

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Нікіпчук Сергій Вячеславович



УДК 621.01+621.03

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
РОБОЧИХ МАШИН З ОТТО-ДВИГУНАМИ
ЗАСОБАМИ HARD-SOFT-ТЕХНОЛОГІЇ**

05.02.02 — машинознавство

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів — 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гащук Петро Миколайович,
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності (м. Львів),
завідувач кафедри експлуатації транспортних засобів
та пожежно-рятувальної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Вольченко Олександр Іванович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу (м. Івано-Франківськ),
професор кафедри технічної механіки;

кандидат технічних наук,
Віштак Інна Вікторівна,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки
безпеки.

Захист відбудеться «27» 05 2020 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12, навчальний корпус 14, ауд. 61.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1, та на сайті Національного університету «Львівська політехніка» у розділі «Наука».

Автореферат розіслано «14» 04 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



Ю. П. Шоловій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. У приводах практично всіх автономних робочих машин найрізноманітнішого призначення — тракторів/райдерів; різальних/рубальних/мийних/снігоприбиральних/підмітальних машин, садових дробарок, пил/кіс/косарок, мотокультиваторів/мотоблоків, електрогенераторів, мотопомп, дронів, гвинтокрилів, гібридних транспортних засобів, розміновувачів, мультифункційних машин, пожежно-рятувального устаткування тощо-тощо — застосовують теплові машини (двигуни) швидкого внутрішнього згорання. Найприроднішим, найзагальнішим і найоб'єктивнішим мірилом ефективності й досконалості хоч-якої робочої машини є її енерго(ексерго)ощадність за регламентованого рівня продуктивності. Енерго(ексерго)ощадність — це ще й запорука високого рівня екологічності машин.

Через те, що суто механічний аспект енергоощадного/екологічного удосконалення техніки практично вичерпано, то досконалість робочої (чи й транспортної) машини є сенс розглядати через призму досконалості власне привідної теплової машини. Теплові машини внутрішнього згорання створюють значний хімічний (біологічний) і тепловий тиск на довкілля, сукупно спалюючи значну кількість палива й повітря за порівняно низької власної продуктивності. Тож удосконалювати привідний двигун внутрішнього згорання доречно насамперед в сенсі підвищення ефективності енергоперетворення. Саме такого спрямування дослідження є вельми актуальними.

Та виявляється, що подальший розвиток класичних підходів до моделювання робочих процесів в тепловій машині, спираючись суто чи здебільшого на аналітико-алгоритмічні описи, практично цілком вичерпав себе. Тому природно виникає необхідність залучити в модель також і реальний робочий простір теплової машини, системно приєднуючи його до віртуального, втіленого в програмно-алгоритмічному середовищі, і тим самим впроваджуючи частину реальності в модель цієї ж реальності. Відтак виникають можливості суттєво удосконалити технологію дослідження і оптимізації енергоефективності машин не за рахунок добування спеціальних емпіричних описів, а завдяки черпанню поточної інформації з реального інформаційного простору на засадах теорії подібності. При цьому з'являється також можливість суттєво спростити аналітичну складову модельного відображення робочих процесів в машині, надаючи зазначеній технології ознак праксеологічності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку Інституту інженерної механіки та транспорту НУЛП «Створення новітніх технологій, технічних систем та матеріалів у промисловості та транспорті, діагностика машин, конструкцій і споруд» та науковому напрямку кафедри експлуатації та ремонту автомобільної техніки «Дослідження й оптимізація експлуатаційних властивостей автомобілів і їхніх систем, технічного обслуговування та транспортних процесів». Дисертаційна робота виконана в межах науково-дослідних робіт «Дослідження і оптимізація експлуатаційних властивостей автомобілів, технічного обслуговування та транспортних процесів» (№ державної реєстрації 0114U001687), «Дослідження впливу технічних характеристик автомобілів на їхню експлуатаційну ефективність» (№ державної реєстрації

0119U102679). Дисертаційна робота відповідає цільовій комплексній програмі «Транспорт», прийнятій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27.03.1993 № 551-р, а також «Концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на середньостроковий період і до 2020 року».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення енергетичної ефективності робочих машин засобами спеціально розробленої hard/soft-технології ідентифікації закономірностей перебігу і можливостей удосконалення процесів теплотворення/теплоспоживання/теплопередачі в привідних отто-двигунах – теплових машинах швидкого внутрішнього згорання. Hard/soft-технологія передбачає оперування водночас і натурним робочим простором двигуна, і віртуальним робочим простором у формі комп'ютерної його моделі. Для досягнення мети передбачено виконати такі *завдання*:

— провести критичний огляд науково-методологічних принципів моделювання і симулювання процесів, що перебігають у робочому просторі теплової машини;

— формальними засобами ідентифікувати особливості перебігу процесу продукування теплоти в циліндрі двигуна швидкого внутрішнього згорання унаслідок згорання пальної суміші;

— спираючись на принципи аналогії та гармонійного поєднання індукції та дедукції, оцінити можливості формалізованого відображення та теоретичного узагальнення експериментально ідентифікованої інформації про закономірності перебігу процесів теплотворення та процесів споживання теплоти в двигунах Отто (двигунах швидкого внутрішнього згорання);

— оцінити ефективність загальних підходів до моделювання робочих процесів в теплових машинах внутрішнього згорання;

— розглянути випробувані досвідом підходи до аналітичного відображення явища тепловіддачі в циліндрі двигуна;

— розробити й обґрунтувати ефективність hard-soft-технології дослідження особливостей теплотворення і теплоспоживання в двигуні внутрішнього згорання, яка б системно поєднувала в собі засоби математичного й алгоритмічного моделювання та засоби натурального симулювання;

— уточнити засади раціонального поєднання натурального і віртуального модельних середовищ у єдину систему, втілюючи тим самим hard-soft-технологію моделювання робочого процесу в двигуні внутрішнього згорання.

Об'єкт дослідження — технологія моделювання-симулювання особливостей ефективного перетворення теплової енергії в механічну роботу тепловими машинами швидкого внутрішнього згорання, яка передбачає системне поєднання в модельному середовищі комп'ютерних засобів дослідження та натурального робочого простору.

Предметом дослідження є методи й засоби ідентифікації, відтворення та аналізу ефективності явищ і процесів теплотворення/тепловіддачі/теплоспоживання, що перебігають у циліндрах теплових машин швидкого внутрішнього згорання (отто-двигунів) у приводах різноманітних виконавчих механізмів та робочих машин.

Методи дослідження. Дисертаційна робота спирається на загальну в царині технічних наук методологію наукового пізнання, загальнонаукові принципи, методи й засоби, що їх зазвичай використовують у процесі наукового дослідження.

Теоретичною основою роботи стали наукові праці вітчизняних і закордонних вчених у галузі машинобудування. Інформаційною базою дисертаційної роботи є результати власних наукових досліджень автора, результати наукових досліджень визнаних фахівців, публікації в періодичних фахових виданнях, міжнародні та державні законодавчі та нормативні акти й угоди, фахові відомості з Інтернету.

Розв'язання поставлених у дисертаційній роботі завдань здійснено на засадах: загально визнаних принципів і методів аналізу/синтезу; найновіших здобутків термодинаміки, теорії горіння й теплотворення, теорії теплопередачі, теорії тепловіддачі, теорії теплопровідності; застосування сучасних засобів математичного моделювання, методів теорії подібності, методів симулювання і експериментування.

Для виконання експериментальних досліджень використовувались метрологічно атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання. Результати експериментальних досліджень оброблялися з використанням комп'ютерної техніки та відповідного пакету прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає у розробленні hard-soft-технології модельно-симуляційної ідентифікації й аналізу процесів, що перебігають в робочому просторі теплової машини:

- *уперше:*

- з'ясовано невідворотність внесення змін в парадигму моделювання і симулювання процесів, що перебігають у робочому просторі теплової машини; вони впливають з того, що традиційні підходи до моделювання вичерпали всі можливості для подальшого вдосконалення і тому для підвищення рівня адекватності модельних уявлень доведеться запровадити в модельний простір частину реальності — натурний робочий простір теплової машини;

- розроблено технологію модельно-симуляційної ідентифікації процесів, явищ та ефектів, що перебігають в робочому просторі теплової машини, з використанням математичного й алгоритмічного моделювання та засобів натурального симулювання; встановлено виняткову праксеологічність технології моделювання робочих процесів в двигуні швидкого внутрішнього згорання з залученням у модель реального робочого простору та відсутність ефективнішої альтернативи;

- *удосконалено:* термодинамічну модель двигуна; аналітичний опис процесів теплотворення, теплоспоживання у двигуні швидкого внутрішнього згорання; підхід до моделювання внутрішньодвигунних процесів з використанням двозонної моделі; методи контролю за вимірюванням робочих тисків та температур; методи отримання режимних параметрів дослідного двигуна;

- *набули подальшого розвитку методології:* уточненого аналізу ефективності теплових процесів теплотворення/теповіддачі/теплоспоживання; двозонного моделювання процесів в тепловій машині швидкого внутрішнього згорання (оттто-двигуні); застосовування теплотвірної експонентної функції для віртуального симулювання явища теплотворення; організації життєвого середовища дослідного двигуна; підвищення ефективності процесу теплотворення, рівня корисного тепловикористання та рівня досконалості системи тепловідведення.

Практичне значення результатів дослідження. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення дають можливість спростити процес удосконалення теплових машин внутрішнього згорання різного призначення на стадії проєктування

і виробництва — оптимізуючи теплотворення і теплоспоживання досягнути якнайвищого рівня їх енергоощадності та екологічності. Отримані результати дають підстави стверджувати про можливість і доцільність широкого практичного застосування запропонованої технології.

Основні наукові результати дослідження витримали апробацію та впроваджені в діяльність ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Електронтранс»» (акт про впровадження результатів від 25.05.2019 р.) і в навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін: «Автомобільні двигуни», «Силові агрегати автомобілів», «Теорія автомобіля», «Автомобілі» (акт про впровадження результатів від 18.11.2019 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно та відносяться до галузі машинознавства. В наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: методика аналітичного відтворення характеристики реального двигуна [1]; концепція поєднання натурності та аналітичності при моделюванні процесів, що перебігають у машинах-двигунах внутрішнього згоряння [2, 13]; технологія дослідження робочого процесу в двигуні внутрішнього згоряння [3, 15]; метод та результати аналізу термодинамічних моделей та емпіричних залежностей для обчислення коефіцієнта тепловіддачі [4, 12]; математична модель термодинамічних процесів, що перебігають в робочому просторі двигуна, та метод аналізу особливостей перебігу процесів теплопередачі/тепловіддачі з залученням модельно-експериментальних засобів [6]; результати дослідження процесу теплотворення в отто-двигуні (двигуні швидкого внутрішнього згоряння) [7, 14]; методика виявлення особливостей перебігу процесу теплотворення на різних режимах роботи двигуна формалізованими засобами [8]; аналіз процесів ідеального та реального теплотворення, результати дослідження процесів теплотворення і теплоспоживання у двигунах внутрішнього згоряння [9, 17]; ідея залучення в модель реального робочого простору двигуна із системним доєднанням його до віртуального двигуна, втіленого в комп'ютерній програмі [5]; концепція модельного робочого простору та методологія його активації [16].

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи обговорено на Дев'ятому міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 20—22 травня 2009 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації» (м. Львів, 20—21 жовтня 2016 р.); 13-ому міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 18—19 травня 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорті автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» (м. Харків, 19—20 жовтня 2017 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (м. Львів, 14 вересня 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту» (м. Харків, 16—19 жовтня 2018 р.); 14-тому Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 23—24 травня 2019 р.); на щорічних наукових

конференціях кафедри «Експлуатація та ремонт автомобільної техніки» Національного університету «Львівська політехніка» (1998—2019 рр.).

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на розширеному засіданні кафедри «Експлуатація та ремонт автомобільної техніки» Національного університету «Львівська політехніка» (протокол № 4/19-20 від 20.11.2019 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, з яких: 8 статей у фахових виданнях України (серед них: 1 стаття, що входить у наукометричну базу Scopus, 3 статті у виданнях, що входять у наукометричні бази Scopus та РІНЦ, 3 статті видані англійською мовою); 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави; 1 навчальний посібник; 7 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій і симпозіумів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації — 214 сторінок, з яких 32 сторінки відведено суто під рисунки та таблиці; 12 сторінок містять перелік джерел посилання (122 назви), а 3 сторінки — додатки. Виклад матеріалу супроводжують 90 рисунків та 6 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й завдання дослідження, розкрито наукову новизну одержаних результатів, окреслено їх практичне значення, наведено відомості про апробацію результатів дослідження та про публікації за темою дисертації, описано структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз засадничих принципів оцінювання досконалості машин найрізноманітнішого призначення, окреслено визначальні аспекти застосування виключно теплових машин-двигунів (а саме двигунів швидкого внутрішнього згорання — ДШВЗ) для приводу хоч-яких автономних робочих машин, обґрунтовано доцільність застосування поняття енергетичної ефективності як ознаки-мірила досконалості чи привідної теплової машини зокрема, чи й робочої машини загалом. З'ясовано: оскільки суто механічний аспект енергоощадного удосконалення техніки практично вичерпано, то досконалість будь-якої робочої (чи й транспортної) машини є сенс (і методично вигідно) розглядати через призму енергоперетворювальної досконалості привідної теплової машини.

Аби якнайглибше проникнути в явище перетворення форм енергії — речовинної (хімічної) на теплову, а далі — теплової на механічну, необхідна багата на когнітивні можливості й належно адекватна модель «постійно змінних» у часі внутрішньодвигунних процесів. Створити таку модель суто аналітичними й алгоритмічними засобами, як з'ясувалось, навряд чи можливо. В такому разі доцільно взагалі доєднати до аналітично-алгоритмічної моделі хоч-якої структури ще й натурний робочий простір якогось модельного двигуна. Поєднання натурності та віртуальності в моделюванні процесів, що перебігають у ДШВЗ, дозволяє принципово підвищити якість інформаційного забезпечення процесу проєктування і конструювання двигунів. Такий підхід було названо hard-soft-технологією пізнання.

Теоретико-методологічним підґрунтям для розв'язання завдань, висунутих у дисертації, є результати дослідження процесів теплотворення, теплоспоживання, тепловіддачі та теплопередачі, викладені в роботах Ф. І. Абрамчука, W. Annand,

I. I. Вібе, G. Woschni, П. М. Гащука, G. Hogenberg, Ю. Ф. Гутаревича, J. C. Guibet P. Eyzat, M. Ishida, G. Kraßnig A. Pischinger, A. Schröer, K. Sitkei та інших вчених.

Другий розділ присвячено проблемі моделювання теплообмінних процесів, що перебігають в циліндрах ДШВЗ. Проведено критичний огляд/аналіз можливостей трьох найдосконаліших різновидів термодинамічних моделей, за допомогою яких загалом можна прийнятно якісно за певних умов описати перебіги теплотворення, теплоспоживання, теплообміну та навіть механізм виникнення токсичних речовин в робочому просторі ДШВЗ: найпростішої і найпоширенішої нуль-вимірної моделі, яка постулює цілковиту однорідність робочої суміші в циліндрі двигуна у кожен мить часу; квазівимірної моделі, в рамках якої стан робочого простору двигуна характеризують, як і у разі нуль-вимірних моделей, тиск, температура, внутрішня енергія та маса робочого тіла, але перебіг тепловиділення там ідентифікують за допомогою додаткових фізичних моделей, що формалізовано описують, приміром, турбулентний рух газів у циліндрі або механізм формування чи розподілу краплин пальної суміші за тими чи іншими параметрами; багатовимірних моделей, за допомогою яких можна описати взаємозв'язок між будь-якими різними теоретично й емпірично розпізнаваними в просторі комори згоряння та інструментально вимірюваними величинами.

Оперування квазівимірними й багатовимірними моделями потребує надмірних інформаційних, інтелектуальних, сервісних, часових ресурсів. Критичний аналіз ефективності різних моделей довів, що у разі доступу до натурального модельного робочого простору найдоцільніше покладатися на двозонну модель, в рамках якої (рис. 1) потрібно буде контролювати тиск p газів (однаковий в обох зонах), масу $m_{зг}$, об'єм $v_{зг}$, температуру $T_{зг}$ тощо робочого тіла в зоні згорілого та такого самого змісту параметри $m_{нг}$, $v_{нг}$, $T_{нг}$, ... робочого тіла в зоні негорілого. Поза увагою, звісно, не можуть залишатися внутрішні $Q_{вн}$ та зовнішні $Q_{зн}$ перетікання теплоти.

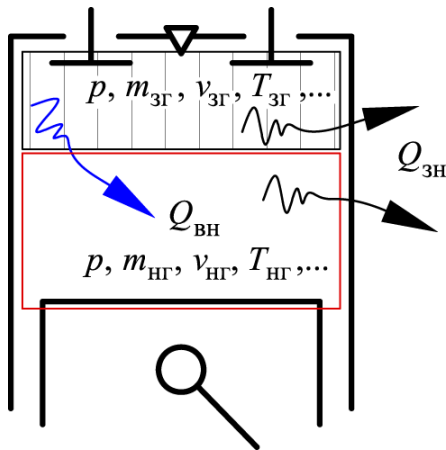


Рисунок 1 — Абстрактна схема модельного робочого простору двигуна

Модельний натурний робочий простір необхідно занурити власне у двигун внутрішнього згоряння ДВЗ (рис. 2) якщо під ним розуміти сукупність усіх систем, що забезпечують нормальну активність робочого простору. Двигун разом з модельним робочим простором занурено у довкілля (у свій життєвий простір), якому належить, зокрема, й навантажувальний пристрій та вся сенсорна система. Перелічене разом — це натурне середовище, яке зобов'язане «спілкуватись» з програмним середовищем: все, що не може або не вміє сказати натурне середовище, зобов'язане через персональний комп'ютер доповісти програмне середовище, і навпаки.

Праксеологічність двозонної моделі у поєднанні з натужністю може мати ще одну цікаву ознаку. У разі гомогенного трактування тиску й температури стає можливим відмовитись від аналітичного контролю так званої хімічної рівноваги продуктів згоряння. Справді, у такому разі не існує причин, які б зумовлювали речовинний обмін між двома зонами, а відтак тепловіддачу у стінки робочого простору можна визначати за прикладом однозонної моделі.

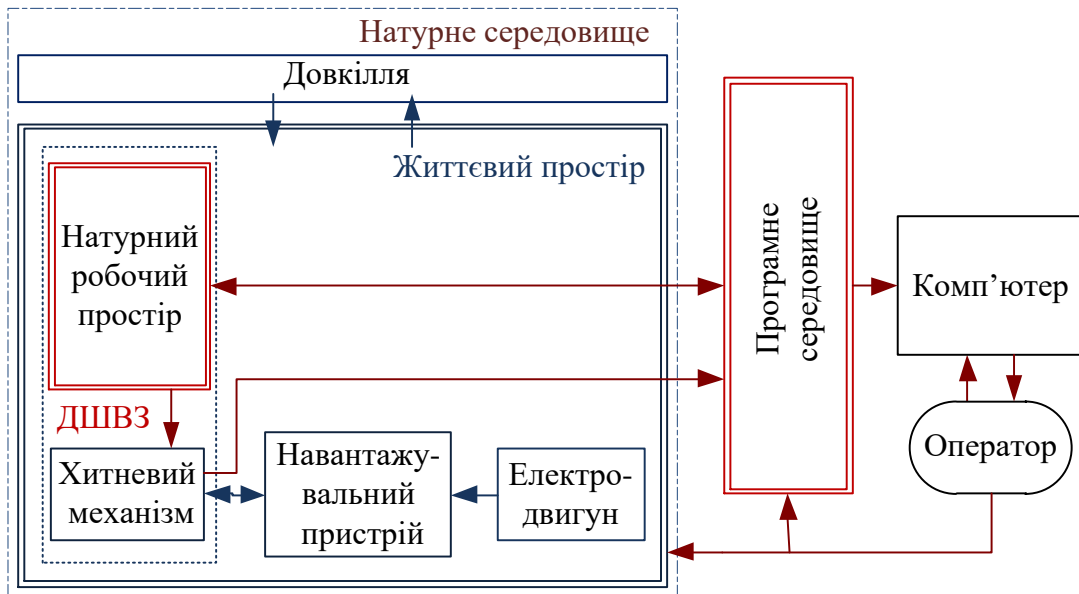


Рисунок 2 — Схема натурно-програмного модельного середовища

Для моделювання теплових явищ, що перебігають у циліндрах двигуна, застосовують у різних формах систему трьох рівнянь: рівняння закону збереження (незнищеності) енергії, рівняння закону збереження (незнищеності) речовини (матерії) і рівняння термодинамічного стану робочого тіла. При цьому доводиться оперувати чотирма змінними величинами: тиском газів у циліндрі чи його частині, відповідною температурою робочого тіла чи його частини, енергією, яка міститься в робочому тілі чи його частині, та масою робочого тіла чи його частини. Отже, вихідну систему рівнянь слід було б доозначити або додатковим рівнянням, або ж інформаційно, задаючи функцію зміни в часі однієї з перелічених величин. Такою функцією є, зокрема, відображувана індикаторною діаграмою взаємна зміна тиску і об'єму. Загальне рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі впливає з рівнянь теплопередачі $Q_{ст} = \alpha A(T_r - T_{ст})$ та подібності $Nu = C Re^m$, де $Q_{ст}$ — тепло, віддане у стінки циліндра; α — власне коефіцієнт тепловіддачі; A — площа поверхні тепловіддачі; T_r — температура газів в циліндрі; $T_{ст}$ — температура стінок; C і m — функція і стала; Nu і Re критерії (числа) Нусельта і Рейнольдса.

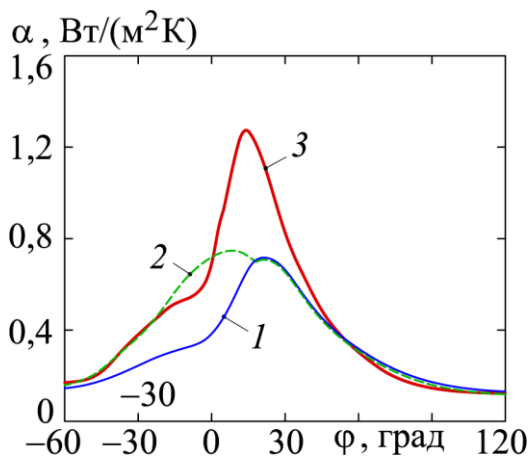


Рисунок 3 — Графіки зміни коефіцієнта тепловіддачі за кутом повороту колінчастого вала

Зазначена технологія дозволяє визначати в кожен мить часу низку саме тих параметрів, що конче необхідні у разі моделювання внутрішньодвигунних процесів в рамках загально визнаних теоретичних уявлень. При цьому забезпечується рівень адекватності інформації, значно вищий від того, якого можна сподіватись у разі класичного підходу до моделювання. Для прикладу можна навести діаграму (рис. 3), яка наочно засвідчує суттєві розбіжності у визначенні зміни коефіцієнта α тепловіддачі у двигуні за кутом ϕ повороту

колінчастого вала у випадках моделювання за Вошні (крива 1 — звичайна класична модель; крива 2 — удосконалена модель) та за аналітично-натурною моделлю (крива 3).

У третьому розділі зосереджено увагу на апаратній інструментарії hard-soft-технології дослідження, необхідність впровадження якої впливає з надмірної складності теплових явищ, що перебігають у ДШВЗ, та неможливості уповні підпорядкувати ці явища існуючим аналітичним модельним уявленням. Лише поєднання в різних формах та в різних пропорціях аналітичності й емпіричності, формальності й матеріальності, віртуальності й реальності дозволяє вибудувати ефективний апарат багатократного відтворення робочого процесу в ДШВЗ за різних керованих умов з наступним адекватним аналізом перспектив, напрямів і засобів удосконалення теплової машини, що приводить у дію робочу машину. Разом апаратний інструментарій вмонтовується в стенд (рис. 4), який дозволяє досліджувати як навантажувальні, так і гальмівні режими роботи двигуна.

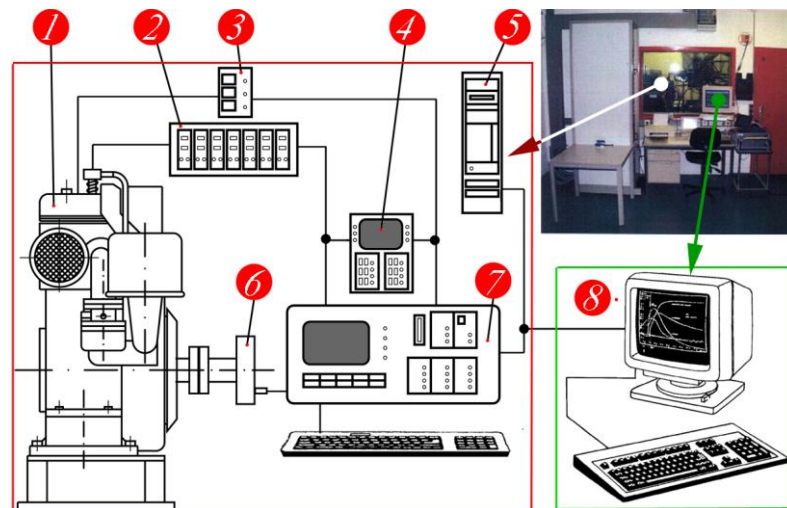


Рисунок 4 — Схема натурно-алгоритмічної модельної системи

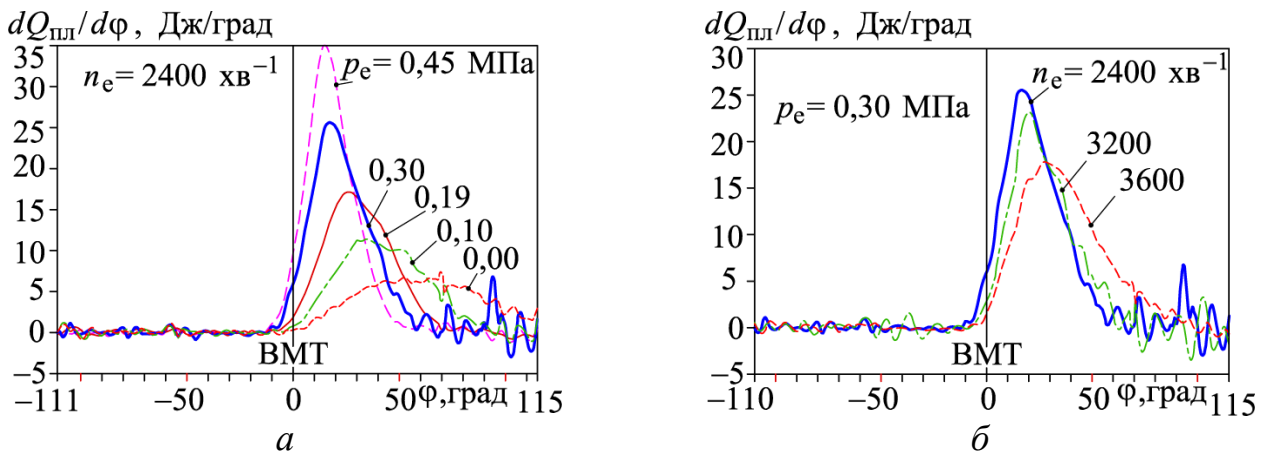
Сигнали від чутників (первинних перетворювачів інформації), що розміщені у головці циліндра двигуна 1, пересилаються через відповідні посилювачі 2 та 3 до пристрою 7 обробки даних (DATA-центру), що має вісім входних каналів; сюди ж надходить й сигнал з пристрою 6 маркування кутів повороту корбового вала; для візуального контролю входних сигналів паралельно до DATA-центру додатково під'єднано осцилограф 4. Результати вимірювань надсилаються на сервер 5, а відтак їх можна зчитати на персональному комп'ютері 8.

За модельний робочий простір вигідно взяти робочий циліндр одноциліндрового чотиритактного ДШВЗ BRIGGS & STRATTON моделі 326432 з повітряним охолодженням. На головці циліндра немає жодних рухомих деталей, що потребують мащення й погіршують доступ для монтування вимірювальної апаратури. Тому практично в будь-якому місці головки циліндра можна розмістити давачі тиску і температури. Навантаженням для досліджуваної теплової машини слугує малоінерційне електромагнітне гальмо Schenck W50. Витрата пального вимірюється об'ємним витратоміром, кількість повітря — газовим лічильником ротаційного типу.

Четвертий розділ присвячено моделюванню й дослідженню явища теплотворення у ДШВЗ. Характер зміни інтенсивності тепловиділення локально є вельми особливим (рис. 5; p_e — середній ефективний тиск, n_e — частота обертання вала двигуна, $Q_{\text{пл}}$ — тепловиділення; ВМТ — положення верхньої мертвої точки). Проте загалом прийнятно точно його можна описати експонентною функцією

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{a(m+1)\tau^m}{\tau_0} \exp(a\tau^{m+1}) = -\frac{(m+1)\tau^m \ln(1-z_k)}{\tau_0} \exp(\tau^{m+1} \ln(1-z_k)), \quad (1)$$

де $z = Q_T / Q_{\text{пл}}$ — відносне теплотворення; Q_T — поточне теплотворення; $Q_{\text{пл}}$ — загальне потенційно можливе теплотворення за робочий цикл; t — поточний час; $\tau = (t - t_{\text{п}}) / (t_{\text{к}} - t_{\text{п}})$ — відносний (абстрактний, безрозмірний) час; $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{к}}$ — мить початку і мить завершення процесу згоряння пального в межах робочого простору; a — характеристична стала; $m > 0$ — характеристичний показник; $\tau_0 = t_{\text{к}} - t_{\text{п}}$ — тривалість процесу теплотворення в межах робочого простору; $z_k = z(t_k)$.



Рисунк 5 — Зміна інтенсивності тепловиділення за однакової швидкості обертання вала двигуна та різних навантажень на нього (а) та за однакового навантаження та різних швидкостей обертання вала двигуна (б)

Залежності $z = z(\tau, m)$ і $dz/d\tau = dz(\tau, m)/d\tau$ відповідно до (1) ($a = -6,908$) є добре упорядкованими і легко прогнозованими (рис. 6). Кількість пального, що вигоряє до тієї чи іншої миті (рис. 6а), та відповідна цій миті інтенсивність згоряння (рис. 6б) — взаємозумовлені. Цю обставину зручно відстежувати за рис. 6а, де для прикладу поряд з низкою кривих $z = z(\tau; m = \overline{0,1; 20})$ нанесено ще й криві $z = z(\tau; dz/d\tau = 1; 2; 2,18; 2,5)$.

Формула (1) гармонійно поєднує в собі якісну змістовність, кількісну адекватність, бажану загальність та очевидну зручність у використанні. Проте, якщо точки максимумів $1', 2', 3', 1, \dots, 6$ експериментально визначених характеристик теплотворення нанести на характеристику, подану на рис. 6б (точки $1', 2', 3'$ — це можливі зміщення точок $1, 2, 3$ унаслідок коливних аномалій), то виявиться, що жодна з них не лягає на криву A максимумів. Звідси випливає, що величина a не повинна приймати одне фіксоване значення $-6,908$, як це прийнято зазвичай в наукових розвідках. Правдиві значення параметра a можна визначити лише засобами hard-soft-технології.

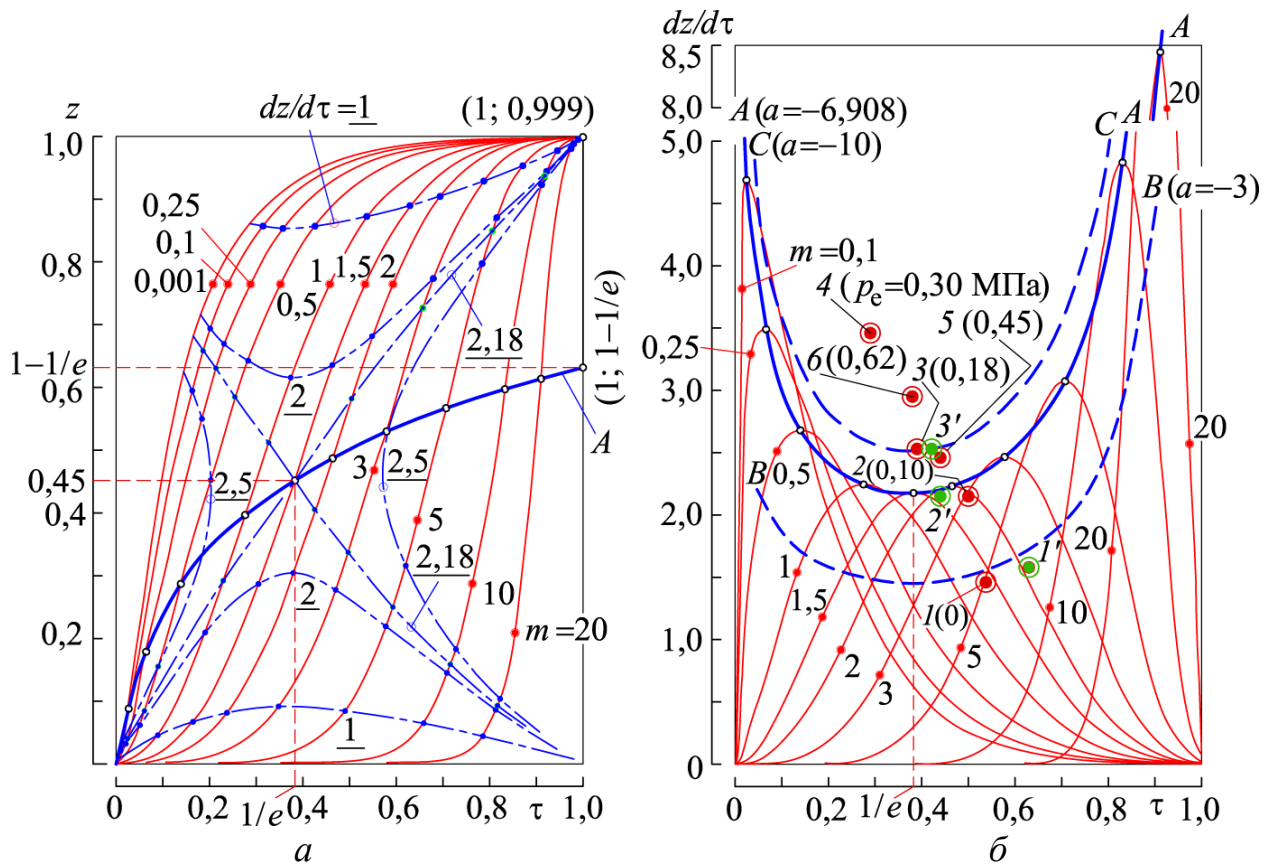


Рисунок 6 — Процес вигорання пального

Як з'ясувалось, типовим для робочих процесів в отто-двигуні внутрішнього згорання є те, що до миті досягнення максимальної інтенсивності теплотворення загальна кількість виділеного тепла складає 49 % від потенційно можливої — тієї, яку приховує в собі пальне, що потрапило в робочий простір двигуна. На різних режимах роботи двигуна параметр m , що характеризує сукупно максимум інтенсивності теплотворення і мить його настання, набуває значень, близьких до $m = 2$. Ці ознаки типовості є дуже стійкими і на них є сенс покладатися у разі моделювання роботи двигуна внутрішнього згорання.

Інтенсивність теплотворення $dz/d\tau$ набуває максимального значення у мить

$$\tau = \tau^* = \left(-\frac{m}{a(m+1)} \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (2)$$

і відповідно до (1) максимальна інтенсивність тепловиділення визначається як

$$\frac{dz^*}{d\tau} = \frac{dz(\tau^*)}{d\tau} = (-a(m+1)m^m)^{\frac{1}{m+1}} \exp\left(-\frac{m}{m+1}\right). \quad (3)$$

При цьому величина (3) мінімальна (стає мінімаксом) за умови, що величина (2) набуває значення $1/e$. Виявляється, «оптимальним» є сенс вважати так званий анти(тепло)детонаційний процес теплотворення, що описується рівняннями

$$z = 1 - e^{a^* \tau^{m^*+1}}, \quad \dot{z} = \frac{dz}{d\tau} = -a^* (m^* + 1) \tau^{m^*} e^{a^* \tau^{m^*+1}}.$$

Він відображається графіком *Opt* (рис. 7) якому відповідають параметри $m = m^* = 1,5$, $a = a^* = -7,28$.

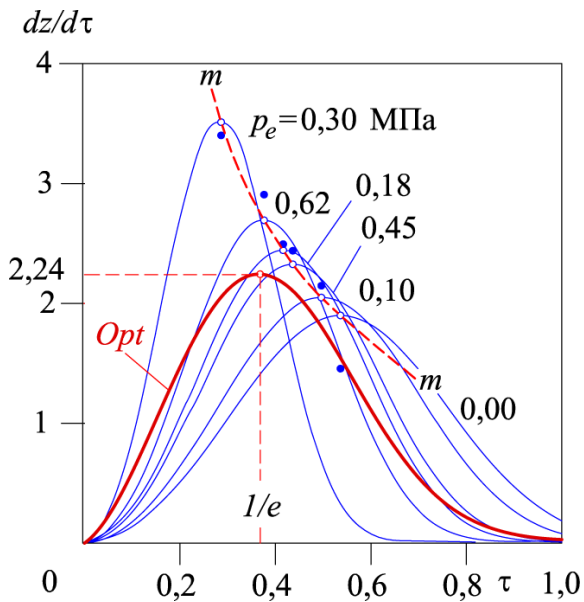


Рисунок 7 — Порівняння гіпотетично оптимальної діаграми теплотворення з тими, що апроксимують реальні

суміші максимальна швидкість виділення теплоти має бути якнайменшою, тобто процес має стати, так би мовити, мінімаксом.

У п'ятому розділі за об'єкт дослідження правлять тепловіддача й теплоспоживання в ДШВЗ, а предметну область охоплює насамперед поняття коефіцієнта тепловіддачі — і як звичайного суто емпіричного параметра, і як розмірного параметра безрозмірного співвідношення подібності.

Найвагомішу конвективну теплопередачу (теповіддачу) dQ_k у стінки робочого простору визначають зазвичай за структурно дуже простою формулою $dQ_k = \alpha_k A(T - T_{\text{ц}}) dt$, де: α_k — коефіцієнт теплопередачі через конвекцію; A — площа поверхні, до якої дотикається робочий газ; T та $T_{\text{ц}}$ — температури відповідно робочого газу та стінок камери згоряння; t — час. Та залишаються суттєві труднощі з визначенням власне коефіцієнта конвективної теплопередачі (теповіддачі), через що доводиться звертатись до теорії подібності та ретельних експериментів, результати яких важко узагальнювати.

Запропоновано дуже багато інших емпіричних залежностей для обчислення коефіцієнта тепловіддачі. Кожна з цих залежностей має свій рівень універсальності та свої межі застосовності з огляду на зручність оперування та адекватність. Переважно універсальність та адекватність не є взаємосупровідними характеристиками якості емпіричних співвідношень. А тому, вивчаючи певну множину режимів роботи двигуна, бажано залучати до математичного й експериментального апарату дослідження такі аналітично відображувані емпіричні співвідношення, які в межах цієї множини залишались незмінними за структурою та значеннями своїх основних параметрів.

В рамках теорії подібності залежність між змінними, які визначають процес тепловіддачі в тепловій машині, подається у формі залежності між певними критеріями подібності Kr_1, Kr_2, \dots : $f(Kr_1, Kr_2, \dots) = 0$, яке у разі моделювання вимушеного конвективного теплообміну доречно звести до вигляду

У такому процесі до миті $\tau = 1/e \approx 0,37$ вигорить 45 % пального, що не спостерігається в дійсності. До прикладу, шести реальним режимам роботи теплової машини (за сталої частоти обертання вала двигуна $n_e = 2400 \text{ хв}^{-1}$) відповідають помітно різні графіки перебігу так званих типізованих апроксимаційних процесів теплотворення — тонкі суцільні криві на рис. 7, які разом суттєво відрізняються від графіка *Opt*. Максимуми цих типізованих процесів (світлі точки) лежать на кривій *mm* і не збігаються з максимумами реально зафіксованих відповідних за навантаженням процесів (затемнені точки). Отож основна особливість «оптимального» теплотворення полягає в тому, що в процесі горіння пальної

$F(\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr}) = 0$, чи навіть до степеневого співвідношення $\text{Nu} = C \text{Re}^m \text{Pr}^n$, де: $Kr_1 = \text{Nu}$, $Kr_2 = \text{Re}$, $Kr_3 = \text{Pr}$ — критерії подібності Нусельта (Nusselt), Рейнольдса (Reynolds), Прандтля (Prandtl) відповідно, C — коефіцієнт пропорційності, m і n — сталі. На практиці, зазвичай, віддають перевагу чотирьом виразам для визначення коефіцієнта теплопередачі, розробниками яких є К. Sitkei, W. Annand, G. Woschni, G. Hohenberg. Всі ці конкуруючі між собою вирази висунувані із степеневих рівнянь подібності, що відрізняються значеннями сталих m і n та способом визначення коефіцієнта пропорційності C (який може бути змінним).

Теплопередачу $dQ_{\text{в}}$ через випромінювання (радіацію), оцінюють за формулою

$$dQ_{\text{в}} = \varepsilon C_{\text{в}} A \left((T/100)^4 - (T_{\text{ц}}/100)^4 \right) dt \equiv \beta (T - T_{\text{ц}}) (T + T_{\text{ц}}) (T^2 + T_{\text{ц}}^2) dt, \quad (4)$$

де: ε — коефіцієнт, що визначає відношення енергії, яку випромінює сіре чи кольорове тіло, до енергії, яку випромінює абсолютно чорне тіло; $C_{\text{в}}$ — стала випромінювання; β — коефіцієнт пропорційності. У науковій літературі, взагалі кажучи, немає одностайної думки щодо способу оцінювання коефіцієнта тепловіддачі через випромінювання, і значення цього коефіцієнта в різних джерелах приймають в межах від 5 до 40 % від значення коефіцієнта конвективної теплопередачі. Натомість, в рамках hard-soft-технології виникає можливість оперувати інтегральним коефіцієнтом тепловіддачі, не розрізняючи конвективність і радіаційність.

Загалом математичний опис процесу тепловіддачі складають: 1) рівняння теплопровідності, 2) рівняння руху плинного середовища, 3) рівняння суцільності плинного середовища, 4) рівняння теплообміну разом з умовами однозначності. Розв'язати аналітично цю систему співвідношень у більшості випадків не вдається, а тому доводиться покладатись в дуже значній мірі на експеримент. Та експеримент тоді багато важить, коли його результати можна узагальнити відповідно до законів подібності явищ і процесів. Теорія подібності — це, по суті, теорія експериментування. У разі дотримання умов подібності різні ДШВЗ пов'язані певними закономірностями, пізнання яких, часом, може стати вагомим надбанням теорії. Та особливо конструктивними закони подібності є саме у разі дослідження теплообмінних процесів.

Графіки зміни коефіцієнта тепловіддачі за кутом повороту колінчастого вала двигуна швидкого внутрішнього згорання на різних режимах його роботи суттєво відрізняються один від іншого, рис. 8 (для прикладу йдеться про режими роботи двигуна за сталої частоти обертання вала $n_e = 2400 \text{ хв}^{-1}$ і різних навантажень на двигун $p_e = 0; 0,10; 0,18; 0,30; 0,45; 0,62 \text{ МПа}$; P і K — початок і кінець області високих тисків в циліндрі, Pz і Kz — початок і кінець процесу згорання пального). Діаграми отримані в дослідно-програмному середовищі, в якому культивується двозонна модель теплотворення-теплоспоживання, і вимірювально/аналітично враховуються одночасно зміна коефіцієнта надлишку повітря, теплові потоки назовні циліндра (через кришку циліндра, головку поршня, гільзу циліндра), внутрішній теплообмін між зонами, зміна локальних температур в різних точках поверхні робочого простору і середньої температури робочого тіла, поточний тиск робочих газів тощо-тощо.

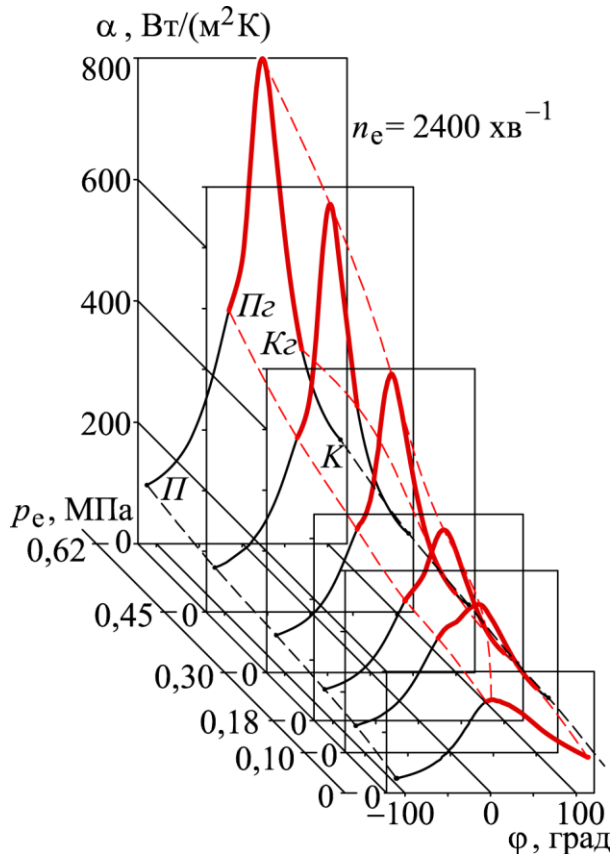


Рисунок 8 — Значення коефіцієнта тепловіддачі на різних режимах роботи теплової машини

Оскільки температура робочого тіла в зонах різна, то довелося визначати тепловіддачу для обох зон окремо. Поєднання дослідного і програмного модельних середовищ виявилось дуже складним. Та навряд чи є можливість спростити його.

Цікаво відстежити супутню зміну індикаторного тиску p , середньої температури робочого тіла T , коефіцієнта тепловіддачі α , приміром, на режимі навантаження $p_e = 0,45$ МПа (рис. 9; p_0 і T_0 — тиск і температура в довкіллі). Подібний характер супутнього перебігу графіків зміни зазначених величин спостерігається і для інших режимів роботи теплової машини. Виглядає так, ніби графік $\alpha = \alpha(\varphi)$ відстежує/наслідує здебільшого графік $p = p(\varphi)$. Але відповідно до існуючих робочих формул за вплив на величину α ніби «змагаються» одночасно величини і p , і T , «силу впливу» яких зважено

показниками степеня m, n , під якими вони перебувають у виразі $\alpha = c p^m T^n$ (c — коефіцієнт пропорційності). Оскільки показники степеня m і n у різних виразах часом дуже різні, то кожен з них відстоює суто свою особливу версію закону тепловіддачі. Але найважливішим є те, що на графіку $\alpha = \alpha(\varphi)$ цілком не помітна

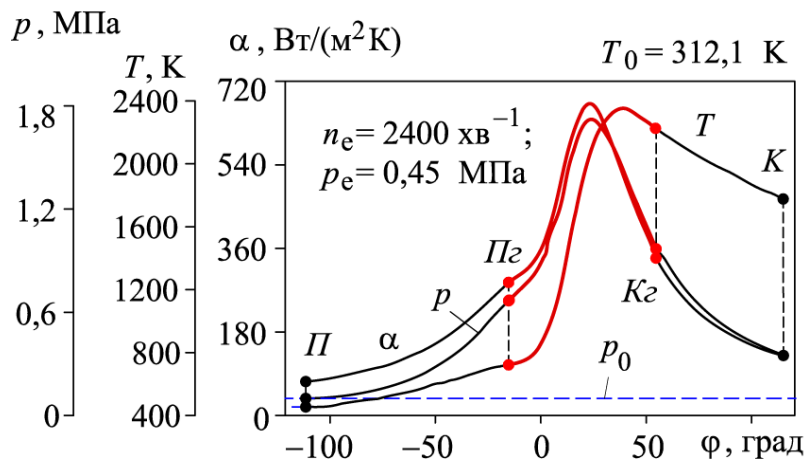


Рисунок 9 — Супутня зміна індикаторного тиску, температури, коефіцієнта тепловіддачі

складова $\alpha_r = \beta(T + T_{\text{ц}})(T^2 + T_{\text{ц}}^2)$, що фігурує у виразі (4). Отже явище радіації практично не проявляє себе в процесах, що перебігають в робочому просторі ДШВЗ.

Спроби здійснити емпіричний пошук якоїсь фундаментальної закономірності у процесах тепловіддачі нажаль не приводять до успіху. Корисним у багатьох випадках є гармонічний аналіз. Можна вдаватися до застосування, приміром, Фур'є-аналізу і Фур'є-синтезу. Але пошук коефіцієнтів Фур'є-ряду, породженого функцією $\alpha = \alpha(\varphi)$, — доволі складне завдання, яке, до того ж, не дозволяє дійти корисних теоретичних узагальнень. Мабуть все-таки коефіцієнт тепловіддачі — «поганий» емпіричний параметр «невдало» аналітично відображеного закону тепловіддачі. А тому без внесення в модель теплоспоживання/тепловіддачі елементів натурності знову-таки не обійтися.

У шостому розділі проведено дослідження ефективності моделювання й симулювання робочих процесів в ДШВЗ засобами hard-soft-технології. Оскільки в фундаментальних законах термодинаміки так чи інакше фігурують такі величини, як тиск і температура термодинамічного тіла, то зміна саме цих величин у часі була б дуже бажаною інформацією для розрахункового аналізу процесу теплопередачі. Техніка вимірювання змінного тиску p у швидкоплинних процесах є прийнятно досконалою. Тож ключову роль в термодинамічній моделі мала б відігравати саме експериментально вимірювана залежність зміни тиску в робочому просторі від кута повороту вала двигуна (рис. 10). Власне оперування діаграмами зміни тиску, а також температури (рис. 11; T_0 — температура в доквіллі) дозволяє досягнути високого рівня праксеологічності моделювання процесів в ДШВЗ.

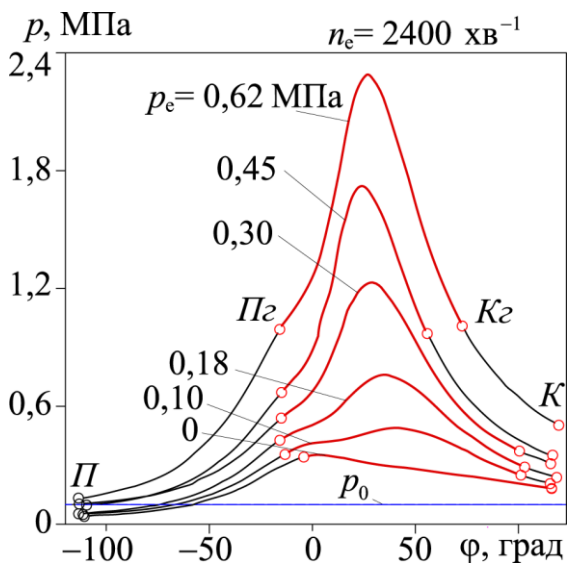


Рисунок 10 — Фрагменти індикаторних діаграм, відтворених комп'ютером на основі експериментальної інформації

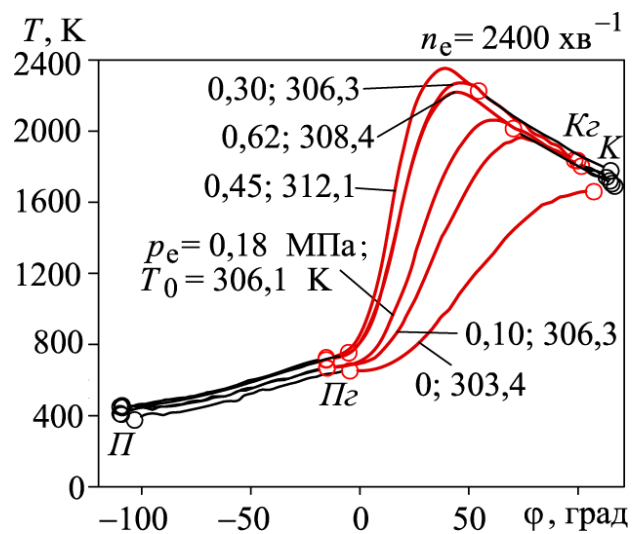


Рисунок 11 — Окремі приклади зміни середньої температури робочого тіла

Основою будь-якого розрахунку процесів є баланс енергії даного процесу в області, що обмежена стінками простору згоряння. В основу розрахунків покладено систему з трьох рівнянь: рівняння закону збереження речовини (у формі балансу мас), рівняння закону збереження енергії (у формі першого закону термодинаміки) та рівняння термодинамічного стану робочого тіла (у формі рівняння стану робочого тіла, робочого газу).

Формально апроксимаційні залежності (1), що описують процес теплотворення, залежні від двох параметрів — a (чи z_k) і m . Але фізично кількість впливових параметрів дорівнює чотирьом: a (чи z_k), m , φ_{Π} , $\Delta\varphi = \varphi_k - \varphi_{\Pi}$. Отже вмотивовано змінюючи перелічені параметри можна відслідкувати їх вплив на характер перебігу теплотворення, а відтак і на такі визначальні для оцінки робочого процесу двигуна величини, як максимальні тиск і температура газів в процесі згоряння пального, середній індикаторний тиск, коефіцієнт корисної дії, питома витрата пального тощо.

Та часто, як зазначалося, параметр a (чи z_k) задають (фіксують) заздалегідь, свідомо зменшуючи тим самим кількість ступенів вільності на одиницю. Фіксований параметр z_k (чи a) помітно звужує гнучкість апроксимаційних засобів. Приміром, у разі $z_k = 0,999$ (чи $a = -6,908$) умовна тривалість $\tau_{1/2}$ вигорання половини пального задовольняє жорстку умову

$$\tau_{1/2}^{m+1} = \frac{\ln \frac{1}{2}}{a} = \frac{\ln \frac{1}{2}}{\ln(1-z_k)} \approx 1/10.$$

У разі $z_k = 0,99$ ($a = -4,605$) — $\tau_{1/2}^{m+1} \approx 0,15$, а у разі $z_k = 0,9$ ($a = -2,303$) — $\tau_{1/2}^{m+1} \approx 0,30$. Експериментально ж підтвердити таку закономірність не вдається. Натомість, якщо порівняти отримані модельно-експериментальними засобами залежності, що відображають реальний перебіг інтенсивності теплотворення в циліндрі двигуна, з тими, що аналітично ідентифікує експонентний опис (1) за умови $a = -6,908$, то з'являються вагомні підстави вважати величину a ще одним режимним, а не формальним суто аналітичним, параметром (чи навіть режимною характеристикою) процесу згоряння пального в циліндрі двигуна, табл. 1 ($Q_{\text{тц}}$ — потенційно можливе теплотворення, визначуване кількістю палива, що потрапило в робочий простір двигуна, і його теплотворною здатністю; $\dot{Q}_{\text{max}} = (dQ/d\varphi)_{\text{max}}$ і $\dot{Q}_{\text{sr}} = (dQ/d\varphi)_{\text{sr}}$ — максимальне і середнє значення аналога інтенсивності теплотворення, зафіксовані комп'ютером). Натомість параметр τ_0 доречно позбавити статусу ніби фізично реальної тривалості процесу згоряння, а тлумачити його лише як вимірник асимптотичності процесу продукування теплоти.

При цьому можна вирізнити такі важливі параметри такі параметри: умовну мить досягнення максимуму інтенсивності (максимуму потужності, швидкості) теплотворення $\tau^* = \frac{\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\Pi}}{\varphi_k - \varphi_{\Pi}}$, (φ_{max} — кутове положення колінчастого вала, при якому інтенсивність згоряння найвища) відносну максимальну інтенсивність (потужність, швидкість) теплотворення $\dot{z}^* = \frac{\varphi_k - \varphi_{\Pi}}{Q_{\text{тц}}} \dot{Q}_{\text{max}}$, параметри m і a , що є розв'язками системи рівнянь

$$\dot{z}^* \tau^* = m \exp\left(-\frac{m}{m+1}\right), \quad a = -\frac{m}{m+1} \frac{1}{\tau^{*m+1}}.$$

Таблиця 1 — Параметри усереднених процесів теплотворення у двигуні

p_e , МПа	1 — 0	2 — 0,10	3 — 0,19	4 — 0,30	5 — 0,45
$Q_{тц}$, Дж	549,54	609,18	706,31	865,59	994,28
\dot{Q}_{max} , Дж/град	7,47	11,38	15,51	25,55	34,98
\dot{Q}_{sr} , Дж/град	4,23	5,38	7,69	10,31	12,26
$\dot{Q}_{max} / \dot{Q}_{sr}$	1,77	2,12	2,02	2,48	2,85
τ^*	0,53	0,51	0,50	0,39	0,39
\dot{z}^*	1,63	1,95	1,96	2,60	2,72
$\dot{z}^* \tau^*$	0,86	0,99	0,98	0,93	1,06
m	1,59	1,91	1,88	1,75	2,08
$-a$	3,37	4,66	4,81	8,48	12,28

З отриманої інформації (табл. 1) випливає, що значно більше підстав вважати наперед заданим значення параметра m , аніж параметра a . Беручи, приміром, $\dot{z}^* \tau^* \approx 1$, можна визнати, що $m \approx 1,93$. А якщо покласти $m \approx 2$, то доведеться визнати, що $\dot{z}^* \tau^* \approx 1,03$. Відтак, наперед задаючи $a = -6,908$ (як це зазвичай роблять), суттєво обмежують гнучкість і точність ідентифікаційного алгоритму.

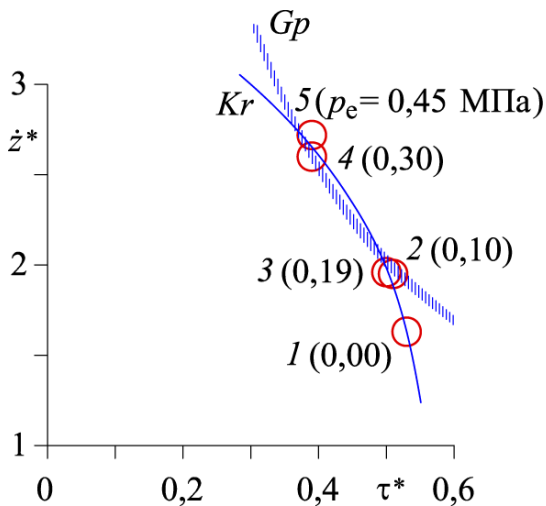


Рисунок 12 — Взаємозумовленість характеристикних параметрів

Очевидно, що в емпіричному сенсі режимні точки 1, ..., 5 (табл. 1) ніби належні деякій (параболічній, мабуть) кривій Kr (рис. 12). Та в теоретичному сенсі, виявляється, вони мали б належати розмитій гіперболі Gp , яку обмежують однозначні гіперболи $\dot{z}^* \tau^* = 1$ та $\dot{z}^* \tau^* = 1,03$. Те, що точка 1 випадає з окресленої тенденції, є радше ознакою суттєвої недосконалості режиму марного ходу двигуна, а не запереченням загальної теоретично обґрунтованої закономірності. Інші принципові невідповідності можуть також впливати з поганої режимної каліброваності двигуна чи невдалого планування експериментів.

Hard-soft-технологія моделювання/симулювання робочих процесів у ДШВЗ дозволяє адекватно оцінити диференціальну теплопередачу за межі циліндра $dQ_{ц} = dQ_{цп} + dQ_{цк} + dQ_{цт}$, розрізняючи окремі її складові через поверхні головки поршня $dQ_{цп}$, кришки циліндра, $dQ_{цк}$, гільзи циліндра $dQ_{цт}$ (рис. 13). Визначальною для двозонної моделі є також характеристика внутрішнього теплообміну $Q_{вн} = Q_{вн}(\varphi)$ між зонами робочого простору (рис. 14).

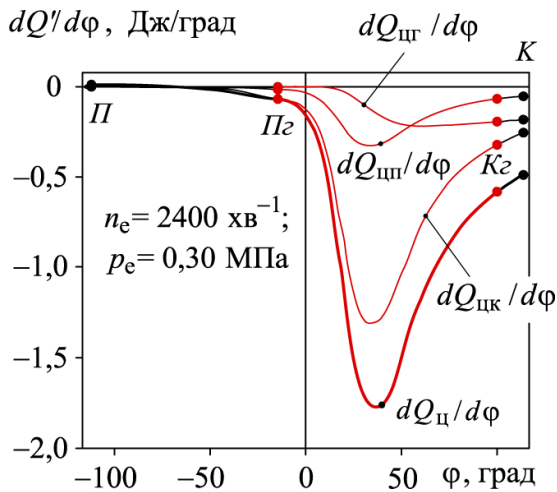


Рисунок 13 — Приклад характеристик тепловідведення

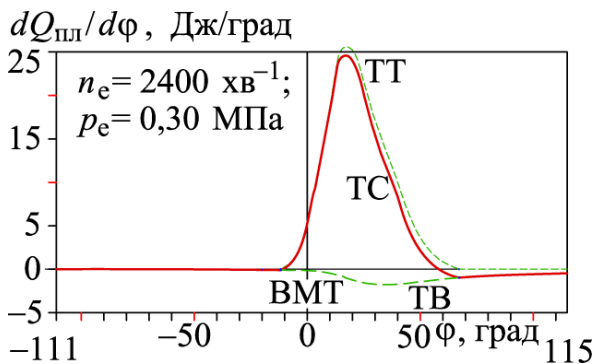


Рисунок 15 — Приклад характеристики теплоспоживання

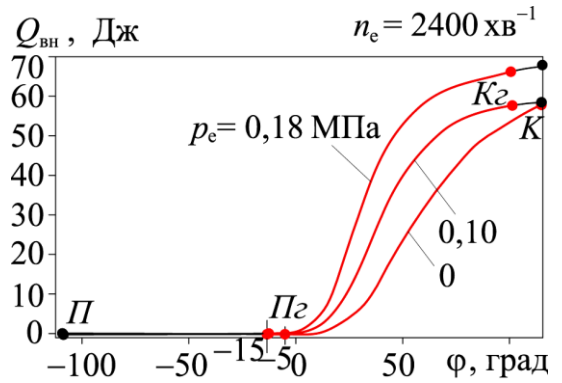


Рисунок 14 — Приклади характеристик внутрішнього (міжзонного) теплообміну

Різниця між теплотворенням та тепловитоками (теплопересиланням у стінки робочого простору, поза його межі) доречно трактувати як теплоспоживання (рис. 15): ТС — характеристика теплоспоживання, ТТ — характеристика процесу теплотворення, ТВ — характеристика тепловитоку; локальні коливання характеристик знівелювано).

Серед множини аналітико-експериментальних дослідів можна відібрати такі, для яких основні режимні параметри n_e і p_e є майже (з точністю до другого знака після коми) однаковими, та усереднити відповідні їм додаткові режимні параметри, серед яких, приміром, можна вирізнити: p_{sr} , T_{sr} і α_{sr} — середні по області високих тисків значення тиску, температури і коефіцієнта тепловіддачі; p_{max} , T_{max} і α_{max} — максимальні значення тиску, температури і коефіцієнта тепловіддачі (табл. 2). Серед наведених параметрів — безрозмірні величини

$$\frac{p_{max}}{p_{sr}}, \frac{T_{max}}{T_{sr}}, \frac{\alpha_{max}}{\alpha_{sr}}, K = \frac{\alpha_{sr} T_{sr}}{p_{sr} c_m}, K_m = \frac{\alpha_{max} T_{max}}{p_{max} c_m},$$

де c_m [м/с] — середня швидкість поршня. Ці величини дають можливість формально порівняти між собою різні режими роботи теплової машини і розпізнати особливості перебігу процесів теплотворення/теплоспоживання за різних навантажень.

Величина T_{max}/T_{sr} , приміром, зі збільшенням p_e зменшується (вагомість локального, так би мовити, зменшується), натомість величини p_{max}/p_{sr} і α_{max}/α_{sr} , навпаки, зростають (локальний екстремум стає все помітнішим на загальному, так би мовити, тлі). Параметри K і K_m характеризують режими роботи теплової машини як доволі подібні. Можна стверджувати, що режим з навантаженням $p_e = 0,30$ МПа є найтепловитратнішим в тому сенсі, що йому відповідає найбільше значення величини K .

Таблиця 2 — Режимні параметри отто-двигунів

p_e , МПа	0	0,10	0,18	0,30	0,45	0,62
p_0 , МПа	0,0971	0,0971	0,0971	0,0971	0,0971	0,0971
p_{\max} , МПа	0,3423	0,4965	0,7599	1,2601	1,8162	2,3212
p_{sr} , МПа	0,2033	0,2847	0,3706	0,5144	0,6900	0,9363
p_{\max} / p_{sr}	1,68	1,74	2,05	2,45	2,63	2,48
T_0 , К	303,4	306,3	306,1	306,3	312,1	308,4
T_{\max} , К	1820,92	1967,01	2069,46	2277,44	2341,46	2223,53
T_{sr} , К	863,49	1054,62	1123,72	1224,18	1287,72	1226,62
T_{\max} / T_{sr}	2,11	1,87	1,84	1,86	1,82	1,81
α_{\max} , Вт/(м ² К)	170	220	315	495	675	800
α_{sr} , Вт/(м ² К)	107,0	133,6	164,0	211,0	265,5	339,5
$\alpha_{\max} / \alpha_{sr}$	1,59	1,65	1,92	2,35	2,54	2,36
K	0,0688	0,0749	0,0753	0,0760	0,0750	0,0673
K_m	0,137	0,132	0,130	0,135	0,132	0,116
KK_m	0,0094	0,0099	0,0098	0,0102	0,0099	0,0078

В рамках hard-soft-середовища існує можливість суттєво спростити аналітичну складову модельного відображення робочих процесів в отто-двигунах, вибудовуючи її на основі суто класичних аналітичних співвідношень. Модель набуває конкретності не за рахунок спеціальних емпіричних описів, а завдяки черпанню поточної інформації з реального інформаційного простору на засадах теорії подібності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні розв'язана науково-прикладна задача підвищення ефективності робочих машин з тепло-механічним приводом засобами спеціально розробленої hard-soft-технології підвищення ефективності процесів теплотворення-теплоспоживання у тягових теплових отто-машинах-двигунах швидкого внутрішнього згорання. Технологія передбачає оперування водночас і натурним робочим простором двигуна, і віртуальним робочим простором у формі комп'ютерної його моделі. Вона загалом уможлиблює ідентифікацію потенційних можливостей підвищення рівня ефективності автономних робочих машин широкого призначення.

Основні результати дослідження отримані вперше та зводяться до такого:

1. Проведено аналіз існуючих науково-методологічних принципів моделювання і симулювання процесів, що перебігають у робочому просторі теплової машини, засвідчив, що у відомих модельних середовищах (наприклад, CFD Code AVL FIRE та ін.) закладені надмірні обмеження можливостей пізнання, розширити які можна лише, долучаючи до звичного програмно-алгоритмічного середовища натурний модельний робочий простір отто-двигуна робочої машини.

2. За результатами дисертаційного дослідження доведено праксеологічність технології моделювання робочих процесів в отто-двигунах робочих машин із залученням у модель реального робочого простору. При цьому досягнуто необхідної гнучкості моделі за рахунок імітації в програмному середовищі взаємодії між собою і довкіллям двох робочих зон, на які поділено модельний робочий простір теплової машини.

3. Розроблено hard-soft-технологію моделювання внутрішньодвигунних процесів у тепловій машині. Точність отриманої з її допомогою інформації в окремих випадках локально перевищує на 85 % точність інформації, отримуваної у разі застосування класичного підходу до моделювання. Hard-soft-технологія дозволяє на понад 17 % скоротити час на добір теплової отто-машини для приводу робочої машини за одночасного гарантування вищого рівня адекватності отримуваних результатів.

4. Удосконалено експонентний опис процесу теплотворення, що дозволило параметризувати процеси і віднайти такі закономірності їх перебігу, котрі залишалися непомітними в масиві експериментальної інформації. Встановлено, що значно більше підстав вважати наперед заданим значення показника якості вигорання пального m , аніж показника повноти вигорання пального a : на різних режимах роботи двигуна параметр m набуває значень, близьких до $m = 2$. Параметр a слід розглядати, як ще один режимний параметр.

5. Удосконалення системи енергоживлення отто-теплової машини згідно з оптимальним перебігом засобами hard-soft-технології моделювання дозволило збільшити на понад 13 % ефективно реалізовану потужність робочої машини. Щоб нову теплову машину змусити працювати за оптимальним тепло(анти)детонаційним процесом необхідно впорскувати пальне перед його входом у робочий простір циліндра (у впускний колектор), а свічку запалення потрібно розміщувати поблизу випускного клапана, створюючи завихрення у коморі згорання. Крім того, завдяки застосуванню нового підходу до ідентифікації процесу теплотворення, рівня корисного тепловикористання та досконалості системи тепловідведення в модельному двигуні внутрішнього згорання досягнуто збільшення коефіцієнта корисної дії на 2,5 %.

6. Застосування розробленої hard-soft-технології дослідження дає можливість сумістити характеристики виконавчих органів (інструментів) робочої машини і її приводу за рахунок точності ідентифікації та коригування визначальних параметрів теплової машини-двигуна у процесі її проектування, конструювання та виготовлення. Похибка визначення верхнього мертвого положення хитневого механізму отто-двигуна на один градус (два градуси) повороту колінчастого вала породжує похибку визначення середнього ефективного тиску (питомої роботи), обертового моменту та потужності на рівні 5 ... 7 (11 ... 15) %. Зниження, скажімо, на 10 % потужності двигуна унаслідок неточності кондиціонування його властивостей породжує зниження продуктивності робочої машини чи на ті ж 10 % перевитрату пального у разі спроби відновити продуктивність до номінального рівня. Втрату енергетичної ефективності робочої машини і перевитрату пального приблизно такого ж рівня породжує й завищення на 10 % потужності теплової машини.

7. Для цілковитого розв'язання проблеми раціонального поєднання в єдиній моделі натурального і віртуального середовищ потрібно стандартизувати натурний модельний робочий простір теплової отто-машини. Це дозволило б узгодити паралельну співпрацю різних наукових центрів і організувати обмін науково-дослідною інформацією.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття у науковому періодичному виданні іншої держави (Польща):

1. Гащук П. Аналитическая аппроксимация топливных характеристик автомобильного двигателя / Петро Гащук, Сергей Никипчук // Тека komisji naukowo-problemowej motoryzacji: «Konstrukcja, Badania, Eksploatacja, Technologia pojazdów samochodowych I silników sralinowych». – Kraków: Polska Akademia nauk oddział w Krakowie, 2001. – Nr 22. – S. 127–134.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Гащук П. М. Натурно-машинні засоби в моделюванні термодинамічних процесів, що перебігають у двигунах внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук, Юрій Богачик // Вісник Державного університету “Львівська політехніка” «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів». – Львів, 1998. – № 354. – С. 3–9.

3. Гащук П. М. Hard-soft-технологія інформаційного супроводу процесу моделювання теплотворення/теплоспоживання в двигуні внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // Зб. наук. пр. «Вісник ЛДУ БЖД». – Львів, 2018. – № 18.– С. 6–22. DOI: 10.32447/20784643.18.2018.01.

4. Гащук П. М. Моделювання теплообмінних процесів, що перебігають в циліндрах двигуна внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // Зб. наук. пр. «Пожежна безпека». – Львів: ЛДУ БЖД, 2018. – № 33– С. 15–34. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.03.

5. Hashchuk P. General principles of hard-soft-technologies application to modelling of operation process in internal combustion engines / P. Hashchuk, S. Nikipchuk // Proceedings of Odesa polytechnic university. – Odesa, 2018. – Issue 2 (55). – С. 34–48.

Статті у наукових періодичних виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз даних (МНБ):

6. Hashchuk P. Development of praxeological principles to model/study heat generation and heat consumption processes in the engine of rapid internal combustion / P. Hashchuk, S. Nikipchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv, 2019. – Vol 1, № 5 (97). – С. 54–65, 73–74. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154409. (Видання включене до МНБ — Scopus).

7. Гащук П. М. Теплотворення в двигуні швидкого внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // Mechanics and Advanced Technologies. – Київ. – 2018. – № 1 (82). С. 92–99. DOI: 10.20535/2521-1943.2018.82.125201 . (МНБ — РИНЦ).

8. Гащук П. М. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // Автомобільний транспорт. – Харків. – 2018. – № 42. – С. 12–21. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2018.42.0.12. (МНБ — Copernicus).

9. Hashchuk P. Heat generation and heat consumption in engine of rapid internal combustion / P. Hashchuk, S. Nikipchuk // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – Львів, 2018. – Vol. 4, № 1. – С. 160–174. (МНБ — Copernicus).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Нікіпчук С. Аналіз та оптимізація схем суміщення структурних елементів у системах охолодження автотранспортних двигунів / Сергій Нікіпчук // IX міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. 20-22 травня 2009 р.: праці. – Львів, 2009. – С. 271–272.

11. Визначення коефіцієнта теплопередачі в двигуні приводу пожежно-рятувального обладнання аналітичними засобами / Сергій Нікіпчук // Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Міжнародна науково-практична конференція. 20-21 жовтня 2016 р.: матеріали. – Львів: ЛДУ БЖД, 2016. – С. 433–435.

12. Гащук П. М. Модельно-симуляційна технологія дослідження термодинамічних процесів у двигунах внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // 13-й міжнародн. симпоз. українськ. інж.-механіків у Львові. 18–19 травня 2017 р.: тези доповід. – Львів: 2017. – С. 93–95.

13. Гащук П. М. Стендово-аналітичні засоби моделювання теплових явищ, що перебігають у двигуні внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців: Міжнародна науково-практична конференція. 19–20 жовтня 2017 р.: наукові праці. – Харків, 2017. – С. 227–228.

14. Гащук П. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: III Міжнародна науково-практична конференція. 14 вересня 2018 р.: матеріали конференції. – Львів, 2018. – С. 166.

15. Гащук П. М. Застосування hard-soft-технології моделювання робочого процесу в двигуні внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // Новітні технології розвитку автомобільного транспорту: міжнародна науково-практична конференція. 16–19 жовтня 2018 р.: наукові праці. – Харків, 2018. – С. 259–261.

16. Гащук П. М. Hard-soft-технологія ідентифікації перебігу робочого процесу в двигуні внутрішнього згоряння / Петро Гащук, Сергій Нікіпчук // 14-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. 23–24 травня 2019 р.: матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2019. – С. 63–65.

Навчальний посібник:

17. Гащук П. Автомобільні двигуни. Тепловий та динамічний розрахунок / Петро Гащук, Теодозій Миськів, Сергій Нікіпчук. – Львів: Українські технології, 2006. – 144 с.

АНОТАЦІЯ

Нікіпчук С. В. Підвищення енергетичної ефективності робочих машин з отто-двигунами засобами hard-soft-технології. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.02 «Машинознавство». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Розглядається технологія моделювання/дослідження явищ теплотворення, тепловіддачі, тепловикористання у тепловій машині швидкого внутрішнього згоряння (отто-двигуні), в основу якої покладено принципи праксеологічності.

Зазначено, що подальший розвиток класичних підходів до моделювання робочих процесів у двигуні, спираючись суто чи здебільшого на аналітико-алгоритмічні описи, є практично неможливим. Тож запропоновано залучити в модель також і реальний робочий простір двигуна, системно приєднуючи його до віртуального, втіленого в програмно-алгоритмічному середовищі, і тим самим впроваджуючи частину реальності в модель цієї ж реальності.

Потрібної ефективності моделі надає імітація в програмному середовищі взаємодії між собою і довкіллям двох зон, на які поділено модельний робочий простір двигуна. Саме у разі двозонного трактування модельного робочого простору стає можливим відмовитись від аналітичного контролю за хімічною рівновагою в робочому середовищі і не існує причин, які б зумовлювали речовинний обмін між зонами.

Ключові слова: робоча машина, теплова машина, двигун внутрішнього згоряння, двигун швидкого внутрішнього згоряння, процес теплотворення, теплоспоживання, теплопередача, експонентна теплотвірна функція, інтенсивність тепловиділення, експонентний аналітичний опис, моделювання, подібність, hard-soft-технологія, анти(тепло)детонаційне тепловиділення.

АННОТАЦІЯ

Никипчук С. В. Повышение энергетической эффективности рабочих машин с отто-двигателями средствами hard-soft-технологии. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 – машиноведение. Национальный университет “Львівська політехніка” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2020.

Рассматривается технология моделирования/исследования явлений теплообразования, теплоотдачи, теплопотребления в тепловой машине быстрого внутреннего сгорания (отто-двигателе), в основе которой положены принципы праксеологичности. Признано, что последующее развитие классических подходов к моделированию рабочих процессов в двигателе, опираясь сугубо или по большей части на аналитико-алгоритмические описания, является практически невозможным. Поэтому предложено привлечь в модель также и реальное рабочее пространство двигателя, системно присоединяя его к виртуальному, воплощенному в программно-алгоритмической среде, и тем самым внедряя часть реальности в модель этой же реальности.

Необходимую эффективность модели обеспечивает имитация в программной среде взаимодействия между собой и окружающей средой двух зон, на которые разделено модельное рабочее пространство двигателя. Именно в случае двухзонной трактовки модельного рабочего пространства становится возможным отказаться от аналитического контроля за химическим равновесием в рабочей среде и не существует причин, которые бы обуславливали обмен веществами между зонами.

Ключевые слова: рабочая машина, тепловая машина, двигатель быстрого внутреннего сгорания, теплообразование, теплопотребление, теплопередача, экспонентная теплообразовательная функция, интенсивность тепловыделения, экспонентное аналитическое описание, моделирование, подобие, hard-soft-технология, анти(тепло)детонационное тепловыделение.

ANNOTATION

Nikipchuk S. V. Increasing the energy efficiency of working machines with otto-engines by means of hard-soft-technology. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.02.02 "Machine Science". – National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 2020.

We consider a technology for modeling/studying phenomena of heat formation, heat transfer, heat utilization in the engine of rapid internal combustion, underlying which are the principles of praxeology. It is recognized that further development of classic approaches to modeling working processes in the engine relying purely or mainly on the analytical-algorithmic descriptions is almost impossible. It is therefore proposed to additionally introduce to the model an actual workspace of the engine, systemically connecting it to the virtual, implemented in the software-algorithmic environment, thereby introducing part of the reality to the model of the same reality. Within the framework of this study, we used, as a full-scale workspace, a cylinder from the tested engine BRIGGS&STRATTON, mounted at a special test bench.

In this case, there is a possibility to greatly simplify the analytical component of the modeling representation of working processes in the engine, building it on the basis of classical analytical ratios that reflect the law of conservation of matter, the law of preservation of energy, a heat transfer law, as well as equations of thermodynamic state of a working body. The model acquires specificity not due to special empirical descriptions, but by acquiring current information from the real information space based on the principles of similarity theory.

The required effectiveness of the model is provided by a simulation in the programming environment of interaction amongst itself and the environment of two zones into which a modeled engine workspace is split. A dual-zone model is opposed to the so-called multi-zone models, within which there is always a high risk of errors, almost uncontrolled, which require a complex and labor-intensive information support and maintenance. It is in the case of a two-zone representation of the modelled working space that it becomes possible to abandon the analytical control over chemical equilibrium in a working environment and there are no reasons that would predetermine the exchange of substances between zones. Therefore, it becomes possible to determine heat transfer to the walls of a working space similar to a single-zone model.

It follows from the study conducted that it is expedient to apply a exponential heat-generating function (Wiebe function) for the virtual simulation of a heat formation phenomenon. Quality of simulation is improved by acquiring information obtained in the process, so to speak, of "on-line communication" between a virtual (in the form of software) and an actual (in the form of a full-scale workspace) parts of the modeling environment.

In general, the course of heat generation process is commonly characterized by the index $m > 0$ of fuel burn-out quality and the index of capacity of combustion. This approach to the identification of processes in the internal combustion engines appeared to be rather effective.

As a rule in case of analytical identification of heat generation – heat consumption processes the index a of combustion capacity is defined in advance. The acquired

information, however, demonstrates that there are more reasons to consider the value of the parameter m to be set in advance, rather than of the parameter a .

The relation between values of heat emission maximal intensiveness z^* and the time of its achievement τ^* in an empirical sense is seemingly parabolic. Theoretically, as it has been found out, it can be evidently treated as “fuzzy” hyperbolic. The fact that the engine’s idle run does not conform to the “hyperbolic” tendency manifests its considerable imperfection and does not contend against the theoretically substantiated regularity. Given, for example, that $z^* \tau^* \approx 1$, it is possible to acknowledge that $m \approx 1,93$. While given $m \approx 2$, we will have to acknowledge that $z^* \tau^* \approx 1,03$. Thus, if we assign in advance that $a = -6,908$ (as usual) we considerably limit the flexibility and preciseness of the identification algorithm.

Equation of forced convection is traditionally based on a similarity relationship $Nu = C Re^m Pr^n$ between criteria Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr); C, n, m , — constant. G. Woschni found out that the values of the degrees of power are acceptable $m = 0,78$ and $n = 0,33$. But in general it turned out that good simulation results can be obtained on the basis of experimental information on the flow of pressure and average temperature in the engine cylinder, taking $n = 1/3$ and for each mode of operation of the engine its meaning m from the range $3/4 < m < 4/5$. Examples of model reproduction of the change in the coefficient of heat output from the angle of rotation of the motor shaft for different loads are given.

The presentation of the material is accompanied by illustrative material, which reflects information, obtained by modeling tools, about a change in: the working pressure in the engine working space, the temperature of a working body, an excess air coefficient, a heat transfer coefficient. We also included examples of change in the intensity of heat formation and intensity of heat transfer at the surface of: the working space in general, a cylinder liner, a cylinder lid, a piston head. Among the illustrations are the characteristics of the internal (intra-zone) heat exchange.

Keywords: *working machine, heat machine, internal combustion engine, rapid internal combustion engine, heat generation process, heat consumption, exponential heat-generating function, heat-fission intensity, exponential analytical description, modelling, similarity, hard-soft technology, anti(heat)detonation heat dissipation.*

Підписано до друку 31.03.2020 р.
Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.
Тираж 100 прим. Зам. 200272.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету «Львівська політехніка»
вул. Ф. Колеси, 4, 79013, Львів
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.