

**Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Корогодський Володимир Анатолійович



УДК 621.434.43

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПЕРСПЕКТИВНИХ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ДВИГУНІВ
З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ ПРИ ВНУТРІШНЬОМУ
СУМІШОУТВОРЕННІ**

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

14 – електрична інженерія

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теплотехніки та теплових двигунів Українського державного університету залізничного транспорту та на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Єроценков Станіслав Аркадійович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Григор'єв Олександр Львович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
професор кафедри вищої математики;

доктор технічних наук, професор
Заренбін Володимир Георгійович,
Придніпровська державна академія будівництва
і архітектури, м. Дніпро,
професор кафедри експлуатації та ремонту машин;

доктор технічних наук, професор
Полив'янчук Андрій Павлович,
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова,
професор кафедри інженерної екології міст.

Захист відбудеться « 25 » жовтня 2018 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна) та на сайті університету:

Автореферат розісланий « ____ » _____ 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



Р.В. Смолянук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні основним джерелом виробництва механічної енергії (більше 70 %) є двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), що обумовлено їхньою високою питомою потужністю, масогабаритними показниками, відносно високою паливною економічністю при потужності до 100 МВт в одному силовому агрегаті, швидким і надійним запуском, простотою обслуговування й високою експлуатаційною надійністю. До переваг поршневих ДВЗ треба також віднести тривалий термін використання та багатопаливність.

В Україні використання ДВЗ економічно виправдано практично в усіх сферах діяльності людини: на транспорті, у промисловості, сільському господарстві, будівництві та побуті. Найбільша кількість ДВЗ задіяна на автотранспорті (60 %) і в агропромисловому комплексі (25 %), де зростання економіки зумовлює збільшення використання силових установок. До основного типу двигунів, що випускається промисловістю, належать двигуни з іскровим запалюванням, на частку яких припадає близько 70 % від загальної кількості вироблених ДВЗ.

Зростання виробництва двигунів з іскровим запалюванням вимагає більш раціонального використання вуглеводневого палива і зниження викидів шкідливих речовин (ШР) з відпрацьованими газами (ВГ). Одночасне зниження витрати палива і виконання нормативних вимог щодо токсичності ВГ можливе за рахунок такої організації робочого процесу двигуна, що забезпечує ефективне спалювання палива.

Одним з основних напрямків створення ефективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням, на підставі сучасної теорії і конструкції двигунів, є застосування безпосереднього впорскування палива й організація внутрішнього сумішоутворення, яке сприяє роботі двигуна на бідних паливоповітряних сумішах.

Надлишок повітря в паливоповітряній суміші теоретично дозволяє ефективно спалювати паливо з низьким вмістом ШР у ВГ. Проте на практиці для розширення границі ефективного збіднення паливоповітряного заряду в циліндрі двигуна з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні потрібно забезпечити раціональну очистку циліндра від продуктів згоряння й ефективно наповнити його свіжим зарядом у процесі перебігу газообміну, що сприяє формуванню умов для подальшого перебігу процесів сумішоутворення й згоряння. Треба зауважити, що забезпечення своєчасного підведення свіжого заряду в зону горіння й відведення продуктів згоряння із зони горіння в підсумку є складною науково-технічною проблемою.

Таким чином, тема дисертації й існуюча науково-технічна проблема є актуальними, бо спрямовані на створення перспективних робочих процесів двигунів з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні, що забезпечують розширення границі ефективного збіднення паливоповітряного заряду шляхом організації ефективного взаємозв'язку між процесами газообміну, сумішоутворення й згоряння та створюють умови для підвищення економічних та екологічних показників. Вищезазначена науково-технічна проблема і визначає основний напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконані на кафедрі теплотехніки та теплових двигунів УкрДУЗТ і на кафедрі ДВЗ ХНАДУ у рамках Держбюджетних тем МОН України: "Розробка наукових основ перспективних робочих процесів двигунів внутрішнього згоряння" (ДР № 0108U000080) і "Розробка багатопаливного робочого процесу для двигуна з іс-

кровим запалюванням" (ДР № 0110U002130), де здобувач є відповідальним виконавцем, та "Теоретичні основи експлуатації тепловозних дизелів при використанні альтернативних палив" (ДР № 0111U002241), де здобувач є відповідальним виконавцем окремих етапів, а також у рамках господарсько-договірної роботи "Підвищення економічності та зниження викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами човнового мотора МС-40Э" (Договір №70 / 2-09-КТУ від 1 жовтня 2009 року з АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя), де здобувач є керівником роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення науково-технічної проблеми створення перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні із забезпеченням розширення границі ефективного збіднення паливоповітряної суміші при згорянні з метою підвищення економічних та екологічних показників за рахунок організації ефективного взаємозв'язку між процесами газообміну, сумішоутворення та згорання.

Досягнення зазначеної мети передбачає розв'язання таких завдань:

- створити методологію організації перспективних робочих процесів у ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні;
- уточнити термодинамічну модель робочого процесу ДВЗ за допомогою використання критерію розшарування паливоповітряного заряду, що дозволить визначати параметри робочого тіла у впускних, випускних і робочих порожнинах ДВЗ;
- розробити комплекс термодинамічних моделей внутрішньоциліндрових процесів, охоплюючи процеси сумішоутворення та згорання, для визначення поточних параметрів робочого циклу, з урахуванням наявності безпосереднього впорскування палива, розшарування та збіднення паливоповітряного заряду;
- визначити теплофізичні властивості робочого тіла у впускних, випускних і робочих порожнинах двигунів 1Д 8,7/8,2 і 2Ч 7,8/6,8 та коефіцієнти витрат продувального й випускного каналів і оцінити показники якості газообміну;
- уточнити модель внутрішнього об'ємно-плівкового сумішоутворення й провести розрахунково-експериментальні дослідження процесів сумішоутворення й згорання для двигунів 1Д 8,7/8,2 і 2Ч 7,8/6,8;
- уточнити формулу тепловіддачі Вошні для ділянки згорання-розширення щодо двотактного двигуна з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива й організації розшарування збідненого паливоповітряного заряду, з кривошипно-камерним продуванням і повітряним охолодженням;
- провести розрахунково-експериментальні дослідження щодо визначення раціональних відповідностей використання розроблених термодинамічних та 3-D газодинамічних моделей для розрахунку робочих процесів різного типу;
- уточнити залежності з метою визначення індикаторних та ефективних показників двотактного ДВЗ щодо врахування втрати частки палива під час продування циліндра, запропонувати та обґрунтувати необхідність уведення чисельних показників для визначення границі ефективного збіднення паливоповітряної суміші (критерій розшарування) та оцінки досконалості організації робочого процесу з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду (ступінь розшарування);
- розробити методологію організації робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням та внутрішнім сумішоутворенням для забезпечення розширення границі ефективного збіднення. Провести експериментальні дослідження двигуна 1Д 8,7/8,2

при роботі на різних типах палива та виконати порівняльний аналіз показників ДВЗ з різними способами організації робочого процесу;

- виконати дослідження щодо можливості впровадження розробленої організації робочого процесу на двигуні 2Ч 7,8/6,8 з безпосереднім впорскуванням палива та розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду.

Об'єкт досліджень – процеси газообміну, сумішоутворення й згоряння у двигуні з іскровим запалюванням.

Предмет досліджень – показники робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням та розшаруванням паливоповітряного заряду при зміні конструктивних і регульованих параметрів ДВЗ та використанні різних видів палива.

Методи досліджень. В основу теоретичних та експериментальних досліджень покладені фундаментальні положення теорії ДВЗ, основні закони термодинаміки й газодинаміки з використанням методів математичного та фізичного моделювання, методів параметричної ідентифікації математичних моделей.

Для дослідження дійсних процесів, що відбуваються у робочих порожнинах двотактного ДВЗ (впускна та випускна системи, циліндр двигуна, кривошипна камера) та паливній системі, використано експериментально-статистичний метод обробки сигналів вимірювальної апаратури на основі методу найменших квадратів. Для теоретичних досліджень робочого процесу ДВЗ використано термодинамічний метод розрахунку на підставі рівняння збереження енергії, маси, рівняння стану й зміни об'єму в робочих порожнинах двигуна; термодинамічний метод об'ємного балансу; газодинамічний метод розрахунку тривимірної течії робочого тіла в робочих порожнинах ДВЗ. Своєю чергою газодинамічний метод моделюється за допомогою 3-D газодинамічної моделі в програмному пакеті *AVL Fire*, що ґрунтується на методі кінцевих елементів, 3-D моделі газової динаміки, заснованої на методі кінцевих часток і використанні методу Ейлера при інтегруванні диференціальних рівнянь та створеної на мові програмування C++, 3-D моделі програмного комплексу *MTFS*, яка дозволяє досліджувати тривимірні газодинамічні процеси шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса при створенні твердотільної моделі конструкції двигунів у програмному комплексі *SolidWorks* та побудові в *MTFS* гексаедральної сітчастої моделі з організацією згущення поблизу твердих границь розрахункової області.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному. У дисертації запропоновані нові наукові рішення з метою створення та оцінки перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням, безпосереднім упорскуванням палива й внутрішнім сумішоутворенням, що забезпечує розширення границі ефективного збіднення паливоповітряного заряду при згорянні в циліндрі двигуна. Використані методи математичного моделювання відрізняються від відомих узгодженим і послідовним розрахунком процесів газообміну, сумішоутворення й згоряння, що надає можливість покращити економічні та екологічні показники двигунів. Треба зауважити, що особисто автором здобуті наступні новітні наукові результати.

1. Отримали подальшого розвитку фундаментальні положення теорії ДВЗ стосовно інноваційного визначення низки основних показників робочого процесу двигунів з іскровим запалюванням, а саме:

- індикаторні й ефективні показники двотактного ДВЗ з обчисленням яких ураховується втрата частки палива під час продування циліндра, що дозволяє

об'єктивно й безпомилково порівняти рівень цих показників для двигунів із зовнішнім і внутрішнім сумішоутворенням;

- критерій розшарування паливоповітряного заряду (L) як кількісного показника для визначення границі ефективного збіднення заряду в циліндрі ДВЗ з іскровим запалюванням;

- ступінь розшарування паливоповітряного заряду (ϵ_L), який дозволяє оцінити досконалість організації робочого процесу з розшаруванням паливоповітряного заряду в циліндрі ДВЗ з іскровим запалюванням.

2. Уперше запропоновано комплексну методологію створення перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням і внутрішнім сумішоутворенням, яка ґрунтується на:

- розрахунку робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням за допомогою однозонної термодинамічної моделі, яка відрізняється тим, що в ній ураховані теплофізичні процеси впорскування, сумішоутворення та випаровування палива в циліндрі на різних режимах роботи;

- розрахунку процесу згоряння при організації однорідного складу паливоповітряної суміші в надпоршневому об'ємі за допомогою двозонної термодинамічної моделі, відмінність якої полягає в тому, що вона надає можливість одночасно визначати параметри робочого тіла в зоні продуктів згоряння й у зоні паливоповітряної суміші з урахуванням реальних теплофізичних властивостей на режимах підвищених навантажень двигуна;

- розрахунку процесу згоряння при організації розшарованого паливоповітряного заряду за допомогою тризонної термодинамічної моделі, яка визначається тим, що надає можливість водночас визначати параметри робочого тіла в зонах продуктів згоряння, паливоповітряної суміші й повітря з урахуванням реальних теплофізичних властивостей на режимах часткових навантажень двигуна.

3. Набули подальшого розвитку субмоделі для розрахунку робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням і внутрішнім сумішоутворенням із застосуванням:

- уточненої математичної моделі внутрішнього сумішоутворення на підставі теорії аеродинамічного сліду, яка відмінною рисою якої є те, що в процесах динаміки та масо-і теплообміну в паливному струмені враховується периферійне розподілення часток палива;

- уточненої формули тепловіддачі Вошні для ділянки згоряння-розширення, яка відрізняється тим, що враховує особливості передачі теплоти між газом і навколишніми стінками надпоршневої порожнини двотактного двигуна з іскровим запалюванням та організацією розшарованого збідненого паливоповітряного заряду, наявність кривошипно-камерного продування й повітряного охолодження.

Практичне значення одержаних результатів у тому, що:

1. Розроблено комплексну математичну модель розрахунку робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні, яка складається з термодинамічної, 3-D газодинамічної моделей, однозонної, двозонної й тризонної моделей на основі методу об'ємного балансу, моделей процесів внутрішнього сумішоутворення, методик експериментальних досліджень процесів газообміну, сумішоутворення, згоряння та визначення техніко-економічних та екологічних показників ДВЗ.

2. Розроблено методику визначення індикаторних і ефективних показників двигуна з іскровим запалюванням, які враховують втрату частки палива під час продування циліндра двотактного ДВЗ.

3. Визначено функціональні залежності параметрів теплофізичних властивостей робочого тіла: теплоємності C_{pm} від значень коефіцієнтів залишкових газів γ , надлишку повітря $\alpha_{цил}$ і розрідження на впуску $\Delta P_{др}$; значень коефіцієнтів і показників процесу газообміну; параметрів руху робочого тіла в кожній точці робочих порожнин ДВЗ на впуску, у циліндрі й у випускній системі; інтенсивності руху паливного струменя з периферійним розподілом часток палива, зовнішнього й внутрішнього кутів розкриття паливного струменя, температури поверхні камери згоряння, тривалості випаровування циклової подачі бензину; характеристик перебігу фізичних процесів згоряння й тепловіддачі від газу до стінки залежно від режиму роботи двигуна.

4. Винайдено конструкцію паливної форсунки (Патент України 93960 С2), яка забезпечує організацію розшарованого паливоповітряного заряду в надпоршневому об'ємі ДВЗ.

5. Обґрунтовано переваги організації внутрішнього сумішоутворення й згоряння з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду в ДВЗ з іскровим запалюванням (Патент WO 2009/044225 A1, Патенти України 29459 U, 29460 U), що дозволяє розширити границі ефективного збіднення паливоповітряного заряду в циліндрі ДВЗ і сприяє зниженню витрати палива та скороченню викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

6. Розроблено принципи організації робочого процесу з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду щодо вибору місця розташування паливної форсунки в циліндрі ДВЗ, принципи застосування форсунки з клапанним розпилювачем з метою периферійного розподілення часток палива в струмені та застосування симетричної напівсферичної камери згоряння з площею витискувача понад 68 % відносно площі днища поршня.

7. Удосконалено концепцію застосування розробленої електронної системи керування з насос-форсункою на основі швидкодіючого електричного приводу (Патенти WO 2007/136359 A1, WO 2008/139250 A1) і форкамерної свічки запалювання для подальшого підвищення економічних та екологічних показників двотактного ДВЗ з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива та організації робочого процесу з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду.

8. Упроваджено програму розрахунку та нові способи організації перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням і внутрішнім сумішоутворенням на ДПМЗ «Гідромаш», ВП МеМЗ ПАТ ЗАЗ (м. Мелітополь), АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ПрАТ «Київський мотоциклетний завод» (м. Київ).

Теоретичні й практичні результати, одержані під час виконання досліджень, упроваджені в навчальний процес Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів (ННППК) УкрДУЗТ та для підготовки студентів зі спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» та за професійним спрямуванням «Двигуни внутрішнього згоряння» на кафедрі ДВЗ ХНАДУ.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення й результати, які наведені в дисертації, одержані здобувачем самостійно. Особистий внесок дисертанта полягає в самостійному окресленні мети та постановці завдань досліджень, розробці методології організації перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні та впровадженні математичної моделі розрахунку робочого процесу ДВЗ. Здобувачем встановлена залежність визначення індикаторних й ефективних показників ДВЗ, винайдений критерій розшарування L та ступінь розшарування паливоповітряного заряду ε_L . Автором самостійно визначені методи, методики, отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів газообміну, сумішоутворення, згоряння, техніко-економічних та екологічних показників двигуна та сформульовані висновки. Здобувачем впроваджені результати роботи як у промисловість, так і в навчальний процес.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень апробовані в доповідях на:

- міжнародних науково-технічних конференціях: "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" Харків (Україна) – Мішкольц (Угорщина) – Магдебург (Німеччина) (Україна, Харків, НТУ "ХП", 2010, 2014-2016); «Systems and Means of Motor Transport. Selected Problems» (Польща, Жешув, 2015); «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Україна, Харків, УкрДАЗТ, 2005, 2007, 2009, 2010, 2012, 2014-2016); «Енергетична безпека та енергозбереження на транспорті: технології та інвестиції» (Україна, Одеса, 2009), «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення» (Україна, Первомайськ, 2007, 2009, 2011, 2013), «Актуальні проблеми морської енергетики» (Росія, Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2015, 2016);
- міжнародних науково-практичних конференціях: «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Росія, Пермь, ПНИПУ, 2014), «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців» (Україна, Харків, ХНАДУ, 2005, 2007, 2012, 2014-2017);
- міжнародних конгресах: міжнародний конгрес двигунобудівників (Україна, Крим, Рибаче, 2005, 2007, 2009, 2010-2013).

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи викладено у 58 наукових публікаціях; з них 1 монографія, 28 статей у наукових фахових виданнях за переліком МОН України (з них 7 статей у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз, у тому числі 1 – входить до бази даних SCOPUS), 4 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 19 – у матеріалах конференцій, 3 патенти України, 3 міжнародних патенти, які включені до наукометричної бази Web of Science. Одноосібно опубліковано 1 монографію та 8 статей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 499 сторінок; з них 60 рисунків по тексту; 125 рисунків на 61 сторінці; 1 таблиця по тексту; 3 таблиці на 2 сторінках; список використаних джерел інформації із 334 найменувань на 38 сторінках; 9 додатків на 56 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та напрямки її досягнення, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, охарактеризовано особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

Перший розділ присвячено аналізу особливостей організації робочого процесу у ДВЗ з іскровим запалюванням і внутрішнім сумішоутворенням у сучасному двигунобудуванні для виконання нормативних вимог щодо токсичності ВГ і мінімального споживання палива.

Провідні виробники автомобілів та інших транспортних засобів розробляють і впроваджують технологію безпосереднього впорскування палива у двигунах з іскровим запалюванням. Масове виробництво ДВЗ у цьому напрямку почала корпорація *Mitsubishi Motors* з розробкою робочого процесу *GDI*. У подальшому впроваджені розробки корпораціями: *Toyota (DI)*; *Lexus (BPI)*; *Honda K20B*; *General Motors (ETGDI)*; *Nissan Motor (VC-T)*; *Ford (ATP-LD)*; *Orbital Engine (OCP)*; *Bombardier Recreational Products (BRP)*, що спеціалізується на транспортних засобах для активного відпочинку з двигунами *Rotax*, *Evinrude*, які оснащені технологією *E-TEC*. Автомобілебудівна корпорація *Renault* уперше у Європі почала виробництво двигунів з іскровим запалюванням та системою безпосереднього впорскування палива (*IDE*). У подальшому в цьому напрямку проведено розробки корпораціями: *Mercedes-Benz (CGI)*; *Volkswagen AG (FSI, TSI)*; *BMW (TVDI)*, *Opel (Direct Ecotec)* та інші.

Дослідженнями з удосконалення організації робочого процесу у ДВЗ з іскровим запалюванням та використанні безпосереднього впорскування палива займалися такі провідні вчені як *H.R. Ricardo*, *G. Woschni*, *A.C. Орлін*, *Ю.Б. Свірідов*, *Р.І. Мехтієв*, *В.Г. Дяченко*, *Р.З. Кавтарадзе*, *І.В. Кузнєцов*, *Н.В. Лобов*, *Е.А. Герман*, *G.P Merker*, *R. Basshuysen*, *H. Zhao*, *C. Baumgarten*, *R. Pischinger*, *Ch. Schwarz* та інші.

Визначено, що з метою поліпшення економічних та екологічних показників ДВЗ з іскровим запалюванням доцільно створювати робочі процеси з внутрішнім сумішоутворенням, які забезпечують розшарування паливоповітряного заряду при розширенні границі ефективного збіднення паливоповітряної суміші шляхом організації ефективного взаємозв'язку між процесами газообміну, сумішоутворення і згоряння. Треба зазначити, що визначені основні напрямки у розв'язанні поставлених завдань: забезпечення якісного газообміну за рахунок раціонального регулювання фаз газорозподілу, використання технології рециркуляції ВГ та застосування у випускній системі ДВЗ трикомпонентного нейтралізатора з низьким гідравлічним опором на випуску; реалізація якісного (змішаного) способу регулювання потужності шляхом зміни складу паливоповітряної суміші в циліндрі при відповідному узгодженні характеристик упорскування палива та аеродинамічних характеристик руху повітряного заряду в надпоршневому об'ємі; підвищення ступеня стиснення ($\epsilon > 12$) при застосуванні напіврозділеної напівсферичної симетричної камери згоряння з розвиненою поверхнею витискувача для підвищення інтенсивності турбулізації паливоповітряного заряду. Таким чином, є доцільним подальше проведення наукових досліджень з удосконалення робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням і внутрішнім сумішоутворенням з метою поліпшення економічних та екологічних показників.

У **другому розділі** увага зосереджена на математичних моделях, які застосовуються для розрахунку робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням.

У розділі наведено розроблену методологію організації перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням і внутрішнім сумішоутворенням. Використовується уточнена термодинамічна модель робочого процесу, у якій застосовується зонний підхід. Газоповітряний тракт двотактного двигуна розбивається на відповідні зони за призначенням і для кожної зони складаються рівняння енергії, маси, рівняння стану і зміни об'єму зони. Модель з точністю до 5 % описує процеси та визначає параметри робочого тіла у впускних, випускних і робочих порожнинах двигуна з реальними теплофізичними властивостями. Оскільки досліджуються процеси газообміну, сумішоутворення, згоряння і стан робочого тіла, склад якого безперервно змінюється (повітря, паливоповітряна суміш, суміш паливоповітряної суміші і продуктів згоряння, суміш повітря з продуктами згоряння), то у формулі рівняння стану робочого тіла враховується газова стала для газової суміші R .

Для визначення параметрів робочого тіла з реальними теплофізичними властивостями у надпоршневому об'ємі ДВЗ з іскровим запалюванням і безпосереднім впорскуванням палива розроблена однозонна термодинамічна модель робочого процесу на підставі методу об'ємного балансу, який запропоновано М.М. Глаголевым. Модель враховує перебіг процесів внутрішнього сумішоутворення і теплофізичні процеси випаровування рідкого палива згідно з рівнянням

$$dV_{\text{но}} = dV_{\text{вт}} + dV_{\text{мфппс}} + dV_Q + dV_{\text{ад}}, \quad (1)$$

де $dV_{\text{но}}$ – зміна надпоршневого об'єму при переміщенні поршня; $dV_{\text{вт}}$ – зміна об'єму робочого тіла, який вийшов з циліндра внаслідок втрат через нещільності між поршневими кільцями і стінками циліндра; $dV_{\text{мфппс}}$ – зміна об'єму паливоповітряної суміші внаслідок фізичних процесів при випаровуванні рідкого палива; $dV_Q = dV_{Qw} + dV_{Q\text{вип}}$ – зміна об'єму робочого тіла в циліндрі внаслідок підведення зовнішньої теплоти, де dV_{Qw} – зміна об'єму робочого тіла внаслідок теплообміну зі стінками надпоршневого об'єму; $dV_{Q\text{вип}}$ – зміна об'єму паливоповітряної суміші $V_{\text{ппс}}$ з частиною продуктів згоряння при перебігу процесів випаровування палива.

Адіабатична зміна об'єму розширеного паливоповітряного заряду, що складається з об'єму паливоповітряної суміші ($V_{\text{ппс}}$) й об'єму повітря ($V_{\text{пов}}$) при відповідних показниках адіабати ($k_{\text{ппс}}$ та $k_{\text{пов}}$) та тиску (p) і зміні тиску (dp) у надпоршневому об'ємі за розглянутими об'ємами

$$dV_{\text{ад}} = -\frac{dp}{p} \left(\frac{V_{\text{ппс}}}{k_{\text{ппс}}} + \frac{V_{\text{пов}}}{k_{\text{пов}}} \right). \quad (2)$$

Для двотактного двигуна з іскровим запалюванням, кривошипно-камерним продуванням, повітряним охолодженням і безпосереднім упорскуванням палива розрахунок коефіцієнта тепловіддачі (α_w) при визначенні кількості теплоти внаслідок теплопередачі між робочим тілом і суміжними стінками (dQ_w) для ділянки стиснення здійснюється за відомою формулою Вошні, яка враховує турбулентність течії і значення коефіцієнта надлишку повітря, а для ділянки згоряння-розширення розрахунок коефіцієнта тепловіддачі визначається за скоригованою формулою

$$\alpha_w = 100 \cdot D^{-0,2} \cdot (p_i \cdot 10^{-5})^{0,75} \cdot T^{-0,55} \times \left[C_1 \cdot C_m + C_2 \cdot \frac{V_{ho} \cdot T_a}{p_a \cdot V_a} (p - p_0) \right]^{0,75}, \quad (3)$$

де D – діаметр циліндра, м; p, p_0 – тиск у надпоршневому об’ємі на працюючому ДВЗ і при прокручуванні відповідно, МПа; p_a, V_a, T_a – тиск (МПа), об’єм (m^3) і температура (K) у надпоршневому об’ємі відповідно в момент закриття органів газорозподілу; $C_1 = 2,28 + 0,308 \cdot (C_T / C_m)$ – константа на ділянці стиснення-згоряння-розширення (C_T і C_m – тангенціальна швидкість робочого тіла біля стінок надпоршневого об’єму і середня швидкість поршня відповідно, м/с); $C_2 = 2,24 \cdot 10^{-4}, K^{-1}$ – скоригована константа з урахуванням організації процесу об’ємно-плівкового сумішоутворення і згоряння розшарованого збідненого паливоповітряного заряду.

Випаровування бензину в паливному струмені з периферійним розподіленням часток палива визначається за уточненою моделлю на основі теорії аеродинамічного сліду Р.М. Петриченка. Сумарна кількість палива, що випаровується

$$dM_\Sigma = \frac{\pi^2 \cdot d^2 (1 + \chi)^{5/3} \cdot \Delta x_\Phi (\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta) \cdot (T_c - T_s) \alpha_0}{\chi_0 \cdot S_0 \cdot r_i \cdot u_0} \cdot \frac{x^2 \cdot dx}{1 + \chi \cdot e^{-k \frac{x}{d}}}, \quad (4)$$

де d – середній діаметр крапель; $\chi = m / m_0$ – відношення мас головної краплі і краплі, що рухається у сліді; Δx_Φ – глибина фронту струменя; α, β – зовнішній та внутрішній кути розкриття струменя відповідно; T_c – осереднена температура газу в камері згоряння; T_s – температура насичення краплі палива; α_0 – коефіцієнт тепловіддачі від газу до краплі; χ_0 – коефіцієнт зближення крапель уздовж осі фронту струменя; S_0 – середня відстань між краплями у фронті струменя; r_i – прихована теплота пароутворення; u_0 – швидкість витікання палива з форсунки; x – довжина струменя палива; k – декремент загасання швидкості руху краплі.

Зміна кількості теплоти з поверхні паливної плівки, що знаходиться на поверхнях камери згоряння, визначається за умови балансу теплоти, яка підведена і втрачена на її випаровування за методикою Л.Г. Спекторова.

Для розрахунку робочого процесу на такті стиснення з урахуванням процесів випаровування палива при внутрішньому сумішоутворенні узяті за основу однозонна модель із середніми показниками адіабати й температури у надпоршневому об’ємі, а зміна тиску вираховується за рівнянням

$$dp = p \cdot \frac{k}{V_{ho}} \cdot \left(\pm \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\pm dQ_w - dQ_{вип}}{p} - dV_{ho} \right). \quad (5)$$

Беручи до уваги, що температура на такті стиснення в об’ємі паливоповітряної суміші та в об’ємі повітря однакова і має середнє значення ($T_{сер}$), то якщо узяти $dp = (T_{сер} / V_{ho}) \cdot dV_{ho}$, зміна температури визначається за рівнянням

$$dT_{сер} = \frac{T_{сер}}{V_{ho}} \left(\frac{k-1}{k} \cdot \frac{V_{ho}}{p} dp + \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\pm dQ_w - dQ_{вип}}{p} \right). \quad (6)$$

Для визначення параметрів робочого тіла на режимах часткових навантажень при перебігу процесу згоряння розшарованого паливоповітряного заряду розроблена тризонна термодинамічна модель робочого процесу ДВЗ. У період згоряння в надпоршневому об’ємі (V_{ho}) двигуна утворюється три зони або три об’єми: об’єм про-

дуктів згоряння ($V_{пз}$) в зоні горіння, об'єм паливоповітряної суміші ($V_{ппс}$) з частиною продуктів згоряння ($V_{ппс}$) та об'єм повітря ($V_{пов}$) з частиною продуктів згоряння. Зони продуктів згоряння й паливоповітряної суміші розділені фронтом полум'я, зони паливоповітряної суміші і повітря умовно розділені між собою. Величини об'ємів зон пов'язані між собою співвідношенням $V_{пз} + V_{ппс} + V_{пов} = V_{но}$, а при повному охопленні полум'ям паливоповітряної суміші $V_{пз} + V_{пов} = V_{но}$. Співвідношення об'ємів за зонами складає: $v_{пз} = V_{пз} / V_{но}$ (зона продуктів згоряння); $v_{ппс} = V_{ппс} / V_{но}$ (зона паливоповітряної суміші); $v_{пов} = V_{пов} / V_{но}$ (зона повітря). З огляду на рух поршня і процес згоряння в циліндрі, зміна об'ємів за зонами відповідно складає: $dV_{пз} = -dV_{ппс}$; $dV_{ппс} = V_{ппс} \cdot dx$; $dV_{пов} = v_{пов} \cdot dV_{но}$. З урахуванням трьох зон в об'ємах $V_{пз}$, $V_{ппс}$ та $V_{пов}$ рівняння об'ємного балансу процесів горіння-розширення має вигляд

$$dV_{но} = dV_{ад} + dV_x + dV_Q, \quad (7)$$

де dV_x – зміна об'єму робочого тіла внаслідок зміни кількості молекул при хімічних процесах горіння; dV_Q – зміна об'єму робочого тіла внаслідок виділення теплоти при горінні палива dQ_x і теплообміну між зонами й стінками надпоршневого об'єму.

Адіабатична зміна об'єму розшарованого паливоповітряного заряду, що складається з об'єму продуктів згоряння ($V_{пз}$), об'єму паливоповітряної суміші ($V_{ппс}$) й об'єму повітря ($V_{пов}$) при відповідних показниках адіабати ($k_{пз}$, $k_{ппс}$ та $k_{пов}$) та тиску (p) й зміні тиску (dp) в надпоршневому об'ємі за розглянутими об'ємами

$$dV_{ад} = -\frac{dp}{p} \cdot \left(\frac{V_{пз}}{k_{пз}} + \frac{V_{ппс}}{k_{ппс}} + \frac{V_{пов}}{k_{пов}} \right). \quad (8)$$

Зміна теплового потоку для зони продуктів згоряння з температурою $T_{пз}$ враховує передачу теплоти ($dQ_{w,пз}$) в суміжні стінки надпоршневого об'єму з температурою T_w та передачу теплоти ($dQ_{т.пз-ппс}$) в зону паливоповітряної суміші з температурою $T_{ппс}$ через відповідні площі поверхні ($F_{w,пз}$ і $F_{т.пз-ппс}$), враховуючи радіаційний тепловий потік (dQ_R), який діє на всі площі поверхонь ($F_{пз}$), що оточують зону продуктів згоряння впродовж часу $d\tau$, описується рівнянням

$$\frac{dQ_{пз}}{d\tau} = \alpha_{пз} (T_{пз} - T_w) F_{w,пз} + k_{пз-ппс} (T_{пз} - T_{ппс}) F_{т.пз-ппс} + dQ_R, \quad (9)$$

де $\alpha_{пз}$ – коефіцієнт тепловіддачі для зони продуктів згоряння, що межує зі стінками надпоршневого об'єму; $k_{пз-ппс}$ – коефіцієнт теплопередачі між зонами продуктів згоряння і паливоповітряною сумішшю; dQ_R – променистий теплообмін.

Зміна теплового потоку для зони паливоповітряної суміші враховує передачу теплоти із зони продуктів згоряння в суміжні стінки і в зону повітря за проміжок часу $d\tau$ та розраховується за формулою

$$\frac{dQ_{ппс}}{d\tau} = \alpha_{ппс} (T_{ппс} - T_w) F_{w,ппс} + k_{пз-ппс} (T_{пз} - T_{ппс}) F_{т.пз-ппс} + k_{ппс-пов} (T_{ппс} - T_{пов}) F_{т.ппс-пов}. \quad (10)$$

Коефіцієнти теплопередачі k і тепловіддачі α між зонами продуктів згоряння і паливоповітряної суміші та суміжними стінками надпоршневого об'єму беруться за аналогією з зоною продуктів згоряння.

Зміна теплового потоку для зони повітря з температурою $T_{пов}$ враховує передачу теплоти в суміжні стінки циліндра з температурою T_w й у днище поршня з температурою $T_{пор}$. Під час згоряння зони паливоповітряної суміші передача теплоти

здійснюється із зони паливоповітряної суміші з урахуванням температури паливоповітряної суміші ($T_{\text{ппс}}$), а при повному згорянні зони паливоповітряної суміші передача теплоти відбувається із зони продуктів згоряння з температурою $T_{\text{пз}}$. Передача теплоти здійснюється через площі стінок ($F_{\text{w.пов}}$ і $F_{\text{w.пор}}$) і площі поділу між зонами ($F_{\text{т.ппс-пов}}$ і $F_{\text{т.пз-пов}}$) за проміжок часу dt і розраховується за рівнянням

$$\frac{dQ_{\text{пов}}}{d\tau} = \alpha_{\text{пов}} (T_{\text{пов}} - T_{\text{w}}) F_{\text{w.пов}} + \alpha_{\text{пов}} (T_{\text{пов}} - T_{\text{пор}}) F_{\text{w.пор}} + k_{\text{ппс-пов}} (T_{\text{рт}} - T_{\text{пов}}) F_{\text{т.ппс-пов}}, \quad (11)$$

де $T_{\text{рт}}$ – температура робочого тіла (паливоповітряної суміші або продуктів згоряння) у відповідний проміжок часу.

Зміна тиску в надпоршневому об'ємі з урахуванням об'ємів, які перебувають у зоні продуктів згоряння, у зоні паливоповітряної суміші і в зоні повітря

$$dp = p \frac{k_{\text{пз}} \cdot k_{\text{ппс}} \cdot k_{\text{пов}}}{V_{\text{пз}} \cdot k_{\text{ппс}} \cdot k_{\text{пов}} + V_{\text{ппс}} \cdot k_{\text{пз}} \cdot k_{\text{пов}} + V_{\text{пов}} \cdot k_{\text{пз}} \cdot k_{\text{ппс}}} \left[V_{\text{ппс}} (\beta - 1) dx + \frac{k - 1}{k} \cdot \frac{dQ_{\text{x}} - dQ_{\text{т}}}{p} - dV_{\text{но}} \right]. \quad (12)$$

Зміна температури робочого тіла в зонах продуктів згоряння ($dT_{\text{пз}}$), паливоповітряної суміші ($dT_{\text{ппс}}$) та повітря ($dT_{\text{пов}}$) з урахуванням теплообміну при $V_{\text{пз}} > 0$ розраховується відповідно за рівняннями:

$$dT_{\text{пз}} = \frac{1}{V_{\text{пз}} \cdot C_{\text{v.пз}}} \left[(dQ_{\text{x}} - dQ_{\text{w.пз}}) - C_{\text{v.пз}} \cdot T_{\text{пз}} \cdot dV_{\text{пз}} - p \cdot dV_{\text{пз}} \right]; \quad (13)$$

$$dT_{\text{ппс}} = \frac{k_{\text{ппс}} - 1}{k_{\text{ппс}}} \cdot T_{\text{ппс}} \cdot \frac{dp}{p} + \frac{T_{\text{ппс}}}{V_{\text{ппс}}} \cdot \frac{k_{\text{ппс}} - 1}{k_{\text{ппс}}} \cdot \frac{dQ_{\text{ппс}}}{p}; \quad (14)$$

$$dT_{\text{пов}} = \frac{k_{\text{пов}} - 1}{k_{\text{пов}}} \cdot T_{\text{пов}} \cdot \frac{dp}{p} + \frac{T_{\text{пов}}}{V_{\text{пов}}} \cdot \frac{k_{\text{пов}} - 1}{k_{\text{пов}}} \cdot \frac{dQ_{\text{пов}}}{p}, \quad (15)$$

де $C_{\text{v.пз}}$ – об'ємна ізохорна теплоємність продуктів згоряння.

Правильність обчислень перевіряється одночасним досягненням при закінченні процесу згоряння таких умов: $v_{\text{пз}} + v_{\text{пов}} = 1$; $V_{\text{пз}} + V_{\text{пов}} = V_{\text{но}}$ та $V_{\text{ппс}} = 0$.

З метою визначення параметрів робочого тіла на режимах підвищених навантажень, коли паливоповітряна суміш займає всю надпоршкову порожнину, розроблена двозонна термодинамічна модель робочого процесу ДВЗ. У період згоряння в надпоршневому об'ємі ($V_{\text{но}}$) двигуна утворюються дві зони або два об'єми: об'єм продуктів згоряння ($V_{\text{пз}}$) в зоні горіння й об'єм паливоповітряної суміші ($V_{\text{ппс}}$) з частиною продуктів згоряння, що залишилися від попереднього циклу.

Величини об'ємів зон продуктів згоряння і паливоповітряної суміші при перебігу процесів горіння-розширення пов'язані між собою співвідношенням $V_{\text{пз}} + V_{\text{ппс}} = V_{\text{но}}$. При повному охопленні полум'ям паливоповітряної суміші (завершення процесів горіння) і при розширенні $V_{\text{пз}} = V_{\text{но}}$. Співвідношення об'ємів за зонами складає: $v_{\text{пз}} = V_{\text{пз}} / V_{\text{но}}$ (зона продуктів згоряння); $v_{\text{ппс}} = V_{\text{ппс}} / V_{\text{но}}$ (зона паливоповітряної суміші). При урахуванні руху поршня й перебігу процесу згоряння зміна об'ємів за зонами відповідно складає: $dV_{\text{пз}} = -dV_{\text{ппс}}$ та $dV_{\text{ппс}} = V_{\text{ппс}} \cdot dx$.

Для двозонної моделі згоряння використовується рівняння (8) з уточненням

$$dV_{\text{ад}} = -\frac{dp}{p} \cdot \left(\frac{V_{\text{пз}}}{k_{\text{пз}}} + \frac{V_{\text{ппс}}}{k_{\text{ппс}}} \right). \quad (16)$$

Позначення у формулах двозонної моделі згоряння, а також розрахунки зміни об'єму робочого тіла внаслідок підведення теплоти і теплообміну між зонами проду-

ктів згоряння і паливоповітряної суміші та стінками аналогічні тризонній моделі.

Зміна теплового потоку для зони паливоповітряної суміші враховує передачу теплоти із зони продуктів згоряння ($dQ_{\text{т.пз-ппс}}$) та у суміжні стінки ($dQ_{\text{w.ппс}}$) за проміжок часу $d\tau$

$$\frac{dQ_{\text{ппс}}}{d\tau} = \alpha_{\text{ппс}} (T_{\text{ппс}} - T_{\text{w}}) F_{\text{w.ппс}} + k_{\text{пз-ппс}} (T_{\text{пз}} - T_{\text{ппс}}) F_{\text{т.пз-ппс}}. \quad (17)$$

Коефіцієнти k і α при розрахунку передачі теплоти між зонами продуктів згоряння і паливоповітряної суміші та суміжними стінками, а також значення площ контакту зон беруться за аналогією з тризонною моделлю.

Зміна тиску в надпоршневому об'ємі з урахуванням зміни об'ємів у зонах продуктів згоряння та паливоповітряної суміші розраховується за рівнянням

$$dp = p \frac{k_{\text{пз}} \cdot k_{\text{ппс}}}{V_{\text{пз}} \cdot k_{\text{ппс}} + V_{\text{ппс}} \cdot k_{\text{пз}}} \left[V_{\text{ппс}} \cdot (\beta - 1) \cdot dx + \frac{k - 1}{k} \cdot \frac{dQ_{\text{х}} - dQ_{\text{т}}}{p} - dV_{\text{но}} \right]. \quad (18)$$

Зміна температури робочого тіла в зонах продуктів згоряння і паливоповітряної суміші визначається за аналогією з тризонною моделлю (13) і (14). При закінченні процесу згоряння повинні виконуватись умови: $v_{\text{пз}} = 1$ і $V_{\text{пз}} = V_{\text{но}}$.

Наведені тризонна та двозонна моделі розрахунку робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням (з розшаруванням і без розшарування паливоповітряного заряду) дозволяють визначити параметри робочого тіла в зонах надпоршневого об'єму залежно від особливостей організації внутрішнього сумішоутворення.

Третій розділ присвячений практичній розробці та впровадженню перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалювання і безпосереднім упорскуванням палива для двотактного та чотиритактного двигунів. У цьому розділі окреслено конструктивні особливості системи безпосереднього впорскування палива, якими є механічний паливний насос, клапанна форсунка з базовим розпилювачем та розроблений штифтовий розпилювач. Зазначено, що ці особливості надають можливість організувати розшарування паливоповітряного заряду в надпоршневому об'ємі.

Наведено опис особливостей нових робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням з метою організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду на режимах часткових навантажень (рис. 1) та гомогенної паливоповітряної суміші практично по всьому надпоршневому об'єму при максимальних навантаженнях (рис. 2).

Доведено, що застосування розроблених робочих процесів дозволяє використовувати різні види палива (бензин, гас, дизельне паливо, газовий конденсат, спирти та їхні суміші).

У розділі відтворено реалізацію перспективних робочих процесів при безпосередньому впорскуванні палива на: двотактному двигуні 1Д 8,2/8,7 з іскровим запалюванням виробництва заводу «Гідромаш» (м. Мелітополь), який можливо використовувати як механічний привід водяних насосів, різних транспортних засобів малої вантажопідйомності, – мотокарах, підйомниках, вантажних візках, на мотоблоках, міні-тракторах, мобільних електростанціях (наведена конструкторська розробка в середовищі *SOLIDWORKS*), зварювальних апаратах та інших засобах малої механізації; на чотиритактному двигуні 2Ч 7,8/6,8 з іскровим запалюванням (наведено конструювання твердотільної моделі модернізованого двигуна в середовищі *SOLIDWORKS*) виробництва «Київський мотоциклетний завод» для важких мотоциклів та мініавтомобілів.

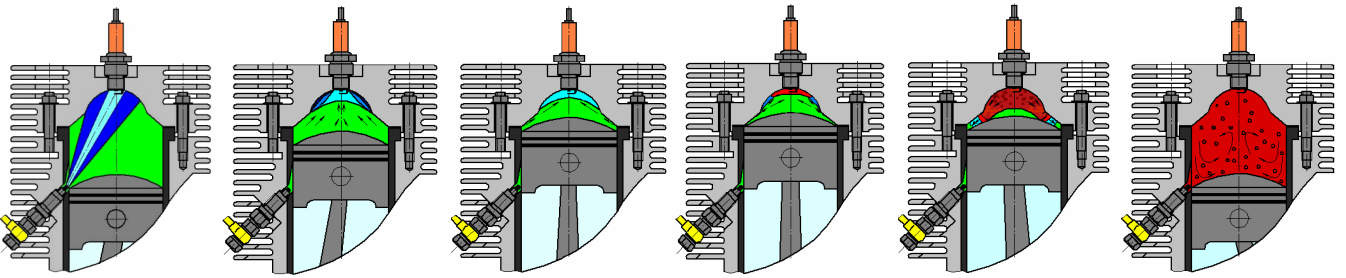


Рисунок 1 – Візуалізація робочого процесу з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду

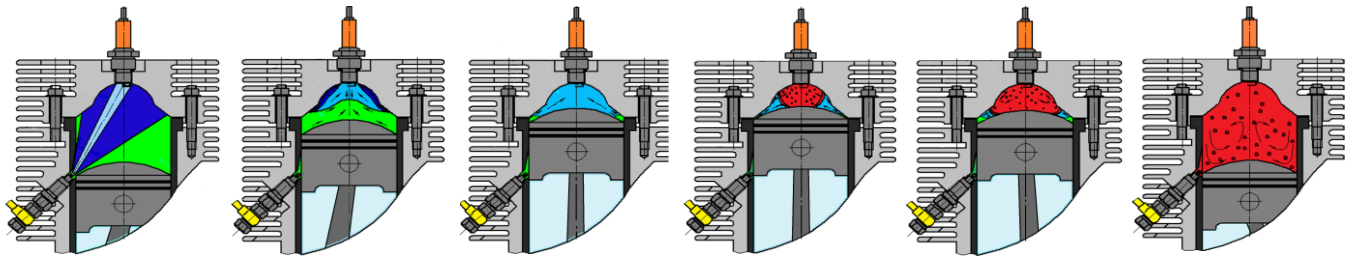


Рисунок 2 – Візуалізація робочого процесу з гомогенним паливоповітряним зарядом

У четвертому розділі наведено синтез методів та методик, які є розвитком теорії ДВЗ щодо визначення показників двигунів з іскровим запалюванням.

Подано метод розрахунку термодинамічного циклу з підведенням теплоти при $V = \text{const}$ та залежність визначення термодинамічного к.к.д. циклу ДВЗ з урахуванням реальних властивостей робочого тіла ($\eta_{t \text{ real}}$), який оцінює досконалість реалізації робочого процесу.

З огляду на те, що у двотактних двигунах з іскровим запалюванням і зовнішнім сумішоутворенням частина палива проходить транзитом через циліндр при продувці і не бере участі в згорянні, проте враховується в загальній витраті палива, пропонується, з метою безпомилкової оцінки визначення індикаторних показників двотактного ДВЗ із зовнішнім сумішоутворенням, враховувати цей факт. Таким чином, індикаторний к.к.д. ДВЗ потрібно визначати за залежністю

$$\eta_i = \frac{L_i}{(G_{\text{п}} - G_{\text{п.втр}}) \cdot Q_{\text{н}}} = \frac{L_i}{G_{\text{п}} \cdot (1 - \psi_{\text{втр}}) \cdot Q_{\text{н}}}, \quad (19)$$

де L_i – індикаторна робота циклу; а величина $\psi_{\text{втр}}$, що є коефіцієнтом втрат палива, розраховується за формулою

$$\psi_{\text{втр}} = G_{\text{п.втр}} / G_{\text{п}}, \quad (20)$$

де $G_{\text{п.втр}}$ – втрати палива при продувці циліндра паливоповітряною сумішшю (у двотактному двигуні із зовнішнім сумішоутворенням); $G_{\text{п}}$ – сумарна циклова подача палива, що надійшла у двигун; $Q_{\text{н}}$ – нижча теплота згоряння палива.

Тоді для оцінки питомої індикаторної витрати палива використовується формула

$$g_i = \frac{G_{\text{п.год}} \cdot (1 - \psi_{\text{втр}})}{N_i}, \quad (21)$$

де N_i – індикаторна потужність ДВЗ; $G_{\text{п.год}} = 120 G_{\text{п}} \cdot n \cdot z / i$ – годинна витрата палива; n – частота обертання колінчастого валу; z – кількість циліндрів; i – тактність ДВЗ.

Залежність визначення ефективного к.к.д. ДВЗ з урахуванням частини палива, яка не бере участі при згорянні в циліндрі, визначається таким чином:

$$\eta_e = \frac{3,6}{g_e \cdot Q_H} = \frac{3,6 \cdot N_e}{G_{п.год} \cdot Q_H} = \frac{3,6 \cdot G_{п.год} (1 - \psi_{втр})}{g_i \cdot G_{п.год} \cdot Q_H} \eta_m = \frac{3,6 (1 - \psi_{втр})}{g_i \cdot Q_H} \eta_m = \eta_i \cdot \eta_m (1 - \psi_{втр}), \quad (22)$$

де $\eta_m = N_e / N_i$ – механічний к.к.д. двигуна (N_e – ефективна потужність ДВЗ).

Впроваджено поняття параметру робочого процесу – критерій розшарування паливоповітряного заряду, – який дозволяє кількісно оцінювати границю ефективного збіднення паливоповітряного заряду в циліндрі ДВЗ з іскровим запалюванням. Критерій L враховує наступні характеристики: перевищення значення коефіцієнта надлишку повітря при нижній границі розповсюдження фронту полум'я ($\alpha_{р.ф.п.}$) в бензоповітряних сумішах ДВЗ з іскровим запалюванням; сумарний коефіцієнт надлишку повітря (α_Σ); коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі ($\alpha_{цил}$) двигуна; коефіцієнт витoku продувного повітря або паливоповітряної суміші (ν) та чисельно визначається за залежністю

$$L = \frac{\alpha_{цил} - \alpha_{р.ф.п.}}{\alpha_{р.ф.п.}} = \frac{(\alpha_\Sigma - \alpha_\Sigma \cdot \nu) - \alpha_{р.ф.п.}}{\alpha_{р.ф.п.}}. \quad (23)$$

Значення $\alpha_{р.ф.п.}$ залежить від тиску, температури, якості та складу палива в циліндрі, а також від інтенсивності підведення окиснювача в зону горіння. У першому наближенні як значення пропонується використовувати нижню границю поширення фронту полум'я в бензоповітряних сумішах ДВЗ з іскровим запалюванням на рівні $\alpha_{р.ф.п.} = 1,35$.

Для якісної оцінки особливостей організації робочого процесу у двигуні з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні і згорянні розшарованого паливоповітряного заряду пропонується використовувати параметр – ступінь розшарування паливоповітряного заряду, який вираховується за формулою

$$\varepsilon_L = \alpha_{цил} / \bar{\alpha}_{ппс}, \quad (24)$$

де $\alpha_{цил}$ – коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі; $\bar{\alpha}_{ппс}$ – осереднений коефіцієнт надлишку повітря в об'ємі паливоповітряної суміші на момент її займання, що відповідає куту випередження запалювання θ_3 .

Фізичний сенс цього параметра є таким: при значеннях ступеня розшарування паливоповітряного заряду $\varepsilon_L > 1$ в надпоршневому об'ємі має місце розподіл складу паливоповітряної суміші або паливоповітряної суміші і повітря шарами, а при значеннях $\alpha_{цил} = \bar{\alpha}_{ппс}$ і відповідно $\varepsilon_L = 1$, – розшарування паливоповітряного заряду відсутнє, що характеризується відносно рівномірним розподілом часток палива по всьому надпоршневому об'єму.

У п'ятому розділі наведені результати розрахунково-експериментальних досліджень двигунів, отримані за допомогою реалізації в них перспективних робочих процесів.

Проведене експериментальне дослідження роботи двигуна 1Д 8,2/8,7 з іскровим запалюванням за навантажувальною характеристикою ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) при раціональних моментах упорскування та запалювання максимальної циклової подачі палива при організації збідненого паливоповітряного заряду по всьому надпоршневому об'єму, розшарованого паливоповітряного заряду та розшарованого збідненого паливоповітряного заряду. Аналіз результатів дозволив встановити, що із застосуванням розшарованого збідненого паливоповітряного заряду досягається найбільше

максимальне навантаження ($p_e = 0,476$ МПа) за рахунок зниження гідравлічних втрат та поліпшення умов перебігу процесів газообміну; знижується значення g_e на 2–8 % у порівнянні з розшарованим паливоповітряним зарядом і на 16–27 % відносно збідненого паливоповітряного заряду, до 14 разів зменшуються викиди CO і CH з ВГ внаслідок збільшення $\alpha_{\text{цил.}}$. Тому ухвалено, що подальший розгляд особливостей організації робочого процесу ДВЗ доцільно проводити для розшарованого паливоповітряного заряду і розшарованого збідненого паливоповітряного заряду.

Дослідження процесів газообміну. Одержано емпіричні залежності коефіцієнта витрати (μ) продувного і випускного каналів у циліндрі ДВЗ 1Д 8,2/8,7, емпіричні залежності коефіцієнта витоку (ν) продувного повітря та коефіцієнта залишкових газів (γ) на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000$ хв⁻¹) та зовнішньої швидкісної характеристики, які використовуються при моделюванні процесів газообміну. При організації розшарованого паливоповітряного заряду і розшарованого збідненого паливоповітряного заряду на режимах навантажувальної характеристики експериментально одержані теплофізичні властивості робочого тіла та створені інтерполяційні залежності з метою визначення істинної масової ізобарної теплоємності C_{pm}

робочого тіла на такті стиснення, які враховують значення γ , $\alpha_{\text{цил.}}$ і розрідження на впуску ($\Delta P_{\text{др}}$) й використовуються в газодинамічній і термодинамічній моделях розрахунку робочого процесу ДВЗ (рис. 3, на рисунках у подальшому вжито наступні скорочення: РППЗ – розшарований паливоповітряний заряд, РЗППЗ – розшарований збіднений паливоповітряний заряд, БВП – безпосереднє впорскування палива, КЗ – камера згоряння).

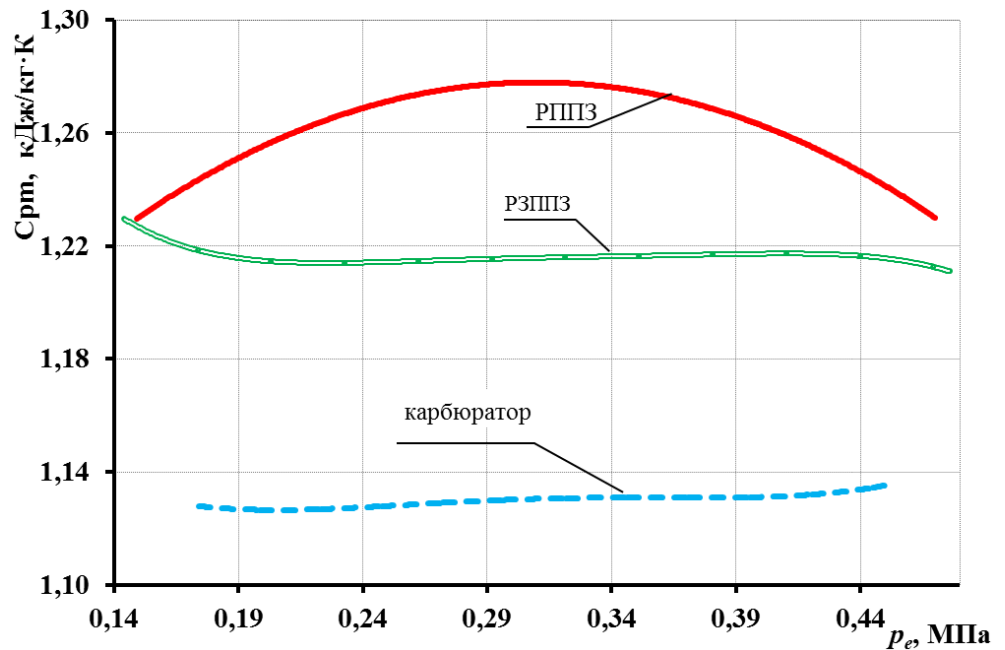


Рисунок 3 – Зміна значень теплоємності реального робочого тіла при організації РППЗ, РЗППЗ і використанні карбюратора залежно від навантаження при $n = 3000$ хв⁻¹

У результаті 3-D моделювання процесів газообміну двигуна 1Д 8,2/8,7 з карбюратором та напівсферичною симетричною камерою згоряння у програмному комплексі *MTFS* на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000$ хв⁻¹) одержані значення маси свіжого заряду ($G_{\text{св.зар.цил.}}$) і продуктів згоряння ($G_{\text{пз.цил.}}$) в циліндрі двигуна, які відрізняються від експериментальних даних не більше, ніж на 3 %. Визначено значення коефіцієнта залишкових газів γ . Встановлено, що з підвищенням навантаження рівень γ знижується з 0,24 до 0,17 (рис. 4).

Під час використання безпосереднього впорскування палива і організації розшарованого паливоповітряного заряду та зміщеної до випускного вікна напівсфери-

чної камери згоряння розрахункове значення $G_{\text{св.зар.цил}}$ у діапазоні підвищених навантажень практично не відрізняється від експериментальних даних. Зі зниженням навантаження різниця між теоретичними та експериментальними даними зростає до 7 %, а рівень γ знижується з 0,15 до 0,13. При організації розширеного збідненого паливоповітряного за-

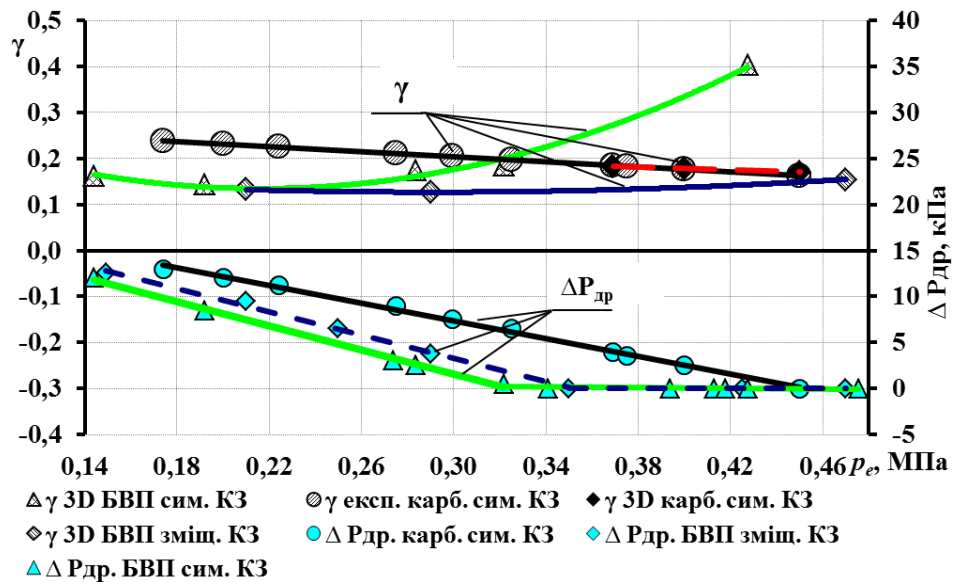


Рисунок 4 – Зміна значень γ і $\Delta P_{\text{др}}$ ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з карбюратором та БВП при організації РППЗ і РЗППЗ

ряду в симетричній напівсферичній камері згоряння і 3-D моделюванні процесів газообміну (рис. 5) кількість $G_{\text{св.зар.цил}}$ зі зниженням до середніх навантажень практично відповідає експериментальним даним. На режимах мінімальних навантажень різниця між експериментальними та теоретичними даними зростає до 9 %.

З підвищенням навантаження рівень γ знижується з 0,16 до 0,13 ($p_e = 0,192$ МПа), а при подальшому підвищенні до $p_e = 0,428$ МПа значення γ зростає до 0,4 (рис. 4).

При експериментальних дослідженнях на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000$ хв⁻¹) встановлено, що в ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з карбюратором (кількісне регулювання потужності) дроселювання свіжого заряду на впуску ($\Delta P_{\text{др}}$) (рис. 4) сприяє зниженню значень коефіцієнтів ϕ_0 та η_v понад 16 % порівняно з безпосереднім впорскуванням палива і комбінованим регулюванням потужності. Максимальні значення $\phi_0 = 0,7$ і $\eta_v = 0,52$ з безпосереднім впорскуванням палива при розширеному паливоповітряному заряді та розширеному збідненому паливоповітряному заряді, що перебувають на режимах максимальних навантажень p_e . При зниженні p_e значення ϕ_0 і η_v з розшированим збідненим паливоповітряним зарядом перевищують до 9 % значення з розшированим паливоповітряним зарядом, що обумовлено зниженням дроселювання повітряного заряду на впуску.

Найбільші значення к.к.д. продувки $\eta_s = 0,87$ – $0,88$ в діапазоні середніх та підвищених навантажень досягаються при застосуванні напівсферичної камери згоряння, яка зміщена до випускного вікна (безпосереднє впорскування палива і розширення паливоповітряного заряду). Застосування напівсферичної симетричної камери згоряння меншого об'єму з підвищенням p_e і збільшенням γ спричиняє до зниження η_s до 0,71

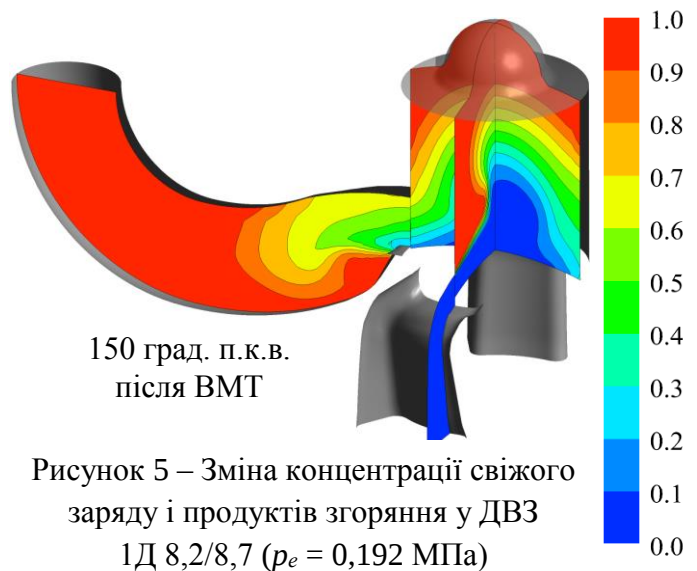


Рисунок 5 – Зміна концентрації свіжого заряду і продуктів згоряння у ДВЗ 1Д 8,2/8,7 ($p_e = 0,192$ МПа)

(безпосереднє впорскування палива і розшарування збідненого паливоповітряного заряду). Використання напівсферичної симетричної камери згоряння з відносно великим об'ємом (карбюраторна система живлення) з підвищенням p_e сприяє поліпшенню якості очищення надпоршневого об'єму від продуктів згоряння, зниженню γ , що зумовлює підвищення η_s до 0,86 при максимальному навантаженні.

Аналіз результатів 3-D моделювання процесу газообміну при організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду у ДВЗ 1Д 8,2/8,7 щодо навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) в середовищі *AVL FIRE* дозволив зробити наступні висновки: резонансний глушник доцільно застосовувати на режимах часткових навантажень; раціональний момент початку подачі палива в циліндр складає $\phi_{\text{впор}} = 150\text{--}220$ град. п.к.в. після ВМТ. Результати 3-D моделювання в середовищі *AVL FIRE* адекватно корелюються з експериментальними даними і результатами, які одержані за допомогою програмного комплексу *MTFS*.

Розбіжність між результатами при 3-D моделюванні на основі методу крупних часток і експериментальними даними на режимах зовнішньої швидкісної характеристики ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з карбюратором для коефіцієнтів газообміну складає: ϕ_o – до 7,8 %; η_v – 1,8 %; v – до 13,6 %; γ – до 10 %. На режимі $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ результати 3-D моделювання з застосуванням методу крупних часток відрізняються від даних експерименту ($\gamma = 0,166$) на 1,8 % і узгоджуються з результатом розрахунку ($\gamma = 0,17$), які одержані при 3-D моделюванні у комплексі *MTFS* на цьому режимі роботи ДВЗ.

Проведено порівняння показників газообміну ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива і організації розшарованого паливоповітряного заряду, які визначені за термодинамічною моделлю та 3-D газодинамічною моделлю в програмному комплексі *MTFS* з експериментальними даними на режимах навантажувальної характеристики при $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ (рис. 6, на рисунку вжито скорочення ТДМ – термодинамічна модель).

Відмінність теоретичних результатів ϕ_o , які одержані за термодинамічною моделлю стосовно експерименту, зростає до 4,1 % з підвищенням до максимального навантаження. При 3-D моделюванні в комплексі *MTFS* значення ϕ_o практично відповідають експерименту. Рівень максимального значення η_v результатів термодинамічного моделювання до 9 % менше даних експерименту при максимальному навантаженні.

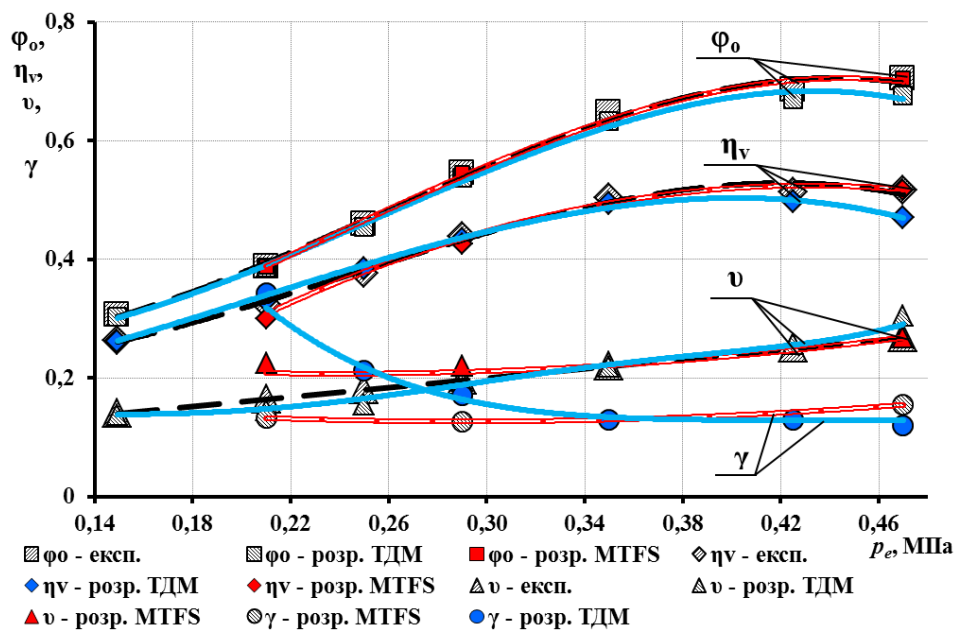


Рисунок 6 – Теоретичні та експериментальні значення показників газообміну: ϕ_o , η_v , v при ТДМ та 3-D моделюванні в комплексі *MTFS*, й γ при 3-D моделюванні (*MTFS*) та ТДМ у ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з БВП та організацією РППЗ

Зі зниженням p_e до 0,21 МПа рівень значень η_v при термодинамічному моделюванні на 1,8 % вище експериментальних даних ($\eta_v = 0,324$), а при моделюванні в комплексі *MTFS* на 6,25 % нижче. При $p_e = 0,15$ МПа відмінність між результатами термодинамічного моделювання і експериментом скорочується до 1,5 %. Взаємний характер зміни значень η_v при термодинамічному моделюванні, у комплексі *MTFS* і при експерименті залежно від p_e узгоджується з кількістю втраченого свіжого заряду під час продування, що характеризується коефіцієнтом витоку продувного повітря v . Рівень розрахункових значень γ при $p_e = 0,47$ МПа, який визначено за термодинамічною моделлю, становить 0,12, а при 3-D моделюванні в комплексі *MTFS* – 0,15. При зниженні до $p_e = 0,21$ МПа та термодинамічному моделюванні рівень γ зростає до 0,34, а при 3-D моделюванні становить 0,13.

Використання 3-D моделювання процесу газообміну в більшій мірі враховує особливості перебігу процесів витиснення і локального змішування свіжого заряду з продуктами згоряння в циліндрі двигуна при визначенні γ порівняно з термодинамічним моделюванням. Підтвердження адекватності визначення значень γ 3-D моделюванням у комплексі *MTFS*, у середовищі *AVL FIRE* та використанні методу крупних часток дозволяє зробити висновок, що з метою визначення показників газообміну доцільно використовувати 3-D моделювання.

Для визначення інтенсивності і напрямку руху робочого тіла на тактах впуску і стиснення в проточній порожнині впускного каналу і в циліндрі двигуна 2Ч 7,8/6,8 на режимі максимальної потужності проведено 3-D моделювання газодинамічних процесів у комплексі *MTFS*. Визначено, що найбільша інтенсивність руху робочого тіла в циліндрі відповідає осьовій швидкості, яка на такті впуску досягає 15,7 м/с, а на такті стиснення – 5,77 м/с. Одержані значення $\eta_v = 0,891$ і $\gamma = 0,039$. Параметри й інтенсивність руху робочого тіла використані під час досліджень процесів сумішоутворення і визначення показників двигуна.

Дослідження процесів внутрішнього сумішоутворення. Процеси динаміки та масо- і теплообміну в паливному струмені з периферійним розподілом бензину А-80 у ДВЗ з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива та організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду досліджуються з використанням уточненої моделі на основі теорії аеродинамічного сліду та експериментальних даних. Для уточнення моделі руху паливного струменя і його фронту результати розрахунків порівняно з даними експериментальних досліджень, які отримані шляхом кінореєстрації. При уточненні функції χ , яка характеризує відношення мас головної краплі і краплі, що рухається в сліді, результати розрахунків практично відповідають результатам експерименту (рис. 7).

На безмоторному стенді визначені значення зовнішнього кута (α), який збільшується від 29° до 40° при збільшенні циклової подачі палива ($V_{\text{ц}}$) від 5,5 до 19,8 мг/цикл і внутрішнього кута (β), який за таких умов, з підвищенням $V_{\text{ц}}$ до 15 мг/цикл, збільшується до 11° , а при подальшому збільшенні $V_{\text{ц}}$ – зменшується до 9° . Залежно від режиму роботи ДВЗ 1Д 8,2/8,7 на експериментальному стенді зареєстровані характеристики паливоподачі у вигляді осцилограм зміни тиску палива за часом перед розпилювачем форсунки. Одержані апроксимаційні залежності інтенсивності руху паливного струменя, значення коефіцієнта надлишку повітря в його тілі, які використовуються при моделюванні процесів внутрішнього сумішоутворення (рис. 8).

Під час досліджень процесів внутрішнього сумішоутворення у ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з напівсферичною симетричною камерою згоряння одержана залежність зміни площі паливної плівки та зміни температури поверхні камери згоряння за навантажувальною характеристикою при $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$, визначена апроксимаційна залежність тривалості випаровування бензину зі зміною $V_{\text{ц}}$ (рис. 8). Випаровування максимальної $V_{\text{ц}}$ закінчується за 66 град. п.к.в. до моменту запалювання ($\Theta_3 = 15$ град. п.к.в. до ВМТ).

Проведені дослідження процесів внутрішнього сумішоутворення чотиритактного двигуна 2Ч 7,8/6,8 з іскровим запалюванням та безпосереднім впорскування палива. Встановлено, що процес випаровування бензину за максимальної потужності і $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ закінчується за 37 град. п.к.в. до ВМТ, за таких умов $\Theta_3 = 30$ град. п.к.в. до ВМТ.

Дослідження процесів згоряння. Проведено аналіз показників процесу згоряння двигуна 1Д 8,2/8,7 з іскровим запалюванням, карбюратором та системою безпосереднього впорскування палива при організації розшарованого паливоповітряного заряду і розшарованого збідненого паливоповітряного заряду за даними експериментальних індикаторних діаграм на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$). Одержані емпіричні залежності від навантаження (p_e): зміни значень тиску в точках c' , p_z ; ступеня підвищення тиску λ ; ступеня попереднього розширення ρ ; ступеня подальшого розширення δ ; показника характеру згоряння m ; зміни значень швидкості тепловиділення $dx/df_{i \text{ max}}$; тривалості згоряння від ВМТ до точки Z (ϕ_z); загальної тривалості процесу згоряння ($d\phi_z$).

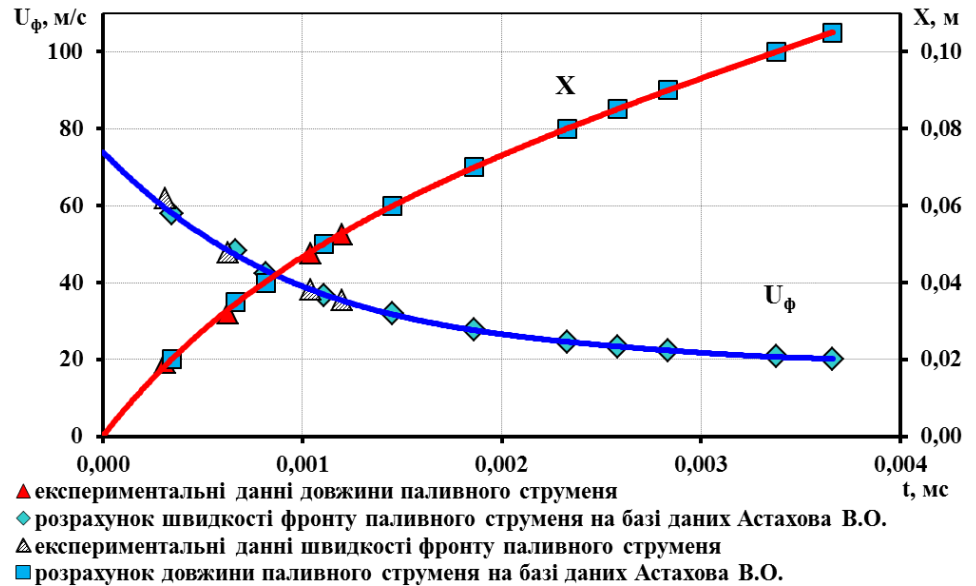


Рисунок 7 – Інтенсивність руху паливного струменя

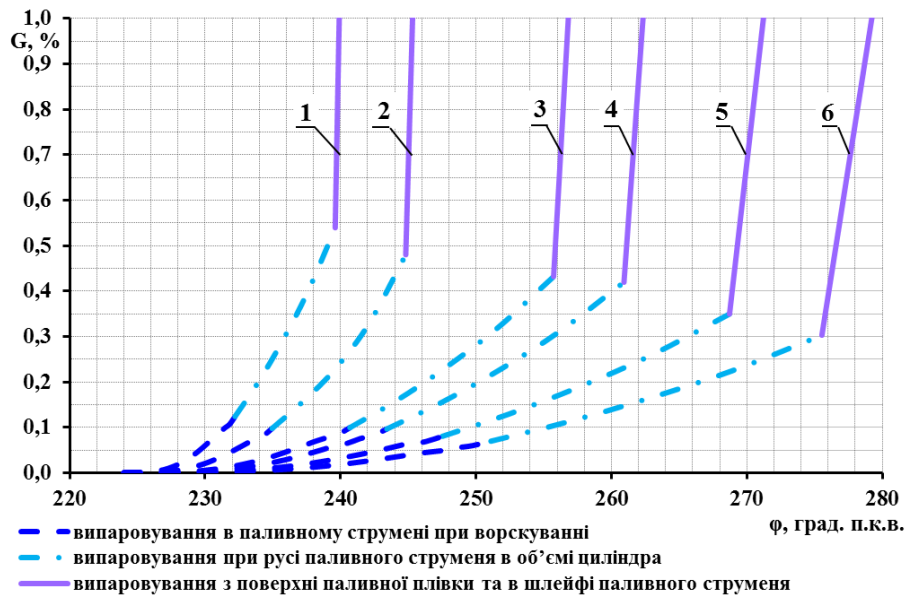


Рисунок 8 – Процеси внутрішнього сумішоутворення у ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з БВП та організацією РЗППЗ:

- 1 – $V_{\text{ц}} = 5,5 \text{ мг/цикл}$; 2 – $V_{\text{ц}} = 6,35 \text{ мг/цикл}$;
3 – $V_{\text{ц}} = 9,39 \text{ мг/цикл}$; 4 – $V_{\text{ц}} = 10,63 \text{ мг/цикл}$;
5 – $V_{\text{ц}} = 14,87 \text{ мг/цикл}$; 6 – $V_{\text{ц}} = 18,18 \text{ мг/цикл}$

Використовуючи індикаторні діаграми та метод Вібе, розраховано характеристики вигорання палива x , за якими визначено інтенсивність перебігу процесу згоряння та моменти закінчення згоряння на відповідних навантажувальних режимах при організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду (рис. 9). Встановлено, що тривалість згоряння палива ϕ_{Σ} збільшується з 29 до 42 град. п.к.в. з підвищенням навантаження p_e від 0,144 до 0,428 МПа. У підсумку визначено, що організація робочого процесу з розширенням збідненого паливоповітряного заряду дозволяє знизити теплові втрати на ділянці горіння-розширення і підвищити рівень η_i двигуна.

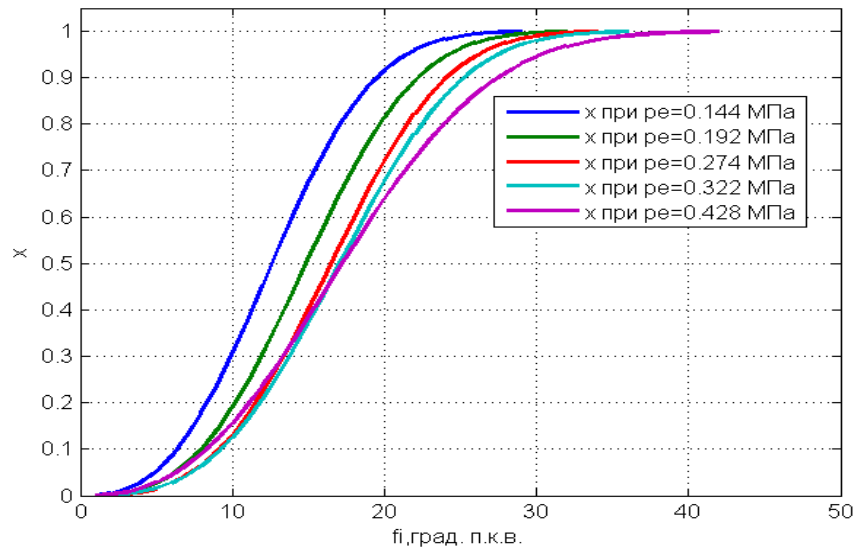


Рисунок 9 – Характеристики вигорання палива x у ДВЗ 1Д 8,2/8,7 з БВП та організацією РЗППЗ

Аналіз результатів моделювання робочого процесу двигуна 1Д 8,2/8,7 з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива і організації розширеного паливоповітряного заряду і розширеного збідненого паливоповітряного заряду на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) показав, що максимальне відхилення рівня тисків у циліндрі ДВЗ при організації розширеного паливоповітряного заряду за теоретичною індикаторною діаграмою, яка одержана за допомогою термодинамічної моделі, та експериментальною індикаторною діаграмою становить до 5 %. Розбіжність значень N_e та g_e при термодинамічному моделюванні робочого процесу та експериментальними даними складає до 4,3 %.

Проведено порівняння результатів моделювання робочого процесу ДВЗ при організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду на режимах навантажувальної характеристики при $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$, які одержані при розрахунку за однозонною, двозонною та тризонною термодинамічними моделями згоряння за даними експерименту. При моделюванні за однозонною моделлю максимальна розбіжність рівня значень по p_z щодо експерименту становить 5,4 % на режимі підвищеного навантаження ($p_e = 0,428 \text{ МПа}$), застосування двозонної моделі надає можливість знизити розбіжність з експериментом до 1,7 %.

Аналіз проведених досліджень на режимах часткових навантажень ($p_e = 0,144\text{--}0,322 \text{ МПа}$) при організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду показує (рис. 10), що доцільно використовувати тризонну модель згоряння зі зміною об'єму паливоповітряної суміші на момент займання та застосовувати кориговану формулу тепловіддачі Вошні (3) для ділянки згоряння-розширення, що дозволяє знизити розбіжність значень щодо p_z з експериментом до 5 %.

На підставі одержаних значень середнього індикаторного тиску (p_i) в результаті обробки теоретичних і експериментальних індикаторних діаграм визначена індикаторна потужність (N_i) ДВЗ 1Д 8,2/8,7 при організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду на режимах навантажувальної характеристики при

$n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ (рис. 11). Максимальна відміна результатів моделювання від експериментальних даних щодо N_i складає 0,7 % ($p_e = 0,322 \text{ МПа}$). Найбільше відхилення значень моделювання g_e залежно від результатів експериментальних досліджень знаходиться в діапазоні мінімальних навантажень ($p_e = 0,144\text{--}0,192 \text{ МПа}$) та не перевищує 2,3 %.

У шостому розділі репрезентовано результати експериментальних досліджень двигуна 1Д 8,2/8,7 з іскровим запалюванням при організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду на режимах навантажувальної характеристики при $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ з раціональним способом регулювання потужності, моментом паливоподачі, кутом випередження запалювання, з використанням гальваноплазмового покриття поверхонь поршня й камери згоряння та одержанням граничної економічності за складом паливоповітряної суміші.

Характеристика граничної економічності (рис. 12) побудована на основі регульовальних характеристик (режими А, Б, В, Г) за складом паливоповітряної суміші в циліндрі $\alpha_{\text{цил}}$ при фіксованій цикловій подачі палива $V_{\text{ц}}$ і постійній частоті обертання колінчастого валу $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$. Так, на режимі В ($V_{\text{ц}} = 9,39 \text{ мг/цикл}$) на кожній точці регульовальної характеристики зареєстрована зміна тиску в циліндрі двигуна у вигляді індикаторних діаграм (рис. 13). З підвищенням $\alpha_{\text{цил}}$ від 1,33 до потужнісного складу паливоповітряного заряду $\alpha_{\text{цил.пот}} = 1,36$, що забезпечує максимальне значення середнього ефективного тиску $p_{\text{еmax}} = 0,288 \text{ МПа}$ (рис. 12) (режим В), зріс і максимальний тиск згоряння p_z , який змінюється від 4,24 до 4,44 МПа (рис. 13).

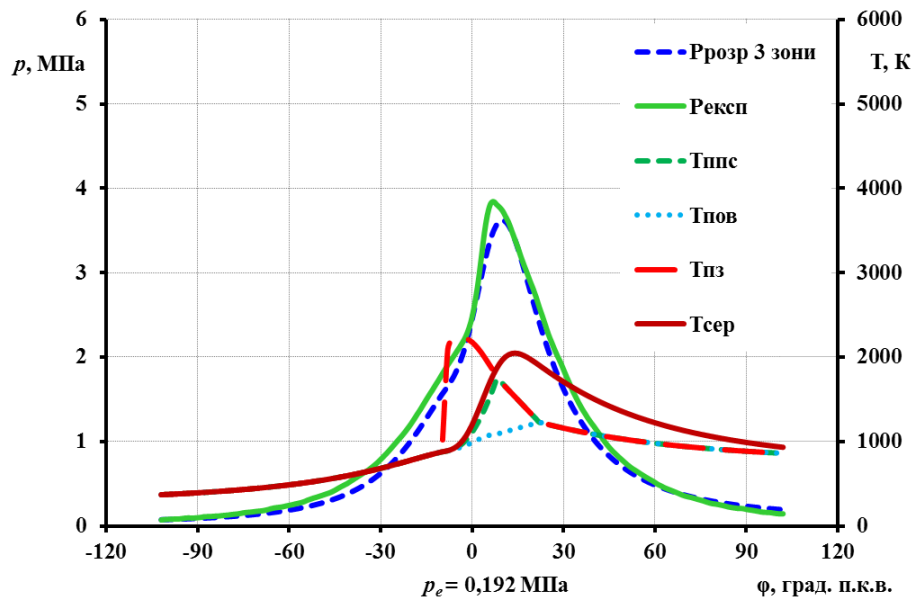


Рисунок 10 – Теоретичні та експериментальні індикаторні діаграми, розрахункові температури в зонах: продуктів згоряння, паливоповітряної суміші і повітря, які визначені по тризонній моделі згоряння

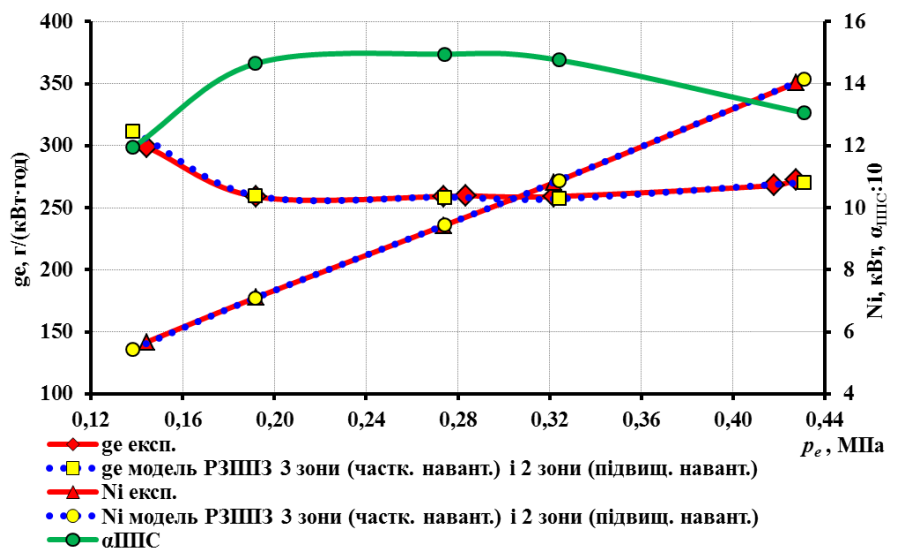


Рисунок 11 – Порівняння значень g_e та N_i , які одержані при експериментальних дослідженнях і при моделюванні робочого процесу з РЗППЗ і коефіцієнтом надлишку повітря у паливоповітряній суміші ($\alpha_{\text{ппс}}$)

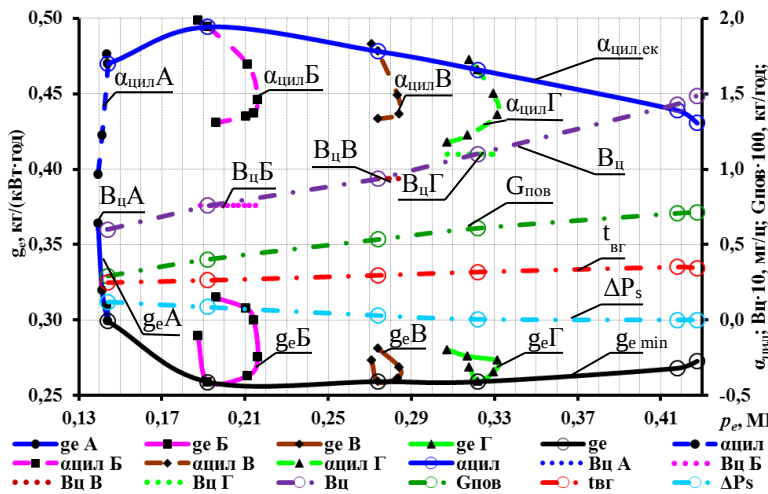


Рисунок 12 – Навантажувальна характеристика граничної економічності ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) ДВЗ 1Д 8,2/8,7

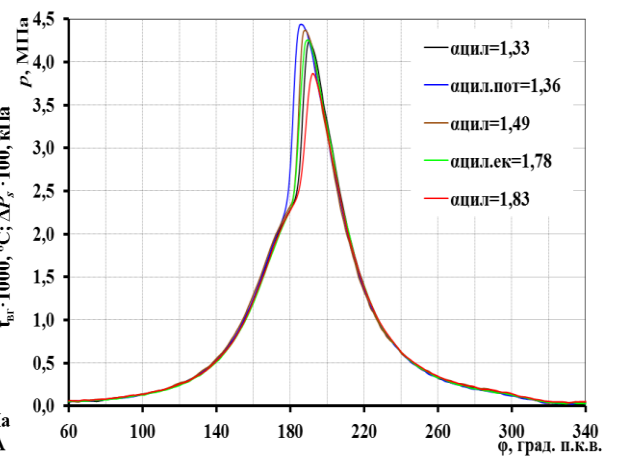


Рисунок 13 – Індикаторні діаграми. Режим В

Подальше збіднення паливоповітряного заряду сприяє зниженню рівня p_z і p_e . Режим ефективного збіднення $\alpha_{\text{цил.ек}} = 1,78$ відповідає економічному режиму роботи двигуна $g_{\text{emin}} = 0,259 \text{ кг/(кВт·год)}$ (рис. 12) при рівні тиску $p_z = 4,25 \text{ МПа}$ (рис. 13). На наступному режимі при збідненні до $\alpha_{\text{цил}} = 1,83$ значення p_z та p_e знизилось до 3,86 та 0,271 МПа відповідно, а значення g_e збільшилось до 0,273 кг/(кВт·год) (режим В).

За характеристикою граничної економічності (рис. 12) з підвищенням навантаження від $p_e = 0,144 \text{ МПа}$ до $p_e = 0,192 \text{ МПа}$ значення $\alpha_{\text{цил.ек}}$, яке відповідає економічному складу розширеного збідненого паливоповітряного заряду, зростає від 1,7 до 1,94. За таких умов рівень g_{emin} знижується від 0,299 до 0,259 кг/(кВт·год). Подальше підвищення навантаження до $p_e = 0,428 \text{ МПа}$ спричиняє зниження $\alpha_{\text{цил.ек}}$ до 1,3 і підвищення g_e до 0,273 кг/(кВт·год). Температура ВГ ($t_{\text{вг}}$) з підвищенням навантаження p_e від 0,144 до 0,428 МПа зростає від 248 до 345 °C.

Досконалість організації робочих процесів при зовнішньому і внутрішньому сумішоутвореннях у двигуні 1Д 8,2/8,7 оцінені рівнем значень η_i (19), який враховує тільки те паливо, яке згоряє в циліндрі ДВЗ. Значення η_i визначалися за експериментальними індикаторними діаграмами. Рівень значень η_i при карбюраторній системі живлення з урахуванням залежності (19) вище, ніж за неврахованих втрат палива під час продування циліндра (штрихпунктирна крива η_i) (рис. 14), а різниця між ними характеризується значеннями коефіцієнта втрат палива $\psi_{\text{втр}}$ (20).

Організація розширеного збідненого паливоповітряного заряду характеризується рівнем значення $\eta_{\text{imax}} = 0,5$ ($p_e = 0,192 \text{ МПа}$), що в понад 2 рази вище рівня при застосуванні карбюратора та на 14 % вище ніж при органі-

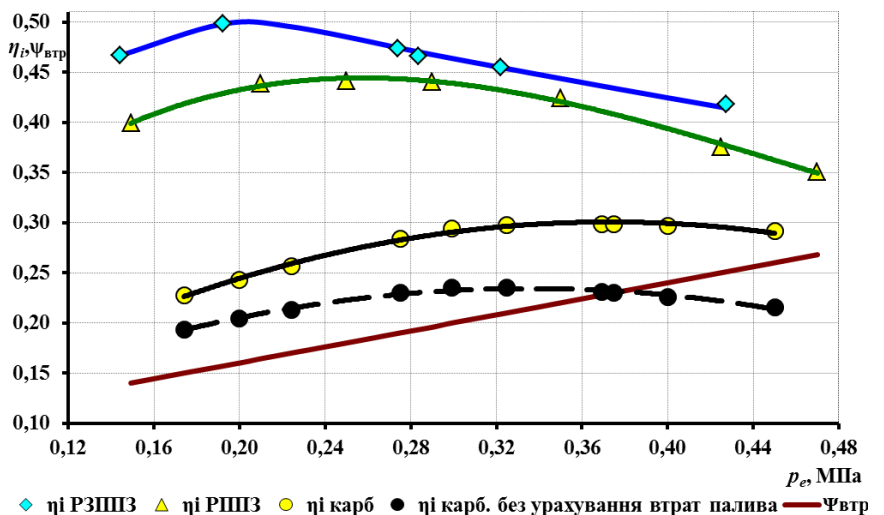


Рисунок 14 – Залежності значень η_i та $\psi_{\text{втр}}$ ДВЗ 1Д 8,7/8,2

зації розширеного паливоповітряного заряду на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) (рис. 14). При організації розширеного паливоповітряного заряду $\eta_{\text{max}} = 0,31$ ($p_e = 0,29 \text{ МПа}$), що в 1,7 рази вище, ніж при застосуванні карбюратора. При організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду $\eta_{\text{max}} = 0,32$ ($p_e = 0,192 \text{ МПа}$), що в понад 2 рази вище, ніж при застосуванні карбюратора внаслідок підвищення η_i і зменшення витрати палива за рахунок виключення втрат під час продування циліндра. Більш високі значення η_m належать ДВЗ з карбюратором внаслідок менших механічних втрат порівняно з організацією розширеного паливоповітряного заряду і розширеного збідненого паливоповітряного заряду відповідно (рис. 15).

Перехід двотактного ДВЗ 1Д 8,2/8,7 (ДН-4М 2S) з іскровим запалюванням із зовнішнього сумішоутворення на внутрішнє сумішоутворення з розшированим збідненим паливоповітряним зарядом дозволяє на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) в 1,7–2 рази знизити витрату палива за рахунок підвищення рівня індикаторного к.к.д. і додатково підвищити економічність на 14–26 % за рахунок виключення втрат палива під час продування циліндра.

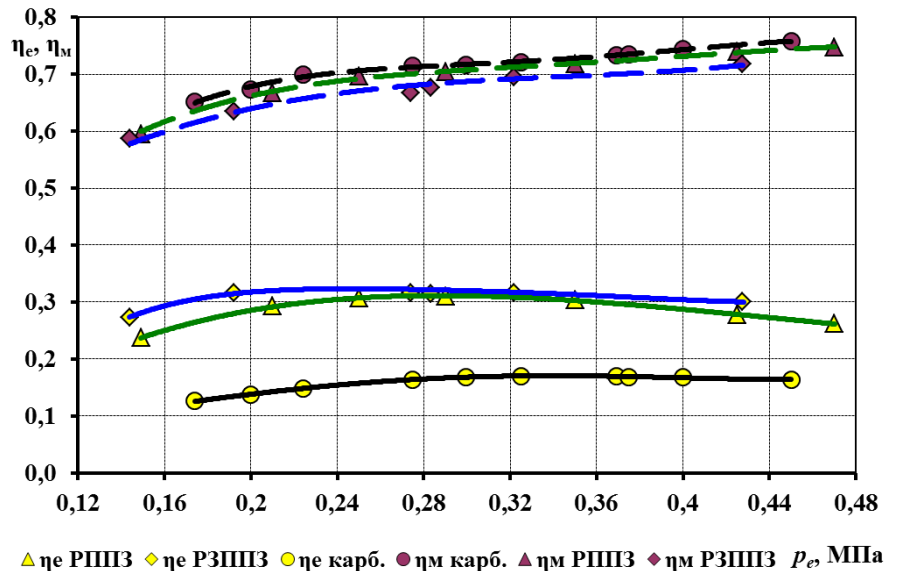


Рисунок 15 – Залежності η_m та η_e ДВЗ 1Д 8,7/8,2

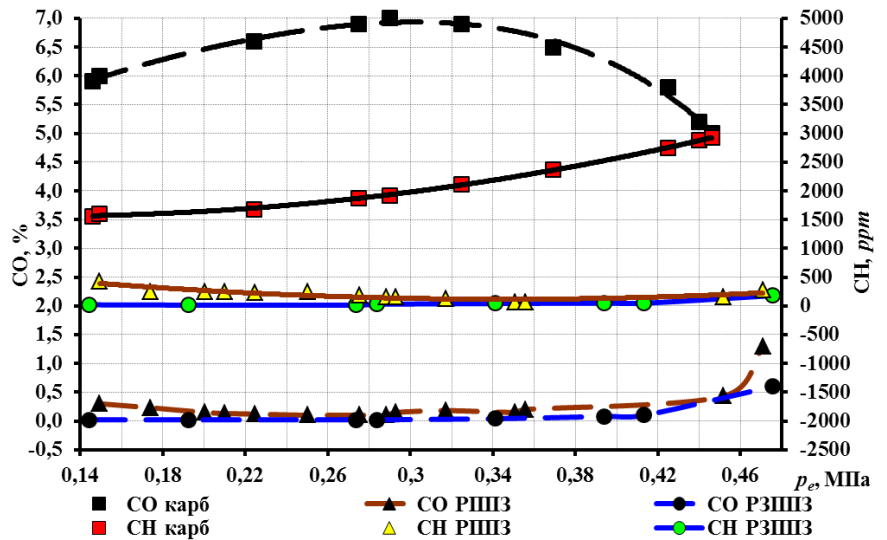


Рисунок 16 – Вміст CO та CH у ВГ за навантажувальною характеристикою ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) ДВЗ 1Д 8,2/8,7

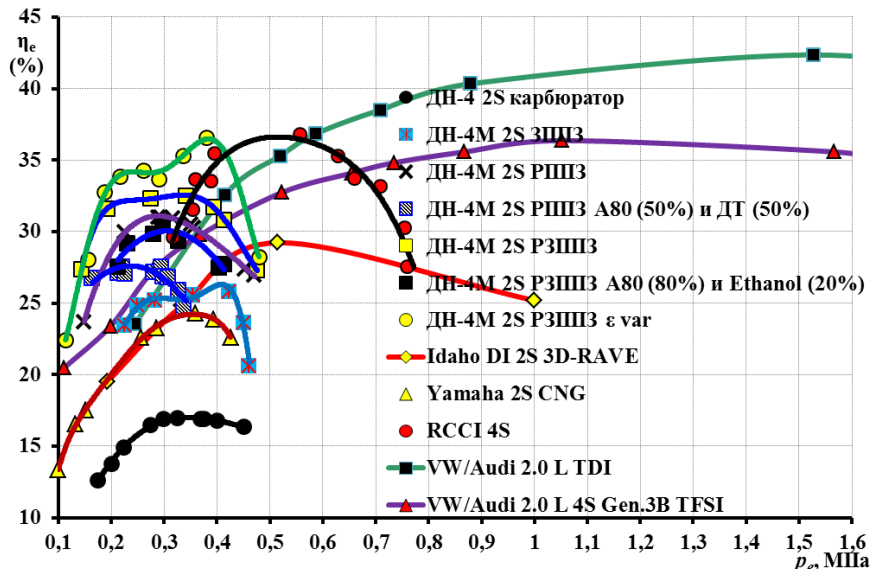


Рисунок 17 – Рівень η_e серед двотактних та чотиритактних ДВЗ з безпосереднім впорскуванням палива

Поліпшення умов згоряння при організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду сприяє скороченню вмісту СО у ВГ у середньому в 10 разів, а кількість СН у середньому в 100 разів порівняно з розшарованим паливоповітряним зарядом при навантаженні до $p_e = 0,341$ МПа та в понад 100 разів зниження СО й СН порівняно з карбюраторною системою живлення (рис. 16).

Максимальне значення ефективного к.к.д. двигуна ДН-4М 2S при організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду та раціональних моментах впорскування палива і запалювання складає $\eta_{\text{emax}} = 0,325$ ($p_e = 0,341$ МПа), застосування гальваноплазмового покриття поверхонь поршня і камери згоряння створює умови для подальшого підвищення η_{emax} до 0,365 ($p_e = 0,38$ МПа), внаслідок підвищення η_i і зменшення тертя між поршнем та циліндром (рис. 17).

Порівняно значення η_e ДВЗ ДН-4 2S з карбюратором, безпосереднім впорскуванням палива при організації збідненого паливоповітряного заряду та розшарованого паливоповітряного заряду і роботі на бензині А-80, паливній суміші, що складається з 50 % бензину А-80 і 50 % дизельного палива, з робочим процесом при розшаруванні збідненого паливоповітряного заряду і застосуванні бензину А-80, бензо-етанольній суміші Е20, використанні гальваноплазмового покриття поверхонь поршня і камери згоряння та варіюванням ступеня стиснення (ϵ_{var}) відносно двотактних (*Idaho DI 2S 3D-RAVE*, бензин АІ-91, *Yamaha 2S CNG*, природний газ) та чотиритактних (*VW/Audi 2.0L 4S Gen.3B TFSI*, бензин АІ-95) двигунів з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива, чотиритактного дизеля (*VW/Audi 2.0 L 4S TDI*, дизельне паливо) та двигуна з гібридним робочим процесом (*RCCI 4S*, ізооктан впорскується на впуску, а н-гептан – безпосередньо в циліндр ДВЗ) (рис. 17, на рисунку вжито скорочення ЗППЗ – збіднений паливоповітряний заряд). Визначено, що за навантажувальними характеристиками в зоні основних швидкісних режимів роботи ДВЗ (до $p_e = 0,4$ МПа) доцільно використовувати двотактний цикл Отто і організацію розшарованого збідненого паливоповітряного заряду, при середніх навантаженнях ($p_e = 0,4\text{--}0,6$ МПа) – ДВЗ, який працює за чотиритактним циклом з робочим процесом *RCCI*, при підвищених навантаженнях (понад $p_e = 0,6$ МПа) – ДВЗ з чотиритактним циклом зі змішаним підведенням теплоти і продовженим розширенням.

Розрахунок робочого процесу модернізованого двигуна 2Ч 7,8/6,8 з системою безпосереднього впорскування палива виявив можливість зниження витрати палива до 13 % порівняно з базовим двигуном із зовнішнім сумішоутворенням.

Сьомий розділ присвячений аналізу зовнішнього теплового балансу на режимі підвищеного навантаження ($p_e = 0,42$ МПа) при $n = 3000$ хв⁻¹ двигуна 1Д 8,7/8,2 з іскровим запалюванням при зовнішньому сумішоутворенні (карбюраторна система живлення, $\epsilon_d = 6$) й внутрішньому сумішоутворенні при безпосередньому впорскуванні палива та організації робочого процесу з розшарованим паливоповітряним зарядом та застосуванні зміщеної до випускного вікна напівсферичної камери згоряння ($\epsilon_d = 8,4$) та з розшарованим збідненим паливоповітряним зарядом і симетричної напівсферичної камери згоряння ($\epsilon_d = 11,3$) (рис. 18).

Рівень ефективного використання теплоти (Q_e) ДВЗ з карбюратором складає 16,3 %, при організації розшарованого паливоповітряного заряду Q_e зростає до 23,7 %, а при розшарованому збідненому паливоповітряному заряді становить 29,8 %.

Решта складових теплового балансу припадають на відпрацьовані гази ($Q_{\text{вг}}$): при застосуванні карбюратора $Q_{\text{вг}} = 26,7 \%$; при безпосередньому впорскуванні палива з розшаруванням паливоповітряного заряду $Q_{\text{вг}} = 47,1 \%$; при організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду $Q_{\text{вг}} = 62 \%$, та на втрати теплоти через стінки в систему охолодження і на неповноту згоряння палива ($Q_{\text{втр.ст.}}$): з карбюратором $Q_{\text{вг}} = 57 \%$; при безпосередньому впорскуванні палива з розшаруванням паливоповітряного заряду $Q_{\text{вг}} = 29,1 \%$; при організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду $Q_{\text{вг}} = 8,2 \%$.

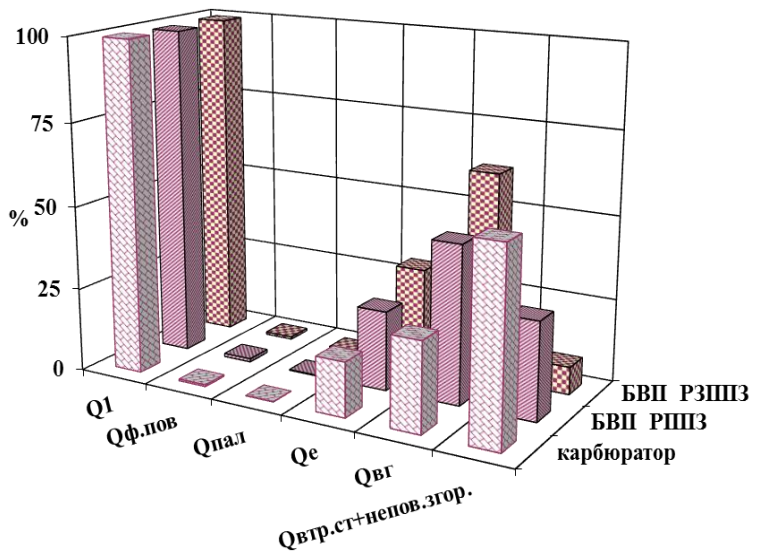


Рисунок 18 – Складові зовнішнього теплового балансу ДВЗ 1Д 8,7/8,2 при зовнішньому та внутрішньому сумішоутвореннях

Встановлено, що для подальшого підвищення економічних та екологічних показників ДВЗ доцільно використовувати теплоту, яка втрачається в систему охолодження і з ВГ. Також доведено, що потрібно застосовувати електронну систему керування на основі насос-форсунки з швидкодіючим електроприводом; форкамерну свічку запалювання та систему нейтралізації відпрацьованих газів накопичувального типу зі зворотним зв'язком.

Таким чином, створені наукові основи перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні розв'язують науково-технічну проблему розширення границі ефективного збіднення паливоповітряної суміші в циліндрі ДВЗ при згорянні, що дозволяє проектувати нові та модернізувати існуючі ДВЗ з підвищеними економічними та екологічними показниками.

У додатках наведено ілюстративний матеріал у вигляді рисунків, які відображають особливості результатів моделювання робочого процесу ДВЗ, експериментальні індикаторні діаграми та діаграми зміни тиску в робочих порожнинах ДВЗ, акти впровадження отриманих матеріалів у промисловість та навчальний процес.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-технічну проблему створення перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні, які забезпечують розширення границі ефективного збіднення паливоповітряного заряду шляхом організації ефективного взаємозв'язку між процесами газообміну, сумішоутворення й згоряння. Вирішення даної проблеми сприяє суттєвому підвищенню економічних і екологічних показників ДВЗ з іскровим запалюванням.

У дисертаційному дослідженні встановлено наступні вагомі результати:

1. Створено методологію організації перспективних робочих процесів у двотактному й чотиритактному ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні, яка включає такі послідовні розділи:

- визначення параметрів робочого тіла в робочих порожнинах двотактного й чотиритактного двигуна за термодинамічною моделлю розрахунку робочого процесу та реальними теплофізичними властивостями робочого тіла шляхом проведення експериментальних досліджень на режимах навантажувальної характеристики й зовнішньої швидкісної характеристики;

- оцінка показників газообміну й техніко-економічних показників ДВЗ при термодинамічному й 3-D газодинамічному моделюванні робочого процесу порівняно з результатами експериментальних досліджень;

- визначення тривалості випаровування циклової подачі бензину в паливному струмені з периферійним розподілом часток палива та з поверхні паливної плівки, яка формується на поверхні камери згоряння з урахуванням експериментальних досліджень геометрії й динаміки бензинового струменя й даних індикаторних діаграм;

- визначення параметрів робочого тіла в надпоршневому об'ємі ДВЗ за однозонною термодинамічною моделлю з урахуванням процесів об'ємно-плівкового сумішоутворення;

- визначення параметрів робочого тіла під час перебігу процесів горіння в зоні продуктів згоряння й у зоні паливоповітряної суміші за двозонною моделлю згоряння на режимах підвищених навантажень двигуна;

- визначення параметрів робочого тіла під час перебігу процесів горіння у зонах продуктів згоряння, паливоповітряної суміші й повітря за тризонною моделлю згоряння на режимах часткових навантажень двигуна;

- визначення уточнень формули тепловіддачі Вошні для ділянки згоряння-розширення під час організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду у двигуні;

- визначення техніко-економічних та екологічних показників ДВЗ з іскровим запалюванням при раціональній організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду з урахуванням результатів моделювання робочого процесу та проведення довідних робіт і зняття регульовальних характеристик.

2. Розроблено комплексну математичну модель розрахунку робочого процесу ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні, яка включає:

- термодинамічну модель розрахунку робочого процесу двотактного двигуна при розшаруванні збідненого паливоповітряного заряду, яка доповнена критерієм розшарування (L);

- однозонну термодинамічну модель розрахунку робочого процесу, яка враховує перебіг процесів внутрішнього сумішоутворення при організації розшарування збідненого паливоповітряного заряду;

- двозонну модель згоряння, яка надає можливість визначати параметри робочого тіла в зоні продуктів згоряння й у зоні паливоповітряної суміші на режимах підвищених навантажень двигуна;

- тризонну модель згоряння, яка дозволяє визначати параметри робочого тіла в зонах продуктів згоряння, паливоповітряної суміші й повітря на часткових навантаженнях двигуна;

- модель внутрішнього об'ємно-плівкового сумішоутворення двигуна з іскровим запалюванням, яка враховує периферійне розподілення часток палива та надає можливість комплексно оцінити вплив початкової швидкості руху паливного струменя й інтенсивність процесу теплообміну на кількість палива, що випаралося;

- модель процесів випаровування палива з поверхонь камери згоряння, яка дозволяє оцінити інтенсивність і тривалість випаровування бензину;

- уточнену формулу тепловіддачі Вошні для двотактного двигуна з іскровим запалюванням та організацією розширеного збідненого паливоповітряного заряду.

3. На основі розрахунково-експериментальних досліджень двигуна 1Д 8,7/8,2 при зовнішньому й внутрішньому сумішоутвореннях з метою оцінки та моделювання робочих процесів отримані наступні результати:

- одержано значення й залежності змін і теплофізичних властивостей робочого тіла в вигляді теплоємності C_{pm} з урахуванням значень коефіцієнтів γ , $\alpha_{цил}$ і розрізнення на впуску (ΔP_s) залежно від режиму роботи двигуна;

- показано, що значення зміни усередненого коефіцієнта витрати μ' при прямому продуванні продувального каналу $\mu'_{впуск\ прям.\ прод} = 0,63 \div 0,815$, випускного каналу $\mu'_{вип.прям.прод} = 0,65 \div 0,815$; при зворотному продуванні продувального каналу $\mu'_{впуск\ зворот.прод} = 0,63 \div 0,73$, випускного каналу $\mu'_{вип.зворот.прод} = 0,64 \div 0,705$ залежно від відносної площі (f_x / f_o) відкриття відповідних вікон;

- встановлено, що одержані значення й залежності зміни коефіцієнта витoku ν продувального повітря або паливоповітряного заряду на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) підвищуються від 0,1 до 0,26 з підвищенням навантаження до $p_e = 0,45 \text{ МПа}$. На режимах зовнішньої швидкісної характеристики з підвищенням n від 2200 до 5000 хв^{-1} значення ν знижуються від 0,3 до 0,19;

- одержано найменші значення коефіцієнта залишкових газів $\gamma = 0,13\text{--}0,15$ для двигуна з розширеним паливоповітряним зарядом. Найбільші значення коефіцієнта наповнення $\eta_v = 0,25\text{--}0,53$ відповідають організації розширеного збідненого паливоповітряного заряду щодо навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$). Треба зауважити, що зниження навантаження сприяє зниженню значень коефіцієнта надлишку продувального повітря ϕ_o , які перевищують до 9 % значення з розширеним паливоповітряним зарядом. Усе це обумовлено зниженням дроселювання повітряного заряду на впуску;

- встановлено, що значення коефіцієнта продування ϕ при зовнішньому й внутрішньому сумішоутвореннях з підвищенням навантаження (p_e) від 0,144 до 0,476 МПа щодо навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) підвищуються від 1,16 до 1,37, а значення коефіцієнта використання продувального повітря η_v знижуються від 0,86 до 0,73. Найбільші значення к.к.д. продування $\eta_s = 0,87\text{--}0,88$ в інтервалі навантажень $p_e = 0,21\text{--}0,47 \text{ МПа}$ відповідають організації розширеного паливоповітряного заряду;

- визначено, що процес випаровування бензину при максимальній цикловій подачі ($B_{ц} = 18,18 \text{ мг / цикл}$) закінчується за 66 град. п.к.в. до моменту запалювання;

- з'ясовано, що інтенсивність вигорання половини циклової подачі палива ($x = 0,5$) вище при організації розширеного паливоповітряного заряду, а загальна тривалість згоряння $d\phi_z$ менше при розширеному збідненому паливоповітряному заряді, що відповідає більшому значенню коефіцієнта надлишку повітря в зоні горіння й супроводжується зниженням теплових втрат і підвищенням η_i ДВЗ;

- уточнено формулу тепловіддачі Вошні для ділянки згоряння-розширення, яка відрізняється тим, що враховуються особливості передачі теплоти між газом і стінками надпоршневої порожнини двотактного двигуна з іскровим запалюванням та організацією розширеного збідненого паливоповітряного заряду, наявністю кривошипно-камерного продування й повітряного охолодження;

– визначено, що 3-D моделювання процесу газообміну в комплексах *AVL FIRE* та *MTFS* більшою мірою враховує особливості перебігу процесів витіснення й локального змішування свіжого заряду з продуктами згоряння в циліндрі порівняно з термодинамічною моделлю. Встановлено, що термодинамічну модель доцільно використовувати з метою визначення техніко-економічних показників ДВЗ.

4. Запропоновано та обґрунтовано залежності для визначення індикаторних і ефективних показників двотактного ДВЗ, які дозволяють об'єктивно й безпомилково порівнювати їхній рівень при зовнішньому й внутрішньому сумішоутвореннях з урахуванням втрати частки палива при продувці циліндра. Одержані формули рекомендовані для практичного застосування в теорії ДВЗ.

5. Запропоновано критерій розшарування (L), який характеризує наявність розшарування паливоповітряного заряду й надає можливість якісно оцінити вплив процесів внутрішнього сумішоутворення та згоряння розшарованого паливоповітряного заряду на показники двигуна в цілому, та викладено метод визначення критерію розшарування (L) при безпосередньому впорскуванні палива.

6. Запропоновано параметр – ступінь розшарування паливоповітряного заряду (ϵ_L), який дозволяє оцінити досконалість організації робочого процесу з розшаруванням паливоповітряного заряду в циліндрі ДВЗ з іскровим запалюванням.

7. Розроблено новий робочий процес для ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні й організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду, який забезпечує розширення границі ефективного збіднення. У результаті експерименту встановлено, що така організація робочого процесу надає можливість скоротити час на перебіг процесів внутрішнього сумішоутворення щодо розшарованого паливоповітряного заряду на 14 град. п.к.в. і збідненого паливоповітряного заряду на 7 град. п.к.в. Загальна тривалість процесу згоряння при організації нового робочого процесу на 39 % менше, ніж при зовнішньому сумішоутворенні, і до 36 % менше, ніж при організації розшарованого паливоповітряного заряду, що забезпечує скорочення часу на відведення теплоти від робочого тіла в стінки надпоршневої порожнини й зниження теплових втрат. Організація робочого процесу з безпосереднім упорскуванням палива та розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду на двигуні 1Д 8,7/8,2 забезпечує зниження витрати палива порівняно зі зовнішнім сумішоутворенням в понад 2 рази, з організацією збідненого паливоповітряного заряду – на 16–27 %, з організацією розшарованого паливоповітряного заряду – на 10–20 %. Вміст CO і CH у ВГ двигуна 1Д 8,7/8,2 при організації нового робочого процесу менше порівняно зі зовнішнім сумішоутворенням у понад 100 разів, з організацією збідненого паливоповітряного заряду – до 14 разів, з організацією розшарованого паливоповітряного заряду – у середньому до 10 разів.

8. Проведення довідних робіт й зняття регулювальних характеристик за навантажувальною характеристикою ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) на двигуні 1Д 8,7/8,2 з іскровим запалюванням при організації нового робочого процесу з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду дозволило визначити доцільне й раціональне застосування наступних параметрів: якісного регулювання потужності при зміні відкриття повітряної заслінки ($\Delta P_s - \text{var}$) на режимах часткових навантажень до $p_e = 0,34 \text{ МПа}$, чисто якісного регулювання потужності при повному відкритті заслінки ($\Delta P_s = 0$) у діапазоні підвищених навантажень понад $p_e = 0,34 \text{ МПа}$, моменту подачі палива

$\varphi_{\text{впор}} = 224$ град. п.к.в. після ВМТ у всьому діапазоні навантажень, збільшення кута випередження запалювання θ_z від 8 до 15 град. п.к.в. до ВМТ з підвищенням навантаження, зменшення ступеня стиснення $\varepsilon_{\text{геом}}$ від 17,6 до 12 з підвищенням навантаження при використанні гальваноплазмового покриття зовнішньої поверхні поршня й камери згоряння, характеристики граничної економічності за складом паливоповітряної суміші.

9. Переведення двотактного двигуна 1Д 8,7/8,2 з іскровим запалюванням із зовнішнього на внутрішнє сумішоутворення при організації розшарованого збідненого паливоповітряного заряду надає можливість на режимах навантажувальної характеристики ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) в 1,7–2 рази знизити витрати палива за рахунок підвищення рівня індикаторного к.к.д. і додатково підвищити економічність на 14–26 % за рахунок виключення втрат палива під час продування циліндра.

10. На підставі порівняння експериментальних даних випробувань ДВЗ за навантажувальними характеристиками в зоні швидкісних експлуатаційних режимів роботи встановлено, що доцільно раціонально застосовувати на часткових навантаженнях (до $p_e = 0,4$ МПа) ДВЗ, які працюють за двотактним циклом Отто при організації робочого процесу з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду, на середніх навантаженнях ($p_e = 0,4\text{--}0,6$ МПа) ДВЗ, які працюють за чотиритактним циклом при організації робочого процесу *RCCI* зі змішаним підведенням теплоти й одночасним використанням палив з різними властивостями; на підвищених навантаженнях (понад $p_e = 0,6$ МПа) ДВЗ, які працюють за чотиритактним циклом зі змішаним підведенням теплоти та продовженим розширенням за рахунок використання подвійного турбокомпресора.

11. Порівняльний аналіз зовнішнього теплового балансу двигуна 1Д 8,7/8,2 з іскровим запалюванням та організацією розшарованого збідненого паливоповітряного заряду показав, що рівень ефективного використання теплоти $Q_e = 29,8$ % в 1,83 раза вище, ніж з карбюраторною системою живлення, і в 1,26 раза вище, ніж при організації розшарованого паливоповітряного заряду, внаслідок менших втрат теплоти в стінки надпоршневої порожнини та з урахуванням втрат палива при продуванні та його недопаленні при згорянні. Подальші шляхи покращення економічних та екологічних показників можливі за рахунок застосування електронної системи керування на основі насос-форсунки з швидкодіючим електричним приводом, форкамерної свічки запалювання та застосування нейтралізатора відпрацьованих газів накопичувального типу зі зворотним зв'язком.

12. У результаті теоретичних досліджень робочого процесу на чотиритактному двигуні 2Ч 7,8/6,8 з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива щодо зовнішньої швидкісної характеристики одержано значення показників газообміну $\eta_v = 0,891$ і $\gamma = 0,039$ ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$). Встановлено, що процес випаровування бензину закінчується за 7 град. п.к.в. до моменту подачі напруги на електроди свічки запалювання, а використання безпосереднього впорскування палива дозволяє до 13 % знизити витрату палива порівняно з базовим ДВЗ із зовнішнім сумішоутворенням.

13. Теоретичні та практичні результати, одержані під час виконання досліджень, упроваджено у виробництво на ДПМЗ «Гідромаш», ВП МеМЗ ПАТ ЗАЗ (м. Мелітополь), АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ПрАТ «Київський мотоциклетний завод» (м. Київ) та в навчальному процесі УкрДУЗТ та ХНАДУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Корогодский В.А. Научные основы перспективных рабочих процессов двигателей с внутренним смесеобразованием и искровым зажиганием: монография / В.А. Корогодский. – Харьков: ХНАДУ, 2017. – 380 с.

Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, у тому числі у базі даних SCOPUS:

2. Корогодский В.А. Организация рационального способа регулирования мощности в двигателе с искровым зажиганием / В.А. Корогодский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 1. – С. 11–16. (*Ulrich's Periodicals Directory*).

3. Корогодский В.А. Повышение топливно-экологических показателей двухтактного ДВС с искровым зажиганием за счет совершенствования процессов внутреннего смесеобразования / В.А. Корогодский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 2. – С. 22–26. (*Ulrich's Periodicals Directory*).

4. Корогодский В.А. Снижение расхода топлива и сокращение выбросов вредных веществ с отработавшими газами за счет определения рациональных углов опережения зажигания / В.А. Корогодский, О.Н. Стеценко, С.В. Обозный // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2015. – Т. 1, Вип. 151. – С. 30–36. – Режим доступа: DOI: 10.18664/1994-7852.151.2015.68541. (*Index Copernicus, Google Scholar*). Здобувачем проведено експериментальні дослідження, встановлено рівень техніко-економічних та екологічних показників двигуна при зміні кута випередження запалювання.

5. Корогодский В.А. Влияние расслоенного топливно-воздушного заряда на показатели сгорания двухтактного двигателя с искровым зажиганием / В.А. Корогодский, О.Н. Стеценко, Е.А. Ткаченко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип. 154. – С. 142–148. – Режим доступа: DOI: 10.18664/1994-7852.154.2015.66009. (*Index Copernicus, Google Scholar*). Здобувачем визначено вплив характеру розшарування паливоповітряного заряду на показники згорання двотактного двигуна.

6. Корогодский В.А. Влияние способа смесеобразования на индикаторный и эффективный КПД двухтактного двигателя / В.А. Корогодский // Автомобильный транспорт. – 2015. – Вып. 37. – С. 22-30. (*DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar*).

7. Корогодский В.А. Исследование влияния типа смесеобразования и формы камеры сгорания на значения коэффициента остаточных газов / В.А. Корогодский, А.А. Хандримайлов, О.Н. Стеценко // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 1/5 (79). – С. 4-12. – Режим доступа: DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59789. (*Academic Search Complete, Chemical Abstracts Plus, Index Copernicus, SCOPUS*). Здобувачем проведено експериментальні дослідження, визначена адекватність 3-D моделювання в програмному комплексі MTFS процесів газообміну на тактах впуску та стиску двотактного двигуна.

8. Корогодский В.А. Оценка показателей газообмена при 3-D моделировании рабочего процесса двухтактного бензинового двигателя / В.А. Корогодский, Е.П. Воропаев // Автомобильный транспорт. – 2017. – Вып. 40. – С. 101–113. (*DOAJ*,

Index Copernicus, Google Scholar). Здобувачем проведено експериментальні дослідження, визначена адекватність 3-D моделювання процесів газообміну методом крупних часток, оцінено рівень показників газообміну.

Статті у наукових фахових виданнях:

9. Корогодский В.А. Оценка показателей рабочих процессов двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием углеводородных топлив различного состава / В.А. Корогодский, Обозний С.В., Степанко В.Г. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2005. – №1. – С. – 21-25. *Здобувачем проведена оцінка показників робочих процесів двигуна.*

10. Корогодский В.А. Влияние степени сжатия и угла опережения зажигания на показатели рабочих процессов двигателя с непосредственным впрыском / В.А. Корогодский // Автомобильный транспорт. – 2005. – Вып. 16. – С. 312–315.

11. Корогодський В.А. Вплив способу регулювання потужності двотактного двигуна з іскровим запалюванням на показники робочих процесів / В.А. Корогодський, С.В. Обозний // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2005. – Вип. 70. – С. 62-72. *Здобувачем визначено вплив способу регулювання потужності двигуна.*

12. Корогодский В.А. Влияние форкамерных свечей «Мрія – 0,8» на экономические и экологические показатели двигателя ВАЗ–21083 / В.А. Корогодский, А.І. Остапенко // Вісник інженерної академії України. – Харків, 2007. – Вип. 1. – С. 82–87. *Здобувачем визначено вплив застосування форкамерної свічки запалювання на економічні та екологічні показники двигуна.*

13. Корогодский В.А. Определение показателей сгорания по индикаторным диаграммам двухтактного двигателя с карбюратором и непосредственным впрыском топлива / В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2007. – Вып. 37. – С. 60-67. *Здобувачем визначено вплив процесів зовнішнього та внутрішнього сумішоутворення на показники процесу згорання.*

14. Корогодский В.А. Анализ экономических и экологических показателей двухтактного двигателя ДН–4М с карбюратором и непосредственным впрыском топлива / С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 1. – С. 70-76. *Здобувачем запропоновано метод визначення індикаторного к.к.д. двотактного двигуна з іскровим запалюванням та зовнішнім сумішоутворенням, проведено аналіз паливно-економічних показників ДВЗ.*

15. Корогодський В.А. Особенности электронной системы керування двотактным двигуном з іскровим запалюванням та безпосереднім впорскуванням палива / В.А. Корогодський, О.В. Василенко, В.В. Діденко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2007. – Вип. 80. – С. 135-141. *Здобувачем запропонована електронна система керування двигуном з іскровим запалюванням при застосуванні насос-форсунки.*

16. Корогодський В.А. Визначення тривалості згорання у двигуні з безпосереднім упорскуванням і розшаруванням паливо-повітряного заряду / В.А. Корогодський, О.В. Василенко // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2008. – Вип. 1. – С. 195–205. *Здобувачем проведена оцінка показників згорання.*

17. Корогодський В.А. Дослідження процесів пливкового сумішоутворення у двигуні з іскровим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива / В.А. Корогодський, О.В. Василенко, О.П. Савельєв // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2009. – Вип. 103. – С. 249-256. *Здобувачем розроблено методологію дослідження процесів внутрішнього сумішоутворення у двигуні з іскровим запалюванням.*

18. Корогодський В.А. Определение теплофизических свойств рабочего тела на такте сжатия для двухтактного двигателя / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009 – № 1. – С. 35–37. *Здобувачем встановлені властивості робочого тіла при безпосередньому вприскуванні палива в циліндр двигуна.*

19. Корогодський В.А. Миниэлектростанция на базе двигателя с перспективным рабочим процессом / В.А. Корогодский // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 4. – С. 53-56.

20. Експериментальне визначення коефіцієнта витoku робочого тіла при продувці циліндра у двотактному двигуні з іскровим запалюванням / В.А. Корогодський, О.В. Василенко, С.А. Цикра, С.В. Обозний // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2010. – Вип. 112. – С. 203-208. *Здобувачем визначена методика проведення експериментальних досліджень та встановлено вплив режиму роботи на рівень значень коефіцієнта витoku у двотактному двигуні з іскровим запалюванням.*

21. Корогодський В.А. Уточнення математичної моделі процесів масо- і теплообміну у паливному струмені з периферійним розподіленням палива / В.А. Корогодський // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2010. – Вип. 117. – С. 64–72.

22. Корогодський В.А. Дослідження процесів динаміки руху фронту бензинового струменя / В.А. Корогодський // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 1. – С. 28–31.

23. Корогодський В.А. Дослідження процесів масо – і теплообміну у паливному струмені з периферійним розподіленням палива / В.А. Корогодський, А.О. Хандримайлов, Є.С. Грайворонський // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 2. – С. 22-27. *Здобувачем виконано розрахунок процесів масо– і теплообміну у паливному струмені.*

24. Корогодський В.А. Модернізація вітчизняного двигуна 2Ч 6,8/7,8 з іскровим запалюванням системою безпосереднього вприскування палива / В.А. Корогодський, А.А. Хандримайлов, Є.С. Грайворонський // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2010. – Вип. 119. – С. 117-122. *Здобувачем проведено компонування ДВЗ з системою безпосереднього вприскування палива, встановлено місце розташування паливної форсунки, запропонована конструкція камери згоряння для організації робочого процесу з розширенням збідненого паливоповітряного заряду.*

25. Определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с искровым зажиганием / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, А.А. Хандримайлов, О.В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 13–19.

Здобувачем одержані експериментальні данні значень коефіцієнта залишкових газів та розроблена методика визначення кількості ВГ в циліндрі двотактного двигуна.

26. Дослідження внутрішнього сумішоутворення у чотирьохтактному двигуні з іскровим запалюванням / В.А. Корогодський, М.Б. Чубикало, А.А. Хандримайлов, Є.С. Грайворонський // Автомобильный транспорт. – 2012. – Вып. 30. – С. 112–117. *Здобувачем проведено теоретичні дослідження процесів внутрішнього сумішоутворення та визначена тривалість процесів випаровування бензину.*

27. Экспериментальные исследования двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива при работе на бензо-этанольной смеси / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, А.А. Каграманян, А.Н. Врублевский, О.В. Василенко, С.В. Обозный // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – №1. – С. 8–9. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження, визначено вплив складу бензо-етанольних сумішей на економічні та екологічні показники ДВЗ.*

28. Сравнение показателей двигателя с искровым зажиганием при непосредственном впрыскивании топлива с расслоением и обеднением топливно-воздушной смеси / С.А. Ерощенков., В.А. Корогодский, О.В. Василенко, С.В. Обозный // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2012. – Вип. 132. – С. 68–72. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження, визначено вплив складу паливоповітряної суміші на паливну економічність та токсичність ВГ двотактного двигуна.*

29. Корогодский В.А. Моделирование процесса газообмена двухтактного двигателя в среде AVL FIRE / Е.С. Грайворонский, А.Н. Врублевський, В.А. Корогодский // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2012. – Вип. 134. – С. 71–78. *Здобувачем встановлені граничні умови в моделі газообміну двотактного двигуна з іскровим запалюванням.*

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав з напрямку:

30. Влияние коэффициента избытка воздуха и степени сжатия на термический КПД двигателя с искровым зажиганием / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, А.А. Каграманян, О.В. Василенко // Грузовик &. – 2009. – № 1. – С. 36–40. *Здобувачем запропонована методика визначення термічного к.к.д. при використанні властивостей реального робочого тіла.*

31. Расчетно-экспериментальные исследования двухтактного двигателя внутреннего сгорания с непосредственным впрыскиванием топлива и искровым зажиганием / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, Е.П. Воропаев, О.В. Василенко // Ползуновский Вестник. – 2013. – № 4/3. – С. 106–109. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження, виконано зрівняння рівня ефективних показників під час теоретичних та експериментальних досліджень.*

32. Корогодський В.А. Дослідження процесів внутрішнього сумішоутворення в двотактному двигуні з іскровим запалюванням та напіврозділеною камерою згоряння / В.А. Корогодський, М.М. Рибальченко, М.Я. Козік // Systems and Means of Motor Transport. Selected Problems. – Rzeszów (Poland): Politechnika Rzeszowska, 2015. – Monografia № 6, Seria: TRANSPORT. – S. 165–170. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження та теоретично визначена тривалість перебігу процесів внутрішнього сумішоутворення.*

33. Перспективы и пути совершенствования двухтактного двигателя с искровым зажиганием при непосредственном впрыскивании топлива / С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, О.В. Василенко, О.Н. Стеценко // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета Выпуск 3 (Труды ЛКИ. Выпуск 266) – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015. С. 7 – 10. *Здобувачем проведено розрахунок зовнішнього теплового балансу двигуна з іскровим запалюванням із різними способами сумішоутворення.*

За результатами досліджень отримано патенти, у тому числі ті, що входять до наукометричної бази Web of Science:

34. Pat. WO 2007/136359 A1, IPC H01F 7/06, F02M 51/06. Electrodynamic actuator / Kyrylyuk I.O. (UA), Korogodskyj V.A. (UA), Lomov S.G. (UA); applicants and patent holders Kulygin, V.I. (UA), Kyrylyuk, I.O. (UA), Korogodskyj, V.A. (UA), Lomov, S.G. (UA). – International Application Number PCT UA 2006 / 000047; priority date 19.05.2006; international publication date 29.11.2007. (Web of Science) *Здобувачем визначено основні параметри силового електроприводу насос-форсунки.*

35. Pat. WO 2008/139250 A1, IPC H01F 7/08, H01F 7/16, H02K 33/02. Combined Electrically-Controlled Actuator / Korogodskyj, V.A. (UA), Kyrylyuk, I.O. (UA), Lomov, S.G. (UA); applicants and patent holders Kulygin V.I. (UA), Korogodskyj, V.A. (UA), Kyrylyuk, I.O. (UA), Lomov, S.G. (UA). – International Application Number PCT/IB 2007/002979; priority date 16.05.2007; international publication date 20.11.2008. (Web of Science) *Здобувачем визначені основні конструктивні параметри комбінованого силового електроприводу для підвищення його ефективності та швидкодії.*

36. Пат. 29459 U Україна, МПК⁷ F02B 23/00. Двигун внутрішнього згоряння з розширенням паливо повітряного заряду та з примусовим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива / Корогодський В.А., Кирилюк І.О., Ломов С.Г.; заявники та патентовласники Кулігін В.І., Корогодський В.А., Кирилюк І.О., Ломов С.Г. – № u200711003; заявл. 05.10.2007; опубл. 10.01.2008; Бюл. №1. *Здобувачем визначені конструктивні особливості камери згоряння, взаємного місця розташування форсунки та свічки запалювання.*

37. Пат. 29460 U Україна, МПК⁷ F02B 17/00. Спосіб сумішоутворення в камері згоряння двигуна внутрішнього згоряння / Корогодський В.А., Кирилюк І.О., Ломов С.Г.; заявники та патентовласники Кулігін В.І., Корогодський В.А., Кирилюк І.О., Ломов С.Г. – № u200711004; заявл. 05.10.2007; опубл. 10.01.2008; Бюл. №1. *Здобувачем визначені напрямки руху свіжого заряду та паливного струменя і особливості їхньої взаємодії при організації внутрішнього сумішоутворення.*

38. Pat. WO 2009/044225 A1, IPC F02B 23/10. A Method of Mixing in a Combustion Chamber of an Internal Combustion Engine and a Spark-Ignition Direct-Injection Stratified Fuel-Air Charge Internal Combustion Engine / Korogodskyj V.A. (UA), Kyrylyuk I.O. (UA), Lomov S.G. (UA); applicants and patent holders Kulygin V.I. (UA), Korogodskyj, V.A. (UA), Kyrylyuk, I.O. (UA), Lomov, S.G. (UA). – International Application Number PCT/IB 2007/004105; priority date 03.10.2007; international publication date 09.04.2009. (Web of Science) *Здобувачем визначена концепція та розроблено особливості організації робочого процесу з розширенням паливоповітряного заряду.*

39. Пат. 93960 С2 Україна, МПК⁷ F02M57/00, F02M59/00, F02M 61/00. Форсунка для впорскування рідкого палива у двигун внутрішнього згоряння / Савінов О.І., Єроценков С.А., Корогодський В.А., Василенко О.В.; заявник та патентовласник УкрДУЗТ – № а200913445; заявл. 23.12.2009; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6 / 2011. *Здобувачем визначено конструктивні особливості розпилювача форсунки, які сприяють формуванню кумулятивного струменя палива.*

Опубліковані праці апробаційного характеру:

40. Корогодський В.А. Перспективний двотактний багатопаливний двигун / В.А. Корогодський, А.О. Каграманян // Энергосбережение. – 2009. – № 9. – С. 12-15. *Здобувачем розроблено робочий процес ДВЗ з іскровим запалюванням, який дозволяє використовувати паливо широкого фракційного складу.*

41. Корогодський В.А. Определение продолжительности сгорания в двухтактном двигателе с непосредственным впрыскиванием топлива и расслоением топливо-воздушного заряда / В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Друга наук.-техн. конф. науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників, 19–20 квітня 2007 р.: матер. конф. – Миколаїв: ППІ НУК, 2007. – С. 37–38. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження, за формулою Вібе визначені значення та характер зміни показника згоряння й тривалість перебігу процесу згоряння.*

42. Значения коэффициента утечки заряда в двухтактном двигателе с искровым зажиганием / В.А. Корогодский, О.В. Василенко, С.А. Цикра, С.В. Обозный // Третя наук.-техн. конф. науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників, 21–22 травня 2009 р.: матер. конф. – Миколаїв: ППІ НУК, 2009. – С. 17–18. *Здобувачем методом газового аналізу визначені значення коефіцієнта витоку у двотактному двигуні з іскровим запалюванням та одержані емпіричні залежності.*

43. Корогодський В.А. Багатопаливна мініелектростанція на базі системи живлення з швидкодіючим електрокеруванням приводом / В.А. Корогодський, А.О. Каграманян // Энергетическая безопасность и энергосбережение на транспорте: технологии и инвестиции: IV Междунар. научн.-практ. конф., 10-12 июня 2009 г.: матер. конф. – Одесса, 2009. – С. 191–196. *Здобувачем розроблена компоновка мініелектростанції та визначені конструктивні особливості насос-форсунки.*

44. Особливості термодинамічної моделі робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням і безпосереднім впорскуванням палива / О.В. Василенко, В.А. Корогодський, Є.П. Воропаєв, С.А. Єроценков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII: Міжнар. наук.-практ. конф., 12–14 травня 2010 р.: тези доп. – У 4 ч. – Ч. 1. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – С. 170. *Здобувачем запропоновано враховувати в термодинамічній моделі робочого процесу двигуна особливості організації розширеного паливоповітряного заряду.*

45. Определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с внешним смесеобразованием / С.А. Ероценков, В.А. Корогодский, А.А. Хандримайлов, О.В. Василенко // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: IV Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, 18–19 травня 2011 р.: тези доп. – Первомайск: ППІ НУК, 2011. – С. 39–40. *Здобувачем визначено вплив кількості ВГ у циліндрі двотактного двигуна з іскровим запалюванням залежно від навантаження на рівень значень коефіцієнта залишкових газів.*

46. Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива / С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, О.В. Василенко, С.В. Обозный, Е.П. Воропаев // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: V Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, 22–23 травня 2013 р.: тези доп. – Первомайск: ППІ НУК, 2013. – С. 86. *Здобувачем запропоновано враховувати в математичній моделі теплофізичні властивості робочого тіла.*

47. Термодинамическая модель рабочего процесса малоразмерного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива / В.А. Корогодский, Е.П. Воропаев, О.В. Василенко, О.В. Клецкая / Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: Междунар. научн.-практ. конф., 14–15 апреля 2014 г.: матер. конф. – Пермь: ПНИПУ, 2014. – С. 122–124. *Здобувачем запропоновано враховувати у термодинамічній моделі розрахунку робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням та безпосереднім впорскуванням палива реальні властивості робочого тіла у циліндрі ДВЗ.*

48. Улучшение эколого-экономических показателей малоразмерных бензиновых двигателей внутреннего сгорания / С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, Е.П. Воропаев, О.В. Василенко // Развитие наукової та інноваційної діяльності на транспорті: 76 Міжнар. наук.-техн. конф., 15-17 квітня 2014 р.: тези доп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 143. – С. 254-255. *Здобувачем запропоновано новий спосіб організації робочого процесу з розширенням паливоповітряного заряду для поліпшення еколого-економічних показників двигуна з іскровим запалюванням.*

49. Корогодский В.А. Потенциальные пути совершенствования двухтактного двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива / В.А. Корогодский, О.В. Василенко, О.Н. Стеценко // Новейшие технологии развития конструкции, производства, эксплуатации, ремонта и экспертизы автомобиля: Международная научно-практическая конференция: 15-16 октября 2014 г.; тез. докл. – Харьков: ХНАДУ, 2014. – С. 237. *Здобувачем запропоновані потенційні шляхи удосконалення двигуна з іскровим запалюванням у вигляді організації робочого процесу з розширенням збідненого паливоповітряного заряду.*

50. Повышение показателей двигателей с искровым зажиганием при непосредственном впрыскивании топлива за счет особенностей конструкции распылителя форсунки / С.А. Ерощенко, В.А. Корогодский, О.В. Василенко, О.Н. Стеценко // Актуальные проблемы морской энергетики: 4-я Всероссийская межотраслевая научно-техническая конференция; 12-13 февраля 2015 г.: матер. конф. – СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2015. – С. 60-61. *Здобувачем визначено рівень ефективних показників двигуна з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива.*

51. Корогодский В.А. Улучшение топливно-экологических показателей двухтактного двигателя за счет определения рациональных углов опережения зажигания / В.А. Корогодский, О.Н. Стеценко, С.В. Обозный // Развитие наукової та інноваційної діяльності на транспорті: 77-а Міжнародна науково-технічна конференція; 21-23 квітня 2015 р.: тез. доп. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Том 1. – Вип. 151. – С. 74. *Здобувачем експериментальним шляхом встановлені раціональні кути випередження запалювання на двотактному двигуні з безпосереднім впорскуванням палива та побудовані навантажувальні характеристики при $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$.*

52. Корогодский В.А. Определение показателей сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда в двухтактном двигателе с искровым зажиганием / В.А. Корогодский, О.Н. Стеценко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXIII Міжнар. наук.-практ. конф., 20–22 травня 2015 р.: тези доп. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – С. 178. *Здобувачем визначені показники згоряння розширеного паливоповітряного заряду у ДВЗ з іскровим запалюванням.*

53. Корогодский В.А. Определение индикаторного КПД двухтактного двигателя с внешним смесеобразованием / В.А. Корогодский, В.В. Савенко, О.Н. Стеценко // Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорті: Міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 жовтня 2015 р.: тези доп. – Харків: ХНАДУ, 2015. – С. 249-250. *Здобувачем запропонована залежність визначення індикаторного к.к.д. двотактного двигуна з іскровим запалюванням та зовнішнім сумішоутворенням.*

54. Корогодский В.А. Анализ двухтактного двигателя с искровым зажиганием по внешнему тепловому балансу / В.А. Корогодский, О.В. Василенко, О.Н. Стеценко // Актуальные проблемы морской энергетики: 5-я Всероссийская межотраслевая научно-техническая конференция; 18-19 февраля 2016 г.: тез. докл. – СПб.: Издательский центр СПбГМТУ, 2016. – С. 101-102. *Здобувачем одержано експериментальні данні щодо зовнішнього теплового балансу та проведено зрівняння складових балансу двигуна із зовнішнім та внутрішнім сумішоутворенням.*

55. Корогодський В.А. Термодинамічна модель процесу згоряння розширеного паливо-повітряного заряду у двигуні з іскровим запалюванням / В.А. Корогодський, О.М. Стеценко / Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матер. доп. 78-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 26–28 квітня 2016 р. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 160 (додаток). – С. 53–54. *Здобувачем запропонована концепція термодинамічної моделі процесу згоряння розширеного паливоповітряного заряду на основі методу об'ємного балансу.*

56. Корогодський В.А. Порівняння результатів 3-D моделювання робочого процесу двотактного двигуна із іскровим запалюванням з експериментальними даними / В.А. Корогодський, Є.П. Воропаєв // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXIV Міжнар. наук.-практ. конф., 18-20 травня 2016 р. – У 4 ч. – Ч. 1. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – С. 199. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження та встановлена адекватність результатів теоретичних досліджень.*

57. Корогодский В.А. Результаты моделирования процесса сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда в двухтактном двигателе с искровым зажиганием / В.А. Корогодский, О.Н. Стеценко // Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців: Міжнар. наук.-практ. та наук.-метод. конф., 20–21 жовтня 2016 р.: наук. праці. – Харків: ХНАДУ, 2016. – С. 216–217. *Здобувачем визначено вплив рівня коефіцієнта надлишку повітря на тривалість перебігу процесу згоряння залежно від навантаження двигуна.*

58. Корогодский В.А. Сравнение уровня эффективного к.п.д. и экологических показателей двухтактных и четырехтактных ДВС / В.А. Корогодский // Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців: Міжнародна науково-практична конференція: 19–20 жовтня 2017 р.; наук. праці. – Харків: ХНАДУ, 2017. – С. 200-201.

АНОТАЦІЯ

Корогодський В.А. Наукові основи перспективних робочих процесів двигунів з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2018 р.

Дисертаційна робота присвячена створенню наукових основ перспективних робочих процесів двигунів з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні для розв'язання науково-технічної проблеми розширення границі ефективного збіднення паливоповітряного заряду в циліндрі двигуна. Організація розшарованого збідненого паливоповітряного заряду за рахунок ефективного взаємозв'язку між процесами газообміну, сумішоутворення і згоряння сприяє отриманню сучасних техніко-економічних і екологічних ДВЗ.

Виконано аналіз особливостей організації робочого процесу в двигунах з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні. Проведено теоретичні дослідження на основі термодинамічних та 3-D газодинамічних моделей процесів газообміну, сумішоутворення та згоряння на двотактному і чотиритактному двигунах з іскровим запалюванням з урахуванням експериментальних даних. Розроблена методологія організації перспективних робочих процесів ДВЗ з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні, основу якої становить однозонна, двозонна та тризонна моделі робочого процесу ДВЗ на основі методу об'ємного балансу, уточнена модель внутрішнього сумішоутворення й уточнена формула тепловіддачі Г. Вошні для ділянки згоряння-розширення. Запропоновано залежності визначення індикаторних і ефективних показників ДВЗ, які враховують витрачене, але не використане при згорянні в циліндрі двигуна паливо. Запропоновано критерій та ступінь розшарування паливоповітряного заряду, які дозволяють оцінити наявність та досконалість організації відповідного робочого процесу. Розроблено новий спосіб організації робочого процесу з розшаруванням збідненого паливоповітряного заряду в ДВЗ з іскровим запалюванням, методологія та результати досліджень впроваджені на підприємствах та у навчальному процесі.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, іскрове запалювання, внутрішнє сумішоутворення, розшарування паливоповітряного заряду, індикаторні показники ДВЗ.

АННОТАЦИЯ

Корогодский В.А. Научные основы перспективных рабочих процессов двигателей с искровым зажиганием при внутреннем смесеобразовании. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2018 г.

Диссертационная работа посвящена созданию научных основ перспективных рабочих процессов двигателей с искровым зажиганием при внутреннем смесеобразовании для решения научно-технической проблемы расширения границ эффективного обеднения топливовоздушного заряда. Организация расслоенного обедненного топливовоздушного заряда за счет эффективной взаимосвязи между процессами газообмена, смесеобразования и сгорания способствует повышению технико-экономических и экологических показателей ДВС.

Выполнен анализ особенностей организации рабочего процесса в двигателях с искровым зажиганием при внутреннем смесеобразовании. Проведены теоретические исследования на основе термодинамических и 3-D газодинамических моделей процессов газообмена, смесеобразования и сгорания на двухтактном и четырехтактном двигателях с искровым зажиганием с учетом экспериментальных данных.

Получили дальнейшее развитие фундаментальные положения теории ДВС относительно определения ряда основных показателей рабочего процесса двигателей с искровым зажиганием: индикаторные и эффективные показатели ДВС, учитывающие потери части топлива при продувке цилиндра; критерий расслоения топливовоздушной заряда (L), позволяющий определить границы эффективного обеднения заряда в цилиндре двигателя; степень расслоения топливовоздушной заряда (εL), позволяющую оценить совершенство организации рабочего процесса с расслоением топливовоздушного заряда в цилиндре ДВС с искровым зажиганием.

Разработана комплексная методология создания перспективных рабочих процессов ДВС с искровым зажиганием и внутренним смесеобразованием, которая базируется на расчете рабочего процесса с помощью однозонной термодинамической модели, учитывающей теплофизические процессы смесеобразования, двухзонной термодинамической модели сгорания при организации однородного состава топливовоздушной смеси в надпоршневом объеме, позволяющей определять параметры рабочего тела в зоне продуктов сгорания и в зоне топливовоздушной смеси на режимах повышенных нагрузок двигателя, трехзонной термодинамической модели сгорания при организации расслоенного топливовоздушной заряда, позволяющей определять параметры рабочего тела в зонах продуктов сгорания, топливовоздушной смеси и воздуха на режимах частичных нагрузок двигателя.

Получили дальнейшее развитие субмодели для расчета рабочего процесса ДВС с искровым зажиганием и внутренним смесеобразованием с применением: уточненной математической модели внутреннего смесеобразования, учитывающей в процессах динамики и массо- и теплообмена в топливной струе периферийное распределение частиц топлива; уточненной формулы теплоотдачи Вошни для участка сгорания-расширения, учитывающей особенности передачи теплоты между газом и окружающими стенками надпоршневой полости двухтактного двигателя с искровым зажиганием, организацией расслоенного обедненного топливовоздушной заряда, наличием кривошипно-камерной продувки и воздушного охлаждения.

Разработан рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием при внутреннем смесеобразовании с расслоением обедненного топливовоздушного заряда, который обеспечивает расширение границ эффективного обеднения.

Определены теплофизические свойства рабочего тела во впускных, выпускных и рабочих полостях ДВС 1Д 8,7/8,2, оценены показатели процессов газообмена и сгорания.

Перевод двигателя 1Д 8,7/8,2 с искровым зажиганием с внешнего на внутреннее смесеобразование позволяет на режимах нагрузочной характеристики ($n = 3000 \text{ мин}^{-1}$) в 1,7–2 раза снизить расход топлива за счет повышения уровня индикаторного к.п.д. и дополнительно на 14–26 % повысить экономичность за счет исключения потерь топлива при продувке цилиндра.

В результате теоретических исследований рабочего процесса двигателя 2Ч 7,8/6,8 с искровым зажиганием и непосредственным впрыском топлива по внешней скоростной характеристике получены значения показателей газообмена:

$\eta_v = 0,89$ и $\gamma = 0,04$ ($n = 3000$ мин⁻¹). Процесс испарения бензина заканчивается за 7 град. п.к.в. до момента зажигания. Снижение расхода топлива составило до 13 % по сравнению с базовым двигателем при внешнем смесеобразовании.

Сравнительный анализ внешнего теплового баланса двигателя 1Д 8,7/8,2 показал, что уровень эффективного использования теплоты при организации расслоенного обедненного топливовоздушного заряда $Q_e = 29,8$ % в 1,83 раза выше, чем с карбюраторной системой питания и в 1,26 раза выше, чем при организации расслоенного топливовоздушного заряда.

Методология организации перспективных рабочих процессов ДВС и результаты исследований внедрены на предприятиях и в учебном процессе.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, искровое зажигание, внутреннее смесеобразование, расслоение топливовоздушного заряда, индикаторные показатели ДВС.

ABSTRACT

Korohodskiy V.A. The scientific fundamentals of promising working processes of spark ignition engines with internal mixture formation. – The manuscript rights.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Technical Science in specialty 05.05.03 – Engines and Power Plants. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the creation of scientific fundamentals of promising working processes of spark ignition engines with internal mixture formation to solve the scientific and technical problem of limit expanding of effective fuel and air charge depletion in engine cylinder. The organization of lean stratified air-fuel charge through an efficient interrelation between gas exchange processes, mixture formation and combustion contributes to obtain spark ignition engines with modern technical-economic and environmental indicators.

The analysis of the peculiarities of the work process organization in spark ignition engines with internal mixture formation was performed. Theoretical investigations based on thermodynamic and 3-D gas-dynamic models of gas exchange processes; mixture formation and combustion for two-stroke and four-stroke engines with spark ignition with consideration of experimental data were carried out. The organization of promising work processes in spark ignition ICE with internal mixture formation methodology were developed. It is based on single-zone, two-zone and three-zones model of the work process of ICE on the basis of the volume balance method, the improved internal mixing model and the improved heat transfer formula by G. Woschni for the combustion and extinction part. It was offered the functional law of internal combustion engines indicator and effective values determination that take accounts of the spent fuel, but not used at combustion in engine cylinder. It was proposed the criterion and indicator of the fuel-air charge stratification degree, which allow of estimating the availability and perfection of organization of the working procedure. The new method of work process organization with the stratification of air-fuel charge was developed. Methodology and research results got accepted in production and in the educational process.

Keywords: internal combustion engine, spark ignition, internal mixture formation, stratification of fuel-air charge, internal combustion engine performance.

В.А. Корюжский

