

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Пильов Вячеслав Володимирович



УДК 621.43.016.4

**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ  
НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДВЗ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Марченко Андрій Петрович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
проректор з наукової роботи,  
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Лісовал Анатолій Анатолійович**,  
Національний транспортний університет, м. Київ,  
професор кафедри двигунів і теплотехніки

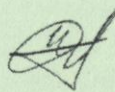
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Левтеров Антон Михайлович**,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного, м. Харків,  
старший науковий співробітник відділу поршневих  
енергоустановок

Захист відбудеться «27» листопада 2014 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.13 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «25» жовтня 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Осетров О.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Характерною ознакою двигунобудівної галузі сучасності є спрямування робіт на всебічне підвищення показників якості двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), серед яких увагу в першу чергу приділяють економічності, екологічності та надійності. Застосування частково-динамічної теплоізоляції (ЧДТ) поверхні камери згорання ДВЗ є одним з напрямів комплексного покращення перерахованих показників. Розроблена в Україні технологія гальваноплазменної обробки деталей з алюмінієвих сплавів дозволяє утворювати на поверхнях поршнів корундовий шар ( $Al_2O_3$ ), що має властивості ЧДТ. Технологія може бути застосована як для двигунів, що розробляються, так і для тих, що знаходяться в експлуатації.

Розробка теоретичних засад впливу ЧДТ на процеси в камері згорання (КЗ) двигуна є суттєво доцільною, що дозволить встановити зв'язок між параметрами теплоізоляції та показниками ДВЗ. Це повинно здійснюватись на основі визначення нестационарного високочастотного температурного стану поверхні КЗ та його впливу на робочий процес двигуна.

Протягом експлуатації на поверхні КЗ можливе нагароутворення. Через низьку теплопровідність та інші властивості нагару має місце явище ЧДТ. Хоча необхідність врахування нагару при дослідженні теплообміну робочого тіла зі стінкою КЗ є загально визнаною, відповідні засоби моделювання потребують подальшого розвитку.

Сучасні дизелі переважно мають об'ємне чи об'ємно-плівкове сумішоутворення. Одним з визначальних чинників якості згорання у циліндрі дизеля при об'ємно-плівковому сумішоутворенні є випаровування паливної плівки зі стінки КЗ. Слід очікувати суттєвого впливу теплоізоляції поршнів та нагаровідкладень на перебіг цього явища.

Тому, визначення впливу теплоізоляції поверхні КЗ та нагару на показники ДВЗ на основі моделювання процесів ЧДТ в зоні наявності та відсутності паливної плівки є актуальною задачею, яка обумовила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі двигунів внутрішнього згорання НТУ «ХПІ» в рамках держбюджетних тем МОН України: «Розробка наукових основ комплексного забезпечення перспективного рівня теплонапруженості та екологізації високофорсованих транспортних двигунів внутрішнього згорання» (ДР №0109U002385), «Інтеграція фізико-хімічних процесів згорання при сумісному керуванні показниками екологічності, економічності та надійності транспортних ДВЗ» (ДР №0112U000404), а також госпдоговірної теми «Попередня оцінка впливу гальваноплазменного покриття на температуру кромки камери згорання автотракторного двигуна» (ПАТ «АВТРАМАТ», м. Харків; ДР №0109U002386), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є визначення впливу теплоізоляції поверхні камери згорання на показники роботи ДВЗ шляхом урахування явищ, що пов'язані з нестационарним високочастотним теплообміном між робочим тілом та поршнем, присутністю нагару та особливостями випаровування паливної плівки.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначені основні задачі:

1. Розробка методики сумісного моделювання робочого процесу та нестационарного високочастотного температурного стану стінки КЗ з ЧДТ.
2. Розробка одновимірної математичної моделі температурного стану стінки в зоні наявності паливної плівки, що випаровується.
3. Проведення експериментальних випробувань та розрахункових досліджень робочого процесу та температурного стану поршня за відсутності та наявності ЧДТ.
4. Формування уявлень щодо ефектів ЧДТ та оцінка їх впливу на показники роботи двигунів внутрішнього згорання.

*Об'єкт дослідження:* процеси теплообміну між робочим тілом та стінками камери згорання ДВЗ.

*Предмет дослідження:* ефекти частково-динамічної теплоізоляції в камері згорання та

їх вплив на показники роботи ДВЗ.

**Методи дослідження.** Усі експериментальні та теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях теорій ДВЗ, теплопровідності та міцності. Експериментальні методи застосовано для ідентифікації робочого процесу дизеля, граничних умов задачі теплопровідності в зоні вогневого денця поршня, визначення товщин нагару, що утворився на поршні. При моделюванні робочого процесу використана математична модель сумішоутворення та згоряння проф. М.Ф. Разлейцева. При моделюванні стаціонарного та нестаціонарного температурних станів поршня використано, відповідно, методи кінцевих елементів та кінцевих різниць.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Розвинуто теоретичні положення щодо визначення показників роботи ДВЗ, які відрізняються від раніше відомих урахуванням ЧДТ стінки камери згоряння в процесі теплообміну між нею та робочим тілом у зонах відсутності та наявності паливної плівки:

1. Вперше встановлено динамічну складову теплоізолюючого ефекту в КЗ дизеля при наявності ЧДТ на поверхні КЗ, що для різних її зон становить 40-80% від загальної величини зниження температури під шаром теплоізоляції.

2. Удосконалено врахування впливу тангенційного вихору робочого тіла на розвиток паливного струменя в моделі сумішоутворення та згоряння проф. М.Ф. Разлейцева, що дозволило уточнити час, координати, швидкість торкання стінки паливним струменем, кількість палива, що потрапило на стінку.

3. Вперше визначено характерні особливості нестаціонарного високочастотного температурного стану поверхні КЗ з шаром ЧДТ у зоні наявності паливної плівки для дизеля 4ЧН12/14. Встановлено зменшення температури поверхні під час випаровування плівки. Після завершення випаровування можливий сплеск вказаної температури, величина якого обумовлюється моментом утворення плівки та кількістю палива, що увійшло до неї.

4. Сформульовано уявлення та кількісно визначено вплив шару ЧДТ на перебіг робочого процесу та ресурсну міцність кромки КЗ. Введення теплоізоляції КЗ дизеля 4ЧН12/14 корундовим шаром товщиною 0,25 мм призвело до підвищення повноти згоряння палива, яке на навантаженому частковому режимі склало 3%, при практично незмінній втраті теплоти до стінки. При цьому допустимим є форсування двигуна на 16-28% при забезпеченні надійності поршня.

**Практичне значення отриманих результатів** для двигунобудівної галузі полягає у наступному:

1. Удосконалено постановку одновимірної нестаціонарної високочастотної задачі теплопровідності стінки камери згоряння ДВЗ, що зменшує час розрахунку при наявності поверхневого корундового шару до 40 разів. Модель реалізовано у вигляді програмного продукту.

2. Розроблено методику визначення тривимірного високочастотного температурного стану поршня з шаром теплоізоляції, що дозволяє встановити ефекти ЧДТ в різних зонах КЗ та може використовуватись в системі прийняття рішень щодо проектування та модернізації конструкцій ДВЗ.

3. Рекомендовано порівняння економічності двигунів, які мають поршні з шаром ЧДТ та традиційної конструкції проводити за наявності на поршнях властивого їм в експлуатації шару нагару.

4. Узагальнено результати експериментально-розрахункових досліджень, сформоване та представлене у вигляді схеми уявлення щодо впливу ефектів ЧДТ на комплекс показників якості двигуна. Для виключення негативних впливів нагару рекомендоване локальне підвищення товщини шару теплоізоляції поршня в зоні контакту паливних струменів зі стінкою КЗ.

Результати роботи, розроблені моделі та методики впроваджені та використовуються у ПАТ «АВТРАМАТ» (акт впровадження від 13.06.2014 р.), у практиці наукових досліджень та в навчальному процесі кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП» (акт впровадження

від 23.06.2014 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати дисертації одержано здобувачем особисто. Серед них: уточнення математичної моделі одновимірної нестационарної високочастотної теплопровідності стінки КЗ; розробка одновимірної математичної моделі температурного стану стінки в зоні паливної плівки, що випаровується; розробка методики визначення тривимірного нестационарного температурного стану деталей КЗ з ЧДТ; уточнення моделі сумішоутворення та згоряння проф. М.Ф. Разлейцева; здійснення програмної реалізації всіх запропонованих моделей та виконання за їх допомогою розрахункових досліджень. Здобувач брав участь у підготовці стенда та проведенні досліджень температурного стану поршня дизеля 4ЧН12/14, вимірюванні товщини шару нагару на ньому, розробці методики сумісного моделювання робочого процесу та нестационарного високочастотного теплообміну робочого тіла з поршнем.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертації доповідалися на: XVII Міжнародному конгресі двигунобудівників (АР Крим, с. Рибаче, 2012 р.), Міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012-2013 рр.), 75-ій Міжнародній науково-технічній конференції кафедр УкрДАЗТ, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн (м. Харків, 2013 р.), XI Міжнародній науково-практичній конференції (м. Володимир, 2008 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 14 наукових працях, з яких 9 у наукових фахових виданнях України, 1 – у закордонному періодичному фаховому виданні, 4 – у матеріалах та тезах конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінки; з них 41 рисунки по тексту, 23 рисунків на 18 окремих сторінках, 17 таблиць по тексту, 10 таблиць на 5 окремих сторінках, 154 найменувань використаних джерел на 16 сторінках, 2 додатки на 6 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, викладено мету та основні задачі дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено особистий внесок здобувача, дані щодо апробації результатів роботи та публікації основних положень.

**У першому розділі** здійснено аналіз, узагальнення та систематизацію світового досвіду застосування теплоізоляції КЗ, її впливу на показники ДВЗ та способів визначення температурного стану теплоізолюваного поршня. Дослідження різних аспектів цього питання займалися Grot K., Huber K., Kolesa K., Linke H., Sperling F., Woschni G., Абрамчук Ф.І, Звонов В.О., Кавтарадзе Р.З., Костин О.К., Марченко А.П., Третяк Є.І., Чепиль В.С., Шеховцов А.Ф., Шпаковський В.В. та інші вчені. Подібні дослідження проводилися у різні часи провідними фірмами, зокрема Opel, VolksWagen, Steyr-Daimler-Puch, Daimler-Benz, Porsche, Audi, BMW, MAN, Sulzer Metco.

Практично всі дослідники оцінку рівня теплоізоляції КЗ ДВЗ ведуть від граничного адіабатного стану двигуна, як такого, при якому сумарний потік теплоти від робочого тіла до стінок КЗ дорівнює нулю. При цьому, розглядаються два основних варіанти конструктивного наближення до теоретичного адіабатного двигуна. Перший, відомий як регенеративна теплоізоляція, передбачає акумуляцію теплової енергії деталями КЗ під час згоряння з наступним її поверненням робочому тілу на інших ділянках циклу. На практиці подібний процес має місце при застосуванні жарових накладок, в першу чергу, на поршні. Основними недоліками подібної конструкції є зменшення коефіцієнту наповнення та надмірне пришвидшення випаровування палива зі стінки, що погіршує ефективність процесу згоряння.

Сутність другого варіанту полягає у мінімізації термічної інерційності поверхні,  $TT =$

$\lambda\rho c \rightarrow 0$ , що викликає слідування температури поверхні стінки за температурою робочого тіла на протязі циклу. Реальні конструкційні матеріали не можуть забезпечити суттєвого зменшення втрат теплоти у стінки КЗ цим шляхом, проте, така теплоізоляція, що носить назву частково-динамічної, викликає певні зміни у перебігу робочого процесу. Цей вплив пояснюються короткочасним підвищенням температури поверхні камери підчас згоряння, що сприяє зменшенню гасіння ланцюгових реакцій горіння в пристінних областях.

Відомі дослідження теплоізолюючих покриттів КЗ засвідчують, що термічний вплив ЧДТ на робочий процес дизелів з об'ємно-плівковим та плівковим сумішоутворенням базується на відносно незалежних процесах теплообміну деталей з робочим тілом та паливною плівкою.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що нагар виступає у ролі частково-динамічної теплоізоляції природного походження. Коливання температури поверхні шару нагару може значно перевищувати коливання температури поверхні штучної ЧДТ.

Таким чином, доцільним є розробка засобів математичного моделювання та дослідження впливу теплоізолюючих покриттів та нагару на перебіг робочого процесу і на цій основі формування уявлень щодо впливу ефектів ЧДТ на показники ДВЗ.

**Другий розділ** містить опис теоретичних положень роботи, запропонованих та удосконалених математичних моделей і методик, призначених для урахування явища ЧДТ в КЗ ДВЗ.

Для визначення нестационарного високочастотного температурного стану поверхні поршня з шаром ЧДТ у одновимірній постановці запропонована наступна математична модель:

$$\rho(x)c(x,T(x,\tau))\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \partial \left( \lambda(x,T(x,\tau))\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \right) / \partial x; \quad (1)$$

$$\rho(0)c(0,T(0,\tau))\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial \tau} = \lim_{x \rightarrow +0} \frac{\lambda(x,T(x,\tau))\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} + \alpha_a(\tau)(T_a(\tau) - T(0,\tau))}{x}; \quad (2)$$

$$\alpha_\varepsilon(T_\varepsilon - T(l,\tau)) - \lambda(l,T(l,\tau))\frac{\partial T(l,\tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$T(x,0) = T_0(x)_{x \in [0;l]}, \quad (4)$$

де  $T_0(x)$ ,  $T(x,\tau)$  – температури стінки на відстані  $x$  від поверхні камери згоряння у початковий момент часу та поточний момент  $\tau$ ;  $T_c(\tau)$ ,  $T_m$  – температури робочого тіла в КЗ та охолоджуючого масла;  $\alpha_c(\tau)$ ,  $\alpha_m$  – коефіцієнти тепловіддачі від відповідних середовищ до тіла;  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  – теплопровідність, теплоємність та густина матеріалів відповідно;  $l$  – товщина стінки.

Запис граничних умов (ГУ) зі сторони теплопідведення (2) базується на застосуванні закону збереження енергії до рівняння конвективного теплообміну. При чисельній реалізації моделі це дозволяє укрупнити часовий і пов'язаний з ним просторовий кроки сіткової моделі, що приводить до зменшення часу розрахунку при заданій точності порівняно з базовою моделлю при наявності поверхневого корундового шару до 40 разів. Час одного розрахунку при цьому може зайняти понад шість годин.

Використання моделі (1)-(4) дозволяє оцінювати температурний стан зони КЗ, в якій середньоцикловий локальний коефіцієнт тепловіддачі  $\bar{\alpha}_a^\varepsilon(x, y, z)$  збігається з середнім по поверхні камери згоряння  $\bar{\alpha}_a$ .

Вже на незначній глибині від поверхні КЗ розмах температурних коливань зменшується до величини, якою можна знехтувати. Тому моделювання температурного стану згідно закону нестационарної теплопровідності достатньо виконувати для поверхневої області тіла  $\Omega_1$  певної товщини  $\Delta_b$ . Температура решти тіла  $\Omega_2$  залишається незмінною на сталому режимі роботи двигуна. За наявності ефекту ЧДТ величина  $\Delta_b$  може бути задана близькою до то-

вщини низькотеплопровідного шару  $\delta_n$ .

На цій основі, спираючись на припущення щодо малості бокових теплових потоків в області  $\Omega_1$ , запропоновано методику моделювання тривимірного температурного стану поршня з шаром ЧДТ. Методика передбачає вирішення задачі теплопровідності в області  $\Omega_1$  як комплексу задач в одновимірній нестационарній постановці, а в області  $\Omega_2$  – у тривимірній стаціонарній. При цьому одновимірні задачі відповідають зонам КЗ, що відрізняються умовами теплообміну та значеннями товщин теплоізоляції.

Для вирішення кожної задачі в області  $\Omega_1$  на її границі з  $\Omega_2$  задаються стаціонарні ГУ першого роду. Довільній температурі  $T_b$  в них можна поставити у відповідність тепловий потік  $q_b$  через поверхню контакту, отримавши функцію  $q_b = f_1(T_b)$ . У свою чергу, при вирішенні задачі в області  $\Omega_2$  застосування ГУ другого роду утворює функцію  $T_b = f_2(q_b)$ . Спільне рішення температурної задачі для областей  $\Omega_1$  і  $\Omega_2$  відповідає виконанню ГУ четвертого роду, що є точкою перетину  $f_1$  і  $f_2$ . Врахування динамічного ефекту від теплоізоляції досягається після виконання відповідних ітераційних розрахунків.

Моделювання робочого процесу, пов'язаного з нестационарним високочастотним температурним станом поверхні КЗ, запропоновано здійснювати за допомогою ітерацій. При моделюванні температурного стану поршня ГУ третього роду визначаються за даними робочого процесу. Коефіцієнт тепловіддачі встановлювався за формулою Вошні. Отримана функція високочастотної зміни температури стінки використовується у моделі робочого процесу, впливаючи на втрати теплоти в КЗ, швидкості випаровування та тепловідлення. Наведена методика дозволяє застосовувати довільну модель робочого процесу.

В роботі використано модель сумішоутворення та згоряння в КЗ дизеля проф. М.Ф. Разлейцева із доповненнями, здійсненими І.І. Сукачовим. Для уточнення умов розвитку паливної плівки на теплоізолюваній стінці в роботі удосконалено закладений в цю модель опис впливу тангенційного вихоря робочого тіла на паливний струмінь. При цьому враховано: відносність швидкості вихорю до руху вершини струменя; прирощення тангенційної швидкості вершини струменя, визначене як проекція повного прирощення, що є функцією від лобового супротиву середовища; вплив вихоря на струмінь визначається для точок простору, що лежать на його деформованій траєкторії; виконується перевірка досягнення струменем стінки, яка враховує профіль останньої, рух поршня і деформованість траєкторій струменів. Уточнена модель дозволяє визначати момент, швидкість та координати торкання кожним струменем стінки КЗ, долю палива, що увійшла до паливної плівки. Достовірність моделі перевірено за експериментально визначеними координатами торкання кожним струменем стінки.

На основі аналізу робочого процесу та температурного стану стінки, прийнятих спрощень і припущень, запропоновано одновимірну нестационарну модель температурного стану стінки КЗ у зоні наявності паливної плівки, що випаровується. Плівка з початковими товщиною  $h_0$  і температурою  $T_{i0}$  миттєво утворюється на стінці камери згоряння в момент  $\varphi_w$  досягнення останньої фронтом паливного струменя. Теплообмін між стінкою КЗ та паливною плівкою супроводжується перемішуванням шарів палива, що виражається в усередненні температури по товщині плівки. Швидкість процесу випаровування палива з поверхні перевищує швидкість механічного перемішування. У зв'язку з цим прийнято, що вся теплота, підведена від робочого тіла, витрачається на нагрів і випаровування поверхневого шару палива. При цьому під час існування паливної плівки коефіцієнт тепловіддачі задається  $\alpha_{de} = 20000 \text{ Å} / (\epsilon^2 \cdot E)$ , відповідно до теорії конвекційного сплеску Вошні. Випаровування здійснюється за температури фазового переходу палива  $T_{ecd}$ .

Модель описується сітковими рівняннями, що включають закони теплопровідності для однорідних матеріалів, їх стику, граничні та початкові умови, рівняння для визначення температури в допоміжних вузлах, позначених зірочкою на рис. 1, температури плівки після перемішування, що в рівняннях позначена індексом  $t$ , та товщини плівки  $h$ :

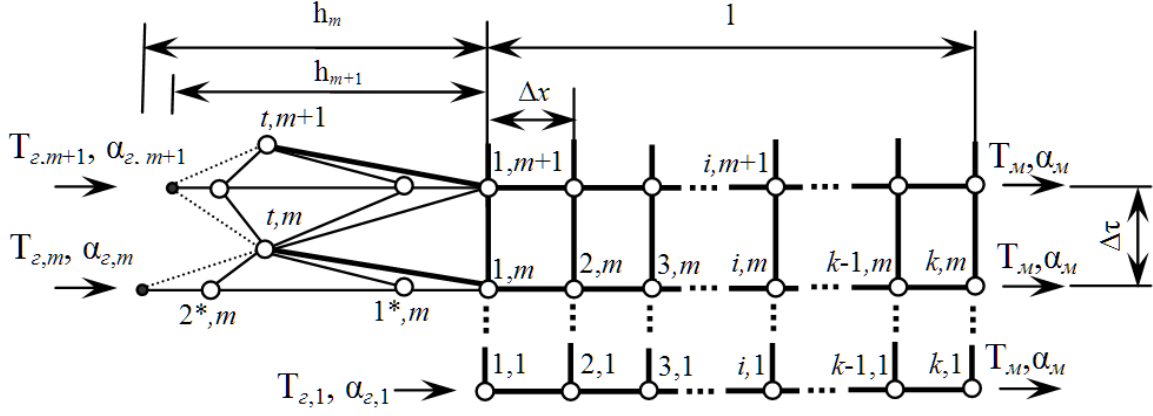


Рисунок 1 – Схема розрахункової сітки нестационарної одновимірної моделі температурного стану стінки камери згоряння у зоні наявності паливної плівки

$$\rho_i c_i \frac{T_{i,m+1} - T_{i,m}}{\Delta \tau} = \lambda_i \frac{T_{i-1,m} - 2T_{i,m} + T_{i+1,m}}{\Delta x^2}, \quad i \in \{2, 3, \dots, k-1\} \setminus \left\{ \left[ \frac{\delta}{\Delta x} \right], \left[ \frac{\delta}{\Delta x} \right] + 1 \right\}; \quad (5)$$

$$\rho_i c_i \frac{T_{i,m+1} - T_{i,m}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2} \frac{T_{i+1,m} - T_{i,m}}{\Delta x} - \frac{\lambda_i + \lambda_{i-1}}{2} \frac{T_{i,m} - T_{i-1,m}}{\Delta x}, \quad i \in \left\{ \left[ \frac{\delta}{\Delta x} \right], \left[ \frac{\delta}{\Delta x} \right] + 1 \right\}, \quad \delta_n \neq 0; \quad (6)$$

$$\rho_k c_k \frac{T_{k,m+1} - T_{k,m}}{\Delta \tau} = \frac{\alpha_{\bar{\epsilon}} (2T_{\bar{\epsilon}} - T_{k,m+1} - T_{k,m}) / 2}{\Delta x / 2} - \frac{\lambda_k (T_{k,m} - T_{k-1,m})}{\Delta x / 2}; \quad (7)$$

$$T_{i,1} = T_0, \quad i \in \{1, 2, \dots, k\}; \quad (8)$$

$$T_{t,m} = T_{t,0}, \quad m \in \left\{ \left[ \frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] \right\}, \quad j \in N; \quad (9)$$

$$h_m = h_0, \quad m \in \left\{ \left[ \frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] \right\}, \quad j \in N; \quad (10)$$

$$\rho_t c_t \frac{T_{1^*,m+1} - T_{1^*,m}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda_t (T_{1,m} - T_{t,m})}{\Delta x}, \quad h_m > \frac{3}{2} \Delta x; \quad (11)$$

$$T_{2^*,m+1} = T_{t,m}, \quad h_m > \frac{3}{2} \Delta x; \quad (12)$$

$$T_{t,m+1} = T_{1,m+1} \frac{\Delta x / 2}{h_{m+1}} + T_{1^*,m+1} \frac{\Delta x}{h_{m+1}} + T_{2^*,m+1} \left( 1 - \frac{3\Delta x / 2}{h_{m+1}} \right), \quad h_m > \frac{3}{2} \Delta x, \\ m \in \left\{ \left[ \frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right], \left[ \frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] + 1, \dots, \left[ \frac{\varphi_{\delta} + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] - 2 \right\}, \quad j \in N; \quad (13)$$

$$\frac{\alpha_{d\bar{e}} (T_{d\bar{e}} - T_{\bar{e}cd})}{\rho_t} = \frac{h_m - h_{m+1}}{\Delta \tau} (c_t (T_{\bar{e}cd} - T_{t+1,m}) + r), \quad h_m > \frac{3}{2} \Delta x, \\ m \in \left\{ \left[ \frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right], \left[ \frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] + 1, \dots, \left[ \frac{\varphi_{\delta} + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] - 2 \right\}, \quad j \in N. \quad (14)$$

$$h_{m+1} = 0, \quad h_m \leq \frac{3}{2} \Delta x, \quad m \in N / \left\{ \left[ \frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] - 1 \right\}, \quad j \in N; \quad (15)$$



$$\frac{\rho_1 + \rho_t}{2} \frac{c_{1,m} + c_t}{2} \frac{2T_{1,m+1} - T_{t,m+1} - T_{1,m}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda_1 \frac{T_{2,m} - T_{1,m}}{\Delta x} - \lambda_t \frac{T_{1,m} - T_{t,m}}{\Delta x}}{\Delta x}, h_m > \frac{3}{2} \Delta x; \quad (16)$$

$$\rho_1 c_1 \frac{T_{1,m+1} - T_{1,m}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda_1 \left( \frac{T_{2,m+1} - T_{1,m+1}}{\Delta x} + \frac{T_{2,m} - T_{1,m}}{\Delta x} \right) / 2}{\Delta x / 2} + \frac{(\alpha_{\dot{a},m+1} (T_{\dot{a},m+1} - T_{1,m+1}) + \alpha_{\dot{a},m} (T_{\dot{a},m} - T_{1,m})) / 2}{\Delta x / 2}, h_m \leq \frac{3}{2} \Delta x, \quad (17)$$

де  $i, m$  – сіткові просторова та часові координати.

Кут моменту кінця випаровування палива  $\varphi_{en}$  враховується з точністю до  $6n\Delta\tau$  за допомогою виразів

$$h_{\left[ \frac{\varphi_{ad} + 720 \cdot j_z}{6n\Delta\tau} \right]} > 0, \quad h_{\left[ \frac{\varphi_{ad} + 720 \cdot j_z}{6n\Delta\tau} \right] + 1} = 0, \quad (18)$$

де  $j_z$  – номер робочого циклу двигуна, при якому вважається, що нестационарний модельований процес установився. Температурний стан стінки, паливної плівки, а також товщина останньої як залежності від кута повороту колінчастого валу  $\varphi \in [0; 720)$

$$T_{i, \left[ \frac{\varphi + 720 \cdot j}{6n\Delta\tau} \right]}, \quad T_{t, \left[ \frac{\varphi + 720 \cdot j}{6n\Delta\tau} \right]}, \quad h_{\left[ \frac{\varphi + 720 \cdot j}{6n\Delta\tau} \right]}$$

при довільній величині  $j \geq j_z$  вважаємо остаточними.

Аналогічно до (5-17) побудовані вісім можливих варіантів моделі, які відрізняються способами врахування теплообміну плівки з робочим тілом і поршнем та перемішуванням шарів палива. Лише наведений варіант (5-17) забезпечив закінчення випаровування паливної плівки у властивих реальному процесу часових межах при температурі стінки, узгодженій з іншими зонами КЗ. Модель (5-17) прийнято до подальшого використання.

На розтріскування кромки КЗ впливають умови експлуатації дизеля та температурний стан поршня. Проте ЧДТ викликає зменшення коливання та загального рівня температури під низькотеплопровідним шаром. Через це в дисертаційному дослідженні відповідно змінено методику оцінки ресурсної міцності кромки КЗ поршня з урахуванням шару теплоізоляції на її поверхні.

**Третій розділ** присвячено викладенню методики та результатів експериментальних досліджень впливу ЧДТ на температурний стан поршня та економічність ДВЗ.

Випробування автотракторного дизеля 4ЧН12/14 проведено на лабораторному стенді кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП». Визначався температурний стан поршня другого

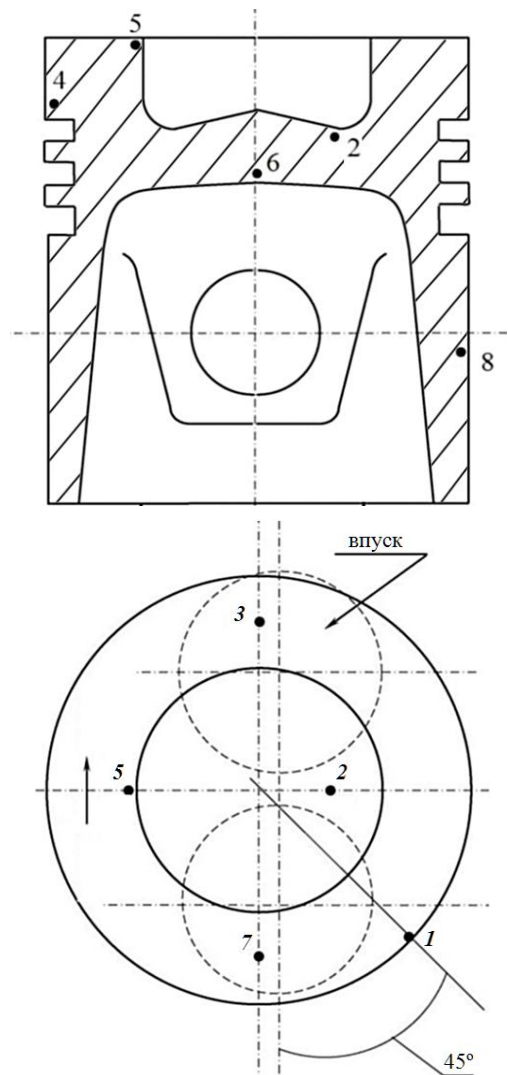


Рисунок 2 – Схема розміщення термопар у поршні

циліндру за допомогою восьми хромель-алюмелевих термопар, розміщених відповідно до рис. 2 на глибині 1 мм від поверхні деталі. Використовувався струмознімальний пристрій з переривчастою передачею сигналу. Регулювання температурного стану поршня на певному режимі роботи дизеля здійснювалось шляхом зміни температури охолоджуючого масла. Для цього було застосовано автономну систему його охолодження у водомасляному теплообміннику.

Перший етап дослідження передбачав застосування поршнів традиційної конструкції. Після завершення експерименту виміряні товщини нагару в камері згоряння переважно становили 0,03-0,05 мм, на периферії КЗ локально сягаючи 0,19 мм. Надалі на вогневій поверхні поршнів було утворено шар  $Al_2O_3$  товщиною 0,05 мм, випробування виконані повторно. Аналіз результатів засвідчує погіршення економічності дизеля при застосуванні штучної ЧДТ. В області навантажених режимів воно складає 3 г/(кВт·год). При цьому спостерігається складний вплив режимних факторів дизеля на його економічність.

На другому етапі використовувались отримані на кафедрі ДВЗ НТУ «ХПІ» результати випробування іншого дизеля 4ЧН12/14 за наявності на поршнях шару корунду товщиною 0,25 мм. Введення такої теплоізоляції, навпаки, призвело до поліпшення питомої ефективної витрати палива на режимі  $N_e = 40$  кВт,  $n = 1000$  хв<sup>-1</sup> на величину до 4 г/(кВт·год).

Отримано індикаторні діаграми та інші необхідні вихідні дані для моделювання робочого процесу та температурного стану поршня.

**У четвертому розділі** спираючись на аналіз експериментальних даних та узагальнення результатів виконаного математичного моделювання процесів, сформоване уявлення щодо впливу ефектів ЧДТ на показники якості двигуна. Комплекс встановлених зв'язків подано на рис. 3.

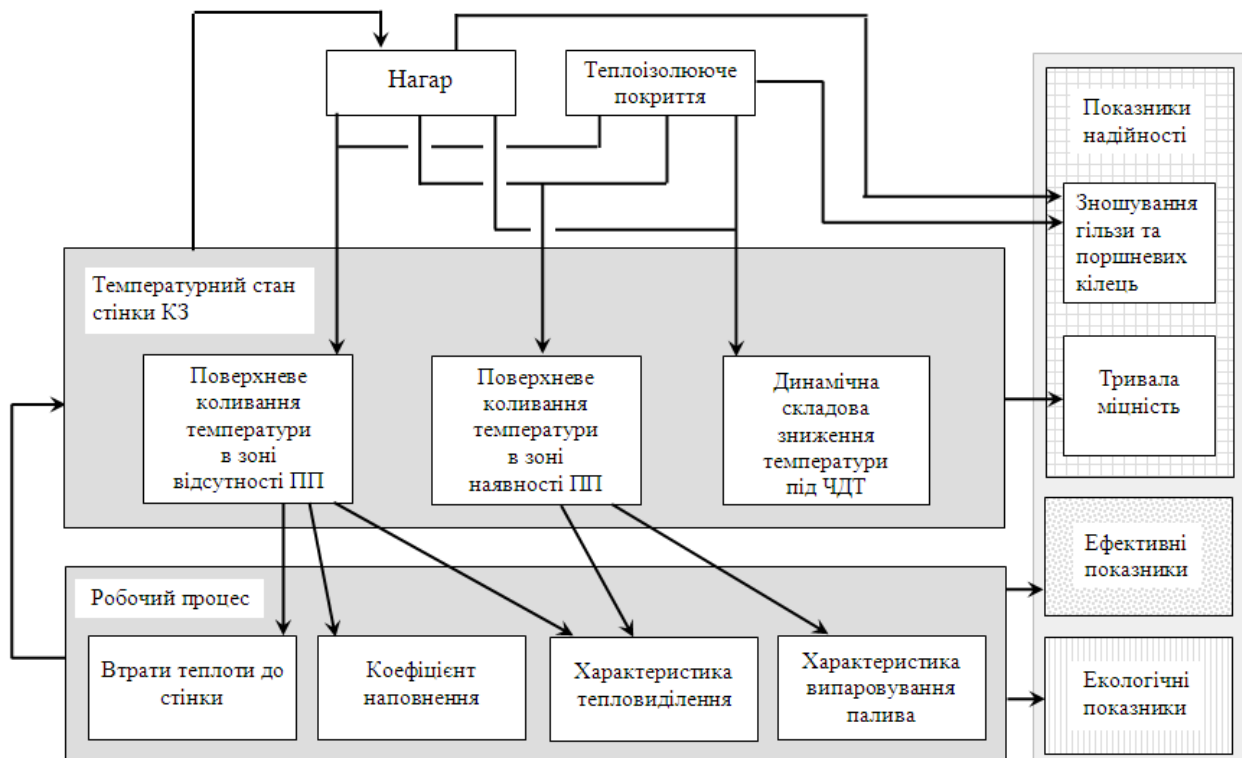


Рисунок 3 – Вплив ефектів ЧДТ на показники двигуна

Чисельне моделювання тривимірного нестационарного високочастотного температурного стану поршня з шаром корунду  $\delta_n = 0,25$  мм та без нього, виконане з використанням розробленої методики, засвідчило особливості зменшення рівня температури основного матеріалу поршня під ЧДТ. Так, для режиму роботи дизеля  $N_e = 100$  кВт,  $n = 2000$  хв<sup>-1</sup> на глибині

1 мм зменшення сягає 8 К. При цьому, це зниження частково обумовлюється ефектом динамічності температури теплоізолюваної поверхні. При розглянутих параметрах теплоізоляції для більшої частини значень координати  $l$ , відкладеної від осі поршня вздовж твірної його камери згоряння, цей вплив перевищує вплив термічного супротиву, складаючи 40-80% загальної величини зниження (рис. 4).

Враховуючи це явище та гасіння високочастотного коливання температури під покриттям виконане моделювання ресурсної міцності теплоізолюваних поршнів. Встановлено, що утворення шару  $Al_2O_3$  товщиною 0,25 мм на поверхні КЗ поршня дозволяє здійснити форсування дизеля 4ЧН12/14 при роботі згідно різних моделей експлуатації на 16-28% при гарантованому забезпеченні надійності кромки КЗ без інтенсифікації масляного охолодження.

Для зони наявності паливної плівки, утвореної довгими та короткими паливними струменями, проведені багатоваріантні порівняльні розрахунки. Виконано оцінку нестационарного високочастотного температурного стану камери згоряння з шаром ЧДТ в зоні наявності паливної плівки на різних режимах роботи двигуна (рис. 5). Встановлене істотне зменшення температури поверхні КЗ, властиве як конструкції з теплоізоляцією, так і без неї, що в одновимірній постановці може сягнути 140 К. Останнє є поясненням експериментально зафіксованого виникнення нагару в зоні контакту паливних струменів зі стінкою. Особливого значення це має для поршня зі штучною ЧДТ, коли в інших зонах нагар практично відсутній.

З'ясовано, що охолодження стінки КЗ в усіх розглянутих випадках на часткових режимах, порівняно з номінальним, є меншим. Аналогічний результат має місце для довгих паливних струменів порівняно з короткими. Встановлено, що в зоні взаємодії зі стінкою довгого паливного струменя чи на часткових режимах можливе повторне зростання температури стінки на фазі догоряння. Ці ефекти обумовлені більш раннім моментом завершення випаровування, що залежить від моменту утворення плівки та кількості палива, що досягло стінки. Встановлено, що на результати моделювання значний вплив оказує початкова температура палива  $T_{i0}$ . Згідно моделі сумішоутворення та згоряння проф. М.Ф. Разлейцева, величина  $T_{i0}$  оцінюється як 50-250°C. Отриманий результат дозволив для двигуна 4ЧН12/14 звузити означений діапазон зверху до 170°C. В протилежному випадку розрахунки надають неможливий на практиці нагрів поршня за рахунок теплоти палива.

Сумісне моделювання робочого процесу дизеля та температурного стану стінки виявило достатність виконання двох ітерацій. Це пояснено малістю впливу зміни параметрів робочого процесу, викликаних температурним станом, на вказаний температурний стан, порівняно із режимними факторами та конструкцією теплоізоляції. На цій основі встановлена припустимість для визначення температурного стану стінки КЗ з ЧДТ та обумовлених цим змін робочого процесу використання в якості вихідних даних для моделювання індикаторних діаграм, отриманих на двигуні з поршнями традиційної конструкції.

При виконанні дисертаційного дослідження визначено викликані ЧДТ поршня відмін

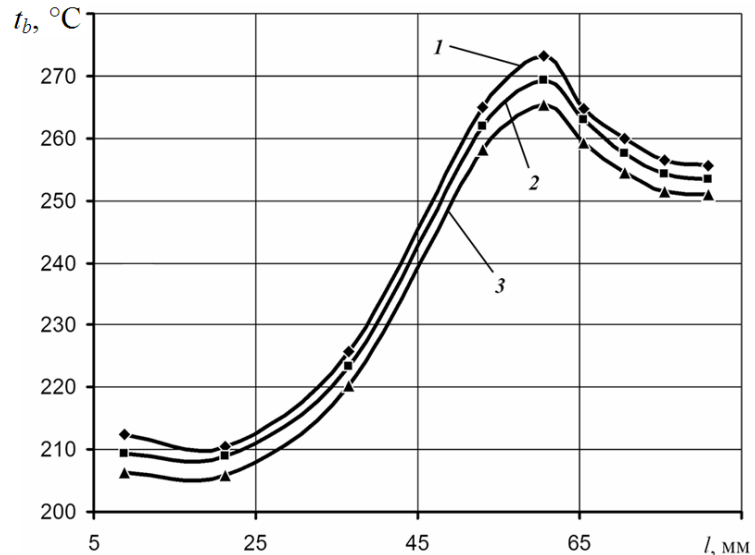


Рисунок 4 – Температура тіла поршня на глибині 1 мм від його поверхні: 1 – без ЧДТ; 2 – динамічний ефект від шару корунду 0,25 мм не враховано; 3 – динамічний ефект враховано

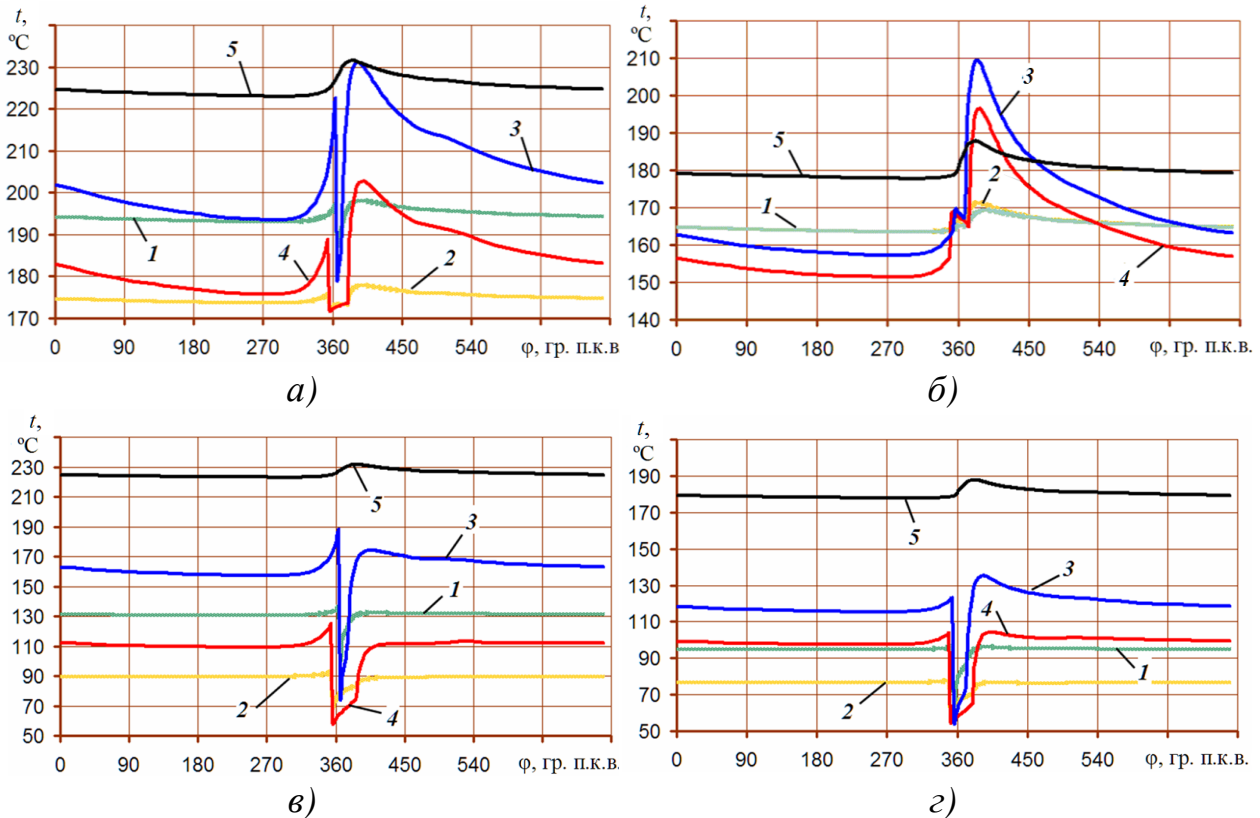


Рисунок 5 – Температурне коливання поверхні камери згоряння поршня дизеля 4ЧН12/14 на режимах роботи  $N_e = 100$  кВт,  $n = 2000$  хв<sup>-1</sup> (а, в) та  $N_e = 40$  кВт,  $n = 1000$  хв<sup>-1</sup> (б, г) в зоні наявності паливної плівки з початковою температурою 170°C (а, б) та 50°C (в, г): 1 – за відсутності ЧДТ, плівка утворена довгим паливним струменем; 2 – за відсутності ЧДТ, короткий струмінь; 3 – за наявності шару корунду 0,25 мм, довгий струмінь; 4 – шар корунду 0,25 мм, короткий струмінь; 5 – поршень без ЧДТ, паливо відсутнє

ності у перебігу робочого процесу. Для розглянутого часткового режиму відбувається підвищення на 3% кількості вивільненої при згорянні теплоти, що пов'язано з більш повним пристінним згорянням. При цьому втрати теплоти до стінок КЗ є практично незмінними (рис. 6). Відповідні температурні коливання поверхні камери згоряння поршня з ЧДТ, побудовані відносно власних середньоциклових значень, подано на рис. 7. За початок відліку часу тут прийнято момент впорскування палива, що для двигуна 4ЧН12/14 відповідає куту 18 гр. п.к.в. до ВМТ. При меншій частоті обертання колінчастого вала температурна хвиля на поверхні стінки є вищою.

Аналіз проведених сумісних розрахунків робочого процесу та температурного стану поршня дозволив встановити, що найбільший позитивний вплив від застосування ЧДТ на економічність ДВЗ досягається на навантажених часткових режимах, що не суперечить результатам випробувань.

Для додаткового підтвердження отриманого результату в умовах запобігання можливим зустрічним впливам від наявності на поверхні теплоізоляції паливної плівки розглянуто конструкцію, яка позбавлена відповідних зон. Для цього оброблено відомі результати випробувань бензинового двигуна 4Ч7,2/6,7 з шаром корунду товщиною 0,2 мм на поршнях. Підтверджено, що зменшення питомої витрати палива від впливу частково-динамічної теплоізоляції відбувається зі зменшенням частоти обертання колінчастого вала та з підвищенням навантаження. Відповідно максимальний ефект для цього двигуна досягається на зовнішній швидкісній характеристиці при мінімальній частоті обертання колінчастого вала. Тому, рекомендовано здійснювати визначення раціональної товщини теплоізоляції не для номінального, а для часткового режиму експлуатації зі значним відносним наробітком.

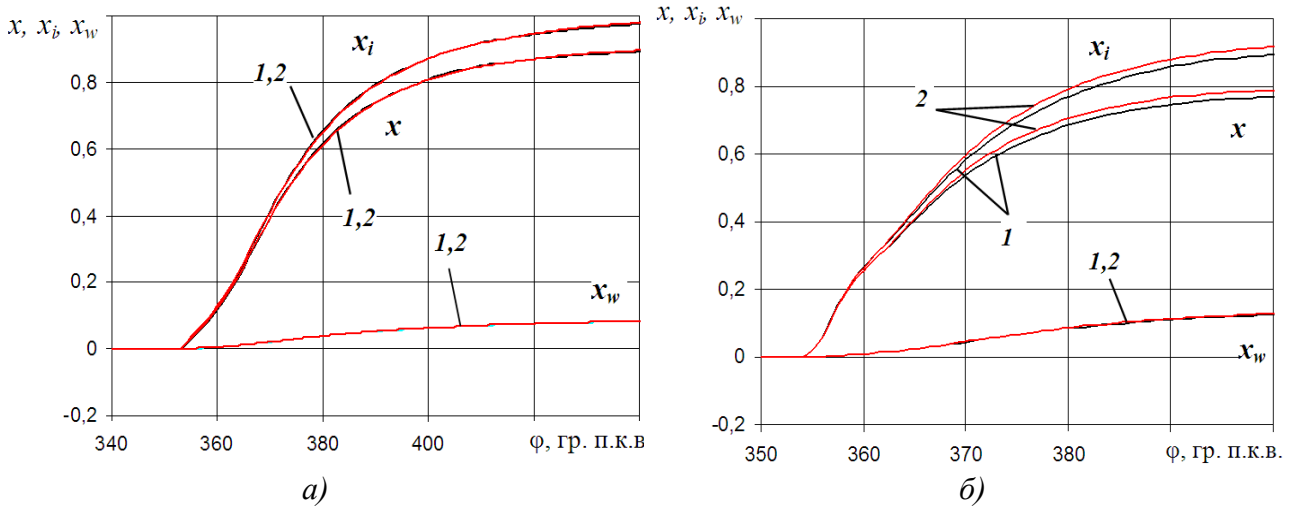


Рисунок 6 – Характеристики тепловиділення дизеля 4ЧН12/14 на режимах  $N_e = 100$  кВт,  $n = 2000$  хв<sup>-1</sup> (а) та  $N_e = 40$  кВт,  $n = 1000$  хв<sup>-1</sup> (б): 1 – штатні поршні; 2 – на поршнях утворено шар корунду товщиною 0,25 мм

У результаті порівняння температурного стану стінки КЗ із шаром штучної ЧДТ та нагару встановлено, що розмах коливання температури, викликаний нагаром вимірної початкової товщини 0,05 мм, є близьким до отриманого при застосуванні в 5 разів товстішої корундової теплоізоляції (рис. 8). Це дозволило пояснити отриманий в експерименті негативний ефект від застосування шару  $Al_2O_3$  товщиною 0,05 мм, оскільки ефект від природної ЧДТ тут є вищим.

Підвищення товщини шару нагару в експлуатації викликає неконтрольоване зростання температури стінки КЗ. Тому перевагою штучної теплоізоляції над природною є

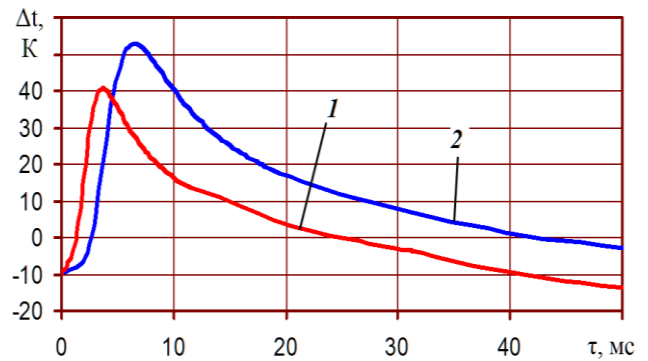


Рисунок 7 – Температурне коливання поверхні камери згоряння поршня з шаром корунду 0,25 мм: 1 –  $N_e = 100$  кВт,  $n = 2000$  хв<sup>-1</sup>; 2 –  $N_e = 40$  кВт,  $n = 1000$  хв<sup>-1</sup>

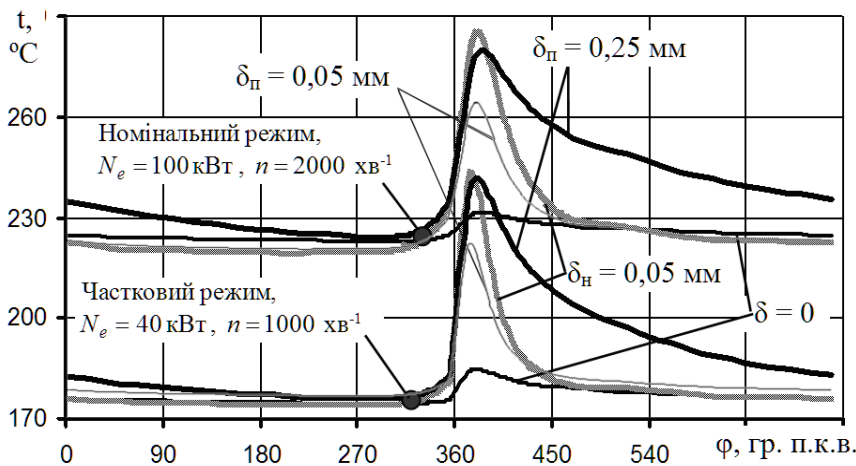


Рисунок 8 – Порівняння впливів нагару вимірної товщини та корундової теплоізоляції на температурний стан поверхні камери згоряння двигуна 4ЧН12/14

її фіксована у часі товщина, що стабілізує показники робочого процесу на заданому високому рівні. Рекомендовано порівняння показників двигунів з поршнями традиційної конструкції та з ЧДТ проводити після напрацювання першими часу, достатнього для утворення стабільного шару нагару.

Другою перевагою штучного покриття над нагаром є повільніше зниження температури стінки під час згоряння. Це сприяє ви-

горянню монооксиду вуглецю, вуглеводнів та твердих часток, підвищуючи екологічні якості двигуна. Так, згідно експерименту кафедри ДВЗ вміст твердих часток у відпрацьованих газах двигуна 4ЧН12/14 з шаром корундового покриття 0,25 мм зменшується до 12-28%.

Приймаючи до уваги схильність зони контакту паливних струменів зі стінкою КЗ до нагароутворення, рекомендовано товщину шару ЧДТ в цій зоні збільшити до товщини, що забезпечує відсутність нагару.

Враховуючи різницю середньоциклових температур поверхні поршня, що сягає 60 К та відмінність розмахів температурного коливання до 1,7 разів, пропонується застосування штучної ЧДТ змінної товщини, що забезпечить високі миттєві значення температури сукупності зон поверхні камери згоряння. Визначення таких раціональних локальних товщин теплоізоляції повинно реалізовуватись шляхом багатокритерійної оптимізації ефективних, екологічних показників двигуна та надійності поршня, одним з засобів якої можуть виступати запропоновані моделі та методики.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі визначення впливу теплоізоляції поверхні КЗ на показники роботи ДВЗ шляхом урахування явищ, що пов'язані з нестационарним високочастотним теплообміном між робочим тілом та поршнем, присутністю на поверхні КЗ нагару та особливостями випаровування з її поверхні паливної плівки. Отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Розроблено методику сумісного моделювання робочого процесу ДВЗ та нестационарного високочастотного температурного стану стінки КЗ поршня, яка враховує вплив температурного коливання поверхні КЗ на процеси випаровування палива та тепловиділення, втрати теплоти в стінку. Це дозволяє врахувати вплив ЧДТ на показники роботи ДВЗ.

2. Удосконалено математичну модель нестационарного високочастотного температурного стану стінки камери згоряння в одновимірному вигляді. Запропоновано запис граничних умов третього роду, який дозволив для випадку наявності поверхневого шару корунду скоротити час розрахунку при заданому рівні точності до 40 разів.

3. Розроблено методику визначення тривимірного високочастотного температурного стану поршня з ЧДТ, засновану на розбивці тіла деталі на стаціонарну та нестационарну області, сумісне рішення для яких знаходяться ітераційним наближенням. Це дозволяє встановити ефекти ЧДТ в різних зонах камери згоряння.

4. Удосконалено модель впливу тангенційного вихоря робочого тіла на розвиток паливного струменя в моделі сумішоутворення та згоряння в КЗ дизеля проф. М.Ф. Разлейцева, що дозволило уточнити час, швидкість та координати торкання кожним струменем стінки КЗ, долю палива, що увійшла до паливної плівки.

5. Розроблено одновимірну математичну модель для визначення температурного стану стінки КЗ у зоні наявності паливної плівки, що випаровується. Встановлено зменшення температури поверхні під час випаровування плівки та можливість після його завершення сплеску вказаної температури, величина якого обумовлюється моментом утворення плівки та кількістю палива, що увійшло до неї. Діапазон можливої початкової температури палива для двигуна 4ЧН12/14 звужено до 50-170°C.

6. Проведено експериментальні дослідження робочого процесу та температурного стану поршня за відсутності та наявності низькотеплопровідного покриття. Покращення економичності дизеля 4ЧН12/14 спостерігається при збільшенні товщини корундового шару до 0,25 мм, при значних навантаженнях на малих частотах обертання колінчастого валу.

7. Встановлено, що при виконанні моделювання нестационарного високочастотного температурного стану стінки КЗ за наявності шару штучної ЧДТ чи нагару на поверхні поршнів припустимим є використання експериментальних індикаторних діаграм, отриманих для випадку без ЧДТ.

8. Сформовано уявлення щодо впливу ефектів ЧДТ на показники роботи ДВЗ. Вста-

новлено, що ЧДТ поверхні КЗ викликає підвищення повноти згоряння. Для дизеля 4ЧН12/14 з поршнями, теплоізолюваними шаром корунду товщиною 0,25 мм, це підвищення сягає 3% при незначному впливі на втрати теплоти до стінки.

9. Проаналізовані заходи щодо поліпшення економічності та екологічних показників ДВЗ. Рекомендовано визначення товщини корундового поверхневого шару на поршнях здійснювати для вагомого часткового експлуатаційного режиму.

10. Встановлено, що порівняння економічності двигунів, які мають поршні з ЧДТ та традиційної конструкції, необхідно проводити за наявності на поршнях останньої шару нагару із товщиною, властивою їй в експлуатації.

Рекомендоване локальне підвищення товщини шару теплоізоляції поршня в зоні контакту паливних струменів зі стінкою КЗ.

11. Визначено складову зниження середньої температури теплоізолюваного поршня, викликану динамічним ефектом. Для розглянутих товщин корундового поверхневого шару КЗ поршня 0,05-0,25 мм вона перевищує складову від термічного супротиву.

Встановлено, що гасіння високочастотного коливання температури та зниження рівня останньої під шаром теплоізоляції товщиною 0,25 мм при збереженні заданого рівня ресурсної міцності кромки КЗ поршня дозволяє здійснити форсування дизеля 4ЧН12/14 при різних умовах експлуатації на 16-28% без інтенсифікації масляного охолодження.

12. Результати наукового дослідження впроваджені і використовуються у ПАТ «АВТРАМАТ», проблемній науково-дослідній лабораторії кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП», а також у навчальному процесі при викладанні дисциплін «Теплообмін у ДВЗ», «Перспективні конструкції ДВЗ», при написанні студентами науково-дослідних магістерських робіт.

Запропоновані методики та математичні моделі реалізовано у вигляді програмних продуктів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пильов В.В. Аналіз високочастотних коливань температури в поверхневому шарі поршня з теплоізолюючим покриттям / А.П. Марченко, В.О. Пильов, В.В. Шпаковський, В.В. Пильов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 1. – С. 65-71. *Здобувач виконав розрахункове дослідження та визначив характеристики температурного стану стінки на поверхні і під покриттям.*

2. Пильов В.В. Распределение мгновенных тепловых потоков и температур в поверхностном слое теплоизолируемого поршня ДВС / А.П. Марченко, В.О. Пильов, В.В. Шпаковський, В.В. Пильов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 2. – С. 32-38. *Здобувач виконав розрахункове дослідження і здійснив аналіз повного та неповного гасіння температурної хвилі в шарі покриття.*

3. Пылёв В.В. Особенности математического моделирования температурной волны в поршне двигателя внутреннего сгорания / А.П. Марченко, В.О. Пильов, В.В. Шпаковський, В.В. Пильов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 1. – С. 48-53. *Здобувач виконав порівняльне дослідження температурної хвилі для матеріалів з відмінною термічною інерційністю при різних формулюваннях математичної моделі.*

4. Пылёв В.В. Оценка влияния режимных факторов на параметры температурного высокочастотного колебания в поверхностном корундовом слое поршня / А.П. Марченко, В.В. Шпаковський, И.И. Сукачев, А.А. Прохоренко, И.Н. Карягин, В.В. Пылёв // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 1. – С. 65-69. *Здобувач запропонував удосконалений запис математичної моделі теплопровідності стінки КЗ, брав участь у розробці методики сумісного моделювання робочого процесу та температурного стану стінки, ним порівняно ефект ЧДТ на різних режимах роботи дизеля.*

5. Пильов В.В. Удосконалення математичної моделі випаровування паливної плівки зі стінки камери згоряння дизеля / А.П. Марченко, В.В. Пильов, І.І. Сукачев // Вісник Націона-

льного технічного університету "ХПІ". – 2011. – № 42. – С. 133-143. *Здобувач запропонував ряд моделей теплообміну паливної плівки з робочим тілом та стінкою КЗ, здійснив їх програмну реалізацію та перевірку, визначив особливості температурного стану поверхні КЗ з ЧДТ.*

6. Пильов В.В. Оцінка температурного стану стінки камери згоряння поршня з шаром нагару / А.П. Марченко, В.В. Шпаковский, В.В. Пильов, В.В. Матвеєнко, С.В. Обозний // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 37-41. *Здобувач брав участь в експериментальному дослідженні, здійснив моделювання температурного стану стінки КЗ, встановив особливості високочастотного температурного стану поверхні КЗ з нагаром та теплоізоляцією.*

7. Пильов В.В. Підвищення економічності бензинового двигуна на різних режимах роботи при застосуванні частково-динамічної теплоізоляції поршнів / А.П. Марченко, В.В. Шпаковский, В.В. Пильов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2013. – № 32. – С. 106-110. *Здобувач здійснив аналіз літературних джерел щодо впливу ЧДТ на показники ДВЗ, виконав обробку експериментальних даних та встановив вплив режиму роботи двигуна на ефект від ЧДТ.*

8. Пильов В.В. Удосконалення опису зносу паливних струменів тангенційним вихором робочого тіла в об'ємі камери згоряння дизеля / В.В. Пильов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2014. – № 6. – С. 169-175.

9. Пильов В.В. Знос паливних струменів в об'ємі камери згоряння тангенційним вихором робочого тіла згідно удосконаленої математичної моделі / А.П. Марченко, І.М. Карягін, В.В. Пильов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2014. – № 32. – С. 67-71. *Здобувач здійснив програмну реалізацію моделі, виконав моделювання та порівняння результатів з експериментальними даними.*

10. Пылёв В.В. Методика моделирования нестационарного высокочастотного температурного состояния поршня двигателя внутреннего сгорания / А.П. Марченко, В.В. Пылёв // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 5. – С. 58-63. *Здобувач запропонував методіку визначення температурного стану поршня, виконав чисельний експеримент, встановив динамічну складову ЧДТ поверхні КЗ.*

11. Пылёв В.В. Эффект влияния малых толщин теплозащитного покрытия поршня на его мгновенную поверхностную температуру / А.П. Марченко, В.А. Пылёв, В.В. Шпаковский, В.В. Пылёв // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей : матер. XI Междунар. научн.-практ. конф., 27-29 мая 2008 г. : тезисы докл. – Владимир : ВГУ, 2008. – С. 220-223. *Здобувач здійснив програмну реалізацію математичної моделі та виконав розрахункове дослідження.*

12. Пильов В.В. Особливості врахування теплообміну між робочим тілом, паливною плівкою та стінкою камери згоряння поршня ДВЗ / А.П. Марченко, В.В. Пильов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали ХХ міжнародної наук.-практ. конф., 15-17 травня 2012 р. : тези доп. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 188. *Здобувач виконав розрахункове дослідження температурного стану стінки КЗ в зоні наявності паливної плівки, утвореної довгими та короткими паливними струменями для випадків наявності та відсутності ЧДТ.*

13. Пильов В.В. Учет эффекта частично-динамической теплоизоляции при моделировании температурного состояния поршня / А.П. Марченко, В.В. Пильов // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту : 75-а міжнародна наук.-техн. конф., 24-25 квітня 2013 р. : тези доп. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 136. – С. 307. *Здобувач виявив вплив товщини покриття і режимних факторів на параметри локальних по поверхні КЗ температурних хвиль та зниження температури основного матеріалу поршня.*

14. Пильов В.В. Моделювання температурного стану поршня ДВЗ з шаром нагару / А.П. Марченко, В.В. Пильов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали ХХІ міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня 2013 р. : тези доп. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 228. *Здобувач виконав розрахункове дослідження нестацио-*



*нарного високочастотного температурного стану поршня з шаром нагару різної товщини на двох режимах роботи дизеля.*

## АНОТАЦІЇ

**Пильов В.В. Визначення впливу теплоізоляції камери згоряння на показники роботи ДВЗ.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної задачі комплексного покращення економічності, екологічності та надійності дизелів на основі урахування явищ нестационарного високочастотного теплообміну робочого тіла та поршня, особливостей випаровування паливної плівки, присутності на поверхні камери згоряння нагару.

Розроблено методику визначення тривимірного високочастотного температурного стану поршня з шаром частково-динамічної теплоізоляції, що заснована на ітераційному вирішенні тривимірної стаціонарної та комплексу одновимірних нестационарних задач теплопровідності. Розроблено методику сумісного моделювання робочого процесу та нестационарного високочастотного температурного стану стінки камери згоряння. Розкрито вплив частково-динамічної теплоізоляції камери згоряння на показники роботи двигунів та розроблено рекомендації щодо її ефективного застосування.

*Ключові слова:* дизель, поршень, камера згоряння, частково-динамічна теплоізоляція, температурний стан, нагар, робочий процес, математичне моделювання.

**Пылёв В.В. Определение влияния теплоизоляции камеры сгорания на показатели работы ДВС.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2014.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи комплексного улучшения экономичности, экологичности и надежности дизелей на основе учета явления нестационарного высокочастотного теплообмена рабочего тела и теплоизолированного поршня, особенностей испарения топливной пленки со стенки камеры сгорания, присутствия на поверхности камеры сгорания нагара.

На основе анализа отечественного и мирового опыта использования теплоизоляции камеры сгорания, ее влияния на показатели ДВС, а также способов определения температурного состояния теплоизолированного поршня и моделирования рабочего процесса предложен ряд новых и усовершенствованных математических моделей и методик.

Для описания нестационарного высокочастотного температурного состояния стенки поршня с теплоизолированным поверхностным слоем предложена уточненная запись математической модели. Она предполагает интерпретацию граничных условий третьего рода на поверхности теплоподвода, которая базируется на применении закона сохранения энергии. При численной реализации усовершенствование модели позволило укрупнить временной и пространственный шаги расчетной сетки, что при заданной точности привело к сокращению времени расчетов до 40 раз.

Предложена методика определения трехмерного высокочастотного температурного состояния поршня со слоем теплоизоляции, которая основана на итерационном решении трехмерной стационарной и комплекса одномерных нестационарных задач. Ее применение позволило впервые установить динамическую составляющую теплоизолирующего эффекта, достигающую для различных зон камеры 40-80% от общего снижения температуры под теплоизоляцией.

Установлено, что снижение температуры под слоем низкотеплопроводного корундо-

вого покрытия позволяет форсировать дизель 4ЧН12/14 на 16-28% при неизменном уровне ресурсной прочности кромки камеры сгорания поршня.

Усовершенствован учет влияния тангенциального вихря рабочего тела на развитие топливной струи в модели проф. М.Ф. Разлейцева, уточнено время, координаты, скорость касания стенки и количество топлива, попавшего на стенку.

Предложена модель испарения топливной пленки с поверхности камеры сгорания. Впервые оценено нестационарное температурное состояние поверхности камеры сгорания в зоне наличия топливной пленки от длинных и коротких топливных струй.

Предложена методика совместного моделирования рабочего процесса и

нестационарного высокочастотного температурного состояния стенки камеры сгорания. Определены отличия характеристик рабочего процесса, вызванные частично-динамической теплоизоляцией стенки.

Установлено сложное влияние на экономичность дизеля температурного состояния стенки камеры сгорания в зонах отсутствия и наличия топливной пленки. Рекомендовано использование слоя теплоизоляции поршня толщиной, установленной для весомого эксплуатационного режима. Установлено, что сравнение экономичности двигателей, имеющих поршни с частично-динамической теплоизоляцией и традиционной конструкции, необходимо осуществлять при наличии на последних свойственного в эксплуатации слоя нагара.

Показано, что преимуществом корундовой теплоизоляции поршня над нагаром является более медленное снижение температуры в процессе сгорания. Это способствует выгоранию монооксида углерода, углеводородов и твердых частиц, тем самым повышая экологические качества двигателя.

В целом обобщены результаты расчетных и экспериментальных исследований, сформировано представление о влиянии эффектов частично-динамической теплоизоляции на комплекс показателей качества двигателя. Разработаны рекомендации по применению для днища поршня теплоизоляции переменной толщины.

*Ключевые слова:* дизель, поршень, камера сгорания, частично-динамическая теплоизоляция, температурное состояние, нагар, рабочий процесс, математическое моделирование.

**Pylyov V.V. Determination of combustion chamber heat insulation effect on internal combustion engine operation performance.** – Manuscript copyright.

The thesis on conferring of a degree of the candidate of technical science on a speciality 05.05.03 – engines and power plants. – National technical university «Kharkiv polytechnic institute». – Kharkiv, 2014.

The thesis deals with an urgent problem of integral improvement of engines' effective, ecological and reliable performance on the base of nonstationary high-frequency heat exchange among in-cylinder medium with piston, fuel film evaporation features and carbon deposit presence on a combustion chamber surface taking into account.

The method of modeling of the three-dimensional nonstationary high-frequency temperature state of piston with partially-dynamic heat insulation surfaces layer is suggested. It is based on the iterative solution of three-dimensional stationary and a system of one-dimensional nonstationary heat conductivity problems. The method of the consistent simulation of the in-cylinder processes and the combustion chamber wall nonstationary high-frequency temperature state is worked out. Effects of the partially-dynamic heat insulation on engine operation performance criteria are revealed. Recommendations on its effective use are developed.

*Keywords:* diesel, piston, combustion chamber, partially-dynamic heat insulation, temperature state, carbon deposit, in-cylinder processes, numerical simulation.

Підп. до друку 22.10.2014 р. Формат видання 134x215. Формат паперу 60x90/16.  
Папір офсет. Цифровий друк. Гарнітура Times New Roman. Обсяг авт. арк. 0,9.  
Наклад 100 прим. Зам. №568

---

Надруковано у копії-центрі "МОДЕЛІСТ"  
(ФО-П Миронов М.В. Свідоцтво ВО №022953)  
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1  
тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)