

УДК 621.43.003

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО СУМІШОУТВОРЕННЯ У ЧОТИРИТАКТНОМУ ДВИГУНІ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ

**В.А. Корогодський, доцент, к.т.н., М.Б. Чубикало, асистент, к.т.н.,
Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків,
А.А. Хандримайлов, доцент, к.т.н., Є.С. Грайворонський, викладач, ХНАДУ**

Анотація. Представлено результати аналітичних досліджень процесів плівкового сумішоутворення при безпосередньому упорскуванні палива у циліндр чотиритактного двигуна. Визначена тривалість випаровування циклової подачі палива при упорскуванні на такті стиску.

Ключові слова: плівкове сумішоутворення, випаровування, безпосереднє упорскування.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ЧЕТЫРЕХТАКТНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

**В.А. Корогодский, доцент, к.т.н., М.Б. Чубыкало, ассистент, к.т.н.,
Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков,
А.А. Хандримайлов, доцент, к.т.н., Е.С. Грайворонский, преподаватель, ХНАДУ**

Аннотация. Представлены результаты аналитических исследований процессов пленочного смесеобразования при непосредственном впрыскивании топлива в цилиндр четырехтактного двигателя. Определена продолжительность испарения цикловой подачи топлива при впрыскивании на такте сжатия.

Ключевые слова: пленочное смесеобразование, испарение, непосредственное впрыскивание.

RESEARCH OF INTERIOR MIXTURE FORMATION IN FOUR-STROKE ENGINE WITH SPARK IGNITION

**V. Korogodsky, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, M. Chubykalo,
Candidate of Technical Sciences, assistant, Ukrainian State Academy of Railway
Transport, Kharkiv, A. Khandrymailov, Associate Professor, Candidate of Technical
Sciences, E.S. Graivoronsky, lecturer, KhNAHU**

Abstract. The results of analytical research of the processes of film mixing with the direct fuel injection into four-stroke engine cylinder are presented. Duration of the fuel cyclic feed evaporation at the compression stroke was determined.

Key words: film mixing, evaporation, direct fuel injection.

Вступ

Зниження витрати палива та виконання сучасних норм з викидів шкідливих речовин (ШР) з відпрацьованими газами (ВГ) у двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) з іскровим запалюванням є можливим при використанні систем безпосереднього упорскування палива (БВП) й організації внутріш-

нього плівкового сумішоутворення з розшаруванням паливно-повітряного заряду (ППЗ). Організація плівкового сумішоутворення при застосуванні бензинів, які містять значну кількість легких фракцій, дозволяє отримати якісну добре змішану однорідну паливно-повітряну суміш (ППС). При цьому згорання розшарованого ППЗ та якісної ППС сприяє підвищенню індикаторного ККД двигуна,

дозволяє підвищити економічність і знизити викиди ШР з ВГ. Тому проведення досліджень з удосконалення процесів плівкового сумішоутворення є актуальною проблемою.

Аналіз публікацій

Для організації плівкового сумішоутворення у чотиритактному двигуні 2Ч7,8/6,8 з іскровим запалюванням використовується новий спосіб формування розшарованого ППЗ у циліндрах ДВЗ [1]. Дослідження процесів масо- і теплообміну у паливному струмені з периферійним розподіленням палива при його русі до поверхонь стінок камери згоряння (КЗ) проводилося на базі уточненої моделі [2], основаної на теорії аеродинамічного сліду [2]. Для розрахунків процесів випаровування палива з поверхонь КЗ прийнято математичну модель Л.Г. Спекторова [3].

Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є дослідження процесів плівкового сумішоутворення у двигуні 2Ч7,8/6,8 з іскровим запалюванням та БВП для визначення тривалості випаровування циклової подачі палива, за частоти обертання колінчастого вала $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ й максимальної потужності двигуна, й часу між закінченням процесів випаровування паливної плівки та моментом подачі напруги на електроди свічки запалювання.

Задачами роботи є визначення інтенсивності та ступеня випаровування палива при його безпосередньому упорскуванні у циліндр

двигуна та за періоди одночасного випару палива зі стінки КЗ й у шлейфі струменя та при випарі паливної плівки з поверхонь КЗ.

Методика оцінки випаровування пального у надпоршневому об'ємі з поверхонь камери згоряння

Розрахунок процесів випаровування паливної плівки (для бензину А-76) проводився виходячи із запропонованої моделі Спекторова Л.Г. [3] з урахуванням параметрів і характеристик робочого тіла (РТ) у циліндрі двигуна. Параметри РТ визначено з розрахунку робочих процесів, а швидкість і напрямки руху повітряного заряду над поверхнею паливної плівки – за допомогою тривимірного газодинамічного розрахунку.

Розрахунки робочих процесів модернізованого двигуна 2Ч7,8/6,8 з іскровим запалюванням та застосуванням БВП за ступеня стиснення $\epsilon=10,6$ проводилися з уточненням процесів газообміну на режимі за максимального навантаження й частоти обертання колінчастого вала $n=3000 \text{ хв}^{-1}$ (рис. 1). Фази газорозподілу двигуна: відкриття випускного клапана відбувається за 50°ПКВ до НМТ, закриття – 10°ПКВ після ВМТ; відкриття впускного клапана – 10°ПКВ до ВМТ, закриття – 50°ПКВ після ВМТ. Розрахунки проведено у розробленій спеціалізованій комп'ютерній програмі Work Cycle, в основу якої покладено методику теплового розрахунку робочих процесів Гриневецького–Глаголева з уточненням процесів газообміну.

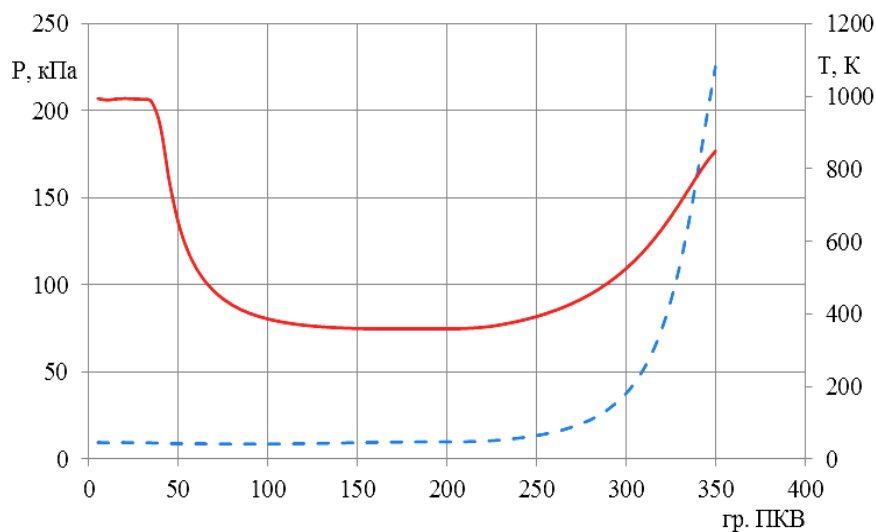


Рис. 1. Параметри РТ у циліндрі ДВЗ: - - - - – тиск газів у циліндрі; — – температура газів у циліндрі

Модель газообміну базується на рівнянні об'ємного балансу, запропонованому М.М. Глаголевим [5]. При цьому у методику теплового розрахунку робочих процесів внесено такі уточнення:

– параметри, термодинамічні показники свіжого заряду (чистого повітря) у впускній системі та значення коефіцієнта опору на впуску приймаються з урахуванням відсутності карбюратора й наявності дифузора у ньому;

– параметри, термодинамічні показники РТ у циліндрі двигуна на такті стиску розраховано з урахуванням кількості повітряного заряду, палива і залишків продуктів згоряння.

Для визначення кількості палива, яке випарувалося від моменту початку БВП ($\varphi_{\text{поч.впр}}=200^\circ\text{ПКВ}$ після ВМТ) до моменту подачі електричного розряду (30°ПКВ до ВМТ), було розраховано процеси випаровування палива (циклова подача палива $V_{\text{ц}} = 22,71$ мг/ц): безпосередньо у паливному струмені при протіканні процесів упорскування (тривалість процесу упорскування $\varphi_{\text{впр}}=25^\circ\text{ПКВ}$); у паливному струмені після закінчення подачі палива й русі струменя в об'ємі КЗ; одночасно з поверхні паливної плівки і зі струменя палива, що осідає; із поверхні паливної плівки.

При розрахунках процесів випаровування палива з поверхонь КЗ прийнято допущення, що при взаємодії фронту паливного струменя зі стінками КЗ краплі палива розподіляються на поверхні рівномірно та утворюють паливну плівку. Випаровування палива відбувається з нагрітої поверхні плівки, обмеженої кривою перетину твірної зовнішнього конуса розкриття паливного струменя з поверхнею стінки. Процес випаровування палива – ізотермічний, теплопередача при випромінюванні не враховується. Час нагріву паливної плівки до температури випару менший, ніж тривалість процесів випару. Температуру поверхні КЗ під паливною плівкою прийнято постійною ($t_{\text{ст}} = 220$ °С). Температура паливної плівки дорівнює температурі поверхні КЗ. Попередньо для розрахунку процесів випаровування паливної плівки було визначено швидкість і напрямок руху РТ над поверхнею паливної плівки за допомогою тривимірного газодинамічного розрахунку (рис. 2).

Чисельне моделювання та обробку результатів розрахунків виконано з використанням програмного комплексу MTF5.

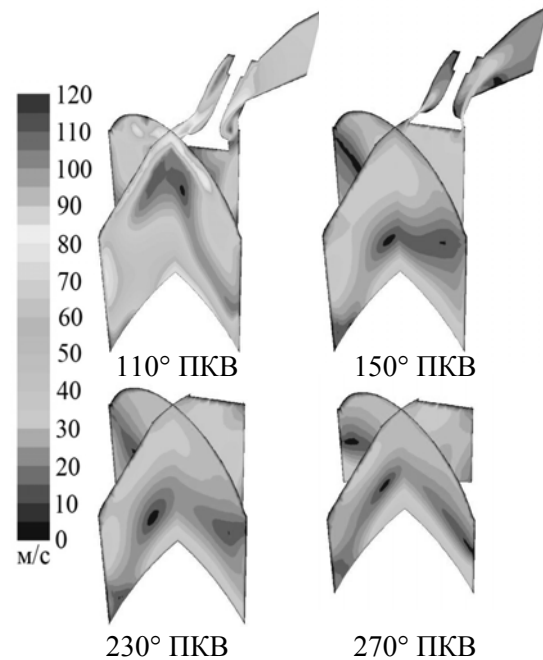


Рис. 2. Поля швидкостей РТ у циліндрі

Відзначимо, що при модернізації двигуна для організації плівкового сумішоутворення паливну форсунку розташовано у стінці циліндра, а паливний струмінь направлено на поверхню КЗ, розташовану в головці циліндра. При цьому змінено форму КЗ в головці циліндра і нахил розташування впускного і впускного клапанів [5]. Аналіз загальної картини швидкості руху РТ в циліндрі двигуна на тактах впуску і стиску показав, що найбільша швидкість спостерігається при відкритті впускного клапана.

На такті стиску, під час протікання процесів плівкового сумішоутворення, над паливною плівкою середня швидкість руху РТ склала близько 10 м/с. При дослідженні процесів плівкового сумішоутворення температура поверхні паливної плівки (температура випаровування) $t_{\text{вип}}$ знаходиться із умов балансу тепла, підведеного до рідкої плівки і витраченого на випаровування [4]

$$\alpha_{\text{рт}}(t_{\text{рт}} - t_{\text{вип}}) + \alpha_{\text{пал}}(t_{\text{пал}} - t_{\text{вип}}) = \beta_{\text{вип}} p_{\text{п}} \Delta i, \quad (1)$$

де $\alpha_{\text{рт}}$, $\alpha_{\text{пал}}$ – коефіцієнти тепловіддачі РТ і палива відповідно; $\beta_{\text{вип}}$ – коефіцієнт випаровування, який віднесено до різниці парціальних тисків пари на поверхні паливної плівки $p_{\text{п}}$ і у РТ $p_{\text{рт}}$; Δi – збільшення ентальпії палива; $t_{\text{рт}}$, $t_{\text{пал}}$ – температури РТ і поверхні паливної плівки з боку нагрітої поверхні відповідно.

З урахуванням результатів досліджень Виурова Д.Н., Нестеренко А.В., Ликова А.В. [6–8] і постійних, що характеризують властивості бензину А-76, АИ-93 [6], після підстановки коефіцієнтів і перетворення залежності (1) набуває вигляду

$$\begin{aligned} & \left(Nu \cdot \lambda_{рт} \cdot t_{рт} + \frac{8}{3} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \lambda_{пал} \cdot t_{СТ} \right) = \\ & = \left(Nu \cdot \lambda_{рт} + \frac{8}{3} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \lambda_{пал} \right) t_{вип} + \\ & + \frac{T_{вип}^{0,33}}{3585} \cdot \frac{5,35 \cdot A_1 \cdot Re^{n_1} \cdot Gu^{0,135} \cdot \nu_{рт}^{0,33}}{\rho_{рт}^{0,66}} \times \\ & \times (65 + 0,34 t_{вип} + 0,2 t_{рт} - 0,52 t_{вип}), \end{aligned} \quad (2)$$

де A_1, n_1 – постійні, що залежать від числа Рейнольдса Re ; Nu, Gu, Re – критерії Нуссельта, Гухмана, Рейнольдса; l, δ – довжина і товщина паливної плівки; $\lambda_{пал}, \lambda_{рт}$ – коефіцієнти теплопровідності палива і РТ.

Температуру рівноважного випаровування зі всієї площі поверхні визначають з рівняння (2) методом підбору.

Коефіцієнт швидкості випаровування [4]

$$K_{и} = \frac{5,35 \cdot A_1 \cdot Re^{n_1} \cdot Gu^{0,135} \cdot \nu_{в}^{0,33} \cdot T_{и}^{0,33}}{l \cdot \rho_{Т} \cdot e^{\frac{T_{и}}{T_{и}}} \rho_{в}^{0,66}}. \quad (3)$$

Ступінь випаровування пального [4]

$$\Omega = \frac{F \cdot \rho_{Т} \cdot K_{и} \cdot \tau}{g}, \quad (4)$$

де F – площа паливної плівки; g – кількість палива на поверхні.

Кількість випаровувань від палива [4]

$$B = \sum \Omega_i \cdot g_i. \quad (5)$$

Особливості організації робочих процесів із БВП у чотиритактному двигуні представлено на рис. 3.

Під час упорскування ($\varphi_{вип} = 200-225^\circ$ ПКВ після ВМТ) й руху паливного струменя частка палива B , що випарувалася, становить де-що більше 1 % від циклової подачі Вц.

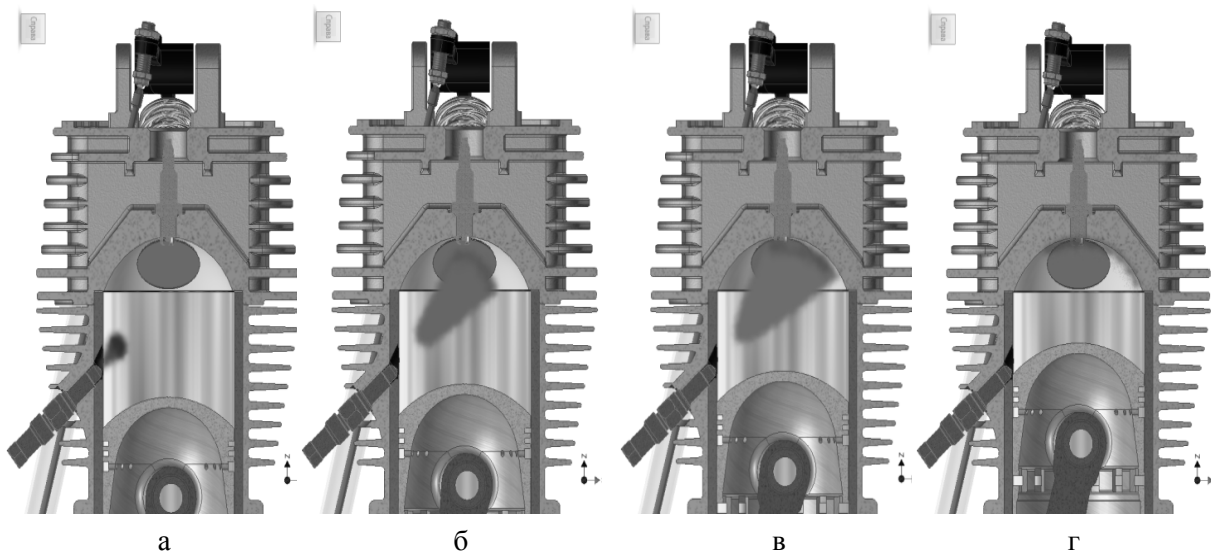


Рис. 3. Процеси внутрішнього сумішоутворення: а – випаровування палива під час упорскування; б – випаровування палива після закінчення паливоподачі до моменту досягнення фронтом струменя стінки КЗ; в – випаровування палива при взаємодії фронту паливного струменя з поверхнею стінки КЗ та у шлейфі струменя; г – випаровування палива з поверхні стінки КЗ

На цьому інтервалі процесів внутрішнього сумішоутворення відбувається неінтенсивне випаровування часток палива у струмені, внаслідок низького тиску упорскування ($P_{впр}=3,5$ МПа) та середнього діаметра крапель $D_{32}\approx 35$ мкм [7]. При русі паливного струменя після закінчення паливоподачі до моменту досягнення фронтом струменя стін-

ки КЗ (230° ПКВ після ВМТ) частка пального, що випарувалася, складає близько 2 %, що характеризує тип сумішоутворення як плівковий (рис. 3, б).

Результати розрахунків процесів внутрішнього сумішоутворення представлено на рис. 4.

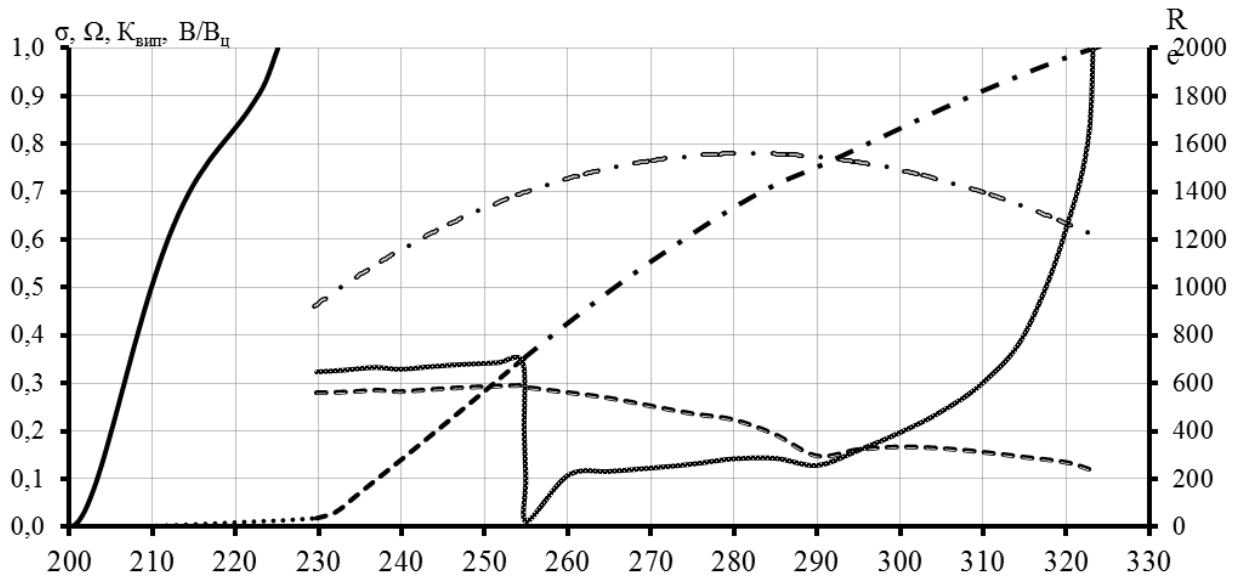


Рис. 4. Розрахунки процесів випаровування палива

- характеристики паливоподачі
- випаровування у паливному струмені
- - - - - випаровування у шлейфі струменя та зі стінки КЗ
- · - · - · випаровування зі стінки КЗ

За період одночасної взаємодії фронту паливного струменя з поверхнею стінки КЗ і випаровувань часток палива, що рухаються у шлейфі струменя ($230\text{--}255^\circ$ ПКВ після ВМТ), частка палива, яка випарувалася, складає близько 36 % (рис. 3, в, 4). Остання частина палива випарувалася з поверхонь стінок КЗ. Процес випаровування паливної півки за рахунок закінчився при 323° ПКВ після ВМТ (рис. 3, г, 4).

Висновки

Розрахунок процесів плівкового сумішоутворення у чотиритактному двигуні 2Ч7,8/6,8 з іскровим запалюванням та БВП палива на такті стиску дозволяє оцінити тривалість випаровування циклової подачі палива (123° ПКВ) за максимальної потужності й частоти обертання колінчастого вала $n=3000$ хв⁻¹. Результати розрахунків показують, що вся циклова подача палива випарується до моменту подачі напруги на електро-

ди свічки запалювання. Процес випаровування закінчується при 37° ПКВ до ВМТ, а кут запалювання становить 30° ПКВ до ВМТ. За підвищення частоти обертання колінчастого вала і збільшення потужності двигуна та циклової подачі палива момент початку упорскування палива може бути переміщений ближче до НМТ та на такт впуску. Застосована методика може бути використана для кількісної оцінки протікання процесів внутрішнього сумішоутворення в ДВЗ із іскровим запалюванням та БВП.

Література

1. Корогодський В.А. Дослідження процесів масо- і теплообміну у паливному струмені з периферійним розподіленням палива / В.А. Корогодський, А.О. Хандримайлов, Є.С. Грайворонський // Двигуни внутрішнього згорання. – 2010. – №2. – С. 22–27.

2. Петриченко Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания: учеб. пособие / Р.М. Петриченко. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 244 с.
 3. Спекторов Л.Г. Расчет испарения бензина с поверхности жидкой пленки при впрыске в двигатель с воспламенением от искры / Л.Г. Спекторов, А.Д. Гурлянд // Двигатели внутреннего сгорания. – 1975. – Вып. 22. – С.103–110.
 4. Глаголев Н.М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания / Н.М. Глаголев. – М.: Машгиз, 1950. – 245 с.
 5. Корогодський В.А. Модернізація вітчизняного двигуна 2Ч 6,8/7,8 з іскровим запалюванням системою безпосереднього впрыскування палива / В.А. Корогодський, А.О. Хандримайлов, Є.С. Грайворонський // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2010. – Вип. 119. – С. 117–122.
 6. Вырубов Д.Н. О расчетах смесеобразования / Д.Н. Вырубов // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1973. – Вып. 3. – С. 86–90.
 7. Нестеренко А.В. Тепло- и массообмен при испарении жидкости со свободной поверхности / А.В. Нестеренко // Техническая физика. – 1954. – Т. 24, вып. 4. – С. 8–11.
 8. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 418 с.
 9. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания / Н.Ф. Дубовкин. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
- Рецензент: Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., ХНАДУ.
- Стаття надійшла до редакції 17 травня 2012 р.
-