

# Транспорт

УДК 629.3:621.434

Аль К'юбезі М., аспір.  
Університет Брайтону, Великобританія

Р.В. Колодницька, к.т.н., доц.  
Житомирський державний технологічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ НАГРІВАННЯ ТА ВИПАРОВУВАННЯ КРАПЕЛЬ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

*Описана розроблена модель для нагрівання та випаровування мультикомпонентних крапель, що враховує ефект температурного градієнту, рециркуляції та дифузії компонентів усередині крапель. Модель була застосована до аналізу крапель біодизельного палива. Прогнозування за цією моделлю порівнювалось з прогнозуванням іншої моделі, що базувалася на наближенні біодизельного палива, використовуючи один компонент. П'ять типів біодизельного палива були розглянуті: Пальмовий Метиловий Ефір, що вироблений з пальмової олії; Конопляний Метиловий Ефір, що вироблений з конопляної олії в Україні та Євросоюзі; Ріпаковий Метиловий ефір, що вироблений з ріпакової олії в Україні, та Соевий Метиловий Ефір, що вироблений з соєвої олії. Було показано, що спрощена модель, що базується на представленні біодизельного палива за допомогою одного компоненту викликає помилку в прогнозуванні випаровування крапель і температури поверхні до 5,5 та 2,4 % відповідно.*

**Ключові слова:** біодизельне паливо, випаровування крапель, моделювання.

**Постановка проблеми.** Термін «біодизель» використовується для палив, що складаються з моноалкілових ефірів жирних кислот, що походять з рослинної олії або тваринного жиру [1]. Частіше всього біодизель – це метиловий чи етиловий ефір жирної кислоти, що виготовлений з рослинної олії чи тваринного жиру, властивості якого такі, що можуть застосовуватися як паливо у дизельних двигунах внутрішнього згоряння [2]. Згідно з ДСТУ 6081:2009, під дизельним біопаливом розуміють моторне паливо, що виготовлено з сировини біологічного походження для використання в двигунах із запаленням від стиснення. Метиловий ефір ріпакової олії в країнах Європи та метиловий ефір соєвої олії в Америці (ці палива ще називають біодизельними, або «біодизелем») є найбільш розповсюдженими дизельними біопаливами, що використовуються у звичайному дизельному двигуні. В той же час, розвивається виробництво біопалив другого покоління, що, як правило, виготовляються з продуктів, які не придатні для їжі, наприклад, з водоростей. Дана робота сфокусована на моделюванні нагрівання та випаровування крапель біодизельного палива. Моделювання цих процесів дуже важливе, щоб зрозуміти процеси згоряння в дизельному двигуні.

**Аналіз останніх досліджень.** Декілька моделей для нагрівання та випаровування біодизельного палива були розглянуті в роботах [3, 4]. Так, в роботі [3] було проаналізовано випаровування двох зразків БП, користуючись методами неперервної термодинаміки. Більшість із існуючих моделей, або ігнорують температурний градієнт і дифузію компонентів всередині крапель або беруть їх до уваги, базуючись на числовому рішенні диференційних рівнянь в часткових похідних. Альтернативний підхід до моделювання цих процесів, що базується на введенні аналітичних рішень диференційних рівнянь в числові алгоритми, був розглянутий в [5, 6]. Модель, що використовується у нашому аналізі базується на останньому підході.

**Метою** статті є моделювання нагрівання та випаровування крапель біодизельних палив, базуючись на їх молекулярному складі.

**Базові рівняння та апроксимації.** Модель нагрівання та випаровування крапель, що використовується у цій статті описана в роботі [6]. Основні ідеї цієї моделі коротко описані в статті. Оскільки і в [3–13], допускається, що процеси випаровування та нагрівання в краплях є сферично – симетричними. Модель бере до уваги наступні процеси, що відбуваються всередині крапель: 1) дифузію різних складових частин (компонентів); 2) обмежену температуропровідність; 3) внутрішню рециркуляцію завдяки відносній швидкості між оточуючим газом і краплею. Вплив крапель на оточуюче повітря ігнорується у даній моделі. Нагрівання крапель описується наступним перехідним тепловим рівнянням провідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) \quad (1)$$

де  $t$  – час;  $R$  – відстань від центра краплі;  $T$  – температура;  $\kappa$  – ефективна температуропровідність.

Ефективну температуропровідність  $\kappa$  можна визначити, як і в [11]:

$$\kappa = \frac{k_{\text{eff}}}{C_i \rho_i}, \quad (2)$$

де  $k_{\text{eff}}$  – ефективний коефіцієнт теплопровідності;  $C_i$  – питома теплоємність рідини;  $\rho_i$  – густина рідини.

Значення  $k_{\text{eff}}$  можна визначити за допомогою наступного виразу:

$$k_{\text{eff}} = \chi k_l, \quad (3)$$

де  $\chi$  враховує рециркуляцію всередині крапель [7, 8].

Коефіцієнт  $\chi$  приймає значення 1 (коли число Пекле  $Re_{d(t)} = Re_{d(t)} Pr_1 < 10$ ) та 2,72, коли  $(Re_{d(t)} > 500)$ . Модель, що базується на апроксимаціях (2) та (3), відома як «Модель Ефективної Теплової Провідності» (Effective Thermal Conductivity) або (ETC) модель. Початкові та граничні умови можуть бути записані наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} T(t=0) &= T_{d0}(R) \\ h(T_g - T_s) &= k_{\text{eff}} \left. \frac{\partial T}{\partial R} \right|_{R=R_d-0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де  $T_s = T_s(t)$  – температура поверхні краплі;

$R_d$  – радіус краплі;

$T_g = T_g(t)$  – температура оточуючого середовища;

$h = h(t)$  коефіцієнт тепловіддачі.

Коефіцієнт  $h$  зв'язаний з числом Нуселта  $Nu$  наступним чином:

$$Nu = 2R_d \frac{h}{k_g}, \quad (5)$$

де  $k_g$  – коефіцієнт теплопровідності газу.

Щоб взяти до уваги ефект випаровування, температура газу  $T_g$  була замінена на так названу ефективну температуру  $T_{\text{eff}}$  [5]:

$$T_{\text{eff}} = T_g + \frac{\rho_i L \dot{R}_{d\sigma}}{h}, \quad (6)$$

де  $L$  – латентна теплота випаровування;

$\dot{R}_{d\sigma}$  – швидкість зміни радіусу краплі завдяки випаровуванню.

Допускаючи, що  $h = \text{const}$ , рівняння (1) має аналітичне рішення, що на проміжку часу  $\Delta t = t_1 - t_0$ , дає наступний вираз для температури в кінці кожного часового кроку  $t_1$  [7]:

$$T(R, t_1) = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{q_n \exp[-\kappa_R \lambda_n^2 t_1] - \frac{R_d^2 \sin \lambda_n}{\|v_n\|^2 \lambda_n^2} \mu_0(0) \exp[-\kappa_R \lambda_n^2 t_1] - \frac{R_d^2 \sin \lambda_n}{\|v_n\|^2 \lambda_n^4} \int_0^t \frac{d\mu_0(\tau)}{d\tau} \exp[-\kappa_R \lambda_n^2 (t - \tau)] d\tau}{\|v_n\|^2 \lambda_n^4} \right\}, \quad (7)$$

де

$$\|v_n\|^2 = \frac{R_d}{2} \left( 1 - \frac{\sin 2\lambda_n}{2\lambda_n} \right) = \frac{R_d}{2} \left( 1 + \frac{h_{0T}}{h_{0T}^2 + \lambda_n^2} \right), \quad q_n = \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_0^{R_d} R T_{d0}(R) \sin \left( \lambda_n \frac{R}{R_d} \right) dR,$$

$$k_R = \frac{k_l}{c_l \rho_l R_d^2}, \quad \mu_0(t) = \frac{h T_g(t) R_d}{k_l}, \quad h_{0T} = \left( \frac{h R_d}{k_{\text{eff}}} \right) - 1, \quad \dot{\mu}_0 = \frac{d\mu_0(t)}{dt}.$$

Установка власних значень  $\lambda_n$ ,  $n > 0$  (тривіальне рішення  $\lambda = 0$  не розглядається), знайдено з рішення наступного рівняння:

$$\lambda \cos \lambda + h_{0T} \sin \lambda = 0 \quad (8)$$

У моделі був взятий до уваги ефект теплового випучування під час випаровування. Радіус краплі  $R_d$  перераховувався в кінці кожного кроку  $\Delta t$  наступним чином [7–9]:

$$R_{d(нов)} = R_{d(old)} + \dot{R}_d \Delta t; \quad \dot{R}_d = \frac{\dot{m}_d}{4\pi R_d^2 \rho_l} + \frac{R_d(\bar{T}_0)}{\Delta t} \left[ \left( \frac{\rho(\bar{T}_0)}{\rho(\bar{T}_1)} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right], \quad (9)$$

де  $\dot{R}_d$  – швидкість зміни радіусу завдяки випаровуванню та випучуванню,

$\bar{T}_0$  та  $\bar{T}_1$  – середні температури краплі на початку  $t = t_0$  і в кінці часового кроку  $t = t_1$ ,

$\Delta t = t_1 - t_0$

$\dot{m}_d$  – швидкість випаровування маси краплі [9]:

$$\dot{m}_d = -2\pi R_d D_v \rho_g B_M Sh_{iso}, \quad (10)$$

де  $\rho_g$  – густина оточуючого газу;

$D_v$  – подвійний коефіцієнт дифузії парів біодизеля у повітрі;

$B_M = (Y_{VS} - Y_V) : (1 - Y_{VS})$ :

$Y_{VS}$  та  $Y_V$  – масова доля пари близько до поверхні краплі та в оточуючому газі, відповідно;

$Sh_{iso}$  – число Шервуда для ізолюваної краплі, що випаровується.

$Sh_{iso}$  – відповідне число Нуссельта для ізолюваної каплі.

$u_{iso}$  визначалося, використовуючи модель Абрамзона та Сірігнано [8].

Число Спалдінга  $B_T$ , яке використовується, щоб визначити  $Nu_{iso}$ , пов'язане з  $B_M$  за допомогою наступного рівняння [8]:

$$B_T = (1 + B_M)^\varphi - 1, \quad (11)$$

де  $C_{pv}$  та  $C_{pa}$  – питома теплоємність парів біодизеля та повітря, відповідно.

$\varphi$  знаходиться за наступним рівнянням:

$$\varphi = \left( \frac{C_{pv}}{C_{pa}} \right) \left( \frac{Sh^*}{Nu^*} \right) \frac{1}{L}, \quad (12)$$

$Sh^*$  та  $Nu^*$  визначаються як у [8]. Оскільки  $\varphi$  є функція від  $B_T$ , рівняння (11) вирішувалося,

використовуючи метод ітерацій. В попередній версії цієї моделі [7,11,12], вплив параметру  $\frac{Sh^*}{Nu^*}$  ігнорувався, допускаючи, що  $\frac{Sh^*}{Nu^*} = 1$ .

У випадку, коли крапля містить декілька компонентів, потрібно враховувати ефект дифузії окремих складових частин всередині краплі. Час розвитку масової долі складових частин за будь-якого  $R$  описується за допомогою наступного рівняння (6,7):

$$\frac{\partial Y_{it}}{\partial t} = D_{eff} \left( \frac{\partial^2 Y_{it}}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial Y_{it}}{\partial R} \right), \quad (13)$$

де  $i > 1$ ;

$D_{eff}$  – ефективний коефіцієнт дифузії рідких компонентів.

Ефективний коефіцієнт дифузії може бути підрахований за наступною формулою:

$$D_{eff} = \chi_Y D_i,$$

де  $D_i$  – коефіцієнт дифузії рідини;

$\chi_Y$  – коефіцієнт (змінюється від 1 до 2,72 [7, 10]).

$\chi_Y$  бере до уваги рециркуляцію всередині крапель і може бути апроксимований таким чином:

$$\chi_Y = 1.86 + 0.86 \tanh \left[ 2.225 \log_{10} \left( \frac{Re_{d(i)} Sc_i}{30} \right) \right], \quad (14)$$

де  $Re_{d(i)}$  – число Рейнольдса,

$Sc_i = \frac{v_l}{D_i}$  – число Шмідта для рідини,

$v_l$  – кінематична в'язкість рідини.

Модель, що базується на введенні  $D_{eff}$ , відома як Модель Ефективної Дифузійності (ED) (Effective Diffusivity). У більшості попередньо використаних дослідженнях щодо нагрівання та випаровування крапель були використані «Infinite Thermal Conductivity» (ITC) та «Infinite Diffusivity» (ID) моделі. В цих моделях допускалося, що  $k_{eff} = \infty$  та  $D_{eff} = \infty$ . Рівняння (13) вирішується, використовуючи наступні початкові та граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} Y_{it}(t=0) &= Y_{i0}(R) \\ \alpha(\epsilon_i - Y_{iis}) &= -D_{eff} \left. \frac{\partial Y_{iis}}{\partial R} \right|_{R=R_d=0} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де  $Y_{iis} = Y_{iis}(t)$  – масові долі компонентів на поверхні краплі,  
 $\epsilon_i$  – швидкість випаровування кожного компоненту.

$$\epsilon_i \text{ визначається як } \epsilon_i = \frac{Y_{vis}}{\sum_i Y_{vis}}, \text{ та } \alpha \text{ визначається як } \alpha = \frac{h_d}{4\pi\rho_i R_d^2}.$$

Допускаючи, що  $D_{eff}$  та  $\alpha$  постійні та однакові для всіх компонентів, аналітичне рішення рівняння (13) може бути представлено, як у роботі [6]:

$$Y_{it} = \epsilon_i + \frac{1}{R} \left\{ \left[ \exp \left[ D_{eff} \left( \frac{\lambda_0}{R_d} \right)^2 t \right] [q_{i0} - \epsilon_i Q_0] \sinh \left( \lambda_0 \frac{R}{R_d} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \exp \left[ -D_{eff} \left( \frac{\lambda_n}{R_d} \right)^2 t \right] [q_{in} - \epsilon_i Q_n] \sin \left( \lambda_n \frac{R}{R_d} \right) \right] \right\} \quad (16)$$

де  $\lambda_0$  та  $\lambda_n$  визначаються з рішення рівнянь  $\tanh \lambda_0 = -\lambda_0/h_{0Y}$  та  $\tanh \lambda_n = -\lambda_n/h_{0Y}$  ( $n \geq 1$ ),

$$h_{0Y} = -\left(1 + \frac{\alpha R_d}{D_{eff}}\right),$$

відповідно,

$$Q_n = \begin{cases} -\frac{1}{\|v_0\|^2} \left( \frac{R_d}{\lambda_0} \right)^2 (1 + h_{0Y}) \sinh \lambda_0 & \text{коли } n = 0 \\ \frac{1}{\|v_n\|^2} \left( \frac{R_d}{\lambda_n} \right)^2 (1 + h_{0Y}) \sin \lambda_n & \text{коли } n \geq 1 \end{cases}$$

$\|v_n\|^2$  одержується з рівняння (7), замінивши  $h_{0T}$  на  $h_{0Y}$ , та:

$$q_{in} = \begin{cases} \frac{1}{\|v_0\|^2} \int_0^{R_d} R Y_{i0}(R) \sinh \left( \lambda_0 \frac{R}{R_d} \right) dR & \text{коли } n = 0 \\ \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_0^{R_d} R Y_{i0}(R) \sin \left( \lambda_n \frac{R}{R_d} \right) dR & \text{коли } n \geq 1 \end{cases}$$

$D_{eff}$  оцінюється як середній параметр для біодизельного палива, що базується через вклад масової долі кожного компонента. В монокомпонентній моделі, рівняння (16) не використовується.

**Результати та аналіз.** Для всіх типів біодизельного палива, що згадані вище, були виконані розрахунки, використовуючи наступні значення вхідних параметрів:  $R_{D0} = 12,66$  мікрон,  $T_{s0} = 375$  К,  $T_g = 880$  К та  $p_g = 30$  бар, для крапель, що рухалися з постійною швидкістю ( $10_{м\cdot с^{-1}}$ ). Ці розрахунки були зроблені 1) за допомогою ЕТС/ЕД моделі (мультикомпонентна модель), враховуючи вклад всіх 16 компонентів; 2) за допомогою ЕТС моделі, замінивши всі компоненти одним компонентом з середніми транспортними та термодинамічними властивостями [10], та 3) за допомогою ІТС/ІД моделі, взявши до уваги вклад усіх компонентів.

Графіки температури поверхні і радіуса залежно від часу для RME, показані на рисунку 1. Наш аналіз показав, що мультикомпонентна модель прогнозує на 2–4 % вищу максимальну температуру поверхні і на 5,5% більший час випаровування порівняно з однокомпонентною моделлю. Ця тенденція узгоджується з результатами, що були одержані раніше в [6, 9–13] для крапель дизелю та бензину в якості палива. З точки зору мультикомпонентної моделі, вигляд температури поверхні і радіусу краплі пов'язані з тим, що масова доля компонентів з більшою кількістю атомів вуглецю збільшується за рахунок зменшення компонентів з меншою кількістю атомів вуглецю.

На рисунку 2 показана еволюція з часом масових долей поверхні шести домінуючих компонентів для RME (C16:0, C18:1, C22:1, C24:1, C18:2, C18:3). Графіки температури всередині RME краплі залежно від нормалізованої відстані від центра краплі  $R/R_d$  для трьох миттєвих часів (0,02 мс, 0,3 мс та 0,5 мс), що спрогнозовані за допомогою ЕТС/ЕД моделі, показані на рисунку 3. Як видно, температурний градієнт всередині краплі помітний тільки на дуже ранній стадії ( $t = 0,02$  мс). Графіки масової долі компонентів в залежності від  $R/R_d$ , що спрогнозовані за допомогою ЕТС/ЕД моделі для трьох миттєвих часів (0,3 мс, 0,5 мс та 1 мс), показані на рисунку 4.

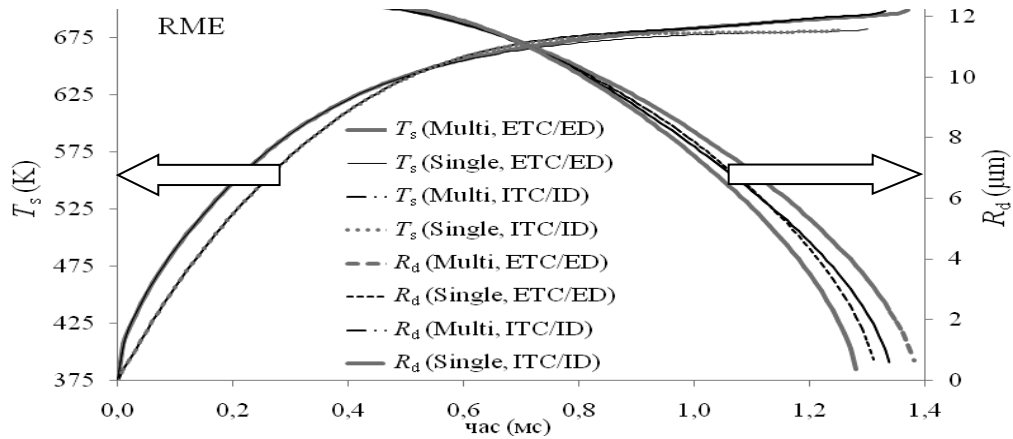


Рис. 1. Температура поверхні краплі ( $T_s$ ) та радіус ( $R_d$ ) залежно від часу, що спрогнозовані за допомогою чотирьох моделей для RME. Початковий радіус краплі та температура допускається рівними 12,66 мкм та 375 K відповідно. Тиск та температура оточуючого газу дорівнює 30 бар та 880 K, відповідно. Крапля рухається з постійною швидкістю 10 м/с

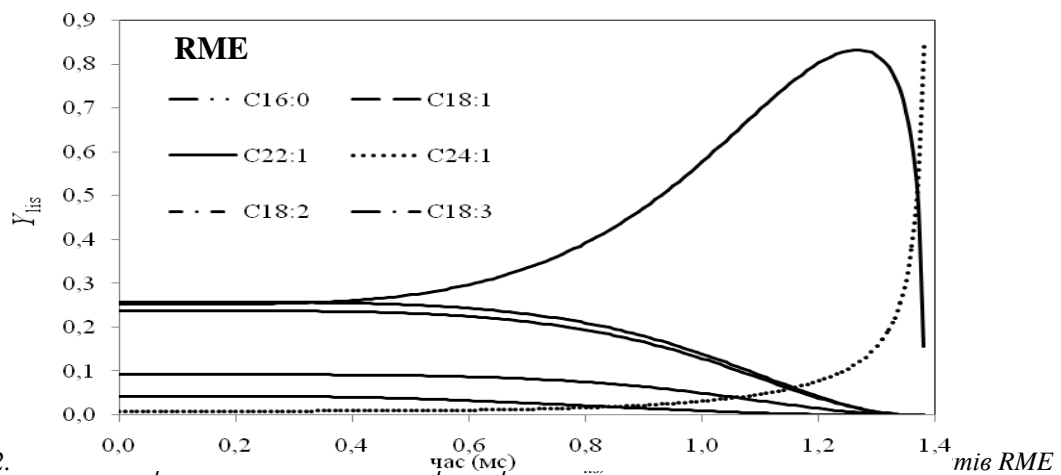


Рис. 2.  $Y_{lis}$  залежно від часу (мс) за тих же самих параметрів, що і на рис. 1

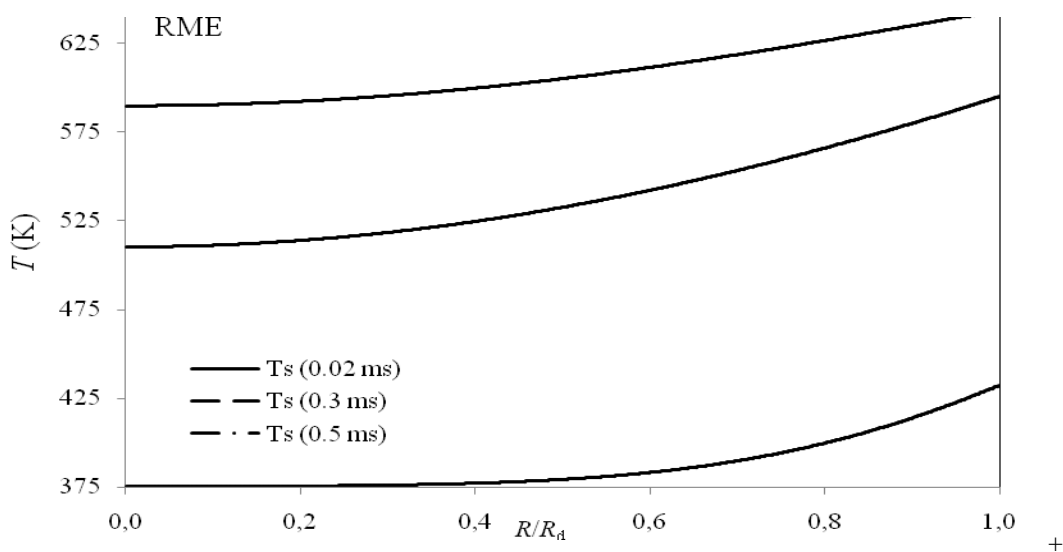


Рис. 3. Зміна температури  $T$  залежно від  $R/R_d$  для часів 0,02 мс, 0,3 мс та 0,5 мс, що спрогнозована за допомогою ETC/ED моделі, для тих же самих параметрів, що і на рис. 1

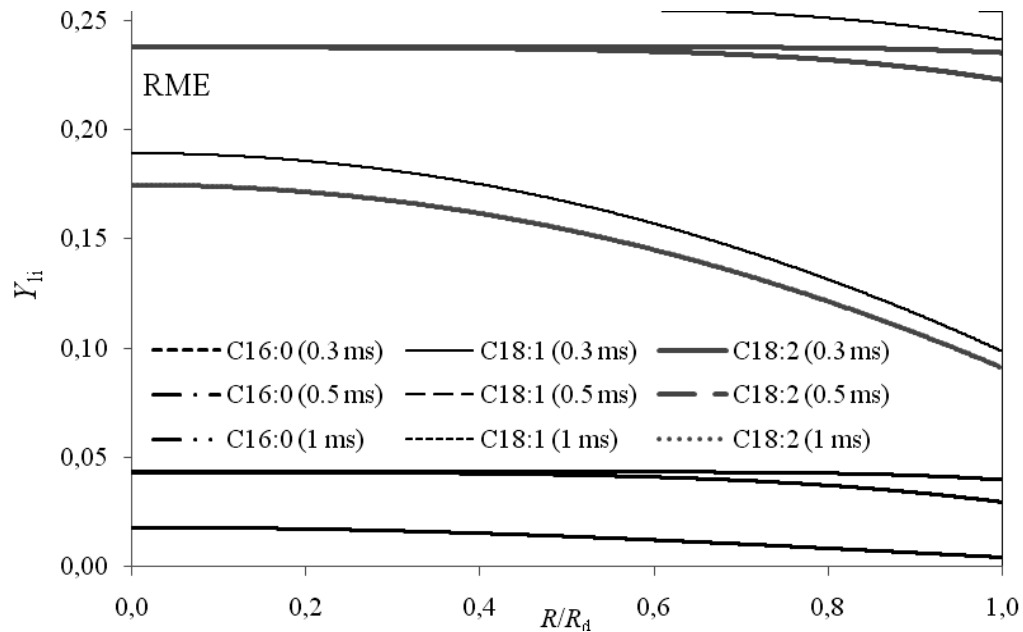


Рис. 4. Зміна масова долі рідкої фракції  $Y_{li}$  залежно від  $R/R_d$  для часів 0.3 мс, 0.5 мс та 1 мс, що спрогнозована за допомогою ETC/ED моделей для тих же параметрів, що на рис. 1

Різниця між часом для масових долей рідких складових частин показана на рисунку 2. Ця різниця може бути пов'язана з результатами, що показані на Рис. 4. Ці два рисунки показують важливість того, що потрібно брати до уваги дифузію складових всередині краплі разом з ефектом температурної зміни у них (рис. 3). Можна зробити висновок, що ігнорування ефекту дифузії складових частин, температурного градієнту і рециркуляції всередині крапель, (що часто трапляється при моделюванні нагрівання та випаровування біодизельного палива в інженерних додатках), може призвести до значних помилок у прогнозуванні температури поверхні краплі та часу випаровування.

#### Позначення

$B_M$	масове число Спалдинга
$B_T$	коефіцієнт тепловіддачі Спалдинга
$C$	питома теплоємність [Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> ]
$D$	коефіцієнт дифузії [м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> ]
$h$	коефіцієнт тепловіддачі [Вт·м <sup>2</sup> ·К <sup>-1</sup> ]
$k$	теплопровідність [Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> ]
$L$	скрита теплота випаровування [Дж·кг <sup>-1</sup> ]
$P$	тиск
$Pe$	число Пекле
$q_m$	параметр введений у рівняння (14)
$q_n$	параметр, введений у рівняння (7)
$Q_n$	параметр, введений у рівняння (14)
$R$	відстань від центру краплі [м]
$R_d$	радіус краплі [м]
$Re$	число Рейнольдса
$Sc$	число Шмідта
$Sh$	число Шервуда
$t$	час [с]
$T$	температура [К]
$Y$	масова доля

$\kappa$	теплопровідність
$\varepsilon$	швидкість випаровування
$\lambda$	власні значення
$\mu$	динамічна в'язкість [Па·с]
$\mu_n$	параметр, введений у рівнянні (7)
$\rho$	густина [кг·м <sup>-3</sup> ]

#### Індекси

$d$	крапля
$eff$	ефективний
$g$	газ
$i$	індекс для компонентів
$iso$	ізолюваний
$l$	рідина
$s$	поверхня
$T$	температура
$v$	пар
$Y$	компонент

#### Список використаної літератури:

1. *Hoekman Review of biodiesel composition, properties, and specifications / Hoekman, A.Broch // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.*

2. *Lapuerta M., Armas O.* Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions / *M.Lapuerta, O.Armaz* // *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008.
3. *Hallett W.H.L.* Modelling biodiesel droplet evaporation using continuous thermodynamics / *W.H.L. Hallett, N.V. Legault* // *Fuel*, 2011.
4. *Saha K.* Multicomponent evaporation model for pure and blended biodiesel droplets in high temperature convective environment / *K.Saha, E.Abu-Ramadan* // *Applied Energy*, 2012.
5. *Sazhin S.S.* Models for fuel droplet heating and evaporation: comparative analysis / *S.S. Sazhin, T.Kristyadi* // *Fuel*, 2006.
6. *Sazhin S.S.* Advanced models of fuel droplet heating and evaporation / *S.S. Sazhin* // *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006.
7. *Sazhin S.S.* A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation / *S.S. Sazhin, A.E. Elwardany* // *Int. J of Heat and Mass Transfer*, 2010.
8. *Abramzon B.* Droplet vaporization model for spray combustion calculations / *B.Abramzon W.A.Sirignano* // *Int. J of Heat and Mass Transfer*, 1989.
9. *Gusev I.G.* A study of the species diffusion equation in the presence of the moving boundary / *I.G. Gusev, P.A. Krutitskii* // *Int. J of Heat and Mass Transfer*, 2012.
10. *Elwardany A.E.* Mono- and multi-component droplet cooling/heating and evaporation: comparative analysis of numerical models / *A.E. Elwardany, I.G. Gusev* // *Atomization and Sprays*, 2011.
11. *Sazhin S.S.* A quasi-discrete model for heating and evaporation of complex multicomponent hydrocarbon fuel droplets / *S.S. Sazhin, A.Elwardany* // *Int. J of Heat and Mass Transfer*, 2011.
12. *Elwardany A.E.* A quasi-discrete model for droplet heating and evaporation: application to Diesel and gasoline fuels / *A.E. Elwardany, S.S. Sazhin* // *Fuel*, 2012.
13. *Sazhin S.S.* Multi-component droplet heating and evaporation: numerical simulation versus experimental data / *S.S. Sazhin, A.E. Elwardany* // *Int. J of Thermal Science*, 2011.

КОЛОДНИЦЬКА Руслана Віталіївна – доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

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

АЛЬ К'ЮБЕЗІ Мансур – аспірант, Університет Брайтону, Великобританія

Наукові інтереси:

- моделювання випаровування дизельного біопалива у дизельних двигунах.

Стаття надійшла до редакції 04.08.2014