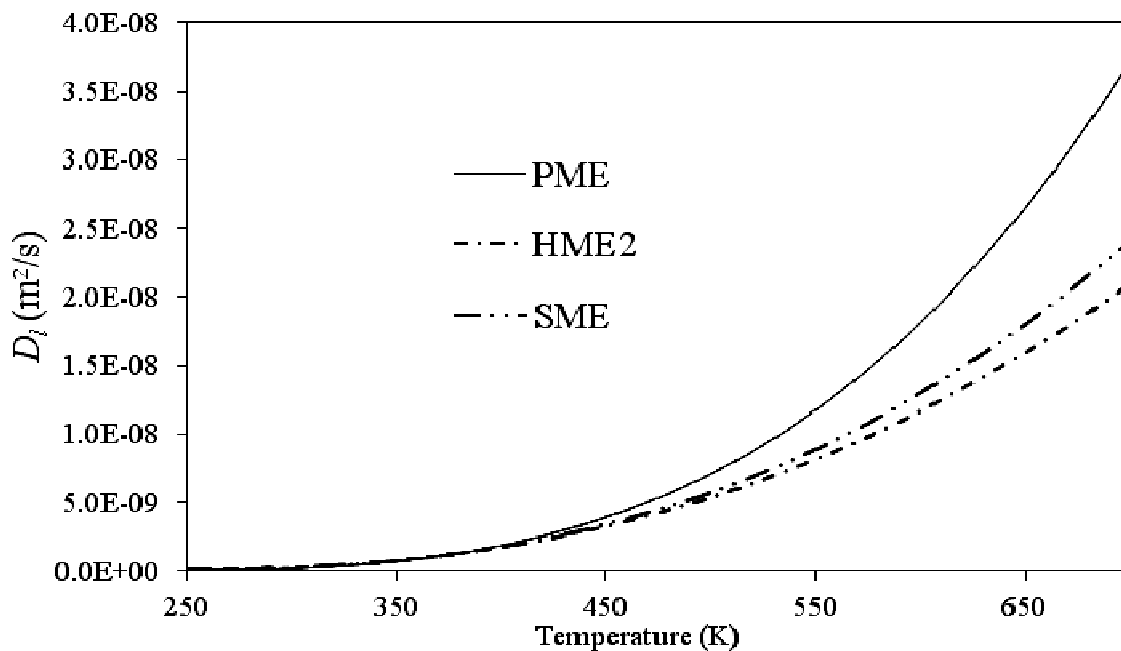


Рис. 2 Коефіцієнт дифузії  $D_l$  залежно від температури для PME, SME та HME2, що розрахований, базуючись на (9)

Як можна бачити (рис. 2), найвищий коефіцієнт дифузії був одержаний для PME, коефіцієнти дифузії для SME та RME дуже близькі один до одного та коефіцієнт дифузії для HME2 близький до коефіцієнта дифузії для HME1 (графіки для HME1 та RME не представлено на рисунку 2).

Альтернативною апроксимацією для описання коефіцієнта дифузії компонентів була обрана залежність, що представлена Гайдук та Мінас (Hayduk та Minhas) у роботі [13]:

$$D_{AB}^0 = 15.5 \times 10^{-12} \left( \frac{P_B^{0.5}}{P_A^{0.42}} \right) \frac{T^{1.29}}{V_B^{0.23} \mu_B^{0.92}}, \quad (12)$$

де  $\mu_B$  – динамічна в'язкість розчинника, cP;  $P_A$  та  $P_B$  – Паракор для розчинної речовини і розчинника (більш детально [10, 13]).

Наступна апроксимуюча формула була одержана для коефіцієнта дифузії рідини насичених молекул (C12:0 M – C24:0 M) за температури 293,15 K, використовуючи рівняння (12), (10) та (11):

$$D_{AB}^0 = A_D \times 10^{-8} e^{(-0.142n_{acid})}, \quad (13)$$

де  $A_D = 2$  для метилових ефірів C12:0 M – C24:0 M.

*Транспортні та термодинамічні властивості парів молекул біодизельного палива*

Тиск насиченої пари (Па) для рідких молекул метилових ефірів оцінювався, базуючись на основі формул, що дійсні у діапазоні температур ( $260 \text{ K} < T < 610 \text{ K}$ ) [20]:

$$p_v = 10^3 a_{CN,0} \left[ a_{uc}(DB+1) + b_{uc} + \frac{c_{uc}}{DB+1} \right] \exp(a_{CN,1} n_{acid}), \quad (14)$$

де  $a_{CN,0} = 1.908 \exp[0.01715T]$ .

$$a_{CN,1} = -5.656 + 0.02649T - 4.5417 \times 10^{-5} T^2 + 2.6571 \times 10^{-8} T^3,$$

для  $DB = 0$  or  $T > 323 \text{ K}$ ,  $a_{uc} = 0$ ,  $b_{uc} = 1$ ,  $c_{uc} = 0$ , у противному випадку,  $a_{uc} = 4.62 \times 10^{-5} T^2 - 3.06 \times 10^{-2} T + 5.05$ ,  $b_{uc} = 3.39 \times 10^{-2} T - 9.93$ ,  $c_{uc} = -2.97 \times 10^{-2} T + 9.62$ .

Використовуючи дані, що наведені в [21], наступна апроксимація для питомої теплоємності парів компонентів дизельного палива в діапазоні температур  $300 \text{ K} < T < 1500 \text{ K}$  було отримано:

$$c_{pv} = 4184 C_{pv,0} C_{pv,1} M^{-1} (J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}), \quad (15)$$

де

$$C_{pv,0} = (6.37561 \times n_{acid} + 6.6472) \ln(T) - 31.361 \times n_{acid} - 26.118,$$

$$C_{pv,1} = \exp[(0.01105 \ln(T) - 0.0425) DB].$$

Коефіцієнт дифузії пару був одержаний, використовуючи дані у [7, 22]:

$$D_v = \frac{2 \times 10^{-10} T^{1.75}}{p},$$

де  $p$  – тиск у циліндрі (бар),

*Транспортні та термодинамічні властивості біодизельного палива*

Дані, що наведені вище, дозволяють розрахувати середнє значення густини, теплоємності, динамічної в'язкості та теплової провідності для 5 біодизельних палив, використовуючи закони для змішування [23, 24].

Таблиця 4 показує значення густини та в'язкості для RME, що розраховані порівняно з експериментальними даними [27] та дані теплової провідності для RME, порівняно з даними, що наводяться у [28].

Таблиця 4

*Розраховані значення густини рідини та в'язкості, порівняно з експериментальними даними [27], та розрахована/оцінена теплова провідність [28] для RME*

Температура	Динамічна в'язкість	Густина	Температура	Теплова провідність
	експериментальна/ розрахована	експериментальна/ розрахована		оцінена [28] / розрахована
293,15 К	0,0063413/0,0058339	879,6/878,823	300 К	0,17696/0,16423
303,15 К	0,0048825/0,0046859	872,9/871,729	350 К	0,16860/0,15349
313,15 К	0,0038665/0,0038166	865,7/864,634	400 К	0,15991/0,14320
323,15 К	0,0031336/0,0031482	858,3/857,540	450 К	0,15083/0,13306
333,15 К	0,0025883/0,0026269	851,0/850,445	500 К	0,14125/0,12280
343,15 К	0,0021724/0,0022151	843,7/843,350	550 К	0,13104/0,11415
353,15 К	0,0018320/0,0018860	836,4/836,256	600 К	0,11997/0,11317
363,15 К	0,0015837/0,0016198	829,1/829,161		
373,15 К	0,0013923/0,0014026	821,7/822,066		

Як можна побачити (табл. 4), розраховані та експериментальні дані для густини та динамічної в'язкості RME дуже близькі між собою та узгоджені між тепловою провідністю, використовуючи два різні методи, також достатньо добре. Теплова провідність біодизельного палива вища, ніж для дизельного [25]. Біодизельне паливо, що вироблялося з ріпакової олії, мало теплову провідність  $0,153 \pm 0,002 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ , виходячи з експериментальних даних [25], (або  $0,17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  [26]) за  $298 \text{ K}$ , порівняно з дизельним паливом, для якого відповідне значення складало  $0,115 \pm 0,002 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  [25].

*Моделювання випаровування крапель біодизельного палива*

Описані вище результати були застосовані для аналізу нагрівання та випаровування крапель біодизельного палива в умовах, що мають місце у дизельному двигуні, використовуючи моделі ефективної температуропровідності / ефективної дифузійності (Effective Thermal Conductivity/Effective Diffusivity) (ETC/ED) моделі [23, 24].

Наш аналіз базувався на наступних значеннях параметрів (допускаючи, що рух газу є ідеальним ( $\rho_a = 11,9 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_a = 880 \text{ К}$ ,  $p_a = 30 \text{ бар}$ ) та допускаючи, що краплі мають швидкість  $10 \text{ м/с}$ .

Рисунок 3 показує результати розрахунків, використовуючи мультикомпонентну модель випаровування, взявши до уваги 16 компонентів, що показані у таблиці 2 для SME та HME1.

Наші аналіз показує, що краплі HME1 випаровуються трохи довше, ніж SME, та температура поверхні крапель HME1 на кінцевій стадії випаровування трохи більша, ніж та, що прогнозована на кінцевій стадії випаровування для SME або ж HME2 крапель (графік для HME2 дуже близький до SME і тому не представлений на рис. 3). Різниця у випаровуванні між HME1 та HME2 може бути пояснена присутністю або відсутністю найважчих компонентів (C22:1 та C24:1 M) в HME2 та HME1 (табл. 2). Більш детальний аналіз випаровування крапель біодизельного палива можна знайти у [29].

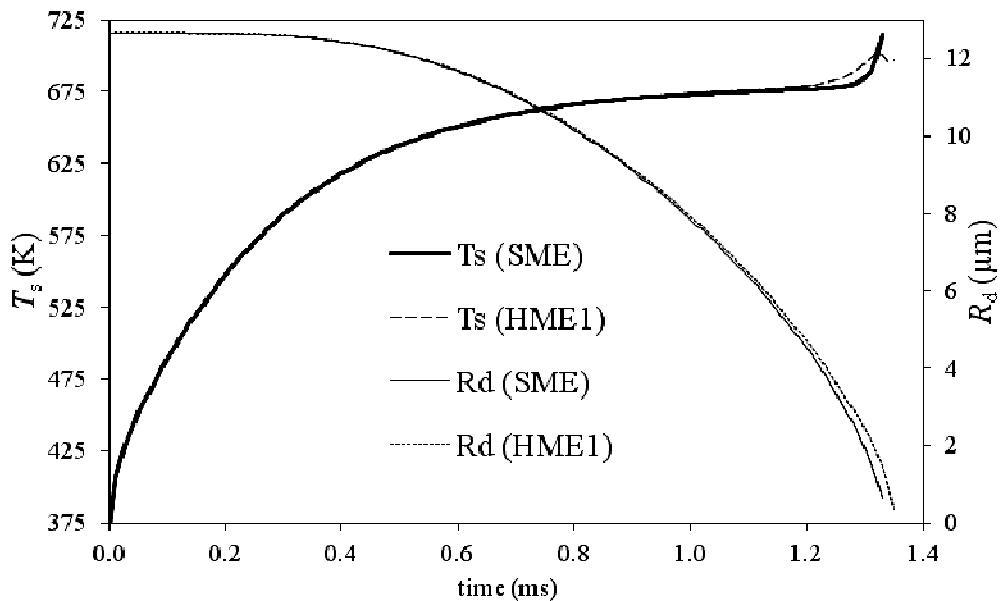


Рис. 3. Графіки для температури поверхні крапель ( $T_s$ ) та радіусу ( $R_d$ ) для SME та HME1 залежно від часу, що прогнозовані за багатоконпонентною (multi-component) моделлю

Допускалося, що краплі рухаються з постійною швидкістю  $10 \text{ м/с}$  і початковий радіус крапель складає  $12,66 \text{ мікрметрів}$ . Температура газу та тиск допускалися рівними  $880 \text{ К}$  та  $30 \text{ бар}$  відповідно.

## Позначення

Символ	Описання	Одиниця	Індекс	Описання
$c$	Питома	$\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$		
$D$	теплоємність	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$A$	Розчинник
$DB$	Коефіцієнт дифузії	-	$a$	повітря
$k$	Кількість подвійних зв'язків	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$B$	Розчинювальна речовина
$L$	Теплова провідність	$\text{Дж} \cdot \text{кмол}^{-1}$		
$M$	Скрита теплота випаровування	$\text{кг} \cdot \text{кмол}^{-1}$	$cr$	Критичний кипіння
$n_{acid}$	Молярна маса	-	$b$	Рідина
$p$	Кількість атомів вуглецю в жирній кислоті	Па/бар	$p$	Постійний тиск
$T$	Тиск	К	$r$	Знижений
$V$	Температура	$\text{см}^3 \cdot \text{мол}^{-1}$	$v$	Пара
$\nu$	Молярний об'єм за температури кипіння	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$0$	Початковий
$\rho$	Густина	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$		
$\mu$	Динамічна в'язкість	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} / \text{сП}$		
$\sigma_v$	Кінематична в'язкість	$\text{А}$		
	Довжина Lennard-Jones			

**Висновки.** В роботі представлений детальний порівняльний аналіз транспортних та термодинамічних властивостей біодизельного палива та компонентів цих палив (метилових ефірів). Аналіз був сконцентрований на п'яти видах біодизельних палив: метиловий ефір пальмової олії (PME); конопляні метилові ефіри, вироблювані з конопляної олії в Україні (HME1) та Євросоюзу (HME2); метиловий ефір ріпакової олії (RME, вироблявся з ріпакової олії в Україні; метиловий ефір соєвої олії (SME) вироблявся з соєвої олії. Розглядалися 16 компонентів біодизельних палив. Результати були застосовані до аналізу нагрівання та випаровування крапель біодизельного палива в умовах, подібних до тих, що мають місце в дизельних двигунах внутрішнього згорання, використовуючи перевірені моделі для дизельного палива, що враховують температурний градієнт та рециркуляцію всередині крапель, а також дифузію компонентів палива. Наші результати показують, що час випаровування для метилового ефіру конопляної олії дуже близький до такого самого часу для метилового ефіру соєвої олії.

## Список використаної літератури:

1. *Lapuerta M.* Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions / *M.Lapuerta, O.Armaz* // Progress in Energy та Combustion Science. – 2008. – 34. – Pp. 198–223.
2. *Hoekman S.K.* Review of biodiesel composition, properties, and specifications / *S.K. Hoekman, A.Broch* // Renewable та Sustainable Energy Reviews. – 2012. – 16. – Pp. 143–169.
3. *Knothe G.* Biodiesel and renewable diesel: a comparison / *G.Knothe* // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – 36. – Pp. 364–373.
4. *Su M.* Biodiesel production from hempseed oil using alkaline earth metal oxides supporting copper oxide as bi-functional catalysts for transesterification and selective hydrogenation / *M.Su, R.Yang*. – 2013. – Fuel 103. – Pp. 398–407.
5. *Grabar I.G.* Biofuels Based on Oil for Diesel Engines / *I.G. Grabar, R.V. Kolodnytska*. – Zhytomyr, 2011.
6. *Schonborn A.* The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl esters on diesel combustion / *A.Schonborn, N.Ladommatos* // Combustion and Flame. – 2000. – 156. – Pp. 1396–412.
7. *Emberger P.* Examination of hemp oil with regard to its suitability as fuel for engines adapted to pure plant oil use / *P.Emberger, K.Thuncke*. – 2007 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.nova-institut.de>.

8. *Ramirez-Verduzco L.F.* Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition / *L.F. Ramirez-Verduzco, J.E. Rodriguez-Rodriguez*. – 2012. – Fuel 91. – Pp. 102–111.
9. *Ejim C.E.* Fleck Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector : Surface tension and viscosity effects / *C.E. Ejim, B.A. Fleck*. – 2007. – Fuel 86. – Pp. 1534–1544.
10. *Kolodnytska R.V.* Analytical study for atomization of hemp oil biodiesel / *R.V. Kolodnytska* // *Visnik Shydno-Ukrainskogo Natsionalnogo Universitetu imeni Volodymira Dalya*. – 2010. – 6 (148). – Pp. 41–46.
11. *Lapuerta M.* Correlation for the estimation of the density of fatty acid esters fuels and its implications / *M.Lapuerta, J.Rodriguez-Fernandez* // *A proposed Biodiesel Cetane Index, Chemistry and Physics of Lipids*. – 2010. – 163. – Pp. 720–127.
12. *Kisnangkura K.* An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures / *K.Kisnangkura, T.Yimsuwan*. – 2006. – Fuel 85. – Pp. 107–113.
13. *Poling B.E.* The Properties of Gases and Liquids / *B.E. Poling, J.M. Prausnitz*. – McGraw-Hill, New York, ed, 5, 2000.
14. *Hallett W.L.H.* A model for the evaporation of biomass pyrolysis oil droplets / *W.L.H. Hallett, N.A. Clark*. – 2006. – Fuel 85. – Pp. 532–544.
15. *Lipkind D.* The vaporization enthalpies and vapor pressures of a series of unsaturated fatty acid methyl esters by correlation gas chromatography / *D.Lipkind, Y.Kapustin* // *Thermochimica Acta*. – 2007. – 456. – Pp. 94–101.
16. *Hallett W.H.L.* Modelling biodiesel droplet evaporation using continuous thermodynamics / *W.H.L. Hallett, N.V. Legault*. – 2011. – Fuel 90. – Pp. 1221–1028.
17. *An H.* Detailed physical properties prediction of pure methyl esters for biodiesel combustion modeling / *H.An, W.M. Yang* // *Appl Energy*. – 2013. – 102. – Pp. 647–656.
18. *Bird R.B.* Transport Phenomena / *R.B. Bird, E.W. Stewart*. – Wiley & Sons, New York, ed, 2, 2002.
19. *Dooley S.* Methyl butanoate inhibition of n-heptane diffusion flames through an evaluation of transport and chemical kinetics / *S.Dooley, M.Uddi* // *Combustion and Flame* 159. – 2012. – Pp. 1371–1384.
20. *Diaz O.C.* Modelling the vapour pressure of biodiesel fuels / *O.C. Diaz, F.Schoegl* // *World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)*. – 2012. – 65. – Pp. 876-886.
21. *Osmont A.* Thermochemistry of Methyl and Ethyl Esters from Vegetable Oils / *A.Osmont, L.Catoire* // *International Journal of Chemical Kinetics*. – 2007. – Pp. 481–491.
22. *Abramzon B.* Convective vaporization of fuel droplets with thermal radiation absorption / *B.Abramzon, S.S. Sazhin*. – 2006. – Fuel 85. – Pp. 32–46.
23. *Sazhin S.S.* A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation / *S.S. Sazhin, A.Elwardany* // *Int. J of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – 53. – Pp. 4495–505.
24. *Sazhin S.S.* Multi-component droplet heating and evaporation, numerical simulation versus experimental data / *S.S. Sazhin, A.Elwardany* // *Int. J of Thermal Science*. – 2011. – 50. – Pp. 1164–1180.
25. *Machado F.A.L.* Thermal properties of biodiesel and their corresponding precursor vegetable oils obtained by photopyroelectric methodology / *F.A.L. Machado, E.B. Zanelato* // *Int. J Thermophys*. – 33. – Pp. 1848–55.
26. *Anand A.* A comprehensive approach for estimating thermo-physical properties of biodiesel fuels / *A.Anand, R.P. Sharma* // *App. Therm. Eng.* – 2011. – 31. – Pp. 235–242.
27. *Mauer K.* Researches of the viscosity and густина of the fuels based on rape oil / *K.Mauer, N.N. Cordos* // *AMMA 2002, Editura U,T, Pres Cluj-Napoca, Conferinta Nationala cu participare Internationala 2 (13–16)*. – 2002.
28. *McCrary J.* Physical property measurement of biodiesel fuels for low temperature combustion modelling / *J.McCrary, A.Hansen* // *An ASABE Meeting Presentation*. – UILLU 2006 -7020, Paper Number, 066146.
29. *Qubeissi M.Al.* Biodiesel fuel droplets: modelling of heating and evaporation processes / *M.Al Qubeissi, R.Kolodnytska* // *Proceedings of ILASS-Europe 2013*. – Chania, Greece, 2013.

КОЛОДНИЦЬКА Руслана Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілі та автомобільне господарство Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- альтернативні палива/біопалива та екологічна безпека автомобіля;
- моделювання розпилювання та випаровування палива у двигунах внутрішнього згорання;
- проблеми руйнування матеріалів, матеріали на основі натуральних волокон.

Стаття надійшла до редакції 08.12.2015



