

Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 160 – 169. Bibliog.: 10 titles. – ISSN 2222-0631.

The WBK-method was used to derive approximate formula for calculating amplitudes of a damped linearly variable mass oscillator with dry friction. The results obtained using the proposed formulas while ignoring the reactive power and those of numerical integration of the original differential equations of motion were compared. Consistency of the WBK-method for this class of problems was confirmed.

Key words: an oscillator, linear-variable mass, dry friction, WBK – method.

УДК 621.43.013.6

В.В. ПИЛЬОВ, аспірант, НТУ «ХПІ»

УДОСКОНАЛЕННЯ ОПИСУ ЗНОСУ ПАЛИВНИХ СТРУМЕНІВ ТАНГЕНЦІЙНИМ ВИХОРОМ РОБОЧОГО ТІЛА В ОБ'ЄМІ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ДИЗЕЛЯ

Запропоновано вдосконалення способу врахування вихорового руху робочого тіла в камері згоряння дизеля у відомій моделі робочого процесу проф. М. Ф. Розлейцева. Досягнуто уточнення траєкторій руху вершин паливних струменів, часу досягнення ними стінки камери згоряння, точок їх контакту з останньою.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, моделювання робочого процесу дизеля, вихор робочого тіла, камера згоряння дизеля, розвиток паливного струменя, деформація траєкторії, точка контакту струменю зі стінкою

Постановка проблеми. Якість протікання робочого процесу двигуна внутрішнього згоряння у значній мірі впливає на показники його економічності та екологічності. В свою чергу, одним із важливих факторів, що зумовлюють вигляд характеристики випаровування палива у камері згоряння, а через неї тепловиділення та робочого процесу в цілому, виступає динаміка паливних факелів. При застосуванні частково-динамічної теплоізоляції поверхні поршнів, за умов об'ємно плівкового сумішоутворення, особливого значення набувають час досягнення паливними струменями стінки та геометрія утвореної на ній паливної плівки. Для їх визначення, наряду з впорскуванням палива та розвитком паливного струменя у стисненому середовищі, повинно здійснюватись моделювання зносу струменя вихором робочого тіла.

Аналіз публікацій. Серед нульвимірних математичних моделей робочого процесу дизеля, через свою достатню для практичних цілей точність при збереженні мінімальної ресурсосмності розрахункових досліджень, широко застосування набула модель, запропонована проф. М.Ф. Розлейцевим.

При сучасному стані її розвитку вплив вихору на розвиток паливних струменів у об'ємі камери згоряння здійснюється згідно наступних рівнянь [1, с. 29 – 30; 2, с. 57]. Тут швидкість тангенційного руху робочого тіла в то-

щі s – вершині паливного струменя визначається за формулою:

$$W_t = \chi H \pi n R / 30,$$

де χ – ступінь затухання вихору; H – вихрове відношення (кутових швидкостей обертання робочого тіла та колінчастого вала); n – частота обертання колінчастого вала; R – радіус циліндру.

Прирошення швидкості вершини струменя у напрямі, нормальному осі розпилюючого отвору становитиме

$$dU_t/d\tau = A \cdot W_t^{1,5}; \quad A \approx C_0 \cdot 0,75 \cdot (\rho_B/\rho_f) \cdot (v^{0,5}/d_{32}^{1,5}),$$

де $C_0 = 1...5$ – емпіричний коефіцієнт, який враховує відмінність поведінки окремих крапель від таких, що знаходяться у складі струменя; ρ_B, ρ_f – густина повітря та палива; v – кінематична в'язкість робочого тіла; d_{32} – *діаметр крапель Заутера*;

Сумарний знос вершини струменя визначається так:

$$y = \sum_{r=0}^{R=R_W} U_t \Delta \tau \cos \beta,$$

де R_W – радіус камери згоряння (КЗ); $\Delta \tau$ – розрахунковий часовий крок; β – проекція кута між віссю розпилюючого отвору та нормаллю до стінки камери згоряння на горизонтальну площину.

Вплив вихору на розвиток паливної плівки на стінці здійснюється або аналогічним чином [1, с. 30], або шляхом визначення емпіричних коефіцієнтів K_j відносної зміни довжини півосей при розтіканні овальної плями [2, с. 55 – 56], які у загальному вигляді залежать від кута приходу паливного струменя на поверхню стінки камери згоряння. Його проекції на горизонтальну площину визначені як

$$\gamma_{3,4} = \pi/2 \mp \arcsin(U_{TW}/U_{KW}),$$

де U_{TW}, U_{KW} – тангенційна та осьова складові швидкості точки s при досягненні нею радіусу R_W .

Ця модель не дозволяє визначити зміщення вихором точок контакту струменів зі стінкою з достатньою точністю та видає однаковий час розвитку для всіх однотипних струменів. На цій основі **метою** роботи є її відповідне вдосконалення.

Розробка математичної моделі. Вкажемо на недоліки у записі приведеної моделі, та розкриємо запропоновані зміни у ній.

1. Вплив зі сторони вихору на паливний факел повинен здійснюватись не з локальною швидкістю руху робочого тіла \bar{W}_t , а із відповідною швидкістю відносно вершини струменя $\bar{W}_r = \bar{W}_t - \bar{V}$, де \bar{V} – вектор повної швидкості точки s . У цьому випадку, швидкість крапель палива за умови тривалого впливу вихору буде прагнути до швидкості останнього. Тобто струмінь зага-

льмується у повітряному середовищі, в той час, як згідно базової моделі пришвидшуватиметься необмежено.

Як і в базовій моделі нами враховується лише горизонтальна складова зносу, перпендикулярна осі струменя. Осьова складова не може бути врахована, оскільки при зміщеному розташуванні форсунки, зважаючи на зміну швидкості впорскування, кожна порція крапель буде мати відмінну траєкторію, тобто відбудеться зруйнування струменя вихором. Можна висунути припущення, що в реальному фізичному процесі повному зруйнуванню буде частково протидіяти течія робочого тіла, викликана рухом самого струменя. Через неможливість врахування цього та інших можливих ефектів без суттєвої переробки моделі, ми вважаємо осьовий знос вже врахованим у напівемпіричному законі руху точки s в напрямку осі розпилюючого отвору із відповідним впливом на коефіцієнти. Врахування складової зносу викликаної тангенційним вихором вздовж перпендикулярної струменю осі у вертикальній площині позбавлено сенсу, оскільки не враховується дія вертикальної складових вихорю, від якої слід очікувати в кілька разів більший ефект.

2. Незважаючи на знехтування вказаними складовими зносу, лобовий супротив прирощення швидкості вершини струменя повинен бути визначеним як функція від повної відносної швидкості $\bar{c}_w(\bar{W}_r)$, оскільки проекція цього вектору на перпендикулярну струменю горизонтальну вісь $\bar{c}_{w'}(\bar{W}_r)$ не дорівнює значенню функції спротиву від проекції відносної швидкості $\bar{c}_w(\bar{W}_{tr})$.

3. Визначення відносної швидкості \bar{W}_r на кожному розрахунковому кроці повинно здійснюватись для точок траєкторії вершини струменя з урахуванням попередньої деформації вихором.

4. З огляду на вказану деформованість траєкторії, змінюються час руху і шлях струменя до стінки. Відповідна перевірка має виконуватись на кожному розрахунковому кроці, додатково враховуючи профіль гребеня поршня та переміщення останнього.

Нижче приведено вигляд запропонованих рівнянь руху довільного паливного струменя.

Декартові координати вершини паливного струменя (точки s) подано у правій системі відліку з початком на осі циліндру, вісь x спрямовано горизонтально, проходячи крізь точку p перетину осей розпилюючих отворів, z – вздовж осі циліндру донизу:

$$x(\tau) = l_s(\tau) \cos \gamma_g \cos \gamma_v - l_t(\tau) \sin \gamma_g + x_{s0}; \quad (1)$$

$$y(\tau) = l_s(\tau) \sin \gamma_g \cos \gamma_v - l_t(\tau) \cos \gamma_g; \quad (2)$$

$$z(\tau) = l_s(\tau) \sin \gamma_v, \quad (3)$$

де $l_s(\tau)$, $l_t(\tau)$ – переміщення точки s вздовж осі розпилюючого отвору та перпендикулярно їй; γ_v – кут нахилу осі розпилюючого отвору до горизонтальної площини; γ_g – проекція на цю площину кута між осями отвору та x ;

x_{s0} – відстань від точки p до осі циліндру.

Полярні координати точки s :

$$R(\tau) = \sqrt{x^2(\tau) + y^2(\tau)}; \quad (5)$$

$$\varphi(\tau) = \begin{cases} \arctg y(\tau)/x(\tau) + \pi, & x(\tau) < 0, \\ y(\tau)/|y(\tau)| \cdot \pi/2, & x(\tau) = 0, \\ \arctg y(\tau)/x(\tau), & x(\tau) > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Кут між напрямком дії вихору та проекцією осі розпилюючого отвору на горизонтальну площину становитиме:

$$\beta(\tau) = \varphi(\tau) - \gamma_g + \pi/2. \quad (7)$$

Швидкість тангенційного руху робочого тіла в точці s є наступною:

$$W_t(\tau) = \chi(\tau) H \pi n R(\tau) / 30. \quad (8)$$

Повна швидкість переміщення вершини струменя дорівнює

$$V(\tau) = \sqrt{U_s^2(\tau) + U_t^2(\tau)}, \quad (9)$$

де $U_s(\tau)$ – осьова швидкість переміщення вершини струменя.

Швидкість руху робочого тіла відносно точки s визначається за формулою:

$$W_r(\tau) = \sqrt{(W_t(\tau) \cos \beta(\tau) - U_s(\tau) \cos \gamma_v)^2 + (W_t(\tau) \sin \beta(\tau) - U_t(\tau))^2 + U_s^2(\tau) \sin^2 \gamma_v}. \quad (10)$$

Коефіцієнт лобового опору руху для крапель у струмені, з урахуванням їх взаємодії, згідно [3, с. 115],

$$c_w(Re, \tau) \approx \frac{24}{Re(\tau)} \left(1 + 0,15 Re(\tau)^{0,687} \right), \quad (11)$$

де число Рейнольдса для сферичної краплі:

$$Re(\tau) = W_r(\tau) d_{32} / \mu. \quad (12)$$

Прирощення швидкості вершини факелу, що відбулося б за умови врахування всіх складових від дії тангенційного вихору і лише від нього, становитиме

$$\Delta(\tau) = \frac{3 \rho_B}{4 \rho_f} \frac{W_r^2(\tau)}{d_{32}} c_w(Re, \tau). \quad (13)$$

Складова цього прирощення у напрямку, перпендикулярному осі розпилюючого отвору в горизонтальній площині,

$$\frac{dU_t(\tau)}{d\tau} = \frac{W_t(\tau) \sin \beta(\tau) - U_t(\tau)}{W_r(\tau)} \Delta(\tau). \quad (14)$$

Прирощення переміщення в цьому напрямку дорівнює

$$\frac{dl_t(\tau)}{d\tau} = U_t(\tau). \quad (15)$$

Проекція кута відхилення швидкості точки s від осі розпилюючого

отвору на горизонтальну площину визначається за формулою:

$$\psi(\tau) = \arcsin U_t(\tau)/V(\tau), \quad (16)$$

а проекція кута відхилення швидкості точки s від нормалі до стінки КЗ на горизонтальну площину – за формулою:

$$\beta_r(\tau) = \pi/2 + \psi(\tau) - \beta(\tau). \quad (17)$$

Результати досліджень. Достовірність моделі було перевірено на прикладі робочого процесу двигуна 4ЧН12/14 на номінальному режимі його роботи ($N_e = 100$ кВт, $n = 2000$ хв⁻¹). При цьому залежність $\chi(\tau)$ є невідомою і приймалася незмінно дорівнюючою одиниці. На рис. 1 приведено розрахова-



Рис. 1 – Знос паливних струменів вихором робочого тіла.

ні траєкторії переміщення точки s для чотирьох паливних струменів цього двигуна. Точки їх контакту зі стінкою збігаються з визначеними експериментально, поданими на рис. 2, із задовільною точністю.

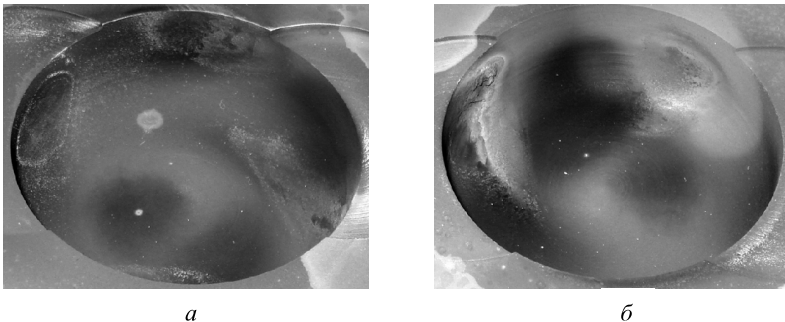


Рис. 2 – Експериментальні точки контакту струменів зі стінкою:
а – довгих; б – коротких.

Також було отримано відмінні значення часу розвитку однотипних струменів до стінки камери згоряння. Для довгих струменів розрахована різниця становить 3, а для коротких – 4 градуса повороту колінного валу.

Слід відзначити, що зміна кута падіння палива на стінку призвела до отримання рядом коефіцієнтів K_j форми паливної плівки від'ємних значень, що пояснюється переміщенням всієї маси палива, яке підходить, у напрямку, протилежному тому, що описує відповідний коефіцієнт. Це явище не в повній мірі передбачено моделлю робочого процесу. Більш того, для верхнього короткого струменя (див. рис. 1), який приходить на стінку проти напрямку руху вихору, значення цих коефіцієнтів стали повністю хибними, вказуючи на продовження розвитку плівки в той же бік, коли експеримент засвідчує протилежне. Таким чином, опис паливної плівки за допомогою лише подібних коефіцієнтів є недостатнім, вплив вихору на рух елементарних порцій палива повинен враховуватись і після їх потрапляння на стінку.

Висновки. Запропоновано уточнення опису паливних струменів у моделі робочого процесу М. Ф. Розлейцева, яке полягає у врахуванні відносності швидкості вихору до руху вершин струменів та деформованості їх траєкторій. Це дозволяє точніше визначати час розвитку струменів та точки їх контакту зі стінкою, а так і кількість палива, що потрапило на неї.

Подальший напрямок робіт пов'язаний із удосконаленням частини математичної моделі, що описує розвиток паливної плівки по стінці під дією вихору, урахуванням його складової у вертикальній площині та згасання, викликаного взаємодією зі стінкою.

Список літератури: 1. *Кулешов А.С.* Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-ПК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 123 с. 2. *Сукачов І. І.* Поліпшення паливної економічності форсованих дизелів шляхом узгодження характеристик викиду палива та форми камери згоряння : дис. ... канд. техн. наук.: спец. 05.05.03 «Теплові двигуни» / *Сукачов Іван Іванович.* – Харків, 2005. – 233 с. 3. *Ashgriz N.* Handbook of Atomization and Sprays. / *N. Ashgriz.* – New-York : Springer Science+Business Media, LLC, 2011. – 490 p.

Надійшла до редколегії 05.03.2014

УДК 621.43.013.6

Удосконалення опису зносу паливних струменів тангенційним вихором робочого тіла в об'ємі камери згоряння дизеля / В. В. Пильов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 6 (1049). – С. 169 – 175. Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2222-0631.

Предложено усовершенствование способа учета вихревого движения рабочего тела в камере сгорания дизеля в известной модели рабочего процесса проф. Н. Ф. Разлейцева. Достигнуто уточнение траекторий движения вершин топливных струй, времени достижения ими стенки камеры сгорания, точек их контакта с последней.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, моделирование рабочего процесса дизеля, вихрь рабочего тела, камера сгорания дизеля, развитие топливной струи, деформация траектории, точка контакта струи со стенкой.

Improvement of the mathematical description of the fuel spray swirl drift in a diesel combustion chamber volume / V. V. Pylyov // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 169 – 175. Bibliog.: 3 titles. – ISSN 2222-0631.

Improvement of the method of considering the cylinder charge swirl in the M. F. Rozleyceev diesel working process model is proposed. The fuel spray front motion trajectories, the time of sprays reaching the combustion chamber wall and the points of these contacts are obtained with better precision.

Key words: internal combustion engine, diesel working process simulation, diesel combustion chamber, cylinder charge swirl, fuel spray propagation, trajectory deformation, spray and wall point of contact.

УДК 629.7.05

Ю.А. ПЛАКСІЙ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

ТРЬОХЧАСТОТНІ АНАЛІТИЧНІ ЕТАЛОННІ МОДЕЛІ ОБЕРТАННЯ ТВЕРДОГО ТІЛА

Запропонована нова аналітична еталонна модель обертання твердого тіла, основана на тригонометричному мультиплікативному представленні кватерніона орієнтації. Показані можливості моделі для оцінювання точності алгоритмів визначення орієнтації в БІНС.

Ключові слова: кватерніон, орієнтація, еталонна модель, дрейф.

Вступ і постановка задачі. Розглядається задача оцінювання точності визначення орієнтації в безплатформених інерціальних навігаційних системах (БІНС) за допомогою спеціальних алгоритмів, орієнтованих на використання первинної інформації про обертання об'єкта на такті обчислень $[t_{n-1}, t_n]$ у вигляді *квазікоординат* [1]

$$\theta_{ni}^* = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i dt, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

де ω_i , $i = 1, 2, 3$ – проекції вектора абсолютної кутової швидкості об'єкта $\vec{\omega}$ на зв'язані осі. Оскільки алгоритми визначення орієнтації в БІНС відтворюють цифровий образ інерціального трієдра осей в бортовому обчислювачі, тобто відіграють роль *аналітичної платформи* [2], питання отримання коректних оцінок точності цих алгоритмів і визначення найбільш ефективного алгоритму для кожного конкретного рухомого об'єкту, що може здійснювати певні обертальні рухи, є актуальною задачею.

Для алгоритму визначення орієнтації, що має порядок m , математична похибка на такті $[t_{n-1}, t_n]$ становить величину $O(\theta_n^{*m+1})$, де θ_n^* – модуль век-