

УДК 629.3:621.434

¹Колодницька Р.В., ²Аль К'юбезі М.¹Житомирський державний технологічний Університет, Україна²Університет Брайтону, Великобританія**МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАРОВУВАННЯ КРАПЕЛЬ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА**

В роботі описана розроблена модель для випаровування мульті-компонентних крапель, що враховує ефект температурного градієнту, рециркуляції і 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 веде до помилки в прогнозуванні випаровування крапель і температури поверхні до 5,5% та 2,4% відповідно.

Ключові слова: біодизель, біодизельне паливо, модель випаровування крапель, метиловий ефір ріпакової олії, метиловий ефір конопляної олії

¹Kolodnytska R.V., ²Al Qubeissi M.,¹Zhytomyr State Technological University, Ukraine²University of Brighton, UK**EVAPORATION MODELLING OF BIODISEL DROPLETS**

A model for evaporation of multi-component droplets, taking into account the effects of temperature gradient, recirculation and species diffusion inside them is described. The model is applied to the analysis of biodiesel droplets. The predictions of this model are compared with the predictions of the model based on the approximation of biodiesel fuel by a single component. So, calculations have been performed: (1) taking into account the contribution of all components of biodiesel fuel; and (2) assuming that this fuel can be treated as a one component fuel with averaged transport and thermodynamic coefficients (as a widely used approximation for the analysis of realistic multi-component fuels, including biodiesel fuels).

Five types of biodiesel fuels are considered: Palm Methyl Ester, produced from palm seed oil; Hemp oil Methyl Esters, produced from hemp seed oil in the Ukraine and the European Union; Rapeseed oil Methyl Ester, produced from rapeseed oil in the Ukraine; and Soybean oil Methyl Ester, produced from soybean oil. It is shown that a simplistic model, based on the approximation of biodiesel by one component, leads to errors in predicted droplet evaporation times and surface temperatures up to 5.5% and 2.4%, respectively. It can be concluded that ignoring the effects of species diffusion, temperature gradient and recirculation inside droplets, common practice in modelling heating and evaporation of biodiesel fuel droplets in engineering applications, can lead to noticeable errors in the predictions of droplet surface temperatures and evaporation times. The maximal deviation between the predictions of the multi-component and single component models have been observed for RME.

Our results also show that HME1 (Hemp Oil Methyl Ester from Ukraine) droplets take slightly longer to evaporate than Soy Methyl Ester (SME) droplets and the surface temperatures of HME1 droplets at the final stage of droplet evaporation are slightly higher than the ones predicted for the SME droplets or HME2 (Hemp Oil Methyl Ester from Europe) droplets. The difference in evaporation between HME1 and HME2 can be attributed to the presence or absence of the heaviest components (C22:1 and C24:1) in HME2 and HME1.

Key words: biodiesel, biodiesel fuel, evaporation model of droplets, Rapeseed oil Methyl Ester, Hemp oil Methyl Ester

¹Колодницкая Р.В., ²Аль Кьюбези М.,¹Житомирский государственный технологический Университет, Украина²Университет Брайтона, Великобритания**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА**

В работе описана разработанная модель для испарения мульті-компонентных капель, которая учитывает эффект температурного градиента, рециркуляции и диффузии компонентов внутри капель. Модель была использована для анализа капель биодизельного топлива. Прогнозирование при помощи этой модели сравнивалось с прогнозированием другой модели, которая базировалась представлением биодизельного топлива при помощи одного компонента. Пять типов биодизельного топлива были рассмотрены: Пальмовый Метиловый Эфир, изготовленный из пальмового масла; Конопляный Метиловый Эфир, изготовленный с конопляного масла на Украине и в Евросоюзе; Рапсовый Метиловый Эфир, изготовленный из рапсового масла в Украине; Соевый Метиловый Эфир, изготовленный из соевого масла. Было показано, что упрощенная модель, которая базируется на представлении биодизельного топлива при помощи одного компонента приводит к ошибке в прогнозировании испарения капель и температуры поверхности 5,5% и 2,4% соответственно.

Ключевые слова: биодизель, биодизельное топливо, модель испарения капель, метиловый эфир рапсового масла, метиловый эфир конопляного масла

Постановка проблеми. Зниження світових запасів нафти та необхідність зменшення викидів вуглекислого газу зумовлюють використання біодизельного палива в двигунах внутрішнього згорання. Термін «біодизель» використовується для палив, що складаються з моноалкілових ефірів жирних кислот, що походять з рослинної олії або тваринного жиру [Помилка! Джерело посилання не знайдено.]. 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 згорання [2]. Згідно 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 водоростів або відходів виробництва. П'ять типів біодизельного палива були розглянуті: Пальмовий Метиловий Ефір (PME), що вироблений з пальмової олії; Конопляний Метиловий Ефір, що вироблений з конопляної олії в Україні (HME1) та Євросоюзі (HME2); Ріпаковий Метиловий ефір (RME), що вироблений з ріпакової олії в Україні; та Соевий Метиловий Ефір, що вироблений з соєвої олії. Данна робота сфокусована на моделюванні випаровування крапель біодизельного палива. Моделювання цих процесів дуже важливе, щоб зрозуміти процеси згорання в дизельному двигуні.

Аналіз останніх досліджень. Декілька моделей для 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 диференціальних рівнянь в часткових похідних. Альтернативний підхід до моделювання цих процесів, що базується на введенні аналітичних рішень диференціальних рівнянь в числові алгоритми, був розглянутий в [5,6]. Модель, що використовується у нашому аналізі базується на останньому підході.

Ціль статті. Ціллю данної статті є моделювання випаровування крапель біодизельних палив, базуючись на їх молекулярному складі.

Базові рівняння та апроксимації. Модель випаровування крапель біодизельного палива, що описана у цій статті, базується на моделі [6], що була застосована до крапель дизельного палива. Так як 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 центру краплі;

T – температура;

κ – ефективна температуропровідність.

Ефективну температуропровідність κ можна визначити так як і в роботі [11]:

$$\kappa = k_{\text{eff}} / C_l \rho_l, \quad (2)$$

де k_{eff} – ефективний коефіцієнт теплопровідності,

C_l – питома теплоємність рідини,

ρ_l – густина рідини.

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

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

де χ враховує рециркуляцію всередині крапель [7, 8].

Коефіцієнт χ приймає значення 1 (коли число Пекле $Pe_{d(1)} = Re_{d(1)} Pr_1 < 10$) та 2,72, коли ($Pe_{d(1)} > 500$). 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:

$$Nu = 2R_d h/k_g, \quad (5)$$

де k_g – коефіцієнт теплопровідності газу.

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

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

де L – латентна теплота випаровування;

\dot{R}_{dE} – 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]:

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

де,

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

$$k_R = \frac{k_l}{c_l \rho_l R_d^2}, \quad \mu_0(t) = \frac{h T_g(t) R_d}{k_l}, \quad h_{OT} = \left(\frac{h R_d}{k_{\text{eff}}} \right) - 1, \quad \mu_0' \equiv \frac{d\mu_0(t)}{dt}.$$

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

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

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

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

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]:

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

де ρ_g – густина оточуючого газу;

D_v – подвійний коефіцієнт дифузії парів біодизеля у повітрі;

B_M – масове число Спалдинга, $B_M = (Y_{vs} - Y_{v\infty}) / (1 - Y_{vs})$;

Y_{vs} та $Y_{v\infty}$ – масова доля пари близько до поверхні краплі та в оточуючому газі, відповідно;

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

Nu_{iso} – відповідне число Нуссельта для ізолюваної краплі.

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

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

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

φ знаходиться за наступним рівнянням:

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

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

Sh^* та Nu^* визначалося як у [8]. Так як φ є функція від B_T , рівняння (11) вирішувалося, використовуючи метод ітерацій. В попередній версії цієї моделі [7,11,12], вплив параметру $\frac{\text{Sh}^*}{\text{Nu}^*}$ ігнорувалося, допускаючи, що $\frac{\text{Sh}^*}{\text{Nu}^*} = 1$.

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]:

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

де $i > 1$;

D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії рідких компонентів.

Ефективний коефіцієнт дифузії може бути підрахований за наступною формулою:

$$D_{\text{eff}} = \chi_Y D_l,$$

де D_l – коефіцієнт дифузії рідини;

χ_Y – коефіцієнт (змінюється від 1 до 2.72 [7,10]).

χ_Y бере до уваги рециркуляцію всередині крапель і може бути апроксимований наступним чином:

$$\chi_Y = 1.86 + 0.86 \tanh[2.225 \log_{10}(\text{Re}_{d(i)} \text{Sc}_l/30)], \quad (14)$$

де $\text{Re}_{d(i)}$ – число Рейнольдса,

$\text{Sc}_l = \frac{\nu_l}{D_l}$ – число Шмідта для рідини,

ν_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 $k_{\text{eff}} = \infty$ та $D_{\text{eff}} = \infty$. Рівняння (13) вирішується, використовуючи наступні початкові та граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} Y_{ii}(t=0) &= Y_{ii0}(R) \\ \alpha(\epsilon_i - Y_{iis}) &= -D_{\text{eff}} \frac{\partial Y_{ii}}{\partial R} \Big|_{R=R_d-0} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де $Y_{iis} = Y_{iis}(t)$ – масові долі компонентів на поверхні краплі,

ϵ_i – швидкість випаровування кожного компоненту.

ϵ_i визначається як $\epsilon_i = Y_{vis}/\sum_i Y_{vis}$, та α визначається як $\alpha = |\dot{m}_d|/(4\pi\rho_l R_d^2)$.

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

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

де λ_0 та λ_n визначаються з рішення рівнянь $\tanh \lambda_0 = -\lambda_0/h_{0Y}$ та $\tanh \lambda_n = -\lambda_n/h_{0Y}$ ($n \geq 1$), відповідно, $h_{0Y} = -\left(1 + \frac{\alpha R_d}{D_{\text{eff}}}\right)$,

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

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

$$q_{in} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\|v_0\|^2} \int_0^{R_d} R Y_{ii0}(R) \sinh \left(\lambda_0 \frac{R}{R_d} \right) dR && \text{коли } n = 0 \\ & \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_0^{R_d} R Y_{ii0}(R) \sin \left(\lambda_n \frac{R}{R_d} \right) dR && \text{коли } n \geq 1 \end{aligned} \right\},$$

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

Результати та аналіз. Для всіх типів біодизельного палива, що упомянуті 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 с^{-1}). Ці розрахунки були зроблені 1) за допомогою ETC/ED моделі (мульті-компонентна модель),

враховуючи вклад всіх 16 компонентів; 2) за допомогою ETC моделі, замінивши всі компоненти одним компонентом з середніми транспортними та термодинамічними властивостями [10]; 3) за допомогою ITC/ID моделі, взявши до уваги вклад усіх компонентів.

Графіки температури поверхні і радіуса в залежності від часу для крапель RME, показані на Рис. 1. Наш аналіз показав, що мультикомпонентна модель прогнозує на 2-4% вищу максимальну температуру поверхні і на 5,5% більший час випаровування в порівнянні 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, залежність температури поверхні і радіуса краплі від часу пов'язана з тим фактом, що масова доля компонентів з більшою кількістю атомів вуглецю збільшується за рахунок зменшення компонентів з меншою кількістю атомів вуглецю.

На Рис. 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 в залежності 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 ETC/ED моделі, показані на Рис. 3. Як видно з рисунку, 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 ETC/ED моделі для трьох миттєвих часів (0,3 мс, 0,5 мс та 1 мс), показані на Рис. 4.

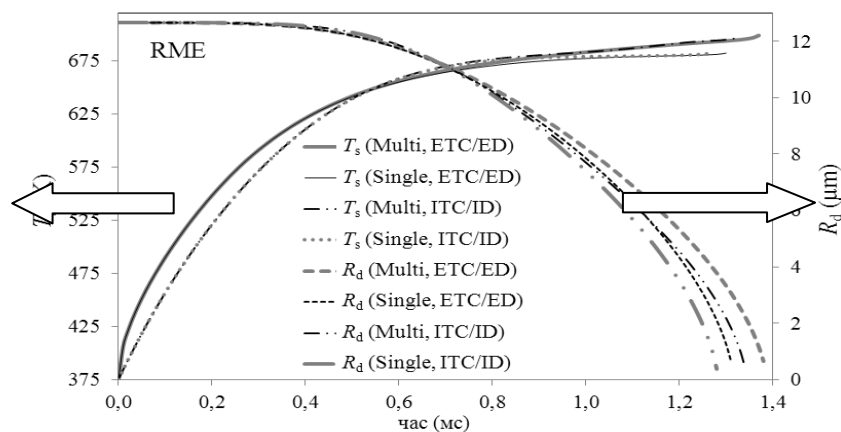


Рисунок 1. Температура поверхні краплі (T_s) та радіус (R_d) в залежності від часу, що спрогнозовані за допомогою чотирьох моделей для RME. Початковий радіус краплі та температура допускалися рівними 12,66 мкм та 375 К, відповідно. Тиск та температура оточуючого газу дорівнює 30 бар та 880 К, відповідно.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

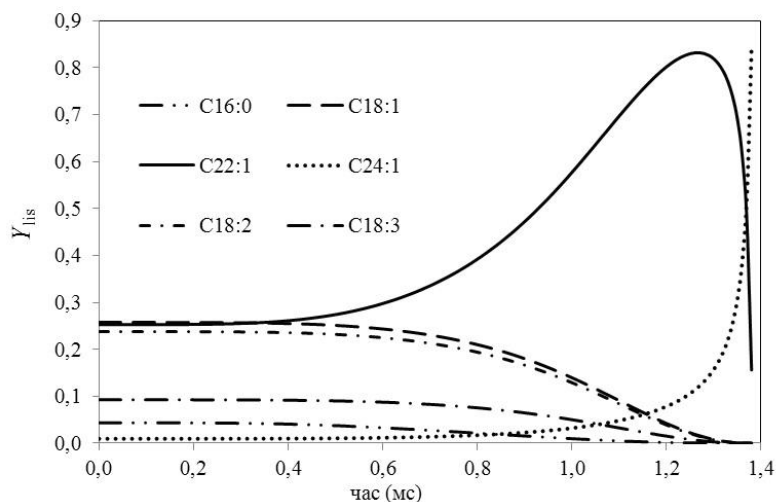


Рисунок 2. Масові доли рідких складових на поверхні краплі Y_{lis} для шести головних компонентів RME в залежності від часу (мс) за тих же самих параметрів, що і на Рис. 1.

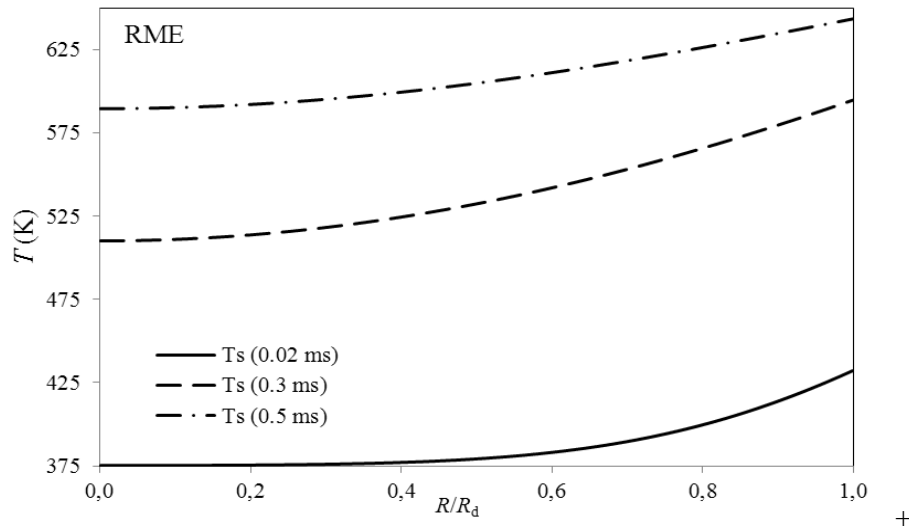


Рисунок 3. Зміна температури T залежно від R/R_d для часів 0,02 мс, 0,3 мс та 0,5 мс, що спрогнозована за допомогою ЕТС/ЕД моделі, для тих же самих параметрів, що і на Рис. 1.

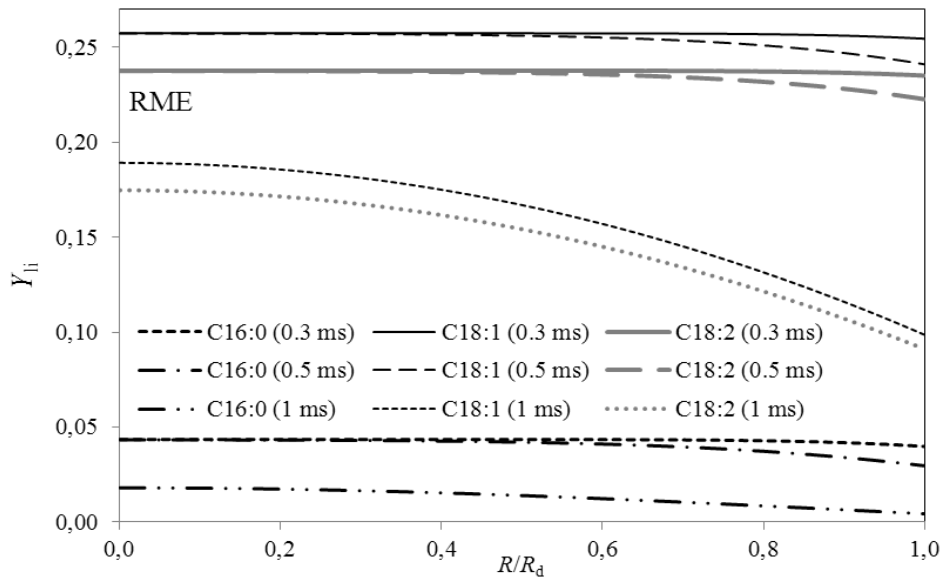


Рисунок 4. Зміна масової долі рідкої фракції Y_{ii} залежно від R/R_d для часів 0,3 мс, 0,5 мс, та 1 мс, що спрогнозована за допомогою ЕТС/ЕД моделей для тих же параметрів, що на Рис. 1.

Різниця між часом для масових долей рідких складових частин показана на Рис. 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 (див. також Рис. 3).

Рис. 5 показує результати розрахунків, використовуючи мультикомпонентну модель випаровування, взявши до уваги 16 компонентів для SME та HME1. Наш аналіз показує, що краплі HME1 випаровуються трохи довше, ніж SME та температура поверхні крапель HME1 на кінцевій стадії випаровування трохи більша, ніж та, що спрогнозована на кінцевій стадії випаровування для SME або ж HME2 крапель (графік для HME2 дуже близький до SME і тому не представлений на Рис. 5). Різниця у випаровуванні між краплями HME1 та HME2 може бути пояснена присутністю або відсутністю найважчих компонентів (C22:1 та C24:1 M) в HME2 та HME1.

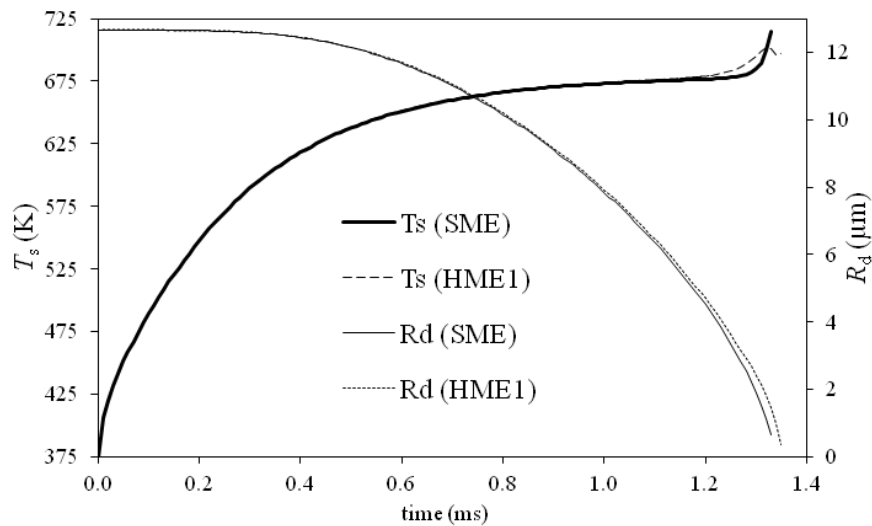


Рисунок 5. Графіки для температури поверхні крапель (T_s) та радіусу (R_d) для SME та HME1 залежно від часу, що спрогнозовані за багато-компонентною (multi-component) моделлю.

При моделюванні випаровування біодизельного палива допускалося, що всі краплі рухаються з постійною швидкістю, рівною 10 м/с і початковий радіус крапель складає 12,66 мікрометрів. Температура газу та тиск допускалися рівними 880 К та 30 бар відповідно. Більш детальний аналіз випаровування крапель біодизельного палива можна знайти в роботах [14, 15].

Висновки.

В роботі була розроблена модель для випаровування крапель біодизельного палива. Модель застосовувалась для аналізу випаровування крапель біодизельного палива в умовах, подібних до тих, що мають місце в дизельних двигунах внутрішнього згоряння, використовуючи перевірені моделі для дизельного палива, що враховують температурний градієнт та рециркуляцію всередині крапель, а також дифузію компонентів палива. 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 привести до значних помилок у прогнозуванні температури поверхні краплі та часу випаровування. Одержані результати показали, що час випаровування для метилового ефіру конопляної олії дуже близький до такого ж часу для метилового ефіру соєвої олії.

Позначення

- B_M масове число Спалдинга
- B_T коефіцієнт тепловіддачі Спалдинга
- C питома теплоємність [$\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
- D коефіцієнт дифузії [$\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$]
- h коефіцієнт тепловіддачі [$\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
- k теплопровідність [$\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
- L скрита теплота випаровування [$\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$]
- P тиск
- Pe число Пекле
- 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
- κ температуропровідність

- ε швидкість випаровування
- λ власні значення
- μ динамічна в'язкість [Па·с]
- μ_0 параметр, введений у рівнянні (7)
- ρ густина [$\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$]

Індекси

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. S.K. Hoekman, A. Broch, Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 143169 (2012).
2. M. Lapuerta, O. Armas, Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science* **34**, 198-223 (2008).
3. W.H.L. Hallett, N.V. Legault, Modelling biodiesel droplet evaporation using continuous thermodynamics. *Fuel* **90**, 1221-8 (2011).
4. K. Saha, E. Abu-Ramadan, Multicomponent evaporation model for pure and blended biodiesel droplets in high temperature convective environment. *Applied Energy* **93**, 71-79 (2012).
5. S.S. Sazhin, T. Kristyadi, Models for fuel droplet heating and evaporation: comparative analysis. *Fuel* **85**:1613–1630 (2006).
6. S.S. Sazhin, Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science* **32**, 162-214 (2006).
7. S.S. Sazhin, A.E. Elwardany, A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation. *Int. J of Heat and Mass Transfer* **53**, 4495-4505 (2010).
8. B. Abramzon, W.A. Sirignano, Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *Int. J of Heat and Mass Transfer* **32**, 1605-1618 (1989).
9. I.G. Gusev, P.A. Krutitskii, A study of the species diffusion equation in the presence of the moving boundary, *Int. J of Heat and Mass Transfer* **55**, 2014-2021 (2012).
10. A.E. Elwardany, I.G. Gusev, Mono- and multi-component droplet cooling/heating and evaporation: comparative analysis of numerical models. *Atomization and Sprays* **21**, 907-931 (2011).
11. S.S. Sazhin, A. Elwardany, A quasi-discrete model for heating and evaporation of complex multicomponent hydrocarbon fuel droplets. *Int. J of Heat and Mass Transfer* **54**, 4325-4332 (2011).
12. A.E. Elwardany, S.S. Sazhin, A quasi-discrete model for droplet heating and evaporation: application to Diesel and gasoline fuels. *Fuel* **97**, 685-694 (2012).
13. S.S. Sazhin, A.E. Elwardany, Multi-component droplet heating and evaporation: numerical simulation versus experimental data. *Int. J of Thermal Science* **50**, 1164-1180 (2011).
14. R. Kolodnytska, Al M., Qubeissi, S.S. Sazhin. Biodiesel fuel droplets: transport and thermodynamic properties. Proceedings of the ILASS – Europe 2013, 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Chania, Greece, 1-4 September 2013, (2013)
15. M. Al Qubeissi, R. Kolodnytska, S.S. Sazhin. Biodiesel fuel droplets: modelling of heating and evaporation processes. Proceedings of ILASS-Europe 201, Chania, Greece (2013).

РЕЦЕНЗЕНТ:

КРАВЧЕНКО Олександр Петрович, д.т.н., професор, кафедра автомобілі та автомобільне господарство, Житомирський державний технологічний Університет, Україна

Стаття надійшла до редакції 25.12.2015.