

Міністерство освіти і науки України
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ТЕСЛЕНКО ЕДУАРД ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.486

**РОЗРОБКА РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ПНЕВМОДВИГУНА З
КЛАПАННИМ ПОВІТРОРІЗПОДІЛОМ КОМБІНОВАНОЇ
ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛЯ**

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки
14 – електрична інженерія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, м. Харків.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Нікітченко Ігор Миколайович,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет,
доцент, завідувач кафедрою двигунів
внутрішнього згоряння.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тимошевський Борис Георгійович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,
професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння,
установок та технічної експлуатації;

кандидат технічних наук, доцент
Єриганов Олексій Валерійович,
Одеський національний морський університет,
доцент кафедри «Суднові енергетичні установки
та технічна експлуатація»

Захист відбудеться «19» червня 2025 р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.05 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25 та на сайті університету <https://www.khadi.kharkov.ua/science/specializovani-vcheni-radi/d-6405905/>

Автореферат розіслано «16» травня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

В. М. Рагулін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З огляду на аналіз світового двигунобудування перспективним напрямом розвитку автомобільного транспорту, як легкового, так і вантажного, є створення комбінованих (гібридних) енергетичних установок (КЕУ). КЕУ властиво понад 30 % економії палива й значне зниження токсичності вихлопних газів.

Разом із поршневим ДВЗ у КЕУ, нарівні з електричним, ефективно працює поршневий пневмодвигун (ПД). Порівняно з електродвигуном пневматична силова установка має значні переваги: більш просту конструкцію та кращі екологічні показники, що впливають на людину й довкілля. У багатьох країнах розробляються енергетичні установки з ПД. В Україні, зокрема в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (ХНАДУ), створено й випробувано пневматичний двигун із золотниковим повітророзподілом для автомобілів ЗАЗ і «Таврія» з різними компоновальними схемами розміщення двигунів у КЕУ.

Перевага КЕУ полягає в заповненні всього діапазону обертів її роботи. З нуля й до 800–1000 хв⁻¹ працює пневмодвигун, далі внаслідок підвищення обертів працює ДВЗ. Основними експлуатаційними перевагами поршневого ПД є простота в керуванні та регулюванні потужності, мінімальні витрати стисненого повітря, допущення перевантажень.

Максимальний крутний момент поршневого пневмодвигуна удвічі більший, ніж момент його номінальної потужності, а також ПД має сприятливішу зовнішню швидкісну характеристику.

Актуальність завдання визначило напрям дослідження – вдосконалення робочого процесу ПД з клапанним повітророзподілом, – що відповідає науково-дослідній діяльності кафедри двигунів внутрішнього згоряння ХНАДУ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано відповідно до напрямів та завдань державних науково-технічних програм «Енергетична стратегія розвитку України на період до 2030 року» (Постанова Кабінету Міністрів України № 145-р від 15 березня 2008 р.), «Концепція розвитку, модернізації та переоснащення газотранспортної системи України на 2009–2015 роки» (Постанова Кабінету Міністрів України № 1417-р від 21 жовтня 2009 р.); у дисертації узагальнено результати досліджень автора за планами науково-дослідних робіт кафедри двигунів внутрішнього згоряння ХНАДУ на 2009–2024 рр.; дисертація також є складником координаційних планів науково-дослідних робіт з держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України «Теоретичні основи створення пневматичної силової установки для екологічно чистого комбінованого автомобіля» 2009 р. (ДР № 0109V001351) і 2011 р. (ДР № 0111V001501), «Розробка комбінованої енергетичної установки на базі пневмодвигуна з використанням поновлювальних джерел енергії для міського автотранспорту» впродовж 2021–2022 рр. (ДР № 0119U001299) та госпдоговірних робіт протягом 2012–2024 рр. (ДР № 0121U109610, № 0121U109611), у яких здобувач є виконавцем окремих етапів роботи.

Мета роботи полягає в розробці робочих процесів пневматичного двигуна, який є частиною однокорпусної комбінованої енергетичної установки автомобіля й містить клапанний повітророзподіл з електрогідроприводом.

Відповідно до мети окреслено такі **завдання дослідження**:

1) обрати привід клапанного повітророзподільного механізму, зробити його розрахунок, виконати робочі кресленики та виготовити експериментальний зразок цього механізму;

2) удосконалити й застосувати методи визначення необхідної потужності та крутного моменту ПД з огляду на конкретизацію маршрутів і часу по м. Харкову, швидкості та прискорення автомобіля класу M_2 з комбінованою енергетичною установкою;

3) удосконалити математичні моделі та з їх допомогою розрахувати робочі процеси ПД з клапанним повітророзподілом, оцінити його вплив на індикаторні й ефективні показники;

4) створити експериментальний зразок поршневого ПД з розробленою системою клапанного повітророзподілу й обраним керованим приводом клапанів;

5) модернізувати експериментальний стенд і за розробленою методикою провести розрахунково-експериментальні дослідження ПД та проаналізувати їх робочі процеси;

6) розробити методи експериментального дослідження робочих процесів ПД та визначити індикаторні ефективні показники з використанням математичного планування багатофакторного експерименту й оптимізації отриманої функції;

7) сформулювати рекомендації за результатами дослідження та впровадити їх у виробництво та навчальний процес.

Об'єкт дослідження – робочі процеси поршневого пневмодвигуна із клапанним повітророзподілом.

Предмет дослідження – закономірності та параметри робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля з клапанним повітророзподілом.

В основу дисертації покладено фундаментальні положення теорії термодинаміки й теплопередачі з використанням таких **методів**:

- математична статистика;
- математичне моделювання робочих процесів у циліндрі ПД;
- вимірювання й обчислення показників роботи ПД;
- експериментальні дослідження ПД.

Наукова новизна досягнутих результатів полягає в тому, що *вперше*:

– визначено математичні залежності впливу фаз повітророзподілення та тиску стисненого повітря на впуску на індикаторні показники автомобільного ПД з клапанним повітророзподілом;

– отримано оптимальне співвідношення варійованих регульованих параметрів повітророзподілення та їх впливу на індикаторні показники автомобільного ПД з клапанним повітророзподілом;

- отримано й уточнено комплекс індикаторних ефективних коефіцієнтів і показників робочих процесів ПД, на основі яких оптимізовано роботу ПД;
- подальшого розвитку набула динамічна математична модель робочого процесу ПД з клапанним повітророзподілом.

Практичне значення результатів дослідження:

- розроблено методику вибору, розрахунку, а також технічну документацію на виготовлення електрогідравлічного приводу клапанів автомобільного ПД;
- удосконалено методику розрахунку крутного моменту та необхідної потужності ПД за визначеною максимальною швидкістю руху автомобіля;
- створено експериментальний зразок ПД з електрогідравлічним механізмом повітророзподілу, який може працювати в складі КЕУ;
- модернізовано автоматизований моторний стенд для досліджень робочих процесів пневмодвигунів комбінованої енергетичної установки з підігрівом і без підігріву повітряного заряду з клапанною системою повітророзподілу;
- розроблено програмне забезпечення для розрахунку робочого процесу клапанного ПД, що дає змогу на стадії проектування оцінити вплив конструктивних параметрів ПД з клапанним механізмом на його індикаторні показники;
- оригінальність технічних рішень, отриманих під час випробувань, підтверджено патентами України на корисну модель і на винахід;
- за результатами досліджень запропоновано рекомендації для виробників щодо вибору раціональних конструктивних і регулювальних параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля.

Особистий внесок здобувача. Основні висновки та положення дисертації отримані здобувачем особисто:

- на підставі виконаного аналізу конструкцій повітророзподілу ПД, які застосовуються на транспорті [1;6;], запропоновано загальну конструкцію клапанного механізму газорозподілу ПД й методику його дослідження;
- розроблено методи й програму розрахунку клапанного механізму газорозподілу ПД [8; 15;17];
- розроблено межі варіюваних параметрів для дослідження та межі їх застосування [13; 22];
- удосконалено методи обчислення робочих процесів на основі динамічної моделі для ПД з клапанним газорозподілом [1; 2; 3; 4; 12; 14; 16; 18; 19];
- розраховано та створено для випробувань електрогідравлічний механізм приводу клапанів [9; 11; 21;];
- створено експериментальний зразок пневмодвигуна, оснащеного деталями й механізмами, необхідними для його роботи [1; 2; 7; 12];
- модернізовано експериментальний стенд для застосування ПД з електрогідравлічною системою повітророзподілу [7];

– виконано експериментальні дослідження та рекомендовано раціональні параметри стисненого повітря на впуску створеної енергоустановки [12; 20; 22; 24].

– виконано роботу по підвищенню показників ПД за рахунок підігріву стиснутого повітря на впуску [5; 10; 29; 35; 36] і створення відповідних конструкцій ПД [18; 19; 23–28; 30–34].

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дослідження висвітлено в доповідях на науково-технічних конференціях ХНАДУ й семінарах кафедри двигунів внутрішнього згоряння ХНАДУ (м. Харків, 2009–2024 рр.), а також на наукових конференціях, зокрема: міжнародній науково-практичній та науково-методичній конференції «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців» (м. Харків, 2016); міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» (м. Харків, 2017); LXXIV науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університетів (м. Київ, 2018); міжнародній науково-практичній та науково-методичній конференції «Сучасні проблеми матеріалознавства: стан, ідеї, рішення» (м. Харків, 2018); VIII всесвітньому конгресі «Авіація у ХХІ столітті» – «Безпека авіації та космічні технології» (м. Київ, 10–12 жовтня 2018 р.); міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті» (м. Харків, 21–22 листопада 2018 р.); IV міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» (м. Вінниця, 11–12 грудня 2019 р.); XXV міжнародній науково-технічній конференції ЕКОVarna (м. Варна, 2019); міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 6–9 жовтня 2020 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування» (м. Харків 16–18 вересня 2020 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців» (м. Харків 27–29 жовтня 2021 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Матеріалознавство та технології» (м. Харків, 2022); міжнародній науково-практичній конференції до Дня автомобіліста та дорожника «Сучасні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців» (м. Харків, 23–25 жовтня 2023 р.), міжнародній конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії» (м. Харків, 11–12 березня 2024 р.).

Основні положення дисертації викладено, обговорено та оприлюднено в повному обсязі на розширеному засіданні кафедри двигунів внутрішнього згоряння ХНАДУ (м. Харків, 2024 р.).

Публікації. З теми дисертації опубліковано 38 наукових робіт, серед них 1 монографія, 2 стаття в міжнародній наукометричній базі даних SCOPUS, 8 статей у наукових фахових виданнях, включених до переліку МОН України,

Проаналізовано електрогідроприводи й для дослідження обрано електрогідропривод із пропорційним механізмом. Зроблено розрахунок, виконано робочі кресленики та виготовлено електрогідравлічний механізм приводу клапанів для експериментальних випробувань.

Другий розділ «Методи розрахункового дослідження робочих процесів пневмодвигуна» присвячено математичному моделюванню робочих процесів ПД.

Проведено уточнені дослідження транспортних потоків з метою визначення середньої та максимальної швидкості руху досліджуваного транспортного засобу по найбільш навантажених вулицях м. Харкова. У роботі застосовано метод визначення параметрів руху за допомогою GPS-навігатора. Виконано тяговий розрахунок для автомобіля категорії M_2 з метою встановлення необхідної потужності та крутного моменту ПД.

Для визначення відповідності базового двигуна умовам конвертації в пневмодвигун упроваджено методику розрахунку за статичною моделлю. Встановлено індикаторні й ефективні показники ПД. З'ясовано можливість використання штатного двигуна автомобіля M_2 в режимі ДВЗ та пневмодвигуна без значних змін конструкції.

На другому етапі розрахункового дослідження показники робочого процесу обчислено за динамічною моделлю, запропонованою проф. В. Дьяченком.

Для загального випадку тепло- й масообміну зміна тиску робочого тіла на розрахунковій ділянці Δp_i :

$$\Delta p_i = \frac{k_{si} p_i}{V_i} \left[\frac{1}{\rho_i} \left(\Delta M_{sш} \cdot \frac{T_s}{T_i} - \Delta M_{цвi} \right) + \frac{k_{si} - 1}{k_{si}} \cdot \frac{\Delta Q_{Ti}}{p_i} - \Delta V_{ш} \right], \quad (1)$$

де p_i, V_i, T_i, ρ_i – відповідно, тиск, об'єм, температура й щільність робочого тіла (суміші газів) на початку розрахункової ділянки (Па, м³, К, кг/м³);

k_{si} – показник адіабати робочого тіла на початку розрахункової ділянки;

$\Delta M_{sш}$ – маса робочого тіла, що надійшла протягом розрахункового кроку в надпоршневу порожнину з камери згоряння, кг;

$\Delta M_{цвi} = \rho'_i \cdot i_B \cdot (\mu_{Bi} f_{Bi})_{ср} \cdot W_{Bi} \cdot \Delta \tau_i$ – маса робочого тіла, що пішла з надпоршневої порожнини у випускний канал протягом розрахункового кроку;

ΔQ_{Ti} – втрати теплоти в стінки протягом розрахункового кроку;

C_m – середня швидкість поршня, м/с;

$\Delta V_{ш}$ – зміна об'єму надпоршневої порожнини на розрахунковій ділянці, м³.

Унаслідок математичного моделювання визначено величини основних показників робочого процесу: індикаторної роботи газів за цикл L_i ; індикаторної потужності N_i ; індикаторного коефіцієнта корисної дії η_i ; питомої індикаторної витрати палива g_i ; відносні втрати теплоти від робочого тіла в стінки надпоршневої порожнини W . Побудовано декілька теоретичних

індикаторних діаграм. Розбіжність становить менше ніж 5 % у всіх варіантах зіставлення діаграм з експериментальними.

З метою випробування ПД застосовано метод математичного планування експерименту (МПЕ) для одержання апроксимуючої математичної моделі досліджуваного пневмодвигуна. Водночас отриману апроксимуючу математичну модель використано для розв'язання завдань оптимізації.

Дослідження проводилося за обраним математичним планом, що передбачає мінімально необхідну кількість експериментів. Кожний з експериментів проводився строго для заданого планом поєднання обраних змінних X_1, X_2, X_3, X_4 , що називаються факторами, де X_1 – початок відкриття впускного клапана $\phi_{вп}$; X_2 – початок закриття впускного клапана $\phi_{вп}$; X_3 – початок відкриття випускного клапана $\phi_{вип}$; X_4 – початок закриття випускного клапана $\phi_{вип}$.

З огляду на досвід використання МПЕ у випробуванні ДВЗ у дисертації апроксимуючою математичною моделлю для ПД обрано поліном другого ступеня, якому відповідав математичний план другого порядку. Для цього дослідження надано перевагу Д-оптимальному плану, що забезпечував достатню точність апроксимації обраних показників. План містить три рівня.

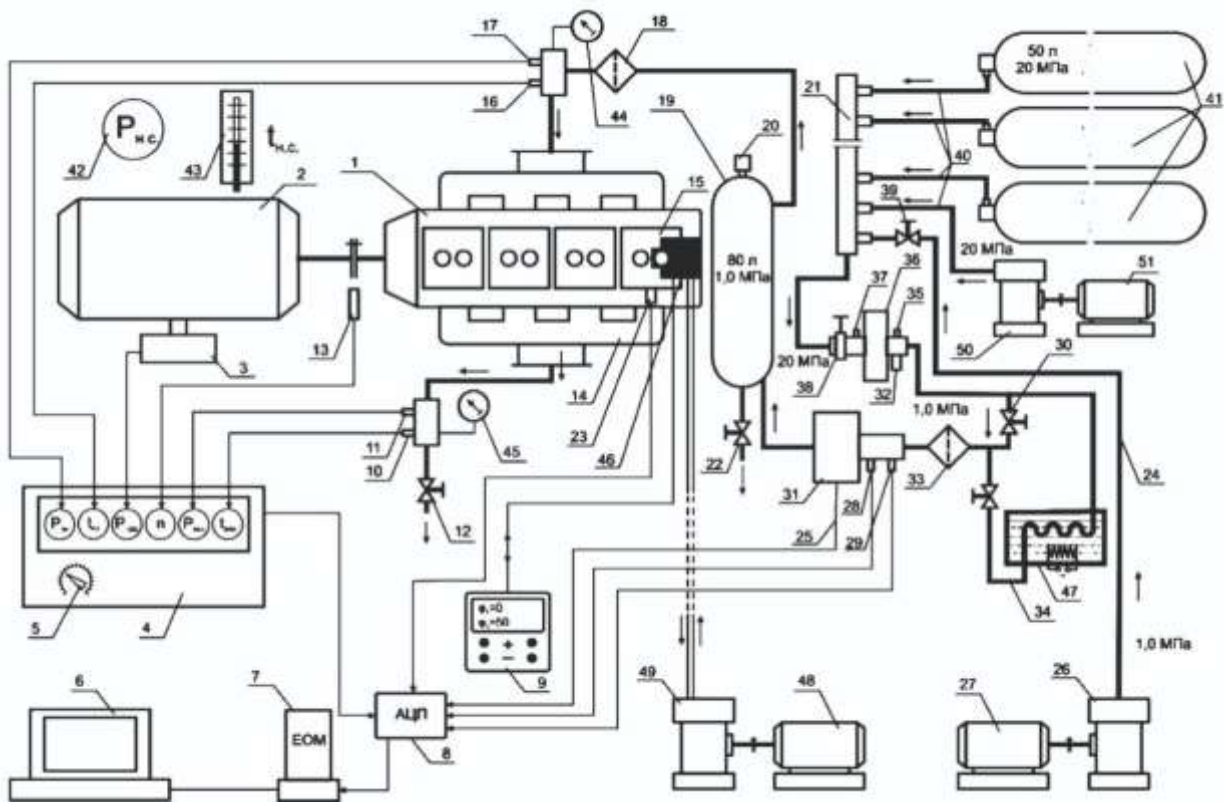
У третьому розділі «Методи експериментального дослідження робочого процесу пневмодвигуна» наведено розроблені методи експериментального випробування поршневого пневмодвигуна з клапанним повітророзподілом. Дослідження було проведено на спеціальному модернізованому стенді, оснащеному контрольно-вимірювальною апаратурою та обладнаному системами регулювання температури мастила й повітря (рис. 2).

На рис. 2 позначено: 1 – пневмодвигун; 2 – електрична балансирна машина; 3 – ваговий термінал; 4 – пульт керування; 5 – пульт керування корисним навантаженням; 6 – дисплей; 7 – електронно-обчислювальна машина; 8 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 9 – блок керування електрогідравлічним клапаном; 10 – датчик температури; 11 – датчик тиску; 12 – регулювальний кран; 13 – датчик частоти обертання; 14 – випускний колектор пневмодвигуна; 15 – головка циліндра; 16 – датчик температури; 17 – датчик тиску; 18 – фільтр; 19 – повітряний ресивер низького тиску; 20 – запобіжний клапан; 21 – рампа повітряна високого тиску; 22 – дренажний вентиль; 23 – датчик індикування циліндра; 24 – сталеві труба високого тиску; 25 – інформаційний канал витрати стисненого повітря; 26 – чотириступінчастий поршковий компресор для накачування балонів високого тиску; 27 – ДВЗ приводу компресора; 28 – датчик тиску; 29 – датчик температури; 30 – кран регулювання тиску повітря перед ПД; 31 – витратомір; 32 – запобіжний клапан; 33 – фільтр; 34 – кран регулювання тиску й температури повітря перед ПД; 35 – пружинний манометр; 36 – газовий редуктор РК3-500-2; 37 – пружинний манометр; 38, 39 – запірні крани; 40 – сталеві труби високого тиску; 41 – балони для повітря високого тиску; 42 – барометр М67; 43 – ртутний термометр; 44, 45 – пружинні манометри; 46 – електрогідравлічний привід клапанів; 47 – електричний нагрівач стисненого

повітря; 48 – електродвигун гідравлічної станції; 49 – живильна гідравлічна станція; 50 – компресор; 51 – електродвигун компресора.



а)



б)

Рисунок 2 – Загальний вигляд (а) і схема стенда (б)
для дослідження ПД

Системи й комплекс контрольно-вимірювальної апаратури дали змогу підтримувати задані режимні параметри, контролювати тепловий стан ПД, вимірювати з необхідною точністю параметри робочого процесу та всі його основні показники роботи.

Для реєстрації індикаторних діаграм застосовано вимірювально-обчислювальний комплекс «ВОК-ДВЗ» виробництва кафедри ДВЗ ХНАДУ.

Отримані індикаторні діаграми було оброблено із застосуванням відомих методів. Визначено індикаторні й ефективні показники ПД, експериментальні коефіцієнти, за допомогою яких встановлено адекватність теоретичним моделям.

Експериментально визначено коефіцієнт повноти індикаторної діаграми $\eta_p = f(n, p_{вп}, T_{вп})$ (рис. 3). Виконано обґрунтований вибір конструктивних параметрів, що залишаються без змін та варіюються в заданих межах.

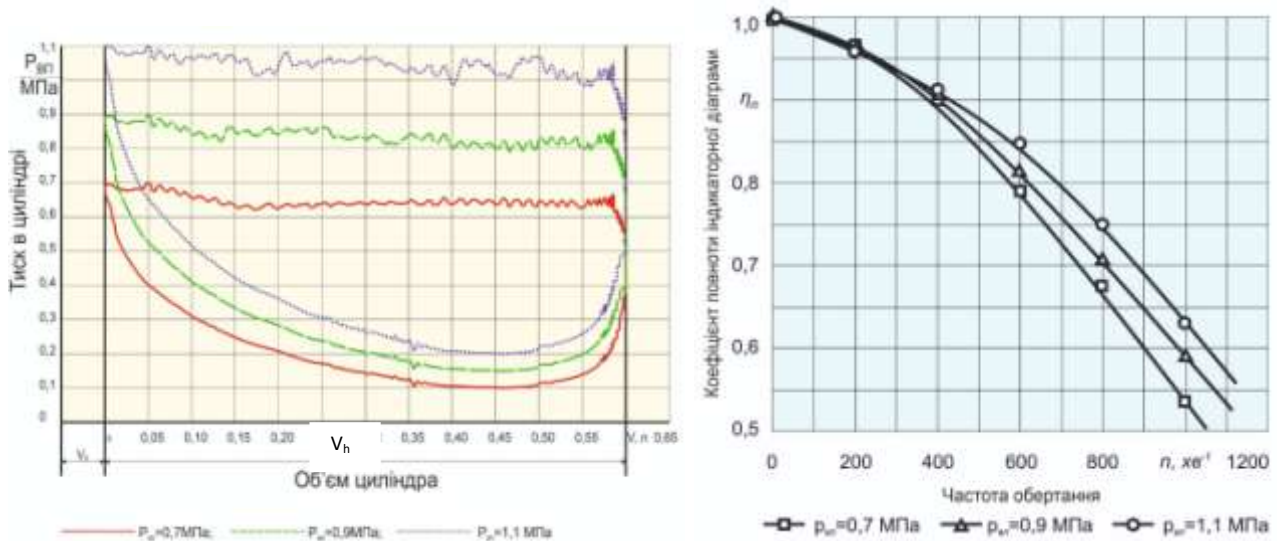


Рисунок 3 – Визначення коефіцієнта повноти індикаторної діаграми ПД

Додатково обґрунтовано вибір таких параметрів: відносна величина шкідливого простору ε_0 , величина ступеня зворотного стиснення ε_3 , величина ступеня наповнення ε_1 .

Унаслідок експериментальних досліджень побудовано швидкісні та навантажувальні характеристики для подальшого порівняння з результатами теоретичних розрахунків.

У четвертому розділі «Аналіз розрахунково-експериментального дослідження робочого процесу пневмодвигуна» наведено результати розрахунково-експериментального дослідження ПД.

Метою математичного оброблення результатів випробування було подання дослідних показників у вигляді, що дав змогу:

- визначити оптимальне співвідношення кутів відкриття-закриття впускних та випускних клапанів для отримання мінімальної витрати стисненого повітря;
- встановити вплив варійованих фаз повітророзподілення, які забезпечують РП у ПД з клапанним механізмом, на індикаторні показники;
- отримати достовірні значення параметрів РП способом побудови й оброблення розрахункових і експериментальних індикаторних діаграм;

– провести порівняльне оцінювання РП у пневмодвигунах із золотниковим і клапанним повітророзподільними механізмами.

За отриманими регресійними рівняннями проаналізовано вплив конструктивних параметрів на питому індикаторну витрату повітря, що був прийнятий як функція мети (рис. 4).

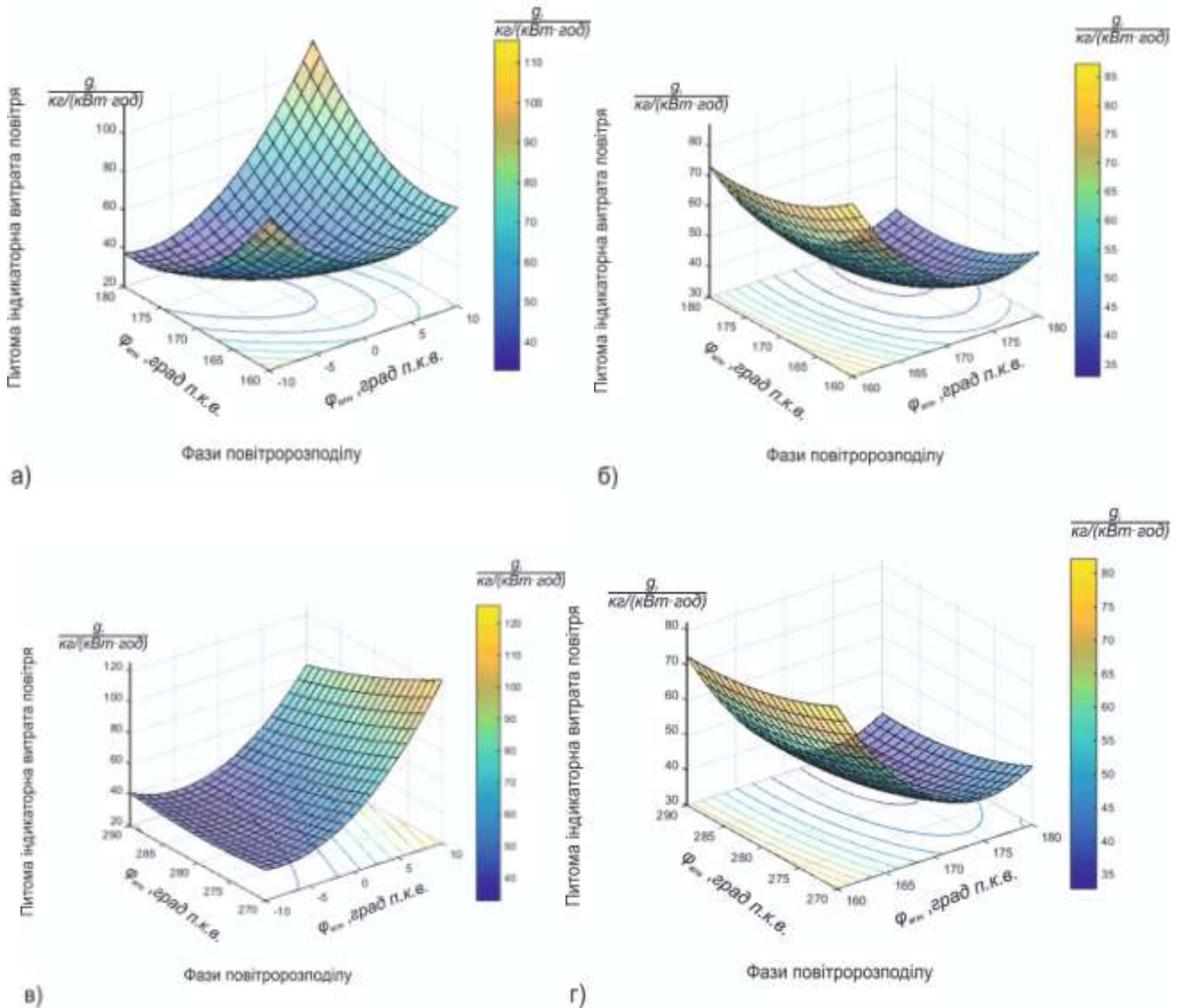


Рисунок 4 – Функція мінімальної питомої витрати стисненого повітря за умови різних кутів впускних (а, б) і випускних клапанів (в, г)

Параметри, що варіюються, задовольняли умови проведення експерименту: сумісності й незалежності. Результати експериментальних досліджень оброблено й подано у вигляді рівнянь регресії другого порядку. Коефіцієнти регресії визначено за допомогою методу найменших квадратів. Модель перевірено на адекватність і відтворюваність. Усі коефіцієнти моделі значущі.

Рівняння відгуку, що містить конструктивні варійовані параметри ПД, має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
y = & 9399,8871 + 0,26 x_1^2 + 0,18 x_2^2 + 0,057 x_3^2 + 0,03 x_4^2 + \\
& + 2,6014x_1 - 62,9937x_2 - 19,9586x_3 - 15,9027x_4 + \\
& + 0,2512x_1x_2 - 0,1x_1x_3 - 0,1x_1x_4 + \\
& + 0,0044x_2x_3 + 0,002x_2x_4 - 0,0048x_3x_4.
\end{aligned} \quad (2)$$

Унаслідок аналізу розрахунків отримано такі оптимальні параметри фаз розподілу повітря за умови досягнення максимальної потужності:

$$\begin{aligned}
\varphi_{\text{впн}} &= -3,9 \text{ град ПКВ}, \varphi_{\text{впк}} = 174,0 \text{ град ПКВ}, \\
\varphi_{\text{випн}} &= 176,2 \text{ град ПКВ}, \varphi_{\text{випк}} = 266,9 \text{ град ПКВ}.
\end{aligned}$$

Водночас отримано питому витрату повітря $g_{\min} = 32,90 \text{ кг/кВт}\cdot\text{год}$ та $N_i = 2,23 \text{ кВт}$, якщо $\varepsilon_0 = 0,12$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_3 = 0,62$, $p_{\text{ен}} = 0,7 \text{ МПа}$ й $n = 720 \text{ хв}^{-1}$.

Проаналізовано результати розрахунково-експериментального дослідження ПД. Визначено основні індикаторні й ефективні показники пневмодвигуна. Потужність і крутний момент ПД за різних тисків на впуску подано на рис. 5.

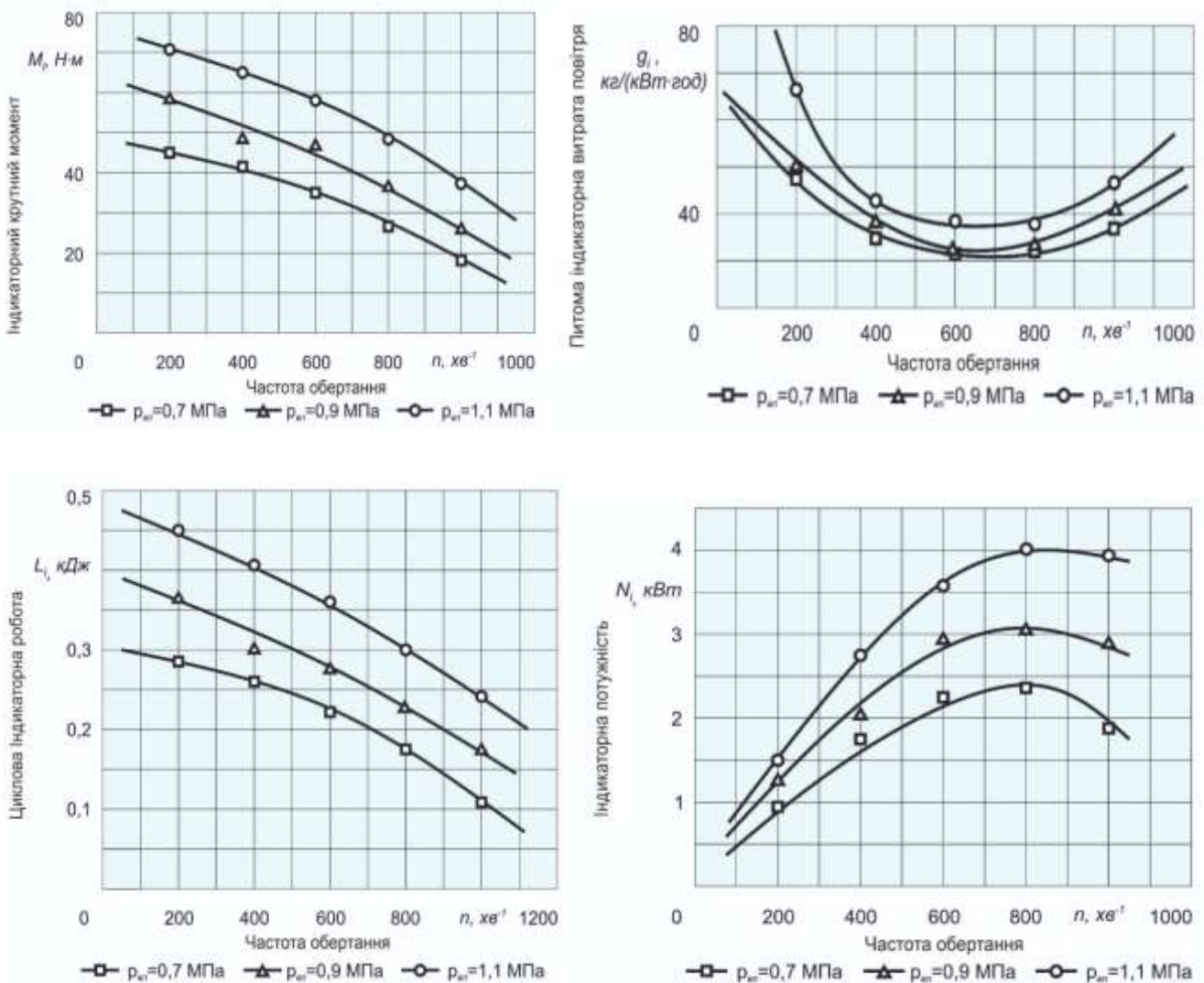


Рисунок 5 – Швидкісні характеристики за результатами випробувань

Унаслідок перевірки результатів розрахункового дослідження на адекватність із експериментальними показниками встановлено, що різниця між ними не перевищує 5 %. Проаналізовано витрату повітря, потужність, крутний момент та інші показники на різних режимах роботи.

Конструкція ПД із золотниковим механізмом ($D/S = 7,6/6,6$ $V_h = 0,2994$ л) уможливила здійснення робочого процесу за часткового наповнення ($\varepsilon_1 = 0,5$). Тоді як у ПД з клапанним механізмом ($D/S = 9,2/9,2$ $V_h = 0,612$ л) робочий процес було отримано з повним наповненням ($\varepsilon_1 = 1$). Це значно збільшувало площу індикаторної діаграми. Однак це не приводило до збільшення витрати стисненого повітря порівняно із золотниковим ПД, через що шкідливий об'єм у ПД з клапанним повітророзподілом значно менший.

Конструкція ПД дає змогу здійснювати випуск, якщо тиск $p_{\text{вип}} = 0,1\text{--}0,12$ МПа. Велике значення має зворотне стиснення. Хоча площа діаграми стає меншою внаслідок адіабатного стиснення, витрата повітря знижується завдяки тому, що не потрібно заповнювати об'єм камери згоряння стисненим повітрям. Максимальний тиск в умовах зворотного стиснення у ПД з клапанним механізмом практично дорівнює тиску, якщо наповнення становить $p_{\text{вп}} = 0,7$ МПа.

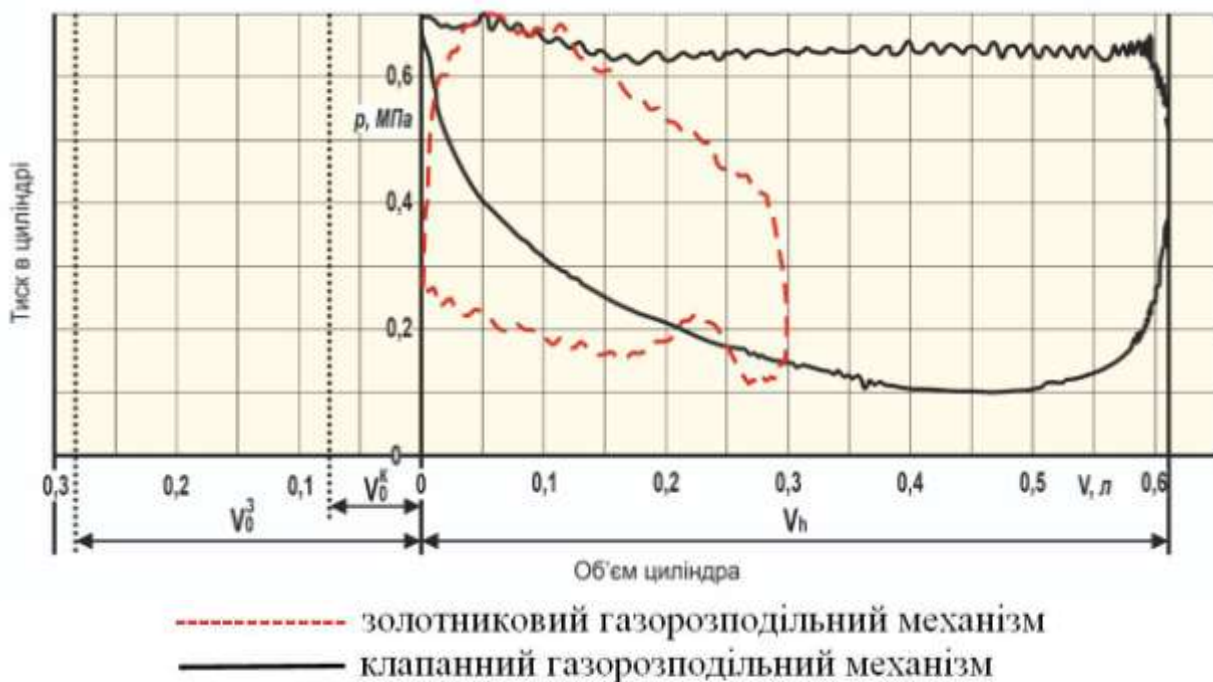


Рисунок 6 – Порівняльні індикаторні діаграми ПД з клапанним і золотниковим газорозподілом

На рис. 7 продемонстровано швидкісні характеристики комбінованої енергетичної установки, яка працює на таких режимах:

- режим роботи ПД від 0 до $700\text{--}800$ хв^{-1} ;
- режим роботи ДВЗ від $700\text{--}800$ хв^{-1} .

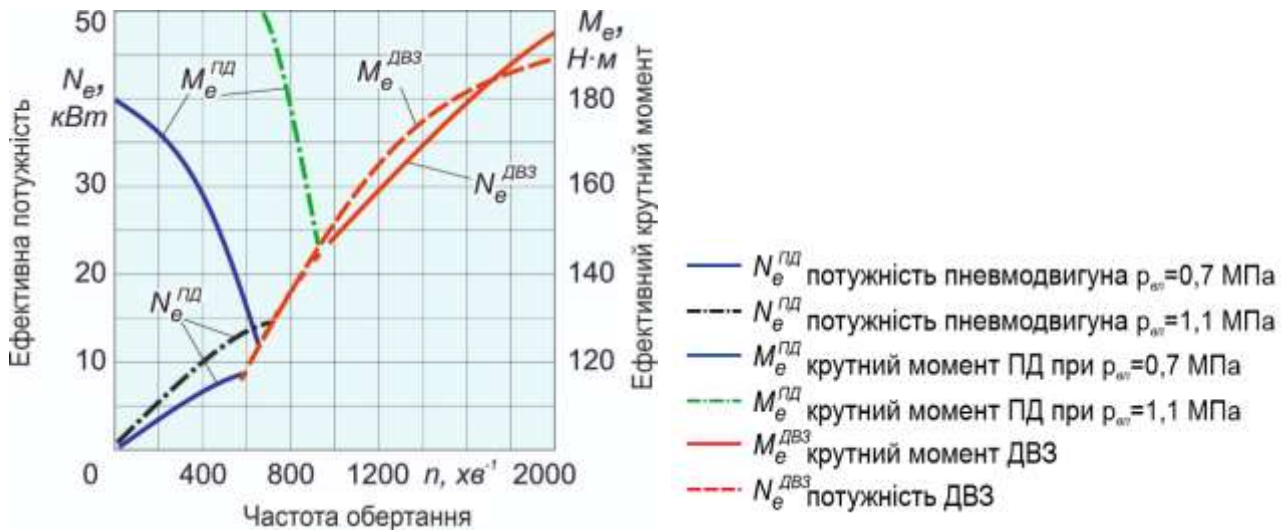


Рисунок 7 – Спільна швидкісна характеристика комбінованої енергетичної установки з ПД і ДВЗ

У цьому дослідженні застосовано сполучену блокову схему розміщення ПД і ДВЗ на транспортному засобі. За такої схеми ДВЗ і ПД розміщені в одному корпусі й працюють по черзі. Але це дає змогу КЕУ працювати за послідовною, паралельною або комбінованою схемами розміщення агрегатів.

Потужність пневмодвигуна із клапанним повітророзподілом N_e з підвищенням обертів колінчастого вала до 800 хв^{-1} зростає практично від 0 до 8 кВт. Максимальний крутний момент під час пуску ПД становив $M_{кр} = 320 \text{ Н}\cdot\text{м}$ та зменшився до $M_{кр} = 130 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

ВИСНОВКИ

У дисертації розроблено робочі процеси пневмодвигуна з клапанним повітророзподілом з електрогідроприводом, який є частиною однокорпусної комбінованої енергетичної установки автомобіля, що сприятиме максимальній потужності за мінімальної витрати стисненого повітря та дасть змогу підвищити економічні та екологічні показники КЕУ.

Відповідно до завдань дослідження здобуто наукові та практичні результати.

1. Проаналізовано клапанні механізми повітророзподілу двигунів з механічним, електромагнітним, гідравлічним, пневматичним і комбінованим приводами. Обрано електрогідравлічний привід клапанів. Виконано розрахунок і розроблено кресленики електромагнітного приводу клапанів. Виготовлено експериментальний зразок електрогідравлічної системи керування ПД.

2. Удосконалено й застосовано метод визначення необхідної потужності та крутного моменту ПД під час його пуску та руху автомобіля в м. Харкові з огляду на конкретизацію маршрутів і часу, що дав змогу обчислити швидкість та прискорення автомобіля категорії M_2 з комбінованою

енергетичною установкою. Визначено здатність штатного ДВЗ для роботи в пневморежимі.

3. Удосконалено математичні моделі дослідження робочих процесів ПД за статичним і динамічним методами з метою визначення характеристик пневмодвигуна та впливу конструктивних і регулювальних параметрів ПД з клапанним повітророзподілом на його індикаторні та ефективні показники. За динамічною методикою проведено розрахунки робочих процесів ПД з клапанним повітророзподілом на режимах, що не досліджувались у процесі роботи пневмодвигуна. Оцінено вплив застосування клапанного повітророзподілу на індикаторні й ефективні показники.

4. Створено експериментальний зразок поршневого пневматичного двигуна з експериментальною клапанною системою повітророзподілу з електрогідравлічним приводом клапанів з електронним програмним керуванням, що дає змогу автоматично підтримувати задані режими роботи ПД.

5. Модернізовано експериментальний стенд та розроблено методи експериментального дослідження ПД, за якими проаналізовано робочі процеси.

6. Розроблено методи проведення експериментального дослідження робочого процесу пневмодвигуна з визначенням індикаторних та ефективних показників із використанням математичного планування багатофакторного експерименту та оптимізації отриманої функції. Зокрема застосовано такі методи: проведення експериментів, зняття та оброблення індикаторних діаграм, обчислення похибок вимірів тощо.

Проведено розрахунково-експериментальне дослідження та визначено адекватність запропонованого методу діючим дійсним процесам у циліндрі пневмодвигуна. Різниця площ експериментальної та теоретичної індикаторних діаграм становить менше ніж 5 %. Унаслідок аналізу проведеної багатофакторної оптимізації отримано такі оптимальні параметри фаз розподілу повітря за умови досягнення необхідної потужності:

$$\begin{aligned}\varphi_{\text{випн}} &= -3,9 \text{ град ПКВ}, \varphi_{\text{впк}} = 174,0 \text{ град ПКВ}, \\ \varphi_{\text{випн}} &= 176,2 \text{ град ПКВ}, \varphi_{\text{впк}} = 266,9 \text{ град ПКВ}.\end{aligned}$$

Водночас отримано питому витрату повітря $g_{\min} = 32,90 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ та $N_i = 2,23 \text{ кВт}$, якщо $\varepsilon_0 = 0,12$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_3 = 0,62$, $p_{\text{ен}} = 0,7 \text{ МПа}$ та $n = 720 \text{ хв}^{-1}$.

Порівняно з пневмодвигуном із золотниковим механізмом індикаторна робота підвищилась з $L_{i3} = 0,11 \text{ кДж}$ (ПД із золотниковим повітророзподілом) до $L_{i4} = 0,25 \text{ кДж}$ (ПД з клапанним повітророзподілом), а витрата повітря знизилась з $g_{i3} = 72 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$, відповідно, до $g_{i4} = 32,9 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$.

Визначено, що КЕУ з пневмодвигуном займає весь ряд швидкісних режимів роботи. З 0 обертів до $700\text{--}800 \text{ хв}^{-1}$ працює ПД, з $700\text{--}800 \text{ хв}^{-1}$ і вище працює ДВЗ. У такий спосіб розв'язується питання пуску КЕУ та її роботи на холостому ходу ДВЗ.

7. За результатами дослідження сформульовано рекомендації у вигляді методичних вказівок, інструкцій щодо розрахунку робочих процесів ПД. Результати розрахунково-експериментальних досліджень впроваджено та

використано під час конструювання та застосування енергетичних силових установок на ДП «Завод ім. В. О. Малишева», в Інституті проблем машинобудування імені А. М. Підгорного НАН України (ІПМаш), ПФ «Променерго», науково-дослідній лабораторії двигунів внутрішнього згоряння ХНАДУ, а також упроваджено в навчальному процесі для підготовки здобувачів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Концепция создания пневматического двигателя для автомобиля : монография / А. И. Воронков, Д. Б. Глушкова, В. А. Карпенко, **Э. В. Тесленко** и др. – Харьков : ХНАДУ, 2019. 256 с. Бібліогр.: С. 230–251.

Статті в міжнародній наукометричній базі даних SCOPUS

2. Leontiev D., Voronkov O., Korohodskiy V., Hlushkova D., Nikitchenko I., **Teslenko E.**, Lykhodii O. Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car. SAE Technical Paper 2020-01-2222, 2020. ISSN: 0148-7191. DOI:10.4271/2020-01-2222

3. Manoylo V., Korohodskiy V., Voronkov A., Avramenko A., Nikitchenko I., Shevchenko I., Iesipov O., Polyashenko S., **Teslenko E.**, Lemishko D. Devising a method for assessing the performance of exergetic efficiency of a pressure wave exchanger. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* ISSN-L 1729-3774; E-ISSN 1729-4061 1/5 (133) 2025(38-45).

Статті в наукових фахових виданнях України

4. Воронков А. И., Никитченко И. Н., **Тесленко Э. В.**, Минин А. М. Изменения эффективных параметров работы поршневого пневмодвигателя по скоростным характеристикам. *Автомобильный транспорт* : сб. науч. тр. 2012. Вып. 31. С. 62–66.

5. Воронков О. І., Леонтьєв Д. М., **Тесленко Е. В.** Визначення вихідних енергетичних параметрів транспортного засобу із пневматичним двигуном. *Автомобільний транспорт* : зб. наук. пр. 2013. Вип. 33. С. 70–76

6. Воронков А. И., **Тесленко Э. В.**, Удовик Т. А. Определение минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в автомобильный пневмодвигатель при различных условиях эксплуатации. *Вісник ХНАДУ* : зб. наук. пр. 2016. Вип. 75. С. 100–108.

7. Воронков А. И., Аврунин Г. А., Никитченко И. Н., **Тесленко Э. В.**, Назаров А. А. Выбор схемы электрогидроавтоматики для управления впускным клапаном поршневого пневмодвигателя. *Вісник ХНАДУ* : зб. наук. пр. 2017. Вип. 78. С. 144–150.

8. **Тесленко Э. В.** Экспериментальный стенд для исследования автомобильных пневматических двигателей с клапанным воздушораспределением. *Вісник ХНАДУ* : зб. наук. пр. 2018. Вип. 83. С. 23–34.

9. Лурье З. Я., Аврунин Г. А., Воронков А. И., Никитченко И. Н., Серикова И. А., **Тесленко Э. В.**, Назаров А. А., Соловьев В. М., Цента Е. Н., Мороз И. И. Методика расчета объемного гидропривода впускного клапана пневмомотора. *Вісник ХНАДУ*: зб. наук. пр. 2020. №89. С. 34–43.

10. Лурье З. Я., Аврунин Г. А., Воронков А. И., Никитченко И. Н., Серикова И. А., **Тесленко Э. В.**, Назаров А. А., Соловьев В. М., Цента Е. Н., Мороз И. И. Динамика объемного гидропривода впускного клапана пневмомотора. *Вісник ХНАДУ*: зб. наук. пр. 2020. №90. С. 62–72.

11. Філатова Г. Є., Варавіна О. П., Нікітченко І. М., **Тесленко Е. В.**, Круговий А. О., Созикін М. В. Побудова регресійної моделі питомої витрати повітря автомобільного пневмодвигуна / *Вісник ХНАДУ*: зб. наук. пр. 2024. №107. С. 94–99.

Опубліковані праці апробаційного характеру

12. **Тесленко Е. В.** Определение минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в автомобильный пневмодвигатель при различных условиях эксплуатации. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців*: матеріали міжнар. наук.-практ. та наук.-метод. конф. Харків: ХНАДУ, 2016. С. 15.

13. **Тесленко Е. В.** Розробка електрогідроприводу газорозподільчого механізму для поршневого пневмодвигуна. *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців*: наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф. Харків, 2017. С. 190–191.

14. **Тесленко Е. В.** Поліпшення економічних показників автомобільного пневмодвигуна з клапанним повітророзподілом. *LXXIV наук. конф. проф.-викл. складу, асп., студ. та співроб. відокремл. структур. підрозділів ун-тів*: тези доп. Київ, 2018. С. 48.

15. **Тесленко Е. В.** Performing the optimization of compressed air specific consumption depending on the defining dimensionless structural and operating parameters of the motor-car pneumatic motor. *Авіація у XXI столітті – Безпека авіації та космічні технології: VIII всесвіт. конгрес (The eighth world congress «Aviation in the XX – st century» «Safety in Aviation and Space Technologies» (10–12 october, 2018). Kyiv, 2018. P. 7.12–7.16.*

16. **Тесленко Е. В.** Model of working processes of a pneumoengine theoretical cycle. *Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті*: матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (21–22 листопада 2018 р.). Харків: ХНАДУ, 2018. С. 65–66.

17. **Тесленко Е. В.** Методика расчета объемного гидропривода впускного клапана пневмомотора. *«Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування»*: IV Міжнар. наук.-техн. Internet-конф., 11–12 груд. 2019 р. / Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця. 2019. С. 15–19.

18. **Teslenko E.** Analyzing a two-stroke automobile engine using compressed air: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 977,

25th Technical and scientific conference "transport, ecology – sustainable development" ЕКО 16–18 May 2019, Varna, Bulgaria Т. 26. Ч. 1. Р. 11–18. ISSN 2367-6299.

19. **Тесленко Е. В.** Динамика мехатронного об'ємного гідропривода впускного клапана пневмомотора // "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці": матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., 6–9 жовт. 2020 р. м. Київ. Київ. 2020. С. 337–340

20. **Тесленко Е. В.** Особливості здійснення робочого циклу в двигунах із зовнішнім підводом теплоти. Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування: наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф. (16–18 вересня 2020 р.). Харків: ХНАДУ, 2020. С. 204.

21. **Тесленко Е. В.** Пневматичний двигун із зовнішнім підводом теплоти *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців*: наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф. (27–29 жовт. 2021 р.). Харків: ХНАДУ, 2021. С. 216–218.

22. **Тесленко Е. В.** Результати випробувань пневмодвигуна з комбінованою клапанною системою повітророзподілу. *Матеріалознавство та технології*: міжнар. наук.-техн. конф. Харків: ХНАДУ, 2022. С.184-187.

23. **Тесленко Е. В.** Розробка загального виду клапанного механізму з гідравлічним приводом клапанів. *Сучасні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців*: наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф. до Дня автомобіліста та дорожника (23–25 жовтня 2023 р.). Харків: ХНАДУ, 2023. С. 152–155.

24. **Тесленко Е. В.** Регулювання потужності автомобільного пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки (КЕУ). *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії*: зб. тез та доп. міжнар. конф. (11–12 березня 2024 р.). Харків: ХНАДУ, 2024. С. 239–241.

Наукові праці, у яких додатково відбито результати дисертації

25. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. 100503 Україна. МПК 7 В60К 6/00 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко**, О. Ю. Ліньков, А. О. Назаров; заявник та патентовласник Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т.; № и 201501594; заявл. 24.02.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

26. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. 101604 Україна МПК 7 В60К 6/00 В60К 5/00 F28С 3/00 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко**, О. Ю. Ліньков, А. О. Назаров; заявник та патентовласник Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т.; № и 201502228; заявл. 13.03.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.

27. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. 122872 Україна, МПК В60К6/12 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко** та ін.; № а 201712711; заяв. 21.12.2017; опубл. 13.01.2021, Бюл. № 2.

28. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. 125526 Україна В60К6/00 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко**,

А. О. Назаров, Т. М. Колеснікова; заявник та патентовласник Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т.; № у 201712712; заявл. 21.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9.

29. Комбінована силова установка транспортного засобу: пат. 125527 Україна, МПК В60К6/00 / І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко**, А. О. Назаров та ін.; № у 201712714; заявл. 21.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9.

30. Комбінована силова установка транспортного засобу: пат. 127732 Україна, МПК В60К6/00 / І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко**, Т. О. Удовік та ін.; № у 201712715; заявл. 21.12.2017; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.

31. Спосіб роботи поршневого теплового двигуна: пат. 129153 Україна, МПК F02В47/00 / В. Г. Дьяченко, О. Ю. Ліньков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко** та ін.; № у 201803708; заяв. 06.04.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20.

32. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. 138997 Україна, МКИ МПК (2019.01), В60К 6/00 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко** та ін.; № у 201906652; заявл. 13.06.2019; опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23. 6 с.

33. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. на корисну модель 140580 Україна, МПК В60К6/00 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, Д. Б. Глушкова, В. О. Карпенко, О. П. Варавіна, А. О. Назаров, **Е. В. Тесленко**; № у 201906681; опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5.

34. Комбінована силова установка автотранспортного: пат. на корисну модель 140581 Україна, МПК В60К6/08 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, Д. Б. Глушкова, В. О. Карпенко, О. П. Варавіна, А. О. Назаров, **Е. В. Тесленко** та ін.; № у 201906683; опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5.

35. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. на корисну модель 141329 Україна, МПК В60К6/00 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, Д. Б. Глушкова, В. О. Карпенко, О. П. Варавіна, А. О. Назаров, **Е. В. Тесленко** та ін.; № у 201906654; опубл. 10.04.2020, Бюл. № 7.

36. Комбінована силова установка автотранспортного засобу: пат. на винахід 125140 С2 МПК В60К 6/12 / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, Д. Б. Глушкова, **Е. В. Тесленко** та ін.; № а 201906653; заяв. 13.06.2019; опубл. 19.01.2022, Бюл. № 3.

37. Спосіб роботи поршневого теплового двигуна: пат. на корисну модель 149466 Україна, МПК F02В 47/10 (2006.01), F02В 33/22 (2006.01), F02В 19/12 (2006.01) / В. Г. Дьяченко, О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко**, А. О. Назаров, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун; № у 202007287; заявл. 16.11.2020; опубл. 24.11.2021, Бюл. № 47.

38. Спосіб роботи поршневого теплового двигуна: пат. на корисну модель 149467 Україна, МПК F02В 47/10 (2006.01), F02В 33/22 (2006.01), F02В 19/12 (2006.01) / В. Г. Дьяченко, О. І. Воронков, І. М. Нікітченко, **Е. В. Тесленко**, А. О. Назаров, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун; № у 202007289; заявл. 16.11.2020; опубл. 24.11.2021, Бюл. № 47.

АНОТАЦІЯ

Тесленко Е. В. Розробка робочих процесів пневмодвигуна з клапанним повітророзподілом комбінованої енергетичної установки автомобіля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2025.

Дисертацію присвячено розв'язанню актуального питання – розробленню робочих процесів пневмодвигуна з клапанним повітророзподілом комбінованої енергетичної установки автомобіля, що сприяє досягненню необхідної потужності за мінімальної витрати стисненого повітря й дає змогу підвищити економічні та екологічні показники КЕУ. У процесі дослідження визначено основні конструктивні й режимні параметри, що впливають на індикаторні та ефективні показники.

У роботі проаналізовано клапанні механізми з механічним, електромагнітним, пневматичним, гідравлічним та комбінованим регульованими приводами, їх конструкції та особливості роботи. Запропоновано метод і програму розрахунку електрогідравлічного приводу клапанів, виконано робочі кресленики й виготовлено експериментальний електромагнітний привід.

Розрахункові дослідження здійснено в два етапи. На першому етапі з метою встановлення потужності ПД для конвертації штатного ДВЗ проведено попередні обчислення та визначено межі варіюваних параметрів за допомогою статичної моделі. Уточнену динамічну модель застосовано для розрахунків індикаторного процесу й перевірки на адекватність з експериментальними показниками на другому етапі.

Створено одноциліндровий відсік пневмодвигуна на базі конвертованого ДВЗ 4 Ч 9,2/9,2.

Застосування пневмодвигуна з клапанним повітророзподілом дало змогу істотно підвищити результати робочого процесу й рівень техніко-економічних показників роботи порівняно з двигунами аналогічної розмірності із золотниковим повітророзподілом. Упровадження методу планування експерименту з подальшою оптимізацією фаз газорозподілу сприяло скороченню часу експериментального дослідження та істотно підвищило показники роботи пневмодвигуна.

Рекомендації з обчислення робочого процесу ПД у вигляді алгоритмів програм, методичних вказівок і результатів розрахунково-експериментальних досліджень упроваджено й застосовано для модернізації силових установок в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного (ІПМаш НАН України), ДП «Завод ім. В. О. Малишева, ПФ «Променерго», ПрАТ «Промбудмонтаж», а також у навчальному процесі ХНАДУ.

Ключові слова: комбінована енергетична установка, пневматичний двигун, двигун внутрішнього згоряння, клапанний розподіл повітря, індикаторна діаграма, індикаторні показники.

ABSTRACT

Teslenko E. V. The development of working processes of a pneumatic engine with valve air distribution of a vehicle combined power plant. – Manuscript. Thesis for a Candidate degree in Technical Science. Specialty 05.05.03 – Engines and power plants. Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2025.

The thesis deals with solving an urgent scientific problem of developing working processes of a pneumatic engine with valve air distribution of a vehicle combined power plant taking into account obtaining maximum power at compressed air minimum consumption, which allows to increase its economic and environmental performance. In the process of the research, the main design and operating parameters that affect the indicator and effective values were determined.

The work analyzes valve mechanisms with adjustable mechanical, electromagnetic, pneumatic, hydraulic, and combined drives, their design and performance characteristics. A methodology and a program for calculating the electrohydraulic valve drive were developed; an experimental electromagnetic drive was designed and manufactured.

The computational studies were carried out in two stages. At the first stage, a static calculation model was used to determine the power of the pneumatic motor for converting a standard (serial) internal combustion engine, conduct preliminary calculations and determine the limits of changing parameters. At the second stage, the specified dynamic model was used for calculations of the indicator process and checking for adequacy with experimental data.

A single-cylinder compartment of a pneumatic engine was created based on a converted ICE 4 CH 9.2/9.2. The use of the pneumatic engine with valve air distribution allows to significantly increase the performance of the working process and the level of technical and economic indicators of operation in comparison with engines of similar dimensions with spool air distribution. The use of the experiment planning method with subsequent optimization of the valve timing allows to reduce the time of experimental research and significantly increase the performance of the pneumatic engine.

Recommendations for calculating a pneumatic engine in the form of program algorithms, methodological guidelines and results of computational and experimental studies are implemented and used during work on the modernization of power plants at A.M. Pidgorny Institute of Problems of Mechanical Engineering (IPMash of the NAS of Ukraine), “V. Malyshev Plant” state-owned enterprise, “Promenergo” private company, “Promstroymontazh” private limited company, in the educational process of Kharkiv National Automobile and Highway University.

Keywords: combined power plant, pneumatic engine, internal combustion engine, valve air distribution, indicator diagram, indicator values.