

УДК 629.3:621.434

Колодницька Р.В., к.т.н.¹, Карімі К., аспірант², Круа К., д.т.н.²,
Хайкел М.Р., д.т.н.², Сажина Е.М., д.т.н.²

1 — Житомирський державний технологічний університет, м. Житомир;

2 — Дослідницький технічний центр Брайтонського університету,
Великобританія

МОДЕЛЮВАННЯ ДОВЖИНИ КОНУСА РОЗПИЛЮВАННЯ У ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ (СОФМ-МОДЕЛЬ)

В статті описано моделювання довжини конуса розпилювання дизельного палива, використовуючи СОФМ модель з врахуванням змінної швидкості маси, що впорскується. Довжина конуса розпилювання збільшується зі збільшенням тиску впорскування, що добре узгоджується з експериментальними даними для форсунок Delphi та Bosh, що одержані в автомобільному центрі ім. Рікардо, (Брайтонський Університет).

Вступ

Одним із шляхів зниження викидів сажі дизельного двигуна, поряд із застосуванням біопалива, є оптимізація процесу розпилювання у камері згорання. Розпилюючий струмінь можна охарактеризувати такими параметрами як довжина конуса розпилюючого струменя, кут конуса розпилювання та діаметр крапель при розпилюванні. Довжина конуса розпилювання може бути визначена як максимальна відстань, яка досягається, коли паливо впорскується у камеру згорання. Надмірна довжина розпилювання приводить до попадання палива на стінки камери згорання [1]. Як правило процес розпилювання розглядають як двохстадійний процес, що складається з основної стадії розпилювання і початкової стадії, яка вивчена ще недостатньо. **Метою даної роботи** є моделювання довжини конуса розпилювання на початковій стадії розпилювання.

Виклад основного матеріалу

Для моделювання довжини конуса розпилювання запропоновано багато моделей, деякі із них надзвичайно складні. Достатньо популярна KIVA-модель, яка описана, наприклад, в роботі [2]. Використовуючи підхід Лагранжа-Ейлера, розпилювання моделюється як набір частинок (парселів). Кожна порція впорскується зі специфічною швидкістю впорскування за певний проміжок часу. Такий підхід часом дає гірший збіг з експериментальними даними, ніж емпіричні формули [3]. Досить відома модель Разлейцева [1], на основі якої знаходиться довжина конуса розпилювання в програмі ДИЗЕЛЬ-РК (МДТУ ім. Баумана). Серед оригінальних моделей можна відмітити модель Соберга [4]. Автор показав, що паливо, яке випускається з розпилювача, утворює інтенсивну тверду серцевину, а зсувні сили створюють вихри і неоднорідну периферію розпилювання. Згідно моделі [4], довжина конуса розпилювання — це оточуюча всіх індивідуальних розпилювальних парселів на кривій довжин розпилювання. Було досліджено, що порції рідини всередині розпилювання рухаються швидше, ніж вершина струменю сама по собі. Це означає, що паливо з рідкої серцевини випинається в головку (вершину) розпилювання зі штовханням старіших порцій палива вбік, що спричиняє розтягування головки струменя. З іншого боку, дослідники [5] допускають, що вершина струменя має більшу швидкість руху, ніж його центр мас. Було запропоновано СОФМ модель (centre of mass model) для визначення довжини конуса розпилювання в дизельному двигуні.

1. COFM модель для визначення довжини конуса розпилювання

COFM модель [3, 4] застосовує закон збереження імпульсу до всієї маси палива, що впорскується в камеру згорання за час t :

$$\frac{d(mu)}{dt} = \rho_l A_n u_{inj}^2 - \frac{1}{2} C_D \rho_g A u_{tip}^2, \quad (1)$$

де m — маса впорскуваного палива;

u — швидкість центру мас струменя;

ρ_l — густина впорскуваного палива;

A_n — площа поперечного перерізу кожного отвору форсунки;

u_{inj} — миттєва швидкість впорскування;

C_D — коефіцієнт опору для струменя;

ρ_g — густина газу;

A — площа поперечного перерізу струменя;

u_{tip} — швидкість вершини струменя.

Рівняння (1) можна представити у вигляді:

$$\frac{d(mu)}{dt} = \rho_l A_n u_{inj}^2(t) - \frac{1}{2} C_D \rho_g A(t) \beta^2 u^2, \quad (2)$$

де β — відношення довжини конуса розпилювання вершини струменя S_{tip} до довжини конуса розпилювання центра мас струменя S .

У рівнянні (2) $u \equiv u(t)$, $A = A(t)$. Коефіцієнт опору для струменя був прийнятий постійним ($C_D = 1,54$). Миттєва швидкість впорскування $u_{inj} = u_{inj}(t)$ може бути підрахована з експериментальних даних швидкості зміни маси струменя dm/dt за формулою:

$$u_{inj} = \frac{\dot{m}}{\rho_l A_n n}, \quad (3)$$

де n — кількість отворів форсунки.

Допускається, що форма струменя на початковій стадії впорскування являє собою конус з площею поперечного перерізу $A(t)$ і висотою, що дорівнює довжині розпилювання S_{tip} . Тобто, об'єм струменя може бути представлений у вигляді:

$$V(t) = \frac{1}{3} A(t) \beta S(t), \quad (4)$$

де $S(t)$ — довжина конуса розпилювання, який утворює центр мас струменя.

Причому, швидкість центра мас струменя u :

$$u = \frac{dS}{dt}. \quad (5)$$

Конус розпилювання буде формуватися як із рідини, що впорскується, так і з повітря. Введемо коефіцієнт ε (доля рідини у розпилюванні), що буде дорівнювати відношенню об'єму рідини в розпилюванні до загального об'єму струменя розпилювання:

$$\varepsilon = \frac{m(t)}{\rho_l V(t)}, \quad (6)$$

де ε — доля рідини в розпилюванні; $m(t) = m$;
 $V(t)$ — загальний об'єм струменя розпилювання.

Виходячи з рівнянь (4) і (6), площа поперечного перерізу струменя на кожному кроці буде дорівнювати:

$$A(t) = \frac{3}{\beta s(t)} \frac{m(t)}{\rho_l \varepsilon}. \quad (7)$$

Допускається, що доля рідини у струмені (доля рідкої фракції) зменшується з часом за експоненціальною залежністю:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{t+t_{OD}}{\tau}\right), \quad (8)$$

де t_{OD} — затримка відкриття форсунки;

τ — характеристичний час розпаду (підгоночний параметр моделі), $\varepsilon_0 = 1$.

2. Аналіз COFM-моделі, програма COFM (Matlab)

Рівняння (2), (3), (5), (7), (8) були зведені до системи двох диференціальних рівнянь з двома невідомими: швидкістю центра мас (u) та довжиною конуса розпилювання центра мас (S):

$$\begin{aligned} du / dt &= A_1 \times u^2 / S + A_2 \times u + A_3 \\ dS / dt &= u \end{aligned} \quad (9)$$

де A_1, A_2, A_3 — змінні коефіцієнти, що залежать від t , $S = S(t)$.

Довжина розпилювання вершини струменя S_{iip} знаходилась як $s_{iip}(t) = \beta s(t)$.

Система (9) вирішувалась, використовуючи авторську програму COFM, яка була написана в середовищі Matlab 6.5. При вирішенні диференційного рівняння застосовувався чисельний метод Рунге Кута зі змінним кроком інтегрування (функція *ode45*). Причому, функції *ode113* та *ode15s* давали практично ті ж самі рішення у порівнянні з *ode45*. Дослідження, що проведені у Matlab, показали, що постійний крок інтегрування не підтримується всіма вищевказаними функціями, хоча документація Matlab вказує на таку можливість.

COFM-програма (Matlab 6.5) дає можливість також зчитувати експериментальні дані по зміні швидкості маси палива, що впорскується, з текстового файлу. Програма також автоматично апроксимує дані, що зчитуються, у поліном. Степінь поліному можна задавати в програмі. Дослідження показали, що степінь поліному більше 6 використовувати недоцільно, так як це може привести до погіршення точності рішення диференційного рівняння. Маса впорскуваного палива знаходилась інтегруванням даних зі швидкості зміни маси, використовуючи функцію Matlab 'quad'.

В програмі використовувались такі вхідні дані: $\rho_l = 800 \text{ кг/м}^3$, $\rho_g = 19,9 \text{ кг/м}^3$; діаметр розпилюючих отворів форсунки $D_n = 0,2 \text{ мм}$, число розпилюючих отворів $n = 3$, (форсунки Bosh); $D_n = 0,135$, $n = 7$ (форсунки Delphi).

Головною відмінністю запропонованої моделі від існуючих є те, що тут враховується змінна величина швидкості впорскуваної маси, що вимірюється експериментально (рис. 1). Автори [3, 4] вважають, що це покращує точність моделювання.

На рис. 2 представлені довжини конуса розпилювання S_{iip} для Common Rail форсунок Bosh та Delphi з тиском в циліндрі 2 МПа, та тисками впорскування 140 та 60 МПа, що розраховані за COFM моделлю (9).

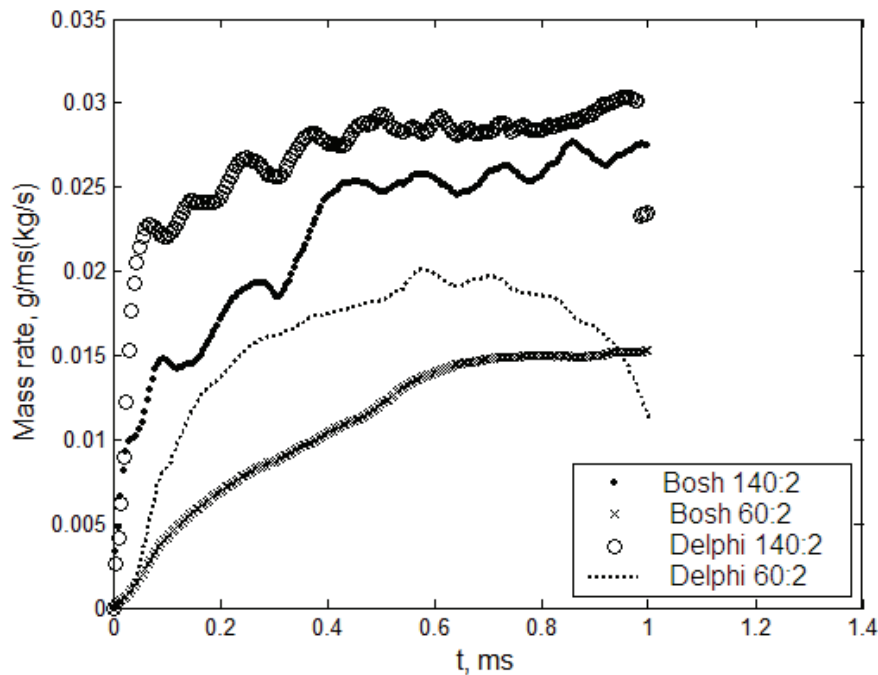


Рис. 1. Зміна швидкості впорскуваної маси (кг/с) для форсунок Bosh та Delphi (тиск впорскування 140 та 60 МПа, тиск газу 2 МПа) в залежності від часу (мілісекунди)

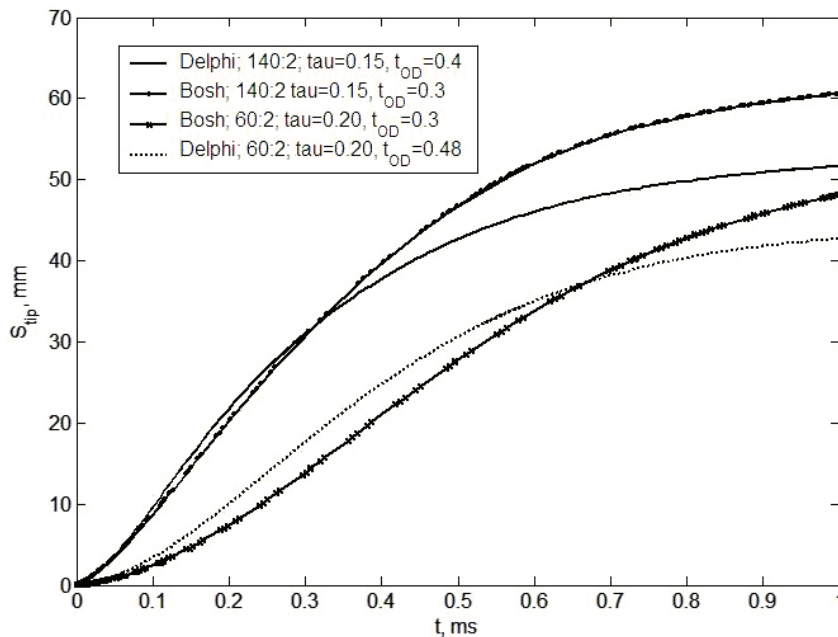


Рис. 2. Довжини конуса розпилювання (мм) для форсунок Bosh та Delphi (тиск впорскування 140 та 60 МПа, тиск газу 2 МПа) в залежності від часу (мілісекунди)

Як видно з рис. 2, довжина конуса розпилювання збільшується зі збільшенням тиску впорскування. Виходячи з моделі (9), довжина конуса розпилювання для форсунок Bosh одержується більшою, ніж для форсунок Delphi, на основній ділянці розпилювання. Для тиску впорскування 140 МПа на початку розпилювання довжини конуса розпилювання практично однакові для форсунок Delphi та Bosh, що добре узгоджується з експериментальними даними. Для тиску впорскування 60 МПа довжини розпилювання для форсунки Delphi більші, ніж для форсунки Bosh на початку розпилювання (див. рис. 2). Цей факт також добре узго-

джується з експериментальними даними. Але для більш точного моделювання довжини конуса розпилювання потрібно уточнити параметри моделі. Для цього потрібно проаналізувати експериментальні дані для тисків впорскування, що лежать в діапазоні 60-140 МПа, що буде темою наступних досліджень.

Висновки

1. Знайдено значення довжини конуса розпилювання дизельного палива за COFM моделлю для форсунок Bosh та Delphi з тисками впорскування 140 МПа та 60 МПа, та тиском газу 2 МПа.

2. Виходячи з теоретичної моделі, довжини конуса розпилювання для розглянутих типів форсунок збільшуються зі збільшенням тиску впорскування, і це узгоджується з експериментальними даними.

3. Теоретична модель та експериментальні дані показують однакові довжини конуса розпилювання на початковій ділянці розпилювання для високого тиску впорскування (140 МПа) для різних типів форсунок (Bosh та Delphi), та різні довжини розпилювання для тих самих форсунок для низького тиску впорскування (60 МПа).

Список літератури

1. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. — Харьков: Вища школа, 1980. — 169 с.
2. Sazhin S.S, Martynov S.B., Kristyadi T., Crua C., Heikal M.R. Diesel fuel spray penetration, heating, evaporation and ignition: modelling versus experimentation.
3. Karimi K., Sazhina E.M., Abdelghaffar W.A., Crua C., Cowell T., Heikal M.R., Gold M.R. Development in diesel spray characterisation and modelling // Thiesel 2006 Conference on Thermo and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines.
4. Sjoberg M. The rotating injector as a tool for exploring DI diesel combustion and emissions formation processes, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, 2001.
5. Karimi K., Crua C., Heikal M.R., Sazhina E.M. Split injection strategy for diesel sprays: Experiment and modelling // PTNSS Kongres 2007, 20-23 May 2007. — Kraków, Poland, 2007.

Стаття надійшла до редакції 04.06.08

© Колодницька Р.В., Карімі К., Круа К., Хайкел М.Р., Сажина Е.М., 2008