

Підвищення ресурсу експлуатації автомобіля шляхом керування якістю паливно-повітряних сумішей

Аналізуються умови формування паливно-повітряної суміші у взаємозв'язку із експлуатаційними характеристиками двигуна внутрішнього згорання при його роботі на паливах різного хімічного складу (з біопаливом включно). Стан паливно-повітряної суміші моделюється в межах моделі максимуму ентропії. Інтегро-алгебраїчні рівняння при максимізації ентропії краплинної системи в межах зазначених представлень розв'язувалися чисельними методами. В якості вхідної інформації при моделюванні процесу розпилення палива слугували термодинамічні властивості палив різного складу й умови його розпилення. Вихідною розрахунковою інформацією були дані про функції розподілу для діаметрів і швидкостей руху крапель палива.

Отримано кількісні дані про стан паливної краплинної системи при різних величинах втрат енергії й імпульсу крапель, що рухаються при формуванні паливно-повітряної суміші. Досліджується стан краплинно-повітряної системи, залежно від величини відносної частки втрат імпульсу й енергії. Розрахункові дані зіставляються з експериментальними результатами деяких авторів щодо стану краплинно-повітряної суміші, сформованої в різних умовах функціонування розпилюючих систем. Досягнута задовільна відповідність розрахункових і експериментальних результатів дозволяє стверджувати про застосовування моделі максимуму ентропії для аналізу процесу формування краплинно-повітряної суміші на основі палив різного хімічного складу.

Ключові слова: *паливо різного хімічного складу; біопаливо; крапельно-повітряна суміш; термодинаміка дисперсних систем.*

Вступ. Проблема збереження ресурсу та підвищення експлуатаційних характеристик автомобілів при переході двигунів внутрішнього згорання на біопаливо різного хімічного складу є актуальною економічною та технічною проблемою. Важливим технічним вузлом двигуна, в якому заміна традиційного палива на паливо з іншими термодинамічними властивостями робить найбільший внесок у ефективність роботи двигуна, є вузол, що формує крапельно-повітряну паливну суміш. Тому наявність кількісної інформації про розподіл розмірів крапель та швидкостей їх руху в розпиленому паливі являє собою необхідний набір тих параметрів, які дозволяють здійснювати оцінки фундаментальних властивостей усієї крапельно-повітряної системи. Дані такого типу необхідні як для напрямленої розробки конструкції технічних пристроїв, що формують крапельно-повітряні системи із заданими параметрами, так і для пошуку найбільш сприятливих умов їх функціонування. Природно, що такі дані дозволяють здійснювати теоретичний пошук ефективних режимів використання палив різного складу.

Складності під час проведення безпосередніх експериментів щодо визначення параметрів стану розпиленого палива відомі. Вони, у першу чергу, зумовлені складностями проведення прямих вимірювальних процедур через високу вартість прецизійного устаткування. В такій ситуації на перший план виходять різні теоретичні моделі, які тією чи іншою мірою вирішують завдання теоретичного опису проблеми.

Серед напрямів теоретичних розробок, що описують процеси, які відбуваються в повітряно-крапельних сумішах, особливе місце займають рівноважні моделі процесу краплеутворення [1–3]. На користь використання рівноважних наближень для оцінки стану повітряно-крапельної системи говорить той факт, що застосування рівноважного наближення передбачає використання математичної моделі з меншим числом параметрів, порівняно з кінетичними аналогами. Менша кількість вхідних параметрів моделі усе ж дозволить полегшити інтерпретацію отриманих даних і виявити основні термодинамічні параметри палива та розпилювальних систем, які визначають остаточний стан паливних крапель.

Рівноважні моделі формування крапельної системи дозволяють зробити такий важливий для практики висновок. Оскільки основні положення цього підходу не потребують інформації про те, яким способом технічна система створює крапельно-повітряну суміш, це означає, що отримані результати можна розглядати як можливу теоретичну межу у формуванні властивостей крапельної системи. При цьому параметри кінцевого стану залежать лише від термодинамічних властивостей взаємодіючих середовищ

та величини втрат при формування крапельної системи. Це, відповідно, та межа до якої необхідно прагнути під час розробки технічних систем, які формують паливно-повітряні суміші із заданими параметрами.

До таких рівноважних моделей, що описує утворення повітряно-крапельної суміші, варто, у першу чергу, зарахувати моделі, які ґрунтуються на принципі максимуму ентропії [1–6]. В основі методу максимуму ентропії лежать уявлення другого закону термодинаміки, де стверджується, що впродовж еволюції система розпиленних крапель рідини має розвиватись у напрямі досягнення своєї максимальної ентропії.

Саме умова максимуму ентропії повітряно-крапельної системи дозволяє сформулювати необхідні умови для визначення функції розподілу крапель розпиленої рідини. Обмеженнями, які забезпечують існування локального максимуму ентропії крапельної системи, є умови, що випливають із законів збереження маси, імпульсу та енергії. Інакше кажучи, в основі моделі максимуму ентропії лежить пошук такого розподілу для розмірів та швидкостей крапель, які задовольняють рівняння законів збереження, а ентропія системи досягає свого максимуму.

Тому метою даної роботи є аналіз впливу умов функціонування паливних систем на розміри та параметри руху крапель у паливно-повітряних сумішах у межах моделі максимуму ентропії. Дійсна робота є продовженням та розвитком нашої роботи [6], що присвячена аналізу впливу термодинамічних властивостей палива на стан крапельно-повітряної суміші.

1. Основні положення методу максимуму ентропії при моделюванні стану розпиленого палива.

У якості моделі розпиленого палива розглядається сукупність крапель, кожна з яких характеризується поточним діаметром D та швидкістю руху u . Для опису стану такої системи можна використати диференціальну функцію розподілу $f(D, u)$ за розмірами та швидкостями, ідентифікація якої здійснювалася за допомогою методу максимуму ентропії.

Нагадаємо, що згідно з основним положенням методу, серед усіх можливих станів крапельно-повітряної суміші реалізується той, при якому ентропія системи досягає свого максимуму. Процес формування крапель, наразі зміна виду та параметрів функції розподілу, в заданому об'ємі простору при цьому розглядається як перехід із одного стану в інший – кінцевий, який відповідає своєму новому стану рівноваги. Відповідно до законів термодинаміки в процесі переходу між цими станами маса, імпульс та енергія мають підкорятись законам збереження, у той час як ентропія всієї системи після розпилення має досягати свого максимуму.

Очевидно, що в якості початкового стану системи вибирають стан рідини на виході інжектора, тоді як кінцевим вважається стан, коли остаточно сформовані краплі розпиленої рідини заповнюють увесь заданий об'єм конусу розпилення. Рівняння, які описують перехід системи між вказаними станами, найбільш детально розглянуто в [1–6]. Зокрема, врахування основних процесів, які протікають під час формування крапельної системи, призводить до наступної системи інтегральних рівнянь відносно параметрів функції розподілу.

Для задач, визначених у даній роботі, достатньо розглядати рух системи крапель лише вздовж однієї координатної осі. Тоді у межах вибраного наближення рівняння законів збереження маси, імпульсу та енергії через функцію розподілу (щільність ймовірності) f розмірів та швидкостей крапель можна записати в такому знерозміреному вигляді [1–6]:

$$\iint f \bar{D}^3 d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{G}_m; \quad (1)$$

$$\iint f \bar{D}^3 \bar{u} d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{G}_{mv}; \quad (2)$$

$$\iint f (\bar{D}^3 \bar{u}^2 + B \bar{D}^2) d\bar{u} d\bar{D} = 1 + \bar{G}_e; \quad (3)$$

$$\iint f \bar{u} d\bar{u} d\bar{D} = 1, \quad (4)$$

де $\bar{G}_m = \frac{G_m}{\dot{m}_o}$, $\bar{G}_{mv} = \frac{G_{mv}}{J_0}$, $\bar{G}_e = \frac{G_e}{\dot{E}_o}$, $\dot{E}_o = \dot{m}_o U_0^2$, $\bar{V} = \frac{V}{V_m}$, $\bar{u} = \frac{u}{U_0}$, $V_m = \frac{\dot{m}_o}{\rho \dot{n}}$, $We = \frac{\rho U_0^2 \cdot D_{30}}{\sigma}$, $B = \frac{12}{We}$,

We – число Вебера крапельної системи.

Умови функціонування інжектора при формуванні повітряно-крапельної суміші визначають величини швидкості утворення крапель рідини $\dot{n} = \partial n / \partial t$, подачі в систему маси \dot{m} , імпульсу J_0 та енергії \dot{E}_0 . G_m, G_{mv}, G_e – швидкості роботи джерел (або стоків) речовини, імпульсу і енергії в самому розпиленому паливі σ , ρ – поверхневий натяг рідини і її густина \bar{V} , \bar{u} – знерозмірений об'єм краплі та її швидкість руху, що отримані нормуванням на значення середньої швидкості впорскування рідини U_0 та на середній об'єм крапель V_m . Якщо прийняти, що краплини мають сферичну форму, то середній

об'єм крапель V_m можна пов'язати із середнім (об'ємним) діаметром крапель $V_m = \frac{\pi}{6} D_{30}^3$. У зазначеній формулі використано осереднений за об'ємом краплини діаметр D_{30} , який вводиться формулами з [1–6]. Тоді відповідний знерозмірений діаметр краплини $\bar{D} = D/D_{30}$.

Остаточне формування математичного забезпечення задачі виконано з урахуванням умови нормування щільності розподілу ймовірностей (4). У наведених виразах інтегрування виконується по всьому об'єму та швидкостям руху крапель.

Рівняння (2), яке відображає закон збереження імпульсу при формуванні системи крапель, записане в скалярній формі. Це відповідає вказаному вище одномірному припущенню в описі руху крапель, коли всі вони рухаються вздовж однієї осі, не утворюючи при цьому конуса розпилення. Вибране припущення обмежує об'єм вихідної інформації про стан крапель, але фізична сутність моделі дозволяє отримати кількісні дані, які адекватно відображають основні закономірності впливу властивостей розпиленого палива на кінцевий стан крапельно-повітряної суміші.

У рівнянні (3) враховано, що крім кінетичної енергії краплина має і поверхневу енергію, яка необхідна для її формування. Ця компонента енергії, відповідно [3–6], розраховується безпосереднім множенням площі поверхні краплі поточного діаметра на поверхневий натяг рідини.

Згідно з методом максимуму ентропії, ентропія S у кінцевому стані системи розпиленних крапель має досягати свого максимуму [1–6]. Відповідно до класичних взаємозв'язків між ентропією системи та щільністю ймовірності заповнення можливих її станів [2–6], можна записати:

$$S = -k_B \cdot \iint f \cdot \ln(f) d\bar{V} d\bar{u}; \quad (5)$$

де k_B – стала Больцмана.

Система рівнянь (1–5) формує математичну задачу пошуку максимального значення ентропії системи крапель за умови існування в системі обмежень виду (1) – (4). Таку класичну задачу пошуку екстремуму функції, як правило, розв'язують із використанням методу множників Лагранжа.

Реалізацію методу множників Лагранжа щодо системи (1–4) було здійснено в роботах по розробці методу максимуму ентропії [1–3]. В них показано, що в неперервному наближенні для зміни об'ємів і швидкостей руху крапель частинний розподіл ймовірностей можна записати у вигляді:

$$f(\bar{D}, \bar{u}) = 3\bar{D}^2 \exp \left[-\alpha_0 - \alpha_1 \cdot \bar{D}^3 - \alpha_2 \cdot \bar{D}^3 \cdot \bar{u} - \alpha_3 (\bar{D}^3 \cdot \bar{u}^2 + B \cdot \bar{D}^2) \right]; \quad (6)$$

де α_i , $i = 0, 1, 2, 3$ – множники Лагранжа.

Отже, остаточний вигляд математичної моделі еволюції системи крапель, що рухаються, описується системою рівнянь (1–4), де функція $f(\bar{D}, \bar{u})$ визначається виразом (6) та задовольняє принципу максимуму ентропії (5).

Таким чином, розв'язання поставленої в роботі задачі зводиться до аналізу розв'язків системи інтегро-алгебраїчних рівнянь (1–6), вхідними даними для яких є набори термодинамічних параметрів палива різного складу і умови функціонування розпилювальної системи. Останнє означає, що розв'язки наведених рівнянь знаходилися для дизельного палива різного хімічного складу, враховуючи біопаливо, коли змінними параметрами моделі було обрано величини втрат імпульсу та енергії при русі крапель. Необхідні для розрахунків термодинамічні параметри палив, розпилення яких моделювалося, запропоновано в наших роботах [4–6].

Для отримання таких даних в якості вхідних параметрів для рівнянь (2.1) – (2.6) постають різні значення параметрів \bar{G}_{mv} та \bar{G}_e , які враховують роботу стоків для імпульсу і енергії, відповідно. В межах вибраної моделі вказані параметри розглядаються як підгінні та їх значення знаходяться за найкращої відповідності експерименту.

Водночас, величини, навколо яких здійснювалась їх варіація для досягнення найкращої відповідності з експериментами, підтримувалась в околі, рівному або близькому величині, знайденої в роботі [3] при застосуванні моделі до опису процесів розпилення води. Відповідно до роботи [3], частка імпульсу, яка розсіюється при подоланні сил тертя при переході системи з початкового стану в стан ізоентропного, динамічного процесу з максимально можливою ентропією, склала величину $\bar{G}_{mv} = -0,0175$.

Щодо втрати енергії на роботу сил тертя впродовж того ж проміжку часу руйнування струменя рідини, то з метою зменшення підгінних параметрів моделі і спрощення інтерпретації її результатів було використано підхід, запропонований у [5, 6]. Згідно з припущенням [6], величину частки втраченої енергії на виконання роботи проти сил тертя, як при русі крапель у повітрі, так і внутрішнього тертя при русі і руйнуванні струменя рідини приймали рівною відповідній величині для частки розсіяного імпульсу. Інакше кажучи, у всіх виконаних розрахунках приймали, що $\bar{G}_{mv} = \bar{G}_e$.

Крім розглянутих вище параметрів, які характеризують втрати імпульсу і енергії у системі, єдиним параметром, який визначає вид даного розподілу, є число Вебера We . Розрахунки чисел Вебера на

підставі термодинамічних параметрів з робіт [5, 6] показують, що для випадку сталої середньої швидкості на виході форсунки розпилювальної системи величини вказаних чисел знаходяться у проміжку від 220 до 500, коли тиск впорскування знаходиться на рівні 40 мПа та належить інтервалу 2500–3200 в умовах, коли тиск впорскування становить 100 мПа. Узагальнюючи ці дані, можливо стверджувати, що для практично всіх важливих умов формування повітряно-крапельних сумішей палив різного складу величини чисел Вебера все ж не виходять за межі 220–3500.

2. Математичне забезпечення методу максимуму ентропії.

Для побудови розподілів розмірів крапель та їх швидкостей у крапельно-повітряній системі за принципом максимуму ентропії необхідно максимізувати функцію (5), для якої диференціальна функція розподілу f має вигляд (6) з множниками Лагранжа α_i , $i = 1, 2, 3$, які задовольняють такій системі рівнянь:

$$\begin{aligned} F_1(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) &\equiv \int_0^{D_{\max}} \varphi [D^3 - (1 + S_m)] dD = 0, \\ F_2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) &\equiv \int_0^{D_{\max}} \varphi_1 D^3 - \varphi [1 + S_{mv}] dD = 0, \\ F_3(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) &\equiv \int_0^{D_{\max}} \varphi_2 D^3 + \varphi [BD^2 - (1 + S_e)] dD = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

де $\varphi = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\pi D}{\alpha_3}} \{ \text{Erf}(x_{\max}) - \text{Erf}(x_{\min}) \} \exp \left(-\alpha_1 D^3 + \frac{\alpha_2^2}{4\alpha_3} D^3 - \alpha_3 B D^2 \right)$,

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{3}{4D\sqrt{\alpha_3^3}} \left(\exp(y_{\min}) \left[2\sqrt{\alpha_3} + \alpha_2 \sqrt{\pi D^3} \exp(x_{\min}^2) \text{Erf}(x_{\min}) \right] - \right. \\ &\quad \left. - \left(\exp(y_{\max}) \left[2\sqrt{\alpha_3} + \alpha_2 \sqrt{\pi D^3} \exp(x_{\max}^2) \text{Erf}(x_{\max}) \right] \right) \right) \end{aligned}$$

та

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \frac{3}{8\sqrt{\alpha_3^5 D^5}} \times \\ &\quad \left(\exp(y_{\max}) \left[2\sqrt{\alpha_3 D^3} (\alpha_2 - 2\alpha_3 U_{\max}) + (2\alpha_3 + \alpha_2^2 D^3) \sqrt{\pi} \exp(x_{\max}^2) \text{Erf}(x_{\max}) \right] - \right. \\ &\quad \left. \left(\exp(y_{\min}) \left[2\sqrt{\alpha_3 D^3} (\alpha_2 - 2\alpha_3 U_{\min}) + (2\alpha_3 + \alpha_2^2 D^3) \sqrt{\pi} \exp(x_{\min}^2) \text{Erf}(x_{\min}) \right] \right) \right), \\ x_{\max, \min} &= \frac{\alpha_2 + 2\alpha_3 U_{\max, \min}}{2\sqrt{\alpha_3}} D^{3/2}, \\ y_{\max, \min} &= -\alpha_1 D^3 - \alpha_2 D^3 U_{\max, \min} - \alpha_3 B D^2 - \alpha_3 D^3 U_{\max, \min}^2, \\ \text{Erf}(x) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \end{aligned}$$

Тоді як параметр α_0 обчислюється із умови нормування:

$$\alpha_0 = -\ln \left(\int_0^{D_{\max}} \varphi dD \right).$$

Розв'язання системи (7) є непростим завданням [1–6] через погану зумовленість матриці Якобі на початковій стадії ітераційного процесу, пов'язану із значною апріорною невизначеністю у виборі початкових значень шуканих змінних.

В основу ітераційного алгоритму пошуку розв'язку системи інтегро-алгебраїчних рівнянь покладено метод Ньютона. Згідно з цим методом, корегування елементів матриці розв'язку на кожному кроці ітераційного процесу здійснювалося за формулою:

$$X_{n+1} = X_n - M^{-1} F(X_n),$$

де $X_n = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)_n^T$ матриці поточних значень шуканих змінних на відповідних кроках ітераційного процесу. Символ « T » біля матриці означає операцію її транспонування; $|F(X_n)|$ – матриця з елементами, які мінімізуються; $M = \left| \partial F_j / \partial X_j \right|$ – матриця лінеаризації системи рівнянь (7). Показник -1 означає операцію обертання матриці. Елементи матриці часткових похідних, з якою працює реалізований в роботі алгоритм пошуку розв'язку, мають такий вигляд:

$$M = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_3} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_3} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial F_3}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial F_3}{\partial \alpha_3} \end{pmatrix},$$

$$M_{1j} = \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_j} = \int_0^{D_{\max}} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_j} [D^3 - (1 + S_m)] dD,$$

$$M_{2j} = \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_j} = \int_0^{D_{\max}} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha_j} D^3 - \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_j} [1 + S_{mv}] dD,$$

$$M_{3j} = \frac{\partial F_3}{\partial \alpha_j} = \int_0^{D_{\max}} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha_j} D^3 + \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_j} [BD^2 - (1 + S_e)] dD, \quad j = 1, 2, 3.$$

Досвід роботи з розробленим алгоритмом пошуку розв'язку методом Ньютона показав, що цей метод для свого використання в методі максимуму ентропії потребує деякої модернізації. На існування такої проблеми було вказано і в роботах [3–6]. Основне припущення при здійсненні модифікації обчислювального алгоритму пов'язане з використанням можливості виконати аналітичне інтегрування функції розподілу f , а також обмежити межі інтегрування змінних скінченними величинами. Такий підхід зумовлений швидким затуханням підінтегральних експоненційних функцій і має прийнятні втрати точності обчислень.

Останнє змусило при виконанні чисельного моделювання здійснити оцінку похибки обчислень, які вносились у кінцевий результат через прийняті при інтегруванні припущення. Результати розрахунків показали, що корегування меж інтегрування вносять похибку в кінцевому результаті менше 0,2%. У той же час досвід роботи з розробленим алгоритмом показав, що межі інтегрування $\bar{D}, \bar{U} \in (0; 3,5)$, які пропонують у [2–3], не завжди забезпечують стійку роботу обчислювальної програми. Це проявлялось у появі розв'язків, які не відповідають фізичному змісту задачі, або зумовлювало втрату збіжності ітераційного процесу. Відновлення збіжності алгоритму в цих випадках вдавалось збільшенням інтервалу інтегрування $\bar{D}, \bar{U} \in (0; 8)$.

Придатність розробленого математичного та програмного забезпечення була доведена підтвердженням чисельних розрахунків [3], коли в межах моделі максимуму ентропії було виконано розрахунки, які моделюють процес розпилення води ($We = 311$). Отриманий результат дозволяє стверджувати застосовуваність розроблених обчислювальних програм для моделювання впливу різноманітних умов розпилення палива різного хімічного складу на кінцевий стан крапельно-повітряної паливної суміші.

3. Моделювання впливу величини витрат на параметри крапельно-повітряної системи.

Основний акцент у розрахунках даної роботи зміщено у напрямі моделювання впливу величини витрат на кінцевий стан паливно-повітряної суміші, яка сформована на основі палива різного хімічного складу. Тому в якості змінних параметрів у розрахунках було обрано величини параметрів \bar{G}_{mv} та \bar{G}_e . При цьому величини чисел Вебера було обрано такими, що вони відповідали найбільш типовим умовам розпилення палива. Останнє означає, що при формуванні паливної суміші в умовах значних витрат та з використанням термодинамічних параметрів палив від класичних дизельних до перспективних біодизельних з таблиці 1 [6] значення числа Вебера знаходилося в межах 220–550.

Найбільш суттєво на величину числа Вебера (4) впливає середня швидкість палива, що розпилюється. Істотно, що при зменшенні величини витрат у системі швидкість руху рідини істотно збільшується. Вважаючи, що число Вебера є квадратичною функцією цього параметра, то варто очікувати значні його зміни при варіації витрат у системі. Теоретично виконати розрахунки швидкості руху рідини в таких умовах з високою вірогідністю дуже важко. Тому в роботі значення числа Вебера при моделюванні розпилення палива в умовах малих витрат все ж розглядалося як підгінний параметр. Його величину знаходили за найкращою відповідністю розрахунків експериментальним даним [8–9] за функцією розподілу розміру крапель.

В якості першого наближення при моделюванні процесів розпилення було обрано таку величину відносних витрат імпульсу на подолання сили тертя $\bar{G}_{mv} = -0,017$, а для втрати енергії було прийнято $\bar{G}_e = 0$. Саме таку оцінку величини вказаних параметрів було використано в [3] для опису утворення водно-повітряної крапельної суміші в різних умовах її формування. Істотно, що ці величини корегувалися при моделюванні кожного реального процесу розпилення.

3.1. Моделювання стану розпиленого палива в умовах значних втрат.

Найбільш вагомим підтвердженням застосовуваності методу максимуму ентропії до опису процесу розпилення палива різного хімічного складу можна отримати, досліджуючи експериментальні дані [7]. Принциповою особливістю цих даних необхідно визнати те, що вони отримані для паливних сумішей різного складу за однією й тією самою методикою і на тому самому обладнанні.

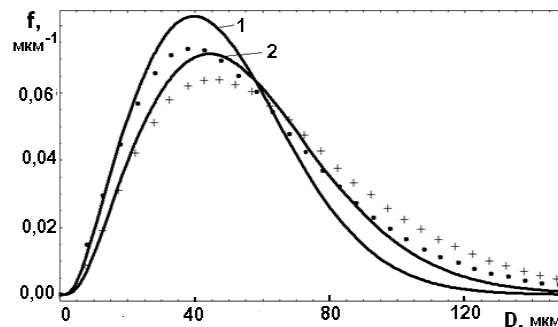
Для здійснення зіставлення розрахункових та експериментальних даних перерахунків від нормованих змінних у функціях щільності розподілу діаметрів крапель, в яких виконувалися розрахунки, до параметрів, що аналізуються в експериментальних умовах, здійснювався за таким виразом:

$$f(D) = \int_{D_i}^{D_{i+1}} f(\bar{D}) d(D/D_{30}) = \frac{1}{D_{30}} f_i(\bar{D}) \cdot (D_{i+1} - D_i) = \frac{\Delta D}{D_{30}} \cdot f_i(\bar{D}),$$

де $\Delta D = D_{i+1} - D_i$ – інтервал, в якому здійснюється усереднення експериментальних даних за діаметрами крапель.

Експериментальні результати з розподілу діаметрів крапель за розмірами для випадку розпилення палива, утвореного сумішшю дизельного палива з ріпаковою олією з різними співвідношеннями разом з результатами розрахунків, зображено на рисунку 1. Перед обговоренням результатів рисунку 1 варто зупинитися на особливостях отримання представлених теоретичних залежностей. Дійсно, в експериментах [7] виконувалися вимірювання величини об'ємно-поверхневого діаметра крапель D_{32} , тоді як розрахунки розподілу даної роботи виконані, коли незалежною змінною задачі є діаметр D_{30} (1–4). Інтегральна формула для перерахунку діаметра D_{30} у D_{32} добре відома [2]. З даних [2] розраховується, що величина інтеграла, тобто коефіцієнта перерахунку між різними за способом усереднення діаметрами, залежить від виду функції розподілу і параметрів, які до неї належать. Водночас, виконані розрахунки моделі максимуму ентропії дають вичерпну кількісну інформацію про ці розподіли (6). Останнє означає, що в роботі коефіцієнт для перерахунків діаметрів D_{30} у D_{32} знаходився шляхом інтегрування відповідних розподілів числовими методами.

Результати розрахунків показали, що для вибраної форми розподілу (6) коефіцієнт перерахунку для діапазону чисел Вебера від 220 до 1000 виявився практично сталим і рівний 1,19. Це означає, що при побудові графіка рисунку 1 перехід від діаметрів D_{30} до D_{32} здійснювався за формулою: $D_{32} = 1,19 D_{30}$.



Примітка: позначки (•), (+) відповідають експериментальним даним для складів паливних сумішей 1–2.

Рис. 1. Щільності розподілу діаметрів крапель при розпиленні палива різного складу, де 1–30 % РО та 70 % ДП: $We = 750$,

$$\bar{G}_{mv} = \bar{G}_e = -0,020 ; 2 - 40 \% РО та 60 \% ДП: $We = 450$, $\bar{G}_{mv} = \bar{G}_e = -0,032$$$

Необхідні для чисельної обробки даних [7] величини чисел Вебера і частини втрат для імпульсу і енергії були знайдені за допомогою тих же самих міркувань, як були використані в роботі [6]. Саме використання таких припущень дозволило задовільно та досить послідовно описати експериментально знайдений розподіл крапель за їх діаметром, який отримано при розпиленні в'язкого палива в умовах значних втрат. Знайдені в результаті розрахунків величини чисел Вебера та відносних величин втрат наведено в підпису під рисунком.

Результати розрахунків розподілів крапель за їх розмірами разом з експериментальними даними [7] зображено на рисунку 1. Спостерігається задовільна відповідність результатів роботи моделі максимуму ентропії з експериментальними даними при зроблених припущеннях.

3.2. Моделювання стану розпиленого палива в умовах малих втрат.

У реальних умовах експлуатації двигунів втрати як імпульсу, так і енергії в системах, що формують паливно-повітряні суміші, зводять до мінімуму. Тому здійснювання моделювання розпиленого стану палива в умовах малих втрат має не лише важливе теоретичне спрямування, але й є корисним з практичної точки зору.

Розрахунки щільностей ймовірності при розпиленні дизельного палива та біодизелю з відповідними експериментальними даними [8, 9] наведено на рисунку 2, 3. Природно, що моделювання шуканих функції розподілу здійснювалося, згідно з формулами (1–6). Експериментальні дані щодо утворення паливних крапель за допомогою інжекторної системи Дельфи на різних відстанях від сопла взято з робіт [8, 9]. Використання таких даних для порівняння з результатами теоретичного моделювання в умовах малих втрат варто вважати обґрунтованим. Дійсно, експериментальні дані, що використано на рисунку 2 було отримано в реальних умовах роботи дизельного двигуна, коли мінімізації втрат у системі надається особлива увага.

Перед виконанням порівняльного аналізу варто вказати, що результати [8, 9] щодо розміру крапель в суміші дизельного палива і рапсової олії було отримано за допомогою промислового сопла, але в умовах, які відрізняються від умов розповсюдження крапель в реальній камері згоряння. Водночас, обмеженість такого роду даних примушує використовувати саме їх для аналізу розповсюдження палив з різними термодинамічними властивостями.

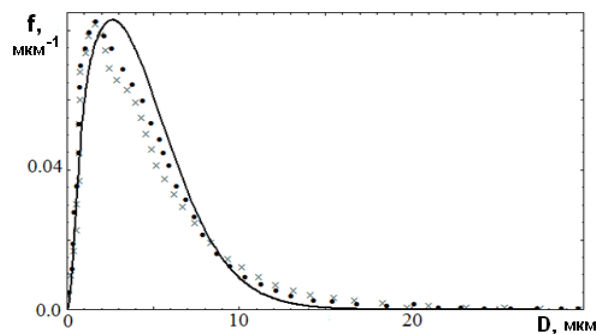


Рис. 2. Щільності розподілу діаметрів крапель при розпиленні дизельного (●) та біодизельного (×) палива на відстані 10 мм від сопла інжектору. Експериментальні дані [30]. Розрахункова лінія відповідає $We = 2500$, $S_{mv} = -0,0035$

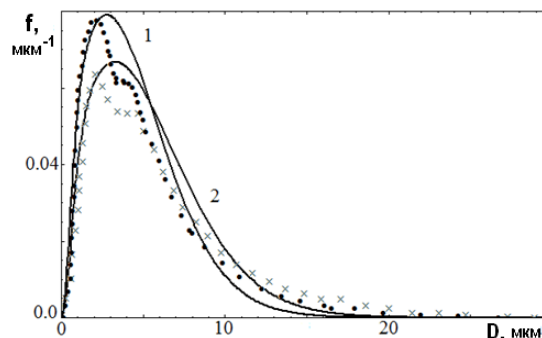


Рис. 3. Щільності розподілу діаметрів крапель при розпиленні дизельного (●) та біодизельного (×) палива на відстані 15 мм від сопла інжектора. Експериментальні дані [30]. Розрахункова лінія відповідає $We = 2500$. 1 – дизельне паливо при $S_{mv} = -0,0035$; 2 – біодизельне паливо при $S_{mv} = -0,00375$

Розподіл розмірів для крапель дизельного та біодизельного палива побудовано на рисунках 2, 3, коли параметри крапель знімалися на відстані 10 мм і 15 мм від сопла інжектора. Теоретичні криві, що зображені на рисунках 2, 3 лініями, було отримано таким чином. В якості параметрів моделі, що розглядаються як підгінні, природно обрати числа Вебера та відношення втрати імпульсу. Оцінки чисел Вебера для умови роботи сопла було здійснено з використанням термодинамічних властивостей розпиленої рідини та умов її розпилення, які надані в [6].

Як і в попередньому випадку найбільш складна проблема виникала при здійсненні теоретичної оцінки середньої швидкості палива на виході із сопла інжектора. Така оцінка була виконана на основі експериментальних даних [8–10] для середнього споживання палива форсуною. Найпростіші розрахунки величини середньої швидкості рідини від розмірів отворів сопла та їх числа дозволяли оцінити шукані параметри. Наша оцінка цього параметру руху не суперечить даним [10] і наведена в таблиці 1 роботи [6].

Варто зазначити, що така оцінка дає істотну помилку для розрахункового значення числа Вебера. Дійсно, формула для виведення числа Вебера містить квадрат середньої швидкості руху рідини. Тому навіть мала варіація величини швидкості руху рідини значно відображається на величині числа Вебера.

Крім того, як вже зазначалося, динамічна в'язкість дизельного та біодизельного палива відрізняється одна від одної більше ніж на 30–40 %. Це забезпечує нижчу вихідну швидкість біодизельного палива, порівняно з дизельним паливом. Це явище необхідно приймати до уваги при виконанні оцінок швидкості руху палива та розрахунків числа Вебера і моделюванні умов руху крапель рідини.

Водночас, досвід наших розрахунків за уявленнями моделі максимуму ентропії показує, що кількісне значення теоретичного розподілу для розмірів крапель залежить від числа We відносно слабо. Цей ефект ілюструється даними рисунку 1 з роботи [6], з якого постає, що лише значна варіація числа Вебера може істотно змінити форму функції розподілу. Це і означає відносно слабку чутливість стану крапель відповідно моделі максимуму ентропії від величини числа Вебера.

Через складність виконання вірогідних розрахунків числа Вебера в умовах експериментів [8–10], що зумовлено відсутністю прямих вимірів середньої швидкості інжекції рідини, у виконаних розрахунках було прийнято, що число Вебера є сталою величиною та її значення дорівнює 2500. Саме таке значення числа Вебера і використано при отриманні даних рисунків 2, 3.

Порівняння експериментальних даних розмірів крапель при розпиленні дизельного та біодизельного палива на досить малій відстані від виходу сопла показує, що вони відрізняються дуже слабо. Можна припустити, що втрати імпульсу при русі палива з різними термодинамічними характеристиками на такій малій відстані майже однакові. Тому моделювання розподілу для системи крапель здійснювалося при фіксованому значенні числа $We = 2500$, а величина S_{mv} розглядалася як регульований параметр на відповідність експериментальним даним. Таку відповідність чисельних результатів експериментальному розподілу для дизельного палива було отримано при $S_{mv} = 0,0035$. Це значення S_{mv} істотно нижче ніж для випадку розпилення суміші дизельного палива з ріпаковою олією (рис. 1). Такий результат визначає нижчі втрати імпульсу при розпилюванні палива з меншою в'язкістю, тобто відповідає умовам розпилення рідини з меншими витратами.

Якщо відстань від сопла збільшується до 15 мм, то експериментальні розподіли для розмірів крапель у випадках дизельного та біопалива починають відрізнятися (рис. 3) і різниця між ними стає досить істотною. Для опису наведених експериментальних даних число Вебера було прийнято незмінним і, як і раніше, дорівнювало 2500. Водночас, величина S_{mv} вважалася змінною. Найкраща відповідність експериментам досягалася при $S_{mv} = -0,0375$. Таке значення вказаного параметра відповідає збільшенню втрат імпульсу при розпиленні біодизельного палива. Таким чином, викладені вище твердження дозволили досягнути поєднання теоретичних та експериментальних даних.

Досвід виконаних розрахунків параметрів розпилення палива у різних умовах для втрат дозволяє стверджувати, що метод максимуму ентропії забезпечує адекватну оцінку впливу паливних термодинамічних властивостей рідини на кінцевому стані крапельно-повітряної суміші.

Висновки. Метод максимуму ентропії використано для оцінки впливу величини втрат імпульсу та енергії у розпилювальній системі на кінцевий стан паливної крапельно-повітряної суміші. Отримано кількісні дані про вплив величини втрат на зміну параметрів функцій розподілу для діаметрів паливних крапель у системі. Розрахунки зіставляються з експериментами із розпилення дизельного палива та його сумішей різного складу в умовах різних величин втрат у системі. Показано, що крапельно-повітряна суміш реагує на зміну величини втрат, у першу чергу, зміною діаметрів крапель палива. Отримані дані необхідні для підвищення ресурсу та покращання експлуатаційних характеристик автомобільних двигунів.

Список використаної літератури:

1. BI-Modal Size Distributions Predicted by Maximum Entropy are Compared with Experiments in Sprays / L.P. Chin, G.Switzer, R.S. Tankin, T.Jackson, J.Stutrud // Combustion Science and Technology. – 1995. – Vol. 109:1–6. – Pp.35–52.
2. Dumouchel C. The Maximum Entropy Formalism and the prediction of Liquid Spray Drop-Size Distribution / C.Dumouchel // Entropy. – 2009. – Vol. 11. – Pp. 713–747.
3. Movahednejad E. Prediction of Droplet Size and Velocity Distribution in Droplet Formation Region of Liquid Spray / E.Movahednejad, F.Ommi, S.M. Hosseinalipour // Entropy. – 2010. – Vol. 12, Pp. 1484–1498.
4. Kolodnytska R.V. Siroid Ye.S. Influence of the thermodynamic properties of a sprayed liquid on the droplet-air mixture parameters in the framework of the maximum entropy model / R.V. Kolodnytska, P.P. Moskvina, S.I. Skurativskiy // Ukr. J. Phys. – 2017. – Vol. 62, No. 3. – Pp. 230–239.
5. Kolodnytska R. Maximum entropy method for biodiesel spray droplet distribution / Kolodnytska R., Skurativskiy S., Moskvina P. // ILASS–Europe 2017: 28-th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. – (6–8 Sept.) 2017, Valencia, Spain.
6. Застосування методу максимуму ентропії для аналізу стану крапель в біопаливо-повітряних сумішах / P.V. Колодницька, П.П. Москвін, В.Л. Добряков, В.М. Очич // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2017. – № 1 (79). – С. 134–144.
7. Иващенко А.В. Двигатели внутреннего сгорания / А.В. Иващенко, В.Н. Горячкин. – 2011. – Т. 2. – С. 41.

8. Crua C. Microscopic imaging of the initial stage of diesel spray formation / C.Crua, M.R. Heikal, M.R. Gold // *Fuel*. – 2015. – Vol. 157. – Pp. 140–150.
9. Crua C. Dropsizing of Near-Nozzle Diesel and RME Sprays by Microscopic Imaging / C.Crua, G. de Sercey, M.R. Heikal // *ICLASS 2012: 12-th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. – (26 Sept.) 2012. – Heidelberg, Germany.
10. Sellens R.W. A simplified prediction of droplet velocity distributions in a spray / R.W. Sellens, T.A. Brzustowski // *Combust. Flame*. – 1986. – Vol. 65. – P. 273.

References:

1. Chin, L.P., Switzer, G., Tankin, R.S., Jackson, T. and Stutrud, J. (1995), «BI-Modal Size Distributions Predicted by Maximum Entropy are Compared with Experiments in Sprays», *Combustion Science and Technology*, Vol. 109:1–6, pp. 35–52.
2. Dumouchel, C. (2009), «The Maximum Entropy Formalism and the prediction of Liquid Spray Drop-Size Distribution», *Entropy*, Vol. 11, pp. 713–747.
3. Movahednejad, E., Omami, F. and Hosseinalipour, S.M. (2010), «Prediction of Droplet Size and Velocity Distribution in Droplet Formation Region of Liquid Spray», *Entropy*, Vol. 12, pp. 1484–1498.
4. Kolodnytska, R.V., Moskvina, P.P. and Skurativskiy, S.I. (2017), «Siroid Ye.S. Influence of the thermodynamic properties of a sprayed liquid on the droplet-air mixture parameters in the framework of the maximum entropy model», *Ukr. J. Phys.*, Vol. 62, No. 3, pp. 230–239.
5. Kolodnytska, R., Skurativskiy, S. and Moskvina, P. (2017), «Maximum entropy method for biodiesel spray droplet distribution», *ILASS–Europe 2017: 28-th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, from 6–8 Sept., Valencia, Spain.
6. Kolodnytska, R.V., Moskvina, P.P., Dobryakov, V.L. and Ochysh, V.M. (2017), «Zastosuvannya metodu maksimumu entropii' dlja analizu stanu krapel' v biopalyvo-povitrjanyh sumishah», *Visnyk ZhDTU, Serija Tehnichni nauky*, No. 1 (79), pp. 134–144.
7. Ivashchenko, A.V. and Gorjachkin, V.N. (2011), *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, Vol. 2, P. 41.
8. Crua, C., Heikal, M.R. and Gold, M.R. (2015), «Microscopic imaging of the initial stage of diesel spray formation», *Fuel*, Vol. 157, pp. 140–150.
9. Crua, C., de Sercey, G. and Heikal, M.R. (2012), «Dropsizing of Near-Nozzle Diesel and RME Sprays by Microscopic Imaging», *ICLASS 2012: 12-th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, from 26 Sept., Heidelberg, Germany.
10. Sellens, R.W. and Brzustowski, T.A. (1986), «A simplified prediction of droplet velocity distributions in a spray», *Combust. Flame*, Vol. 65, pp. 273.

Колодницька Руслана Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного господарства Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- паливні системи двигунів внутрішнього згорання;
- термодинаміка складних систем, термодинаміка розчинів;
- термодинамічні властивості дизельного палива та біопалива.

Москвін Павло Петрович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики та вищої математики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- термодинаміка складних систем, матеріалознавство;
- обчислювальні методи аналізу.

Тел.: (096) 001–97–59.

E-mail: moskvinpavel56@gmail.com.

Очич Віра Михайлівна – старший викладач кафедри фізики та вищої математики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обчислювальні методи вищої математики, математичне моделювання;
- диференціальні рівняння, чисельні методи їх розв'язку.

Тел.: (097) 811–89–59.

E-mail: ochychvm@ukr.net.

Головня Руслан Миколайович – старший викладач кафедри фізики та вищої математики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- диференціальні рівняння, чисельні методи їх розв'язку.

Тел.: (067) 584–35–43.

E-mail: golovna@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2018.