

## МОДЕЛЮВАННЯ ДОВЖИНИ КОНУСА РОЗПИЛЮВАННЯ ПАЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ У ЗАСТОСУВАННІ ДО БІОПАЛИВА

У статті проаналізовано моделі для визначення довжини конуса розпилювання для дизельного палива. Показано, що SOFM-модель забезпечує кращий збіг з експериментальними даними для початкової стадії розпилювання дизельного палива, ніж модель Лишевського–Разлейцева. Водночас для описання розпилювання біодизельного палива ця модель потребує додаткового введення в'язкості палива.

**Вступ. Постановка проблеми.** Нові екологічні норми, що прийняті у світі щодо збереження нашої планети, змушують автомобільні компанії працювати над зменшенням викидів сажі від дизельних двигунів. Тут можна спостерігати два шляхи. З одного боку, це покращання розпилювання палива, що досягається конструкцією форсунки та покращанням параметрів розпилювання. З іншого – це використання біопалив, наприклад, біодизельного палива.

Щодо доцільності застосування біопалив останнім часом проводилося багато дискусій як про позитивні аспекти, так і про деякі негативні. Але все-таки держави багатьох країн вводять закони про обов'язкову домішку біопалив до нафтових. Так у 2008 році у Великобританії було прийнято закон про збільшення цієї домішки до 5 % у 2010 році проти 2,5, що було прийнято раніше [1]. Останнім часом в Україні багато уваги приділяється розвитку біопалива, про це свідчать закони, що прийняті державою, та конференції, які проводяться на державному рівні [2, 3]. З 1 березня 2010 року в Україні діє національний стандарт ДСТУ 6081:2009 «Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги», що гармонізовано з Європейським стандартом EN 14214:2003.

**Аналіз останніх досліджень.** Проблемі визначення довжини розпилювання було адресовано багато робіт. Довжину конуса розпилювання прийнято поділяти на дві стадії: протягом першої стадії довжина конуса розпилювання прямо пропорційна часу  $S \sim t$ , на другій стадії довжина конуса розпилювання пропорційна кореню квадратному від часу  $S \sim t^{1/2}$ . Час, що відповідає зміні режиму, зменшується зі збільшенням тиску в циліндрі. Довжина розпилювання за цей час асоціюється з довжиною руйнування. Інколи першу стадію розвитку довжини розпилювання називають початковою, а другу – основною стадією.

В основному довжина конуса розпилювання базується або на емпіричних кореляціях [4], або на спрощених моделях без урахування ефекту турбулентності. Автори [5] допускають, що густина розпилювання основної стадії залежить від відстані до осі таким же чином, як на початковій стадії. В [6] була використана BSB-модель Рейца для знаходження значення довжини конуса розпилення. Було допущено, що густина суміші газу і крапель у плані, перпендикулярному до осі розпилювання, залишається постійною всередині конуса розпилювання і нульовою зовні. Було розглянуто три зони в області розпилювання. Перша зона – зона 1, коли початкова швидкість частинок набагато вища, ніж швидкість потоку газу; зона 2, коли частинки сповільнюються завдяки силам опору й їх швидкості стають порівняними зі швидкостями повітря; зона 3, коли швидкості частинок зменшуються, вони стають меншими за швидкість повітря.

Оптимізація параметрів розпилювання дизельного палива потребує експериментальних досліджень, які мають досить велику вартість. Наприклад, експериментальні дослідження паливного струменя дизельного палива в широкому діапазоні тисків впорскування та тисків у циліндрі проведені в експериментальному центрі Рікардо (Брайтонський Університет, Великобританія) [7]. У ЖДТУ проводилися експерименти з розпилювання дизельного палива й ріпакової олії та їх сумішей за кімнатної температури та атмосферного тиску [6]. Отже, висока вартість експериментів з розпилювання дизельного палива, з одного боку, та необхідність дослідження біопалив у дизельних двигунах, з іншого, викликають необхідність в існуванні простих моделей для знаходження параметрів розпилювання.

Одна з таких моделей (SOFM-модель) для знаходження довжини розпилювання детально описана в [7]. Довжина розпилювання дизельного палива добре описується емпіричними формулами за моделлю Лишевського–Разлейцева [8, 9].

**Метою роботи** є перевірка SOFM-моделі та моделі Лишевського–Разлейцева на відповідність із сучасними експериментами за довжиною розпилювання дизельного палива, а також аналіз можливості застосування цих моделей для моделювання довжини розпилювання біопалив на основі ріпакової олії.

**Основна частина. Моделювання довжини конуса розпилювання.**

**COFM-модель**

У COFM-моделі, що описана в [5, 7], розпилюючий струмінь, що виходить з отвору форсунки, моделюється конусом з площею поперечного перерізу  $A(t)$  та висотою, що дорівнює довжині розпилювання  $S_{ip}$ . Рівняння зміни імпульсу для розпилюючого струменя можна записати як [5]:

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

де  $m$  – маса рідкого палива, що впорскується;  $u$  – швидкість центра мас струменя;  $t$  – час від початку впорскування;  $\rho_f$  – густина впорскнутого палива;  $A_n$  – площа поперечного перерізу кожного отвору форсунки;  $u_{inj}(t)$  – миттєва швидкість впорскування;  $C_D$  – коефіцієнт опору для струменя;  $\rho_g$  – густина газу;  $A(t)$  – площа поперечного перерізу струменя;  $\beta$  – відношення довжини конуса розпилювання вершини струменя  $S_{ip}$  до довжини конуса розпилювання центра мас струменя  $S(t) = S$ .

Миттєва швидкість впорскування підраховується з експериментальних даних швидкості зміни маси струменя за формулою:

$$u_{inj}(t) = \frac{\dot{m}}{\rho_f A_n n}, \quad (2)$$

де  $\dot{m}$  – експериментально визначена на кожному кроці швидкість зміни маси струменя;  $n$  – кількість отворів форсунки.

Структура струменя являє собою середовище, що складається з рідкого палива і газу. Долю рідини (рідкої фракції) у струмені можна визначити відношенням об'єму всього струменя до об'єму, який займає рідка фракція. У COFM-моделі допускається, що доля рідини у струмені зменшується з часом за експоненціальною залежністю:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{t + t_{OD}}{\tau}\right), \quad (3)$$

де  $t_{OD}$  – затримка відкриття форсунки;  $\tau$  – характеристичний час розпаду (підгоночний параметр моделі),  $\varepsilon_0 = 1$ .

Площа поперечного перерізу струменя на кожному кроці знаходилася, виходячи з об'єму конуса, який буде займати розпилювання:

$$A(t) = \frac{3}{\beta S(t)} \frac{m(t)}{\rho_f \varepsilon(t)}, \quad (4)$$

де  $m(t) = m = \int_0^t \dot{m} dt$ .

**Модель Лишевського–Разлейцева [8, 9]**

Модель Лишевського–Разлейцева для приблизного розрахунку показників струменя розпиленого палива базується на використанні таких безрозмірних критеріїв:

– критерій Вебера, що характеризує співвідношення сил поверхневого натягу та інерції:

$$We = U_o^2 \rho_f D_n / \sigma_f;$$

– критерій  $M$ , що характеризує співвідношення сил поверхневого натягу та в'язкості:

$$M = \mu_f^2 / (\rho_f \sigma_f D_n);$$

– критерій нестационарності процесу:

$$\Xi = \tau_s^2 \sigma_f / (\rho_f D_n^3);$$

– відношення густини повітря і палива:

$$\rho = \rho_g / \rho_f,$$

де  $U_o$  – швидкість встановленого витікання палива з отвору форсунки;  $\rho_f$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;  $D_n$  – діаметр сопла, м;  $\sigma_f$  – коефіцієнт поверхневого натягу палива, Н/м;  $\mu_f$  – коефіцієнт динамічної в'язкості палива, Па·с;  $\tau_s$  – час від початку впорскування, с.

Швидкість встановленого витікання палива з отвору форсунки:

$$U_o = \varphi_c \sqrt{2(P_f - P_g) / \rho_f}, \quad (5)$$

де  $\varphi_c$  – коефіцієнт швидкості,  $\varphi_c = 0,94-0,98$  [8];  $P_f$  – тиск палива перед розпилюючими отворами форсунки;  $P_g$  – тиск газу в камері згорання.

Довжина розпилюючого струменя може бути розрахована за формулами:

– для початкової стадії:

$$l_a = A_s \mathcal{E}^{0,35} e^{-0,2(\tau_s/\tau_g)}; \quad (6)$$

– для основної стадії:

$$l_b = B_s^{0,5} \tau_s^{0,5}, \quad (7)$$

де  $A_s, B_s$  – емпіричні коефіцієнти;  $\tau_s$  – граничний час між початковою і основною стадією.

$$A_s = 1,22 l_g \dot{\gamma}^{-0,35},$$

$$B_s = D_n U_o We^{0,21} M^{0,16} / (D_s \sqrt{2} \rho),$$

$$\tau_g = l_g^2 / B_s,$$

де  $D_s$  – емпіричний коефіцієнт;  $l_g$  – границя між першою (початковою) ділянкою і другою (основною) ділянкою розвитку струменя.

$$l_g = C_s D_n We^{0,25} M^{0,4} \rho^{-0,6},$$

де  $C_s$  – емпіричний коефіцієнт.

У даній роботі було прийнято такі значення коефіцієнтів:  $C_s = 8,85$ ;  $D_s = 3,0$ ;  $D_s = 4,8$ .

#### Аналіз і розрахунки

Значення довжини конуса розпилювання було підраховано за допомогою моделей Разлейцева–Лишевського та СОФМ-моделі. При описанні моделей були збережені різні позначення для часу впорскування, що прийняті в цих моделях ( $\tau_s = t$ ).

Головною особливістю СОФМ-моделі є те, що швидкість впорскування не приймається постійною, як у моделі Разлейцева–Лишевського, а визначається з експериментальних значень миттєвої масової витрати палива за (2). Слід зазначити, що середня швидкість впорскування значно перевищує швидкість руху вершини струменя, навіть на початковій стадії розпилювання [10]. Для СОФМ-моделі коефіцієнт опору для струменя був прийнятий постійним  $C_D = 1,54$ . Значення  $\beta$  було вибрано в діапазоні 1,4–1,8 залежно від тиску впорскування [5]. Значення довжини конуса розпилювання для початкової стадії розпилювання дизельного палива за СОФМ-моделлю порівнювалося з результатами експериментів, що були проведені в експериментальному центрі Рікардо (Брайтонський Університет, Великобританія) [7] (рис. 1).

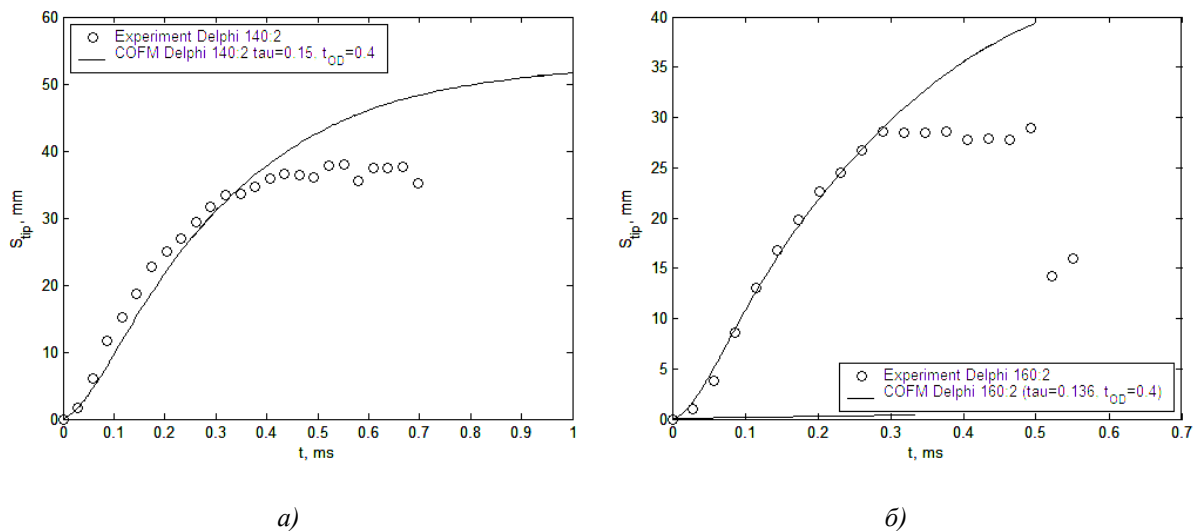


Рис. 1. Порівняння довжини конуса розпилювання за COFM-моделлю з експериментальними даними [7] (форсунки Delphi, тиск у циліндрі 2 МПа ( $\beta = 1,3$ )): а) тиск впорскування 140 МПа,  $\tau = 0,15$  мс; б) тиск впорскування 160 МПа,  $\tau = 0,136$  мс

Додаткового роз’яснення потребує фізичний смисл коефіцієнта опору  $C_D$ . Цей коефіцієнт входить у таку формулу [5], [9]:

$$U_{inj} = C_D \sqrt{2(P_f - P_g) / \rho_f}, \tag{8}$$

де  $C_D$  – коефіцієнт опору.

Порівнюючи (5) та (8), можна помітити, що  $C_D = \varphi_c$ . Існує певна невизначеність для прийняття коефіцієнта опору  $C_D$  у (8). Цей коефіцієнт був прийнятий 0,39; 0,7; 0,8 [9] та 1,54 [5]. У [8] наводиться значення коефіцієнта  $\varphi_c = 0,94-0,98$ . Коефіцієнт  $C_D$  може бути знайдений також з порівняння (2) та (8).

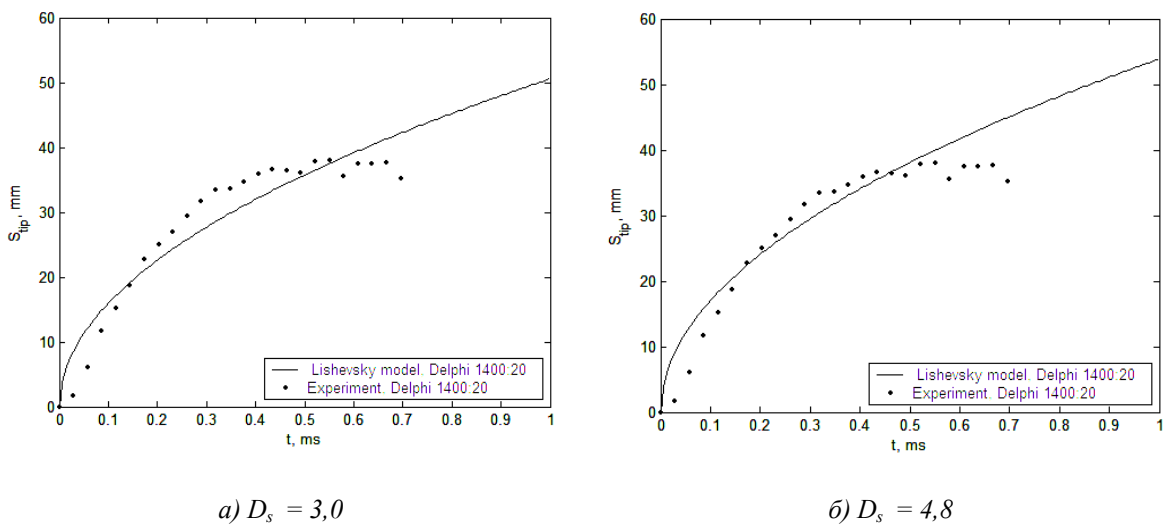


Рис. 2. Порівняння довжини розпилювання за моделлю Лишевського–Разлейцева з експериментальними даними [5] (форсунки Delphi, тиск у циліндрі 2 МПа та тиск впорскування 140 МПа)

Було підраховано параметри розпилювання для дизельного палива за моделлю Лишевського–Разлейцева для форсунок Дельфі 140:2, Дельфі 160:2, Дельфі 140:6. Вхідні дані для дизельного палива були такі: діаметр розпилюючих отворів форсунки  $D_n = 0,135$  мм, кількість розпилюючих отворів  $n = 7$  (форсунки Delphi) [5]. Для тиску впорскування 140 МПа та тиску газу 6 МПа густина газу булл  $\rho_g = 46$  кг/м<sup>3</sup>. У даній роботі швидкість впорскування розраховувалася за (2), але значення масової витрати палива було прийнято постійним і рівним 0,030126942 кг/с. Було прийнято таке значення коефіцієнтів:  $C_s$

= 8,85,  
 $D_s = 3,0 / D_s = 4,8$ . Фізичні властивості дизельного палива приймалися такими:  
 $\rho_f = 791 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_f = 1,326 \text{ мПа/с}$ ;  $\sigma_f = 22,3 \text{ мН/м}$ . На рисунку 2 показані довжини розпилювання за моделлю Разлейцева–Лишевського, що підраховані за (5) та (6), порівняно з експериментальними даними [11].

Аналіз показав, що миттєва масова швидкість, яка визначається у COFM-моделі (2) за значеннями експериментальної масової витрати палива, приводить до достатнього хорошого збігу з даними експериментів за довжиною конуса розпилювання для дизельного палива.

**Застосування моделей для довжини конуса розпилювання до біопалив.** Про параметри розпилювання палив на основі рослинних олій ще ведеться багато дискусій. Було зроблено висновок [10], що біопаливо спричиняє зменшення кута розпилювання суміші залежно від вмісту в ній біопалива. Дослідники двох університетів Німеччини та Шотландії сумісно з компанією Елсбетт [11] проводили експерименти з розпилювання ріпакової олії при температурі 25 °С. Було досліджено, що паливо на основі рослинної олії мало меншу довжину розпилювання, порівняно з традиційними паливами, що автори пов'язують з більшою в'язкістю палива. Не зрозуміло, чи цей висновок можна застосовувати до традиційного дизельного двигуна, оскільки відомо, що двигун Елсбетт був спеціально сконструйований для роботи на рослинних оліях.

В основному експериментальні дослідження показують, що біодизельне паливо спричиняє збільшення довжини розпилення струменя. Так дослідники [12] проводили експерименти з розпилювання біодизельного палива за атмосферного тиску. Результати показують, що довжина розпилювання є більшою, ніж для дизельного палива, як вважають автори завдяки більшій густині біопалива. Водночас кут розпилювання дорівнював майже половині кута для дизельного палива завдяки більшій в'язкості, поверхневому натягу й нижчій летючості біодизельного палива [13].

Розглянуті моделі (COFM-модель та модель Лишевського–Разлейцева) для моделювання довжини конуса розпилювання дизельного палива були також перевірені для використання біопалив на основі рослинних олій (біодизельного палива та ріпакової олії). COFM-модель показує меншу далекобійність для палив на основі рослинних олій, порівняно з дизельним паливом, за допущення, що швидкість розпилення буде однаковою для дизельного палива та рослинних олій. Але, як показують експериментальні дані, об'ємна витрата палива для біодизельних палив буде більшою, ніж для дизельних, що приводить до більш швидкого впорскування. Модель Лишевського–Разлейцева показує збільшення далекобійності палива для рослинних олій з підвищенням в'язкості палива, але точність цієї моделі недостатня для високих тисків впорскування. З іншого боку, COFM-модель не містить таких важливих фізичних характеристик палива, як його в'язкість та поверхневий натяг. Отже, COFM-модель потребує уточнення для правильного описання довжини розпилювання для біодизельного палива.

#### Висновки:

1. COFM-модель показує кращий збіг з експериментальними даними на початковій ділянці розпилювання для дизельного палива, ніж модель Лишевського–Разлейцева.
2. У застосуванні до біодизельних палив COFM-модель не показує тенденцію збільшення довжини конуса розпилювання зі збільшенням густини палива.
3. Точність COFM-моделі у застосуванні до біодизельних палив можна покращити, включивши в'язкість цих палив у модель.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Biofuels international. – 2008. – Вип. 2. – Том 2.
2. Колодницька Р.В. The use of straight vegetable oil as alternative fuels / Р.В. Колодницька // Альтернативне паливо та енергоефективність. – К., 2007.
3. Колодницька Р. Biofuel spray modelling / Р.Колодницька // First International Summit on Biofuels Research and Business Opportunities in Ukraine. – К., 2007.
4. Diesel fuel spray penetration, heating, evaporation and ignition: modelling versus experimentation / S.S. Sazhin, S.B. Martynov, T.Kristyadi etc. // Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation. – Vol. 1. – No. 1. – 2008.
5. Experimental Investigation and Modelling of Diesel Engine Spray / R.V. Kolodnytska, K.Karimi, C.Crua etc. // XIII міжнародний конгрес двигателестроїтелів 14–19 сентября 2008 г. // Internal combustion engines. – 2008. – № 1. – P. 42–46.
6. Development in diesel spray characterisation and modelling / K.Karimi, E.M. Sazhina, W.A. Abdelghaffar etc. // Thiesel 2006 Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines. – 2006.

7. Моделювання довжини конуса розпилювання у дизельних двигунах (COFM- модель) / *Р.В. Колодницька, К.Карімі, К.Круа та ін.* // Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Севастополь 2008 // Вісті автомобільного-дорожнього інституту. – 2008. – № 1 (6). – С. 51–55.
8. *Разлейцев Н.Ф.* Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / *Н.Ф. Разлейцев.* – Харьков : Вища школа, 1980. – 169 с.
9. *Лышевский А.С.* Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / *А.С. Лышевский.* – М. : Машгиз, 1963. – 180 с.
10. *Грабар І.Г.* Дослідження процесів утворення паливної суміші на основі ріпакової олії / *І.Г. Грабар, Р.В. Колодницька, А.В. Ільченко* // Вісник ЖІТІ. – 2003. – № 1 (24). – С. 21–24.
11. The initial stage of fuel spray penetration / *S.Sazhin, K.Crua, D.Kennaird.* – Fuel 2003, 82: 875–885.
12. *Sazhin S.S.* A model for fuel spray penetration / *S.S. Sazhin, G.Feng, M.Heical.* – Fuel 2001, 80: 2171–2180.
13. Split injection strategy for diesel sprays: Experiment and modelling / *K.Karimi, C.Crua, M.R. Heikal, E.M. Sazhina* // PTNSS Kongres 2007, 20–23 May 2007, Kraków, Poland.
14. Preliminary approach towards a CDI system modification operating on neat rapeseed oil / *M.T. Bialkowski, T.Pekdemir, R.Reuben etc.* // Journal of KONES Internal Combustion Engines 2005. – Vol. 12, 1–2.
15. Experimental Study of the Biodiesel Spray and Combustion Characteristics / *Zhang Xu-sheng, Li Li-guang, Wu Zhi-jun etc.* – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.paper.edu.cn>.
16. *Девянин С.Н.* Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей / *С.Н. Девянин, В.А. Марков, В.Г. Семенов.* – 2007. – Харьков : Новое слово, 2007. – 452 с.

КОЛОДНИЦЬКА Руслана Віталіївна – доцент кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- моделювання розпилювання палива в дизельних двигунах;
- біопалива та екологічна безпека автомобіля;
- проблеми руйнування матеріалів;
- композитні матеріали на основі натуральних волокон.

Подано 11.05.2010

**Колодницька Р.В.** Моделювання довжини конуса розпилювання палива для дизельних двигунів у застосуванні до біопалива

**Колодницкая Р.В.** Моделирование длины конуса распыливания топлив для дизельных двигателей в применении к биотопливам

**Kolodnytska R.V.** Diesel engine sprays penetration modelling

УДК 629.3:621.43

**Моделирование длины конуса распыливания топлив для дизельных двигателей в применении к биотопливам / Р.В. Колодницкая**

В статье проанализированы модели для определения длины конуса распыливания для дизельного топлива. Показано, что COFM модель обеспечивает лучшее совпадение с экспериментальными данными для начальной стадии распыливания, чем модель Лышевского- Разлейцева. В то же время для описания распыливания биодизельного топлива эта модель требует дополнительного введения вязкости топлива.

УДК 629.3:621.43

**Diesel engine sprays penetration modeling / R. V. Kolodnytska**

The diesel engine spray penetration models were analysed. It was shown that COFM-model produces a reasonable agreement with the experimental data for the initial stage of penetration.

It was analyzed that the introduction of fuel viscosity as model parameter can to improve the accuracy of model for biodiesel fuels.