

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**ВАСИЛЕНКО ОЛЕГ ВАДИМОВИЧ**



УДК 621.43.055

**УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВОТАКТНОГО  
ДВИГУНА З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ І БЕЗПОСЕРЕДНІМ  
ВПРИСКУВАННЯМ ПАЛИВА**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплотехніки та теплових двигунів Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Корогодський Володимир Анатолійович,**  
Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків,  
доцент кафедри теплотехніки та теплових двигунів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Прохоренко Андрій Олексійович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,  
старший науковий співробітник  
кафедри двигунів внутрішнього згоряння

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

Захист відбудеться «30» червня 2016 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.13 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, кафедра двигунів внутрішнього згоряння, ауд. 11.

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

Автореферат розісланий «27» травня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ребров О.Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Широке розповсюдження енергетичних установок, обладнаних двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), призводить до значної витрати кількості палива і забруднення атмосфери шкідливими речовинами (ШР) відпрацьованих газів (ВГ). Найбільш піддані погіршенню екології великі міста, де основну складову в сумарних викидах ШР в атмосферу вносять ДВЗ, серед яких поширені двотактні двигуни з іскровим запалюванням (ІЗ) і зовнішнім сумішоутворенням. Такі двигуни мають кращі показники за циліндровою потужністю, питомою вагою та питомим об'ємом в порівнянні із чотиритактними двигунами, однак при цьому їм притаманні значні недоліки – висока питома витрата палива, погіршена екологічність та шум. Підвищення еколого-економічних показників двотактних двигунів з ІЗ можливо здійснити за рахунок переходу від зовнішнього до внутрішнього сумішоутворення шляхом використання системи безпосереднього вприскування палива (БВП). Застосування БВП дозволяє підвищити ступінь стискування, виключити втрати палива при продувці циліндра (до 30 %) і, за рахунок організації згоряння збіденого паливоповітряного заряду, додатково підвищити ефективний ККД двотактних двигунів на 10–15 %. При цьому, виключення втрат палива при газообміні та ефективне згоряння паливоповітряного заряду дозволяє у 7–10 разів скоротити викиди ШР з ВГ у порівнянні з використанням зовнішнього сумішоутворення. Також при БВП доцільно використовувати паливні суміші де частина бензину буде замінена паливом з відновлювальної сировини, зокрема етиловим спиртом, що сприяє зменшенню витрати палива нафтового походження.

Дослідження процесів газообміну, сумішоутворення та згоряння в двотактних двигунах з ІЗ обумовили подальший напрямок удосконалення робочого процесу при застосуванні безпосереднього вприскування бензину та бензо-етанольних сумішей, що здійснюється за рахунок модернізації конструкції ДВЗ, паливної апаратури та їх регулювальних параметрів з метою одержання поліпшених еколого-економічних показників. Для оцінки досконалості організації процесів внутрішнього та зовнішнього сумішоутворення й процесів згоряння доцільно визначити рівень індикаторного ККД двигуна відповідного типу.

Таким чином, науково-практична задача, спрямована на поліпшення еколого-економічних показників двотактних ДВЗ з ІЗ за рахунок вдосконалення організації робочих процесів, які забезпечують ефективне згоряння палива нафтового походження і його суміші з етиловим спиртом при низькому вмісті ШР у ВГ, є актуальною, та визначила напрямок роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі теплотехніки та теплових двигунів Українського державного університету залізничного транспорту згідно держбюджетних тем МОН України: "Розробка наукових основ перспективних робочих процесів двигунів внутрішнього згоряння"(ДР №0108U000080) і "Розробка багатопаливного ро-

бочого процесу для двигуна з іскровим запалюванням" (ДР №0110U002130), де здобувач був виконавцем окремих етапів досліджень.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є поліпшення показників робочого процесу двотактного двигуна з іскровим запалюванням шляхом впровадження безпосереднього вприскування палива.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- аналіз існуючих способів організації сумішоутворення в двигунах з іскровим запалюванням та обґрунтування напрямку удосконалення робочого процесу;

- обґрунтувати вибір залежностей, які дозволяють врахувати втрати палива при продувці циліндра двотактного двигуна з іскровим запалюванням, оцінити рівень розшарування паливоповітряного заряду при безпосередньому вприскуванні палива, рівень індикаторного ККД двигуна при зовнішньому та внутрішньому сумішоутвореннях і визначити показники динаміки та тривалості згоряння палива в циліндрі;

- розробка математичної моделі робочого процесу двотактного двигуна з іскровим запалюванням та проведення розрахункових досліджень з оцінки впливу конструктивних і регулювальних параметрів на його показники;

- теоретичні та експериментальні дослідження показників процесу газообміну двотактного двигуна з іскровим запалюванням;

- проведення комплексу стендових експериментальних досліджень двотактного двигуна з іскровим запалюванням для визначення його еколого-економічних показників;

- оцінка ефективності робочого процесу двотактного двигуна з безпосереднім вприскуванням бензину та бензо-етанольних сумішей.

*Об'єктом дослідження* є робочий процес двотактного двигуна з іскровим запалюванням.

*Предмет дослідження* – показники робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням при зміні конструктивних та регулювальних параметрів ДВЗ і використанні різних видів палива.

**Методи дослідження.** В основу дисертаційного дослідження покладені фундаментальні положення теорії двигунів внутрішнього згоряння, основні закони термодинаміки і газодинаміки з використанням методів: математичного та статистичного моделювання; математичного моделювання робочого процесу двигуна з застосуванням методу І.І. Вібе для розрахунку динаміки згоряння палива у циліндрі; методу найменших квадратів, який застосовано для аналізу експериментальних даних; методу Ейлера при інтегруванні диференціальних рівнянь математичної моделі робочого процесу. Експериментальні дослідження виконані на моторному стенді з використанням спеціалізованої реєстраційної вимрювальної апаратури та методик обробки сигналів.

**Наукова новизна** одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано коефіцієнт втрат палива, який дозволяє враховувати при визначенні індикаторного ККД двотактного двигуна з іскровим запалюванням тільки те паливо, яке згоряє в циліндрі.

2. Вперше запропоновано критерій, що характеризує розшарування паливоповітряного заряду у двигунах з іскровим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива й дозволяє оцінити якість організації внутрішнього сумішоутворення та вдосконалити термодинамічну модель розрахунку робочого процесу. Цей критерій враховує: перевищення нижньої межі поширення фронту полум'я в паливоповітряній суміші, сумарний коефіцієнт надлишку повітря, коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі, коефіцієнт витoku продувного повітря та паливо-повітряної суміші.

3. Набули подальшого розвитку регресійні залежності показників динаміки та тривалості згорання моделі І.І. Вібе для двигунів з іскровим запалюванням і внутрішнім сумішоутворенням, які відрізняються від відомих тим, що враховують витрату палива, кут випередження запалювання, кут початку вприскування палива й критерій розшарування паливо-повітряного заряду.

**Практичне значення одержаних результатів** для двигунобудування полягає в реалізації науково-технічних принципів використання розшарування паливоповітряного заряду при безпосередньому вприскуванні палива у двигунах з іскровим запалюванням, які дозволили знизити питому витрату палива та поліпшити екологічні показники.

Дослідження виконано на вітчизняному двотактному двигуні з іскровим запалюванням ДН-4, у якого на основних експлуатаційних режимах роботи забезпечується позитивний вплив удосконаленого робочого процесу на зниження витрати палива та викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами за рахунок:

- застосування форсунки з розпилювачем, конструктивна особливість якої сприяє організації розшарування паливоповітряного заряду зі збільшенням значень коефіцієнта надлишку повітря у циліндрі ( $\alpha_{ц\ max} = 1,63$ ) у порівнянні зі збідненим паливоповітряним зарядом ( $\alpha_{ц\ max} = 1,13$ ), що відповідно дозволяє на 10–20 % знизити витрату палива та в 2–5 разів зменшити вміст шкідливих речовин ( $CO$  та  $CH$ ) у відпрацьованих газах в діапазоні навантажень  $p_e = 0,15-0,45$  МПа, технічна новизна отриманих результатів підтверджується патентом України на винахід (Пат. №93960);

- застосування внутрішнього сумішоутворення при безпосередньому вприскуванні палива з розшаруванням паливоповітряного заряду, що дозволяє знизити питому витрату палива в 1,83 рази відносно двигуна із зовнішнім сумішоутворенням (карбюраторна система живлення) й отримати на режимах навантажувальної характеристики при  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup> мінімальну питому ефективну витрату палива  $g_{e\ min} = 264$  г/(кВт·год) та зменшити вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах в 7–10 разів до рівня  $CO = 0,08$  %,  $CH = 70$  ЧНМ;

- застосування у двигунах з іскровим запалюванням безпосереднього вприскування палива і розшарування паливоповітряного заряду бензоетанольної суміші, що дозволило забезпечити стійку роботу у всьому діапазоні навантажень. При роботі на бензо-етанольних сумішах забезпечуються більш високі економічні та екологічні показники, ніж в аналогічних двигунах

із зовнішнім сумішоутворенням. При роботі за навантажувальною характеристикою при  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$  на суміші E10 мінімальна питома витрата палива  $g_{e \text{ min}} = 287 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  забезпечуються при  $p_e = 0,3 \text{ МПа}$ .

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики по визначенню індикаторного ККД та програми розрахунку робочого процесу двигунів з урахуванням методу визначення індикаторного ККД двотактного двигуна з іскровим запалюванням при зовнішньому сумішоутворенні впроваджені на ДП ВАТ Мелітопольський завод "Гідромаш" (м. Мелітополь акт впровадження б/н від 29.06.2011р.).

Результати дисертаційної роботи використовуються для підготовки фахівців та магістрів УкрДУЗТ за напрямом "Теплоенергетика" і спеціальностями "Енергетичний менеджмент" та "Теплоенергетика".

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення і результати, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: визначені основні технічні вимоги до сучасних двигунів з розшаруванням паливоповітряного заряду та іскровим запалюванням; виконано аналіз способів внутрішнього сумішоутворення в двигунах з іскровим запалюванням; запропоновано коефіцієнт втрат палива, який дозволяє враховувати при визначенні індикаторного ККД двотактного двигуна з іскровим запалюванням тільки те паливо, яке згоряє; запропоновано критерій розшарування паливоповітряного заряду у двигунах з іскровим запалюванням, який дозволяє оцінювати рівень розшарування паливоповітряного заряду; виконано обробку та аналіз індикаторних діаграм двотактного двигуна з іскровим запалюванням для визначення показника і характеристики згоряння в моделі згоряння Вібе І.І. при внутрішньому та зовнішньому сумішоутвореннях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: Міжнародних конгресах двигунобудівників (м. Рибаче, АР Крим, 2007 - 2012 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях кафедр УкрДУЗТ та спеціалістів залізничного транспорту і підприємств «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2007-2014 р.); Всеукраїнських науково-технічних конференціях з міжнародною участю «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення» (м. Первомайськ, Миколаївська обл., 2007, 2009, 2011, 2013 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2009 – 2013р.), а також на науково-методичних семінарах кафедри теплотехніки та теплових двигунів УкрДУЗТ.

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 17 наукових публікаціях, з них: 9 статей у наукових фахових виданнях України (3 – у наукометричних базах), 2 статті у закордонних періодичних фахових виданнях, 5 тез доповідей, 1 патент України на винахід.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятьох розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки; з них 45 рисунка по

тексту; 3 рисунка на 3 окремих сторінках; 6 таблиць по тексту; список використаних джерел зі 115 найменувань на 11 сторінках, 2 додатка на 2 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, розкрита наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз досліджень і вимог, які висуваються до ДВЗ з ІЗ для забезпечення відповідних до сучасного рівня розвитку техніко-економічних і екологічних показників. Аналіз технічної літератури і відкритих джерел інформації показав, що найбільше поширення одержали двотактні ДВЗ з ІЗ, які встановлюються на мопеди, мотоцикли, малолітражні автомобілі, у якості приводів електричних генераторів, сільськогосподарській техніці. В двотактних двигунах найбільше застосовується карбюраторна система живлення, що призводить до значних втрат палива та збільшення викидів ШР з ВГ. Визначено, що для поліпшення еколого-економічних показників двотактних ДВЗ з ІЗ, що працюють при зовнішньому сумішоутворенні доцільно переходити на внутрішнє сумішоутворення з використанням БВП. Тому провідні світові двигунобудівні компанії розробляють і впроваджують технологію БВП у ДВЗ з ІЗ.

Подальше проведення наукових досліджень з поліпшення еколого-економічних показників двотактних ДВЗ за рахунок вдосконалення організації робочих процесів при БВП є обґрунтованим та доцільним.

У **другому розділі** побудована термодинамічна модель робочого процесу двотактного бензинового двигуна з ІЗ та розшаруванням паливоповітряного заряду при БВП.

В термодинамічній моделі робочого процесу для двотактного двигуна з ІЗ та БВП, використовується зонний підхід, тобто газоповітряний тракт двигуна розбивається на ряд зон (за призначенням) і для кожної зони складаються рівняння енергії, маси, рівняння стану і зміни об'єму зони:

$$\frac{dV}{V} = \frac{r_k \cdot F_{II} (\sin\varphi + \lambda_k / 2 \cdot \sin 2\varphi) d\varphi}{V_c + r_k \cdot F_{II} [1 - \cos\varphi + \lambda_k / 4 \cdot (1 - \cos 2\varphi)]}, \quad (1)$$

$$\frac{dM}{M} = \frac{R \cdot T}{p \cdot V} (dM_{en} - dM_e + dM_T), \quad (2)$$

$$\frac{dT}{T} = \frac{(dH_{en} - dH_e + dQ_c + dQ_w)}{C_v \cdot M \cdot T} - \frac{dM}{M} - (k - 1) \frac{dV}{V}, \quad (3)$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{dT}{T} + \frac{dM}{M} + \frac{dR}{R} - \frac{dV}{V}, \quad (4)$$

де  $r_k$ ,  $F_{\text{п}}$ ,  $V_c$  – радіус кривошипа, площа поршня і об'єм камери стиснення;  $H$ ,  $Q_c$ ,  $Q_w$  – ентальпія, теплота при згорянні і теплота при теплообміні;  $k$ ,  $R$  – показник адиабати і коефіцієнт у рівнянні стану робочого тіла в робочому циклі досліджуемого ДВЗ  $R=vario$  від 270 до 305 Дж/(кг·К).

За граничні умови прийнято стан робочого тіла в циліндрі на початку процесу стискування, температура стінок надпоршневої порожнини, тиск на впуску у кривошипну камеру та зміна тиску на випуску в глушнику, що визначались з експериментальних досліджень.

Зокрема стикування зон проведено згідно рівності потоків енергії і маси на виході з попередньої зони та вході в наступну. Процеси тепловиділення при згорянні палива та теплообмін в циліндрі двигуна моделювалися з використанням формул Вібе І.І. і Вошні Г. При цьому значення показника характеру згоряння ( $m$ ) і тривалості згоряння ( $\varphi_z$ ) у формулі Вібе І.І. визначалися на підставі експериментальних даних.

У термодинамічну модель (1)–(4) додатково введено критерій розшарування

$$L = (\alpha_{\text{цил}} - \alpha_{\text{н.ф.п.}}) / \alpha_{\text{н.ф.п.}} = ((\alpha_{\Sigma} - \alpha_{\Sigma} \cdot \nu) - \alpha_{\text{н.ф.п.}}) / \alpha_{\text{н.ф.п.}}, \quad (5)$$

де  $\alpha_{\Sigma}$  – сумарний коефіцієнт надлишку повітря двигуна;  $\alpha_{\text{цил}}$  – середній коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі двигуна;  $\nu$  – коефіцієнт витоку продувального повітря, паливоповітряної суміші;  $\alpha_{\text{н.ф.п.}} = 1,35$  – нижня межа поширення фронту полум'я в бензо-повітряних сумішах у ДВЗ з ІЗ.

Використання критерію розшарування  $L$  дозволяє якісно оцінювати вплив процесів внутрішнього сумішоутворення в циліндрі на показники двигуна в цілому та характеризує перевищення нижньої межі поширення фронту полум'я в паливоповітряних сумішах у ДВЗ з ІЗ.

Для порівняльного аналізу основних індикаторних показників двотактного двигуна із зовнішнім і внутрішнім сумішоутворенням враховується тільки та частина палива, яка згоряє в циліндрі двигуна, таким чином: втрати паливоповітряної суміші і, відповідно, палива при продувці циліндра з карбюраторною системою живлення визначаються за запропонованим коефіцієнтом втрати палива ( $Z$ ). Оскільки у двигуні із зовнішнім сумішоутворенням (з карбюратором) продувка здійснюється паливоповітряною сумішшю, то припускається, що при газообміні концентрація паливоповітряної суміші, що надходить в циліндр та витікає з нього, однакові без урахування паливної плівки на стінках газоповітряних трактів ДВЗ, яка утворюється при зовнішньому сумішоутворенні. Тому, кількість втраченого при транзиті повітря  $G_{\text{п.тр}}$  при продувці циліндра приймається пропорційним кількості втраченої паливоповітряної суміші  $G_{\text{см.тр}}$  або транзитного палива  $G_{\text{пал.тр}}$ , що визначається залежністю

$$Z = \frac{G_{\text{н.тр}}}{G_{\text{н.ц}}} = \frac{G_{\text{см.тр}}}{G_{\text{см.ц}}} = \frac{G_{\text{пал.тр}}}{G_{\text{пал.ц}}}, \quad (6)$$



де  $G_{\text{пал.тр}}$  – кількість транзитного палива, що втрачено при продувці циліндра, кг/год;  $G_{\text{пал.ц}}$  – кількість палива, що залишилося у циліндрі, кг/год;  $G_{\text{см}}$  – кількість паливоповітряної суміші що надходить на впуск у циліндр, кг/год;  $G_{\text{см.тр}}$  – кількість транзитної паливоповітряної суміші, яка втрачена при продувці циліндра, кг/год.

Таким чином, визначення індикаторного ККД для двигуна із зовнішнім сумішоутворенням проводиться за формулою

$$\eta_i = \frac{L_i}{Q_n \cdot G_{\text{пал}}} = \frac{L_i}{Q_n \cdot (G_{\text{пал.ц}} + G_{\text{пал.тр}})} = \frac{L_i}{Q_n \cdot G_{\text{пал.ц}} \cdot (1 + Z)} = \eta'_i \cdot \frac{1}{1 + Z}, \quad (7)$$

де  $\eta'_i$  – індикаторний ККД, який визначається за новим методом;  $\eta_i$  – індикаторний ККД, який визначається за загальновизнаним методом;  $L_i$  – індикаторна робота газів за цикл, кДж/цикл;  $Q_n$  – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг.

Одним із визначальних факторів, що характеризують досконалість протікання процесів газообміну у ДВЗ, є коефіцієнт залишкових газів  $\gamma$ . Для визначення  $\gamma$  використана тривимірна газодинамічна модель процесу газообміну у двотактному ДВЗ з ІЗ, а для порівняння результатів моделювання застосовувалися експериментальні данні.

Для проведення аналітичних досліджень на базі твердотілої моделі двигуна побудована сіткова модель (рис. 1), розділена на три топологічно не зв'язані між собою частини (домени), що містять у собі: простір циліндра і камеру згоряння; проточну область випускного каналу; область продувних каналів й “умовну” область кривошипної камери. Граничними умовами при газодинамічному моделюванні є теплофізичні властивості робочого тіла (середня масова ізобарна теплоємність  $C_{pm}$ ) та значення розрідження на впуску  $\Delta p_s$  залежно від навантаження двигуна. Відпрацювання моделі проводилося на підставі експериментальних даних, які отримано на двигуні із зовнішнім сумішоутворенням, далі модель інтерпретувалася на двигун з БВП і розшаруванням паливоповітряного заряду, після цього проводився розрахунок для визначення коефіцієнта залишкових газів.

Використання вдосконаленої термодинамічної моделі дозволяє розраховувати робочий процес ДВЗ з ІЗ на різних режимах роботи при використанні БВП з врахуванням критерію розшарування, що оцінює якість організації внутрішнього сумішоутворення. Застосування коефіцієнту втрат палива при визначенні індикаторного ККД двотактного двигуна дозволяє коректно проводити порівняльний аналіз при зовнішньому та внутрішньому сумішоут-

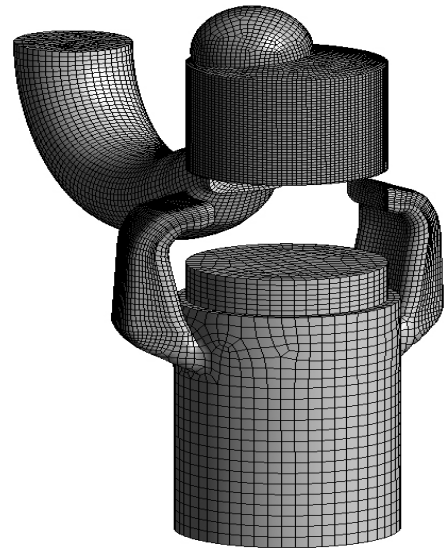


Рисунок 1 – Сіткова модель розрахункової області

вореннях. Використання тривимірної газодинамічної моделі (MTFS) дозволяє визначити показники газообміну у двотактному двигуні.

У **третьому розділі** обґрунтовується напрямок і наводиться методика проведення експериментальних досліджень робочого процесу в одноциліндровому двотактному двигуні ДН-4М (де літера «М» вказує на модернізацію), ( $S/D = 8,7/8,2$ ) з ІЗ, повітряним охолодженням і кривошипно-камерною продувкою виробництва заводу ДП ВАТ «Гідромаш» (м. Мелітополь) за навантажувальною характеристикою при частоті обертання колінчастого валу  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ . Дійсний ступінь стискання при використанні карбюратора склала  $\varepsilon_d = 6$ , при модернізації двигуна за рахунок зміни форми та об'єму камери згоряння  $\varepsilon_d = 8,4$ .

Для проведення досліджень робочих процесів і оцінки рівня показників двотактного двигуна ДН-4 з ІЗ використаний моторний стенд з гідравлічним гальмом "Schenk" з граничною частотою обертання ротора  $n = 10^4 \text{ хв}^{-1}$  (рис. 2). Стенд і його вимірювальний комплекс дозволяють проводити дослідження робочих процесів двигуна та паливної апаратури.



Рисунок 2 – Експериментальний стенд з двигуном ДН-4 та вимірювальною апаратурою

Наведена методика визначення похибок вимірювання показників двигуна та програма експериментальних досліджень.

У **четвертому розділі** представлені результати експериментальних та розрахункових досліджень робочого процесу двотактного ДВЗ з ІЗ.

На двигуні з БВП досліджено внутрішнє сумішоутворення з розшаруванням паливоповітряного заряду (РППЗ), та зі збідненою паливоповітряною сумішшю (ЗППС) за наванта-

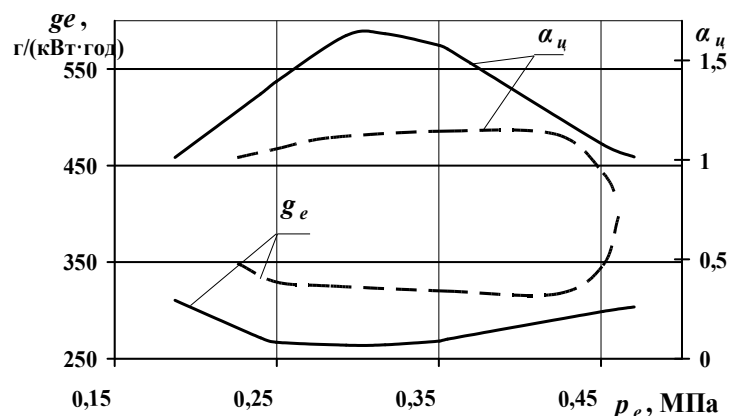


Рисунок 3 – Навантажувальна характеристика ( $n=3000 \text{ хв}^{-1}$ ) при різних способах сумішоутворення: - - - ЗППС; — РППЗ

жувальною характеристикою (рис.3).

Під РППЗ мається на увазі така організація процесу сумішоутворення, при якій забезпечується різна за об'ємом камери згоряння концентрація паливоповітряної суміші. При цьому в зоні електродів свічки запалювання концентрується паливоповітряна суміш з  $\alpha = 0,4-1,25$ , а біля стінок камери згоряння – практично тільки повітря. Під ЗППС мається на увазі така організація процесу сумішоутворення, при якій забезпечується однакова по всьому об'єму камери згоряння однорідна або постійна концентрація суміші на межі поширення фронту полум'я (або  $\alpha = 1,15-1,25$ ).

Технічна реалізація РППЗ і ЗППС здійснювалась при проведенні експерименту на двигуні ДМ-4М шляхом розміщення форсунок з різними розпилювачами. Момент початку подачі палива при максимальній цикловій подачі склав  $\varphi_{впр} = 205$  гр. ПКВ після ВМТ, а раціональний кут випередження запалювання –  $\Theta_{зап} = 27$  гр. ПКВ до ВМТ для ЗППС та  $\Theta_{зап} = 20$  гр. ПКВ до ВМТ для РППЗ.

При використанні РППЗ забезпечується стійка робота двигуна в більш широкому діапазоні навантаження  $P_e$ , питома ефективна витрата палива знижена на 9–17 % відносно ЗППС. При цьому значення  $g_{emin}$  має місце в діапазоні від  $P_e = 0,26$  МПа до  $P_e = 0,36$  МПа (рис. 3) при максимальному значенні коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha_{ц max} = 1,63$ .

Для організації РППЗ використовується модернізований клапанний розпилювач (рис. 4). Розпилювач форсунки (технічна новизна захищена патентом України на винахід) сприяв формуванню кумулятивного паливного струменя з зовнішнім кутом розкриття  $\sim 25^\circ$ , який було спрямовано на поверхню камери згоряння біля електродів свічки запалювання. При русі поршня на такті стиснення повітряний потік спрямовано над паливною плівкою, де утворюється збагачена паливоповітряна суміш, яка рухається в напрямку електродів свічки запалювання. При експериментальних дослідженнях на режимах холостого ходу і часткових навантажень в момент подачі ІЗ на периферії паливоповітряної суміші та біля стінок надпоршневого об'єму знаходиться повітря з продуктами згоряння.

При максимальному навантаженні об'єм паливоповітряної суміші займає весь об'єм камери згоряння. Для забезпечення ЗППС використовується паливна форсунка з розпилювачем без співвісної циліндричної насадки (1) на голці-розпилювачі (3) (рис. 4). Конструкція розпилювача сприяє периферійному розподілу палива у паливному струмені зі збільшеним зовнішнім кутом його

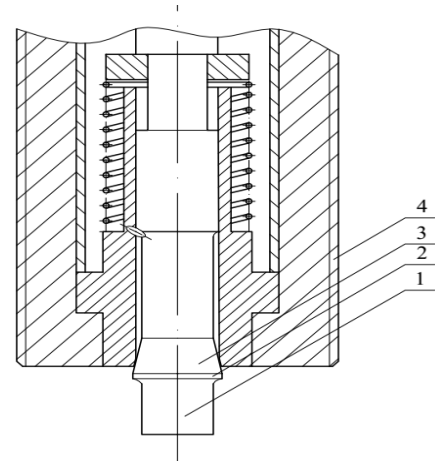


Рисунок 4 – Розпилювач форсунки для створення РППЗ при БВП:

- 1 – співвісна циліндрична насадка;
- 2 – зворотній запірний конус;
- 3 – голка-розпилювача;
- 4 – різьблення для установки форсунки у двигун

розкриття (до  $40^\circ$ ), що дозволяє взаємодіяти з повітряними потоками у циліндрі й формувати однорідну паливоповітряну суміш по всій надпоршневій порожнині. Відповідно до газового аналізу та тривимірної газодинамічної моделі процесу газообміну ДВЗ визначено характер зміни значень коефіцієнта залишкових газів  $\gamma$  в залежності від навантаження двигуна (рис. 5). Значення коефіцієнта залишкових газів, отримані шляхом обробки результатів газового аналізу для ДВЗ з карбюратором склали 23% при  $p_e = 0,21$  МПа, з ростом навантаження до  $p_e = 0,45$  МПа значення  $\gamma$  знизилася до 17%.

При визначенні  $\gamma$  шляхом тривимірного моделювання в пакеті MTFS газодинамічних процесів для ДВЗ з карбюратором значення  $\gamma$  в циліндрі двигуна змінюються від 23 % до 16,4% при  $p_e = 0,21 - 0,45$  МПа. При застосуванні БВП значення  $\gamma$  змінюються від 11,6 % до 13% в діапазоні навантажень при  $p_e = 0,21 - 0,47$  МПа.

Результати визначення індикаторного ККД (рис. 6) двигуна з зовнішнім та внутрішнім сумішоутворенням, отримані згідно залежності (7) та запропонованого коефіцієнту втрат палива  $Z$  відповідно до залежності (6). Значення коефіцієнту  $Z$  зростають від 0,170 до 0,348 при

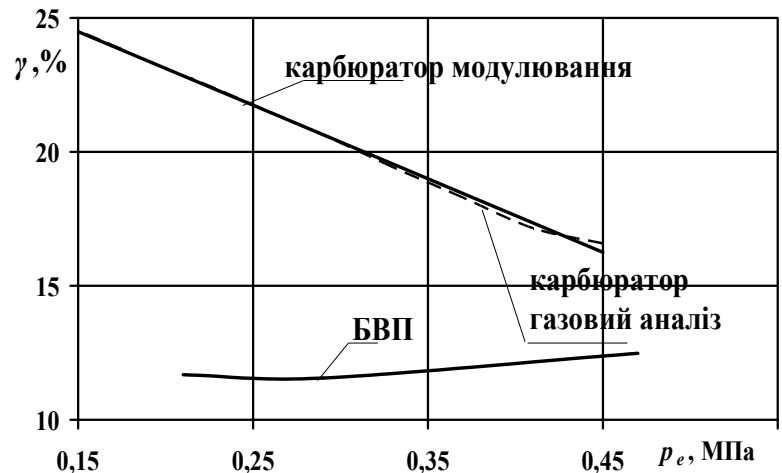


Рисунок 5 – Значення коефіцієнта залишкових газів по навантажувальній характеристиці ( $n=3000 \text{ хв}^{-1}$ )

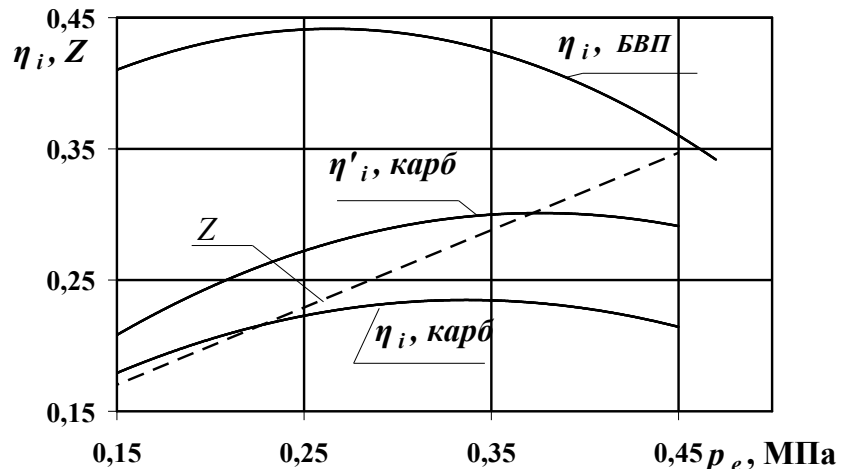


Рисунок 6 – Зміна індикаторного ККД двигуна з БВП та карбюратором по навантажувальній характеристиці ( $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ )

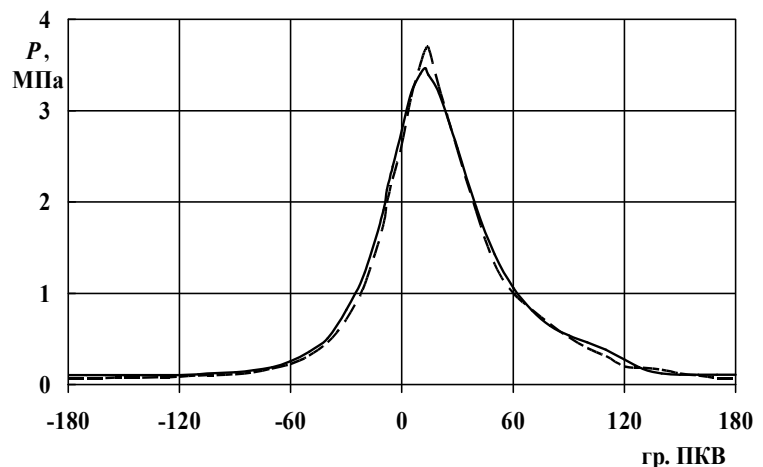


Рисунок 7 – Індикаторні діаграми двигуна ДН-4М, отримані за результатами експерименту та при моделюванні ( $P_e = 0,47$  МПа та  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ )

збільшенні навантаження двигуна від  $p_e = 0,15$  МПа до  $p_e = 0,45$  МПа. Максимальне значення індикаторного ККД, що визначено за розробленим методом, при зовнішньому сумішоутворенні з урахуванням втрат палива при газообміні становить  $\eta_i' = 29,9$  % ( $p_e = 0,325-0,375$  МПа), а при визначенні індикаторного ККД без урахування втрат палива при продувці складає  $\eta_i = 23,6$  % ( $p_e = 0,290-0,325$  МПа).

Використання БВП та РППЗ дозволило отримати максимальний рівень індикаторного ККД  $\eta_{i\text{БВП}} = 44,2$  % при  $p_e = 0,250-0,275$  МПа, що відповідає зоні максимального розшарування паливоповітряного заряду.

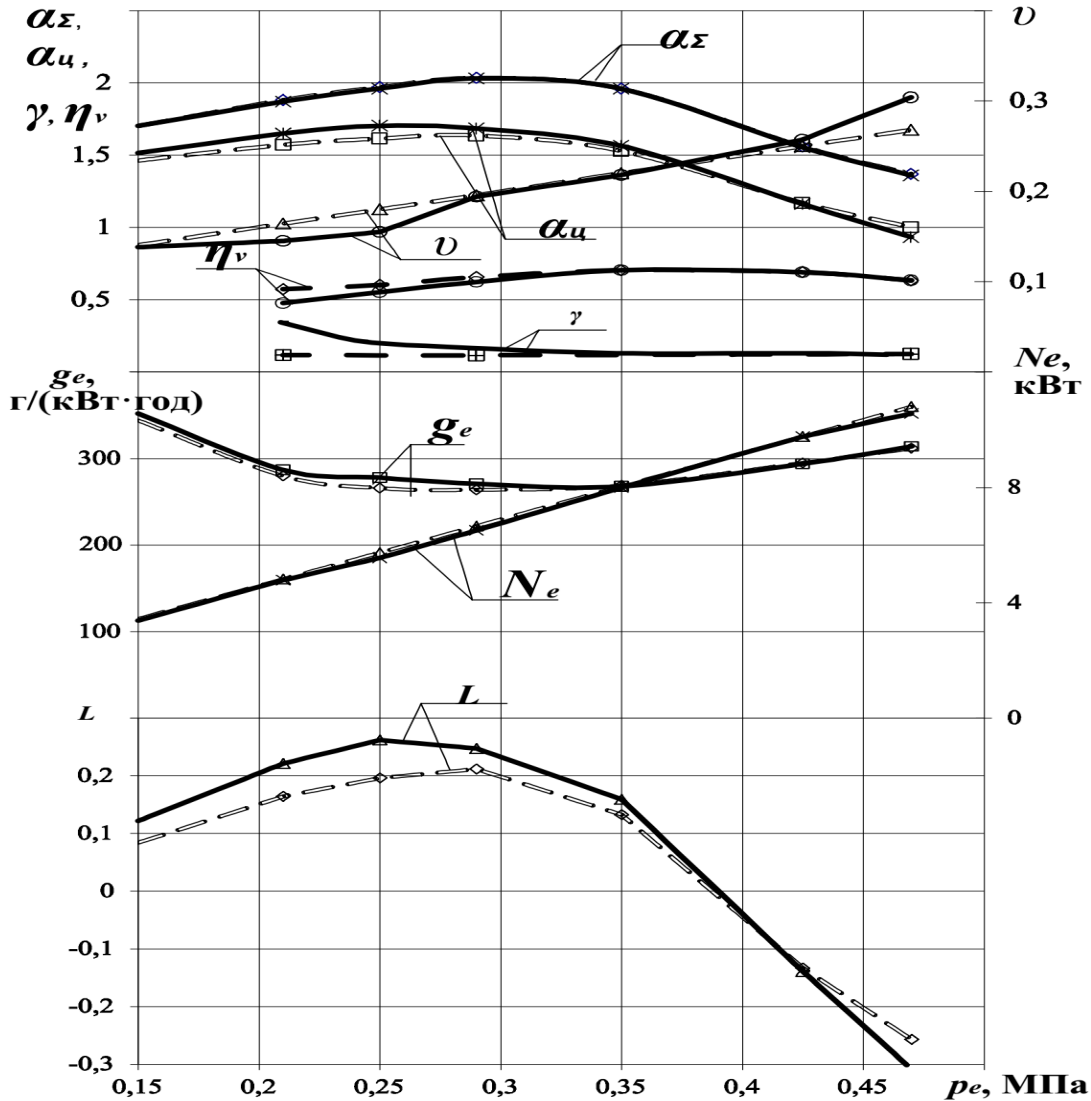


Рисунок 8 – Навантажувальна характеристика двигуна ДН-4М при  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup>

Результати порівняльного аналізу при термодинамічному моделюванні (суцільна лінія) та експериментальних дослідженнях (пунктирна лінія) ДН-4М з БВП і РППЗ за навантажувальною характеристикою при  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup> (рис. 7–8) отримані відповідно до раціональних параметрів  $\varphi_{\text{впр}}$  і  $\Theta_{\text{зап}}$  відносно мінімальних значень  $g_e$ . В діапазоні навантажень при  $p_e = 0,15-0,23$  МПа –  $\varphi_{\text{впр}} = 44$  гр. ПКВ після НМТ,  $\Theta_{\text{зап}} = 8$  гр. ПКВ до ВМТ; при  $p_e = 0,23-0,43$  МПа –

$\varphi_{\text{впр}}=44$  гр. ПКВ після НМТ і  $\Theta_{\text{зап}} = 10$  гр. ПКВ до ВМТ; при  $p_e = 0,430\text{--}0,465$  МПа –  $\varphi_{\text{впр}} = 20$  гр. ПКВ після НМТ і  $\Theta_{\text{зап}}=27$  гр. ПКВ до ВМТ.

Розрахункова індикаторна діаграма з точністю до  $\pm 5\%$  описує діаграму, яка отримана в результаті експериментальних досліджень (рис. 7). Максимальне відхилення становить 0,2 МПа.

Аналіз кривих залежностей показників якості газообміну ( $\eta_v$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ ) двигуна (рис. 8) показав, що значення  $\alpha_\Sigma$  і  $\alpha_\Pi$  відрізняються менш ніж на 3% від результатів експериментальних досліджень. Тільки в діапазоні  $p_e = 0,15\text{--}0,35$  МПа має місце відхилення значень  $\alpha_\Pi$  на 4,5 %. Значення коефіцієнта витоку продувального повітря  $\nu$ , отримані розрахунковим методом, відрізняються від експериментальних досліджень не більше ніж на 5%.

Значення  $g_e$  за навантажувальною характеристикою при  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup>, отримані під час експериментальних і розрахункових досліджень практично збігаються. Відмінність не перевищує  $\pm 4\%$ . Максимальний рівень РППЗ відповідає максимальному значенню критерію розшарування  $L = 0,21$  в діапазоні  $p_e = 0,21\text{--}0,29$  МПа навантажень (рис. 8). При підвищенні навантаження ( $p_e = 0,37\text{--}0,47$  МПа), де  $L$  перетинає нульове значення, має місце відсутність розшарування паливоповітряної суміші. Наведена термодинамічна модель з точністю  $\pm 5\%$  відображає фізичні процеси у ДВЗ з ІЗ та РППЗ.

На базі експериментальних даних отримані емпіричні залежності динаміки згоряння  $m$ , тривалості згоряння  $\varphi_z$  для двигуна ДН-4М з БВП і РППЗ при  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup> залежно від годинної витрати палива  $G_t$ , кута випередження запалювання  $\Theta_{\text{зап}}$ , кута початку вприскування палива  $\varphi_{\text{впр}}$  та критерія  $L$ :

$$m = 1,86 + 0,00576G_t + 0,00668\Theta_{\text{зап}} - 0,00658\varphi_{\text{впр}} - 0,00658L, \quad (8)$$

$$\varphi_z = -36,16 - 5,841G_t + 2,713\Theta_{\text{зап}} + 2,051\varphi_{\text{впр}} - 119,61L. \quad (9)$$

Наведені залежності (8) і (9) з точністю до 3% описують зміну  $m$  і  $\varphi_z$ , тому рекомендується їх використовувати на режимах навантаження при  $p_e = 0,15\text{--}0,47$  МПа.

У п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень при безпосередньому вприскуванні бензо-етанольних сумішей та організації РППЗ, на основі яких складено зовнішній тепловий баланс двигуна ДН-4М (рис. 9). За тепловим балансом ДВЗ визначено, що тільки близько 30 % теплоти згоряння палива перетворюється в механічну роботу, у той час як 30–35 % втрачається з відпрацьованими газами і приблизно 30 % потрапляє у систему охолодження. Серед різних спиртів і їх сумішей найбільшого поширення в якості моторного палива отримали метанол та етанол. З точки зору безпеки для життєдіяльності людини доцільно використовувати етанол в паливних сумішах. Основними недоліками спиртових палив є знижена питома теплота згоряння, висока прихована теплота випаровування й низький тиск насиченої пари.

При дослідженнях використовувалися три види бензо-етанольних сумішей:  $E10$ ,  $E15$ ,  $E20$ , де цифри вказують на об'ємний вміст спирту у паливній суміші. Оскільки, затрачувана енергія на здійснення роботи при різному складі бензо-етанольної суміші відрізняється за теплою згоряння  $Q_n^p$ , то для оцінки економічності двигуна доцільно використовувати порівняння за ефективним ККД ( $\eta_e$ ).

Експериментально встановлено, що за навантажувальною характеристикою при  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$  для бензо-етанольних сумішей (рис. 10) найбільш високі значення з економічності ( $g_e$  і  $\eta_e$ ) забезпечуються при роботі на суміші  $E10$ . Мінімальні значення  $g_e$  мають місце в діапазоні навантажень при  $p_e = 0,25\text{--}0,35 \text{ МПа}$ . З підвищенням навантаження  $p_e$  різниця між рівнем  $g_e$  при використанні різного складу сумішей зменшується; мінімальні значення  $g_e$  забезпечуються при  $p_e = 0,3 \text{ МПа}$  і відповідно дорівнюють: для  $E10$  –  $g_e = 287 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ,  $E15$  –  $g_e = 300 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ , і  $E20$  –  $g_e = 316 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ . Підвищення  $g_e$  з ростом вмісту спирту в суміші викликане меншою питомою теплою згоряння спирту, ніж бензину.

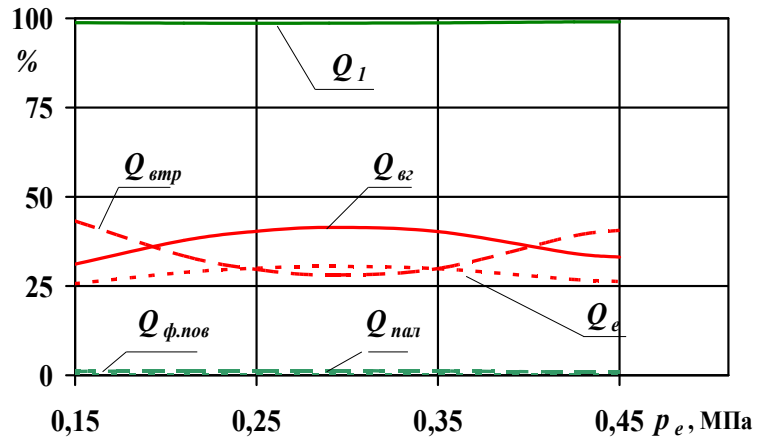


Рисунок 9 – Зовнішній тепловий баланс двигуна за навантажувальною характеристикою ( $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ ):  $Q_1$  – кількість підведеної теплоти;  $Q_{ф.пов}$  – кількість теплоти внесеної з повітрям;  $Q_{пал}$  – кількість теплоти внесеної з паливом;  $Q_e$  – кількість теплоти перетвореної в корисну роботу;  $Q_{вз}$  – кількість теплоти, що йде з ВГ;  $Q_{втр}$  – залишкові теплові втрати

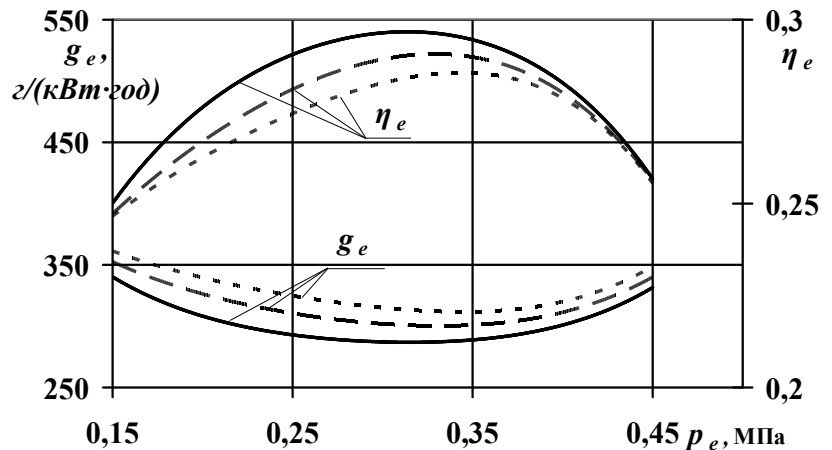


Рисунок 10 – Навантажувальна характеристика ( $n=3000 \text{ хв}^{-1}$ ) ДН-4М при роботі на бензо-етанольних сумішах: - - - -  $E20$ ; - - - -  $E15$ ; — — —  $E10$

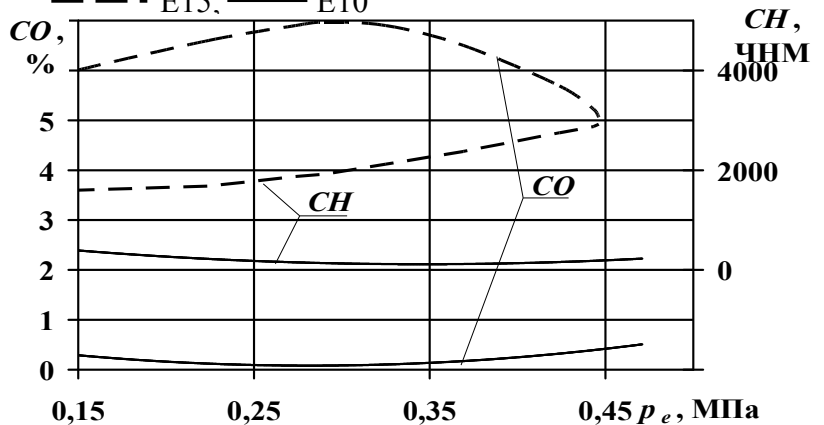


Рисунок 11 – Викиди ШР ( $CO$ ,  $CH$ ) з ВГ двигуна ДН-4М: - - - - карбюратор; — — — БВП

В результаті експериментальних досліджень двотактного двигуна ДН-4М з БВП і РППЗ визначено, що при переході на бензо-етанольні суміші *E10*, *E15*, *E20* забезпечується стійка робота у всьому діапазоні навантажень без змін регулювальних параметрів, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати палива. Використання бензо-етанольних сумішей *E10*, *E15*, *E20* дає можливість зменшити витрати бензину на 2-7 %.

Застосування БВП при роботі за навантажувальною характеристикою (рис. 8) дозволило зменшити викиди ШР з ВГ: *CO* – до 0,08 %, *CH* – до 70 ЧНМ (рис. 11). При роботі ДН-4М з безпосереднім вприскуванням бензо-етанольних сумішей *E10*, *E15*, *E20* (рис. 12) та організації РППЗ встановлено, що за рівнем викидів *CO* і *CH* забезпечується виконання вимог Еуро-VI.

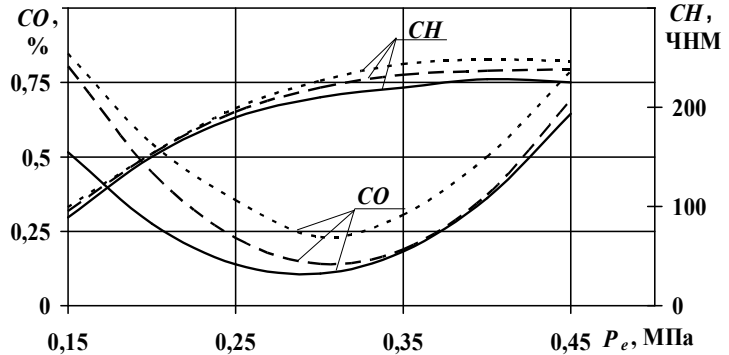


Рисунок 12 – Навантажувальна характеристика ( $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ ) ДН-4М викидів ШР з ВГ (*CO* та *CH*) при роботі на бензо-етанольних сумішах:  
 - - - - E20; — — E15; — E10

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі поліпшення еколого-економічних показників двотактного ДВЗ з ІЗ за рахунок вдосконалення робочого процесу та використання бензо-етанольних сумішей. На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Проаналізовано способи організації існуючих типів сумішоутворення у ДВЗ з ІЗ. Визначено доцільність використання внутрішнього сумішоутворення при БВП, що обумовлює зниження питомої витрати палива та вмісту ШР у ВГ. Запропоновано загальні положення стосовно удосконалення робочого процесу двотактного ДВЗ з ІЗ та організації розшарованого паливоповітряного заряду, що визначає перспективи використання двигунів у промисловості.

2. Запропоновано і обґрунтовано критерій розшарування  $L$ , який дозволяє якісно оцінити вплив процесів внутрішнього сумішоутворення на показники двигуна в цілому. Розроблено метод по визначенню критерія  $L$  у ДВЗ з ІЗ при БВП та розшаруванні паливоповітряної суміші. Межа зміни  $L$  при мінімальному навантаженні ( $p_e = 0,15 \text{ МПа}$ ) складає 0,09, з ростом навантаження до  $p_e = 0,275 \text{ МПа}$  досягає максимального значення 0,21. При подальшому навантаженні значення  $L$  зменшуються, що відповідно характеризує зменшення рівня розшарування й при  $L=0$  ( $p_e = 0,37 \text{ МПа}$ ) – відсутність розшарування, як і в діапазоні максимальних навантажень ( $p_e = 0,37\text{--}0,47 \text{ МПа}$ ), де значення  $L$  стають менше нуля.



3. Запропоновано коефіцієнт  $Z$ , за допомогою якого визначений індикаторний ККД двотактного двигуна із зовнішнім сумішоутворенням  $\eta_i' = 29,9\%$  в діапазоні  $p_e = 0,325\text{--}0,375$  МПа, який враховує тільки те паливо, яке згоряє в циліндрі двигуна.

4. На основі експериментальних даних одержані регресійні залежності показників динаміки та тривалості згоряння моделі Вібе І.І. для двотактного ДВЗ з ІЗ і внутрішнім сумішоутворенням, які відрізняються від відомих врахуванням витрати палива, кута випередження запалювання, кута початку вприскування палива й критерію розшарування паливоповітряного заряду, які дозволяють моделювати процес згоряння у всьому діапазоні навантажень без проведення експериментальних досліджень при частоті обертання колінчастого валу  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup>.

5. Термодинамічна модель робочого процесу двотактного ДВЗ з ІЗ доповнена критерієм розшарування і з точністю до  $\pm 5\%$  описує процеси, що протікають у ДВЗ при БВП та організації розшарованого паливоповітряного заряду.

6. Визначенні основні показники процесу газообміну двигуна ДН-4М: значення коефіцієнту витoku продувного повітря  $v$  на режимах навантажувальної характеристики при  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup> змінюється від 0,05 до 0,28; значення коефіцієнту залишкових газів у циліндрі двигуна  $\gamma$  змінюється від 11,6% до 13% у діапазоні навантажень  $p_e = 0,21\text{--}0,47$  МПа, що є основою моделювання процесів газообміну у ДВЗ з ІЗ та БВП.

7. Комплекс стендових експериментальних досліджень по організації робочого процесу з розшаруванням паливоповітряного заряду з використанням запропонованої конструкції розпилювача форсунки показав, що забезпечується стабільна робота двигуна у більш широкому діапазоні навантажень (до  $p_e = 0,47$  МПа) й, за рахунок підвищення значень коефіцієнту надлишку повітря у циліндрі  $\alpha_{ц}$  на 30 % при частковому навантаженні, на 10-20 % знижується витрата палива і в 2-5 разів зменшується кількість викидів ШР ( $CO$ ,  $CH$ ) з ВГ.

8. Застосування безпосереднього вприскування палива в двигуні ДН-4М на режимах навантажувальної характеристики дозволило знизити в 1,83 рази витрати палива при значеннях ефективного ККД  $\eta_{e \max} = 0,31$ , знизити вміст ШР ( $CO$ ,  $CH$ ) у ВГ двотактного двигуна з ІЗ в 7-10 раз, за рахунок виключення втрат палива при продувці циліндра, зменшення опору на впуску та підвищення ступеня стискання й організації ефективного згоряння розшарованого паливоповітряного заряду.

9. Експериментально визначено, що у двотактних двигунах з ІЗ при БВП і організації розшарованого паливоповітряного заряду та використанні бензо-етанольних сумішей забезпечується стійка робота ДВЗ у всьому діапазоні навантажень без змін регульовальних параметрів, що забезпечує більш високі економічні і екологічні показники, ніж в аналогічних двигунах із зовнішнім сумішоутворенням. При роботі двигуна ДН-4М на суміші  $E10$  мініма-

льні значення питомої витрати палива  $g_{e \min} = 287 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  забезпечуються при навантаженні  $p_c = 0,3 \text{ МПа}$ .

10. Результати роботи у вигляді методики визначення індикаторного ККД та програми розрахунку робочого процесу двигунів з урахуванням методу визначення індикаторного ККД двотактного двигуна з ІЗ при зовнішньому сумішоутворенні впроваджені на ДП ВАТ "Гідромаш"(м. Мелітополь) та в учбовому процесі УкрДУЗТ.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Василенко О.В. Визначення тривалості згоряння 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 визначено показник згоряння й тривалості згоряння в моделі Вібе І.І.*

2. Василенко О.В. Определение показателей сгорания по индикаторным диаграммам двухтактного двигателя с карбюратором и непосредственным впрыском топлива / В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2007. – Вип. 37. – С. 60–67. *Здобувачем проведено обробку індикаторних діаграм.*

3. Василенко О.В. Анализ экономических и экологических показателей двухтактного двигателя ДН–4М с карбюратором и непосредственным впрыском топлива / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, О.В. Василенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – №1. – С. – 70–76. *Здобувачем виконано порівняння індикаторних показників двигуна із внутрішнім і зовнішнім сумішоутворенням та визначено індикаторні показники двотактного двигуна за новим методом.*

4. Василенко О.В. Особенности электронной системы керування двотактним двигуном з іскровим запалюванням та безпосереднім вприскуванням 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 розглянута проблема розробки ефективної системи регулювання робочого процесу з розшаруванням паливо-повітряної суміші при безпосередньому вприскуванні палива (БВП).*

5. Василенко О.В. 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 &. – Москва 2009. – № 1. – С. 36–40. *Здобувачем визначено термічний ККД двигуна для виявлення резервів по підвищенню показників робочого процесу.*

6. Василенко О.В. Дослідження процесів плівкового 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 метод розрахунку процесів внутрішнього сумішоутворення у ДВЗ із БВП.*

7. Василенко О.В. Экспериментальное определение коэффициента утечки продувочного воздуха или топливно-воздушной смеси в двухтактном двигателе с искровым зажиганием / В.А. Корогодский, С.В. Обозный, О.В. Василенко, С.А. Цикра // *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. – 2010. – Вип. 112. – С. 203–208. *Здобувачем виконано обробку експериментальних даних для визначення коефіцієнта витoku у двотактному двигуні.*

8. Василенко О.В. 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 отримані емпіричні залежності щодо визначення теплофізичних властивостей робочого тіла на такті стиску для використання в газодинамічній моделі.*

9. Василенко О.В. Определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с искровым зажиганием / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, О.В. Василенко, А.А. Хандримайлов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2011. – №2. – С. 13–19. *Здобувачем шляхом моделювання визначено значення коефіцієнта залишкових газів.*

10. Василенко О.В. 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 розглянуті переваги та недоліки збідніння і розширювання паливоповітряної суміші при безпосередньому вприскуванні палива.*

11. Василенко О.В. Расчетно-экспериментальные исследования двухтактного двигателя внутреннего сгорания с непосредственным впрыскиванием топлива и искровым зажиганием / С.А. Ерощенков, В.А. Корогодский, О.В. Василенко, Е.П. Воропаев // *Ползуновский Вестник*. – Барнаул, 2013. – №4/3. – С. 106–109. *Здобувачем розраховано коефіцієнт перевищення нижньої межі поширення фронту полум'я в паливо-повітряних сумішах у ДВЗ та розроблено математичні регресійні моделі залежностей показника і характеристики згоряння в моделі згоряння Вібе I.I.*

12. Пат. 93960, Україна, МПК7 F02M 57/00, F02M 59/00, F02M 61/00. Форсунка для вприскування рідкого палива у двигун внутрішнього згоряння / Савінов О.І., Корогодський В.А., Єрощенков С.А., Василенко О.В.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – №а200913445. заявл. 23.12.2009; опубл. 25.03.2011, Бюл. №6/2011. *Здобувачем визначено основні конструктивні параметри розпилювача паливної форсунки.*

13. Василенко О.В. Концепція газодинамічної моделі двотактного високооборотного двигуна / С.А. Єрощенков, В.А. Корогодський, Є.П. Воропаєв, О.В. Василенко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII Міжнар. науч.-техн. конф., 12–14 травня 2010 р.: тези доп.* – У

4 ч. – Ч.1. – Харків, 2010. – С. 168. *Здобувачем проаналізовано існуючі газодинамічні моделі двигунів внутрішнього згорання.*

14. Василенко О.В. Особливості термодинамічної моделі робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням і безпосереднім вприскуванням палива / С.А. Єрощенков, В.А. Корогодський, Є.П. Воропаєв, О.В. Василенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII Міжнар. науч.-техн. конф., 12–14 травня 2010 р.: тези доп. – У 4 ч. – Ч.1. – Харків, 2010. – С. 170. *Здобувачем запропоновано термодинамічну модель робочого процесу двигуна з ІЗ та БВП, яка враховує особливості визначення коефіцієнтів газообміну.*

15. Василенко О.В. Определение коэффициента остаточных газов в двухтактном двигателе с внешним смесеобразованием / С.А. Єрощенков, В.А. Корогодський, А.А. Хандримайлов, О.В. Василенко // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: III Всеукр. наук.-техн. конф., 17–19 травня 2011 р.: тези доп. – Миколаїв, 2011. – С. 39–40. *Здобувачем визначено основні показники процесу газообміну ДВЗ із зовнішнім сумішоутворенням.*

16. Василенко О.В. Використання суміші етилового спирту та бензину як альтернативного палива у двигунах з іскровим запалюванням / С.А. Єрощенков, В.А. Корогодський, С.В. Обозний, О.В. Василенко // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: 74 Міжнар. наук.-техн. конф., 24–25 квітня 2012 р.: тези доп. – Харків, 2012. – С. 21. *Здобувачем доведено можливість використання бензо-етанольних сумішей як альтернативного палива у двигунах з іскровим запалюванням.*

17. Василенко О.В. Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива / С.А. Єрощенков, В.А. Корогодський, О.В. Василенко, С.В. Обозний, Е.П. Воропаєв // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: V Всеукр. наук.-техн. конф., 22–23 травня 2013 р.: тези доп. – Миколаїв, 2013. – С. 86. *Здобувачем розроблено фізико-математичну модель робочого циклу ДВЗ з урахуванням запропонованого коефіцієнту газообміну.*

## АНОТАЦІЇ

**Василенко О.В. Удосконалення робочого процесу двотактного двигуна з іскровим запалюванням і безпосереднім вприскуванням палива.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 - двигуни та енергетичні установки. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – Харків, 2016 р.

Дисертація присвячена поліпшенню еколого-економічних показників двотактних ДВЗ з іскровим запалюванням шляхом застосування безпосереднього вприскування палива. Визначено, що перспективним способом внутрішнього сумішоутворення при безпосередньому вприскуванні палива є організація розшарованого паливоповітряного заряду, що забезпечує покращення

еколого-економічних показників. Запропоновано критерій  $L$ , який характеризує рівень розшарування паливоповітряного заряду, дозволяє якісно оцінити вплив процесів сумішоутворення на показники двигуна в цілому. Запропоновано коефіцієнт  $Z$ , за допомогою якого визначається індикаторний ККД двотактного двигуна із зовнішнім сумішоутворенням, який враховує тільки те паливо, яке згоряє в циліндрі ДВЗ. Застосування безпосереднього вприскування бензину з розшаруванням паливоповітряного заряду на режимах навантажувальній характеристиці при  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$  дозволило зменшити в 1,83 рази витрати палива при значенні ефективного ККД  $\eta_{e \max} = 0,31$ , в 7–10 раз знизити вміст шкідливих речовин ( $CO$ ,  $CH$ ) у відпрацьованих газах, також використання бензо-етанольних сумішей забезпечило стійку роботу двигуна у всьому діапазоні навантажень та більш високі економічні і екологічні показники, чим при використанні карбюраторної системи живлення.

*Ключові слова:* теорія двигунів, фізичне та математичне моделювання, безпосереднє вприскування палива, розшарування паливоповітряного заряду, паливоповітряна суміш, двотактні двигуни, іскрове запалювання.

**Василенко О.В. Совершенствование рабочего процесса двухтактного двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыском топлива.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 - двигатели и энергетические установки. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2016 г.

Диссертация посвящена улучшению эколого-экономических показателей двухтактных ДВС с искровым зажиганием путем применение системы непосредственного впрыска топлива в камеру сгорания. На двигателе ДН-4М проведены экспериментальные исследования с расслоением и обеднением топливновоздушного заряда при непосредственном впрыске топлива. Для обеспечения организации расслоенного топливновоздушного заряда применяется клапанная форсунка с модернизированным распылителем (техническая новизна защищена патентом Украины на изобретение), обеспечивающим кумулятивную топливную струю, направленную на поверхность камеры сгорания возле электродов свечи зажигания. На такте сжатия воздушный поток движется над топливной пленкой, где организуется обогащенная топливновоздушная смесь, которая направляется к электродам свечи зажигания. При этом на режимах холостого хода и на частичных нагрузках на момент подачи искры зажигания на периферии топливновоздушной смеси, возле стенок надпоршневого объема, располагается воздушный заряд с продуктами сгорания. Определено, что перспективным способом внутреннего смесеобразования при непосредственном впрыскивании топлива в цилиндр двигателя является организация расслоенного топливновоздушного заряда, что позволяет улучшить экономические показатели и выполнить современные требования по выбросам вредных веществ с отработавшими газами для двухтактных двига-

телей. Использована известная термодинамическая модель для расчета рабочего процесса двигателя. В модель введен критерий  $L$ , характеризующий уровень расслоения топливно-воздушного заряда, позволяющий качественно оценить влияние процессов внутреннего смесеобразования на показатели двигателя в целом, и разработан метод по определению данного критерия  $L$  в двигателях с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива с расслоением топливно-воздушного заряда. Применение непосредственного впрыска топлива на режимах нагрузочной характеристики позволило снизить в 1,83 раза расход топлива при значении эффективного КПД  $\eta_{emax} = 0,31$ , снизить содержание вредных веществ ( $CO$ ,  $CH$ ) в отработавших газах двухтактного двигателя с искровым зажиганием в 7–10 раз. Определены показатели газообмена: коэффициент утечки продувочного воздуха, топливно-воздушной смеси и коэффициент остаточных газов в цилиндре двигателя. Впервые получены эмпирические формулы (через регрессивные функции) для определения динамики и продолжительности сгорания для двигателя ДН-4М при  $n = 3000$  мин<sup>-1</sup> в зависимости от часового расхода топлива, угла опережения зажигания, угла начала впрыскивания топлива и предложенного критерия расслоения топливно-воздушного заряда. Составлен внешний тепловой баланс двигателя ДН-4М, определены основные статьи, которые отвечают за приход и расход тепловой энергии в двигателе. Выявлено, что резервами повышения показателей работы двигателя являются снижение тепловых потерь с отработавшими газами и в систему охлаждения. В двухтактных двигателях с искровым зажиганием при непосредственном впрыскивании топлива и с расслоением топливно-воздушного заряда при использовании бензо-этанольных смесей обеспечивается устойчивая работа во всем диапазоне нагрузок без изменений регулировочных параметров с более высокими экономическими и экологическими показателями, чем в аналогичных двигателях с внешним смесеобразованием. Минимальные значения удельного эффективного расхода топлива  $g_{e\ min} = 287$  г/(кВт·ч) получены при работе на смеси E10 по нагрузочной характеристике ( $n=3000$  мин<sup>-1</sup>) на режиме частичной нагрузки ( $p_e = 0,3$  МПа).

*Ключевые слова:* теория двигателей, физическое и математическое моделирование, непосредственный впрыск топлива, расслоение топливно-воздушного заряда, топливно-воздушная смесь, двухтактные двигатели, искровое зажигание.

### **Vasilenko O.V. Improve workflow two-stroke engine with spark ignition and direct fuel injection.– Manuscript.**

Thesis to obtain scientific degree of Candidate of Engineering sciences on the speciality 05.05.03 – engines and power plants. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkov, 2015.

The dissertation is devoted to improving environmental and economic performance two-stroke internal combustion engines with spark ignition by the use of direct fuel injection. Determined that a promising way of internal mixing with **di**

rect fuel injection is the organization layered fuel-air charge, providing improved environmental and economic performance. The criterion  $L$ , which characterizes the stratification of the fuel-air charge, can qualitatively assess the effect of mixing process on the performance of the engine as a whole. A factor  $Z$ , which is determined using indicator efficiency two-stroke engine with external mixture formation, which takes into account only that fuel which is involved in the combustion cylinder engine. The use of direct injection petrol bundle of fuel-air charge modes for loading characteristic at  $n = 3000$  rev/min enabled the reduction in fuel consumption of 1.83 times at the effective efficiency  $\eta_{e \max} = 0,31$ , 7-10 times lower harmful substances ( $CO$ ,  $CH$ ) in exhaust gases, the use of gasoline-ethanol blends ensured stable operation of the engine in all load range and a high economic and environmental performance than when using carburetor system power.

Key words: theory of engines, physical and mathematical modeling, direct fuel injection, air-fuel charge demixing, fuel-air mixture, two-stroke engines, spark ignition.



Підписано до друку 26.05.2016р.  
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.  
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 56

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)