

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

**НІКІТЧЕНКО ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.486

**ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПНЕВМОДВИГУНА КОМБІНОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ  
УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛЯ**

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 двигунів внутрішнього згоряння в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Воронков Олександр Іванович**,  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, м. Харків,  
доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Заренбін Володимир Георгійович**  
Придніпровська державна академія будівництва і архітектури, м. Дніпропетровськ,  
завідувач кафедри «Експлуатація та ремонт машин»;

кандидат технічних наук, доцент  
**Корогодський Володимир Анатолійович**, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків,  
доцент кафедри «Теплотехніка і теплові двигуни»

Захист відбудеться «11» лютого 2016 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.059.01 в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного авто-мобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

Автореферат розісланий «04» січня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент

Р.В. Смолянюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблеми покращення паливної економічності і зменшення викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автотранспортом потребують впровадження нових рішень, спрямованих на вдосконалення його енергетичних установок. Аналіз стану світового двигунобудування показує, що створення комбінованих (гібридних) силових установок (КЕУ) є перспективним напрямком розвитку автомобільного транспорту: легкового, пасажирського й вантажного. КЕУ відповідають усім надзорстким нормам токсичності відпрацьованих газів, зафіксованим в сучасних стандартах. До того ж вони мають більш ніж на 30 % нижчу витрату палива, що особливо важливо в умовах обмежених природних запасів вуглеводородного палива.

Аналіз закордонних робіт по впровадженню КЕУ на автомобільному транспорті показують, що разом із поршневим ДВЗ, нарівні з електричним, ефективно працює поршневий пневмодвигун. При цьому силова установка має більш просту конструкцію і значні переваги в порівнянні з електродвигуном.

Поршневий пневмодвигун розвиває максимальний крутний момент у момент подачі стисненого повітря на початку обертання вала й запускається під навантаженням без стартера. Поршневий пневмодвигун має найбільш сприятливу зовнішню швидкісну характеристику, його максимальний крутний момент більш ніж у два рази перевищує момент номінальної потужності. Поршневий пневмодвигун має важливі експлуатаційні переваги: допускає перевантаження, простий у керуванні, має мінімальні втрати стисненого повітря.

Дослідження робочого процесу пневмодвигуна показало необхідність обґрунтованого вибору конструктивних і режимних параметрів робочого процесу з метою одержання найбільш високих індикаторних і ефективних показників. Це потребує поглиблення теоретичної бази досліджень і впровадження перспективних розробок.

Таким чином, розробка пневмодвигуна і доводка його робочого процесу є актуальним завданням, яке й визначило напрямок даного дисертаційного дослідження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана у відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри ДВЗ Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) на 2009–2013 рр., а також є складовою частиною координаційних планів науково-дослідних робіт з держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України «Теоретичні основи створення пневматичної силової установки для екологічно чистого комбінованого автомобіля» у 2009 р. (ДР № 0109V001351) та у 2011 р. (ДР № 0111V001501) та госпдоговірних робіт у 2012-2013 рр., в яких здобувач є виконавцем окремих етапів роботи.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є визначення параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля теоретично-експериментальними методами, що дозволяє підвищити індикаторні і ефективні його показники. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання.

1. Розробка математичної моделі робочого процесу пневмодвигуна із золотниковим повітророзподіленням і підігріванням стисненого повітря на впуску.

2. Розробка методики й програми розрахунку прохідних перетинів золотникового повітророзподільника.

3. Дослідження впливу підігріву стисненого повітря на впуску на показники роботи пневмодвигуна.

4. Розробка метода проведення експериментального дослідження робочого процесу пневмодвигуна.

5. Дослідження впливу конструктивних параметрів і параметрів процесу впуску на індикаторні і ефективні показники пневмодвигуна.

6. Співставлення теоретичного і експериментального дослідження із розробкою практичних рекомендацій щодо вибору раціональних конструктивних і режимних параметрів пневмодвигуна в складі КЕУ автомобіля.

**Об'єкт дослідження** – робочі процеси в циліндрі поршневого пневмодвигуна із золотниковим повітророзподіленням.

**Предмет дослідження** – визначення параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля.

**Методи дослідження.** В основу дисертаційного дослідження покладені фундаментальні положення теорії термодинаміки й теплопередачі з використанням методів:

- фізичного моделювання газових процесів в циліндрі пневмодвигуна;
- математичного моделювання робочих циклів в циліндрі пневмодвигуна;
- вимірювань і обчислення показників роботи пневмодвигуна;
- натурні дослідження пневмодвигуна;
- визначення індикаторних і ефективних показників пневмодвигуна.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

– вперше визначені аналітичні залежності сполучення прохідних перерізів вікон ротора золотника й корпусу золотника системи газорозподілу автомобільного пневмодвигуна під час їх взаємного переміщення;

– одержала подальший розвиток математична модель робочого процесу пневмодвигуна, що враховує зміну прохідного перерізу золотника і підігрів стисненого повітря на впуску;

– уточнено й розширено комплекс індикаторних і ефективних показників пневмодвигуна на основі яких визначені раціональні режими його роботи.

**Практичне значення одержаних результатів:**

– розроблена методика й програма розрахунку прохідних перерізів золотникового механізму;

- теоретично і експериментально обраний доцільний інтервал підігріву стисненого повітря на впуску в циліндр пневмодвигуна;

- розроблено пакет програм для розрахунку на ЕОМ робочого процесу пневмодвигуна, що дозволяє на стадії проектування проводити оцінювання впливу конструктивних параметрів пневмодвигуна на індикаторні показники, скорочуючи витрати часу й коштів на проектування й доведення пневмодвигуна;

- оригінальність технічних рішень, отриманих під час проведення роботи підтверджена патентами України на корисну модель та на винахід [21–23].

Рекомендації з розрахунку пневмодвигунів у вигляді методичних вказівок і результати розрахунково-експериментальних досліджень впроваджені й використовуються під час проведення робіт з модернізації силових установок АТ «ХТЗ», під час проведення дослідно-конструкторських робіт на ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова», ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування».

Результати дослідження й програмний комплекс, що дозволяє розраховувати характеристики робочого процесу, індикаторну діаграму циклу пневмодвигуна й виконувати оптимізацію конструктивно-регулювальних параметрів пневмодвигуна, використовуються в НДР кафедри ДВЗ ХНАДУ.

**Особистий внесок здобувача.** Основні висновки та положення дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто:

- на підставі виконаного аналізу конструкцій пневмодвигунів, які застосовуються на транспорті [1, 2] запропоновані загальна конструкція пневмодвигуна й методика його дослідження;

- розроблена методика й програма розрахунку прохідних перетинів золотникового газорозподільника для пневмодвигуна [4, 7–9, 12, 13];

- розроблена методика й програма розрахунку підігрівання стисненого повітря на впуску в пневмодвигун [2, 3, 6, 8, 9];

- уточнена базова методика розрахунку робочого процесу для пневмодвигуна із золотниковим газорозподілом і підігріванням стисненого повітря на впуску в пневмодвигун [9, 11];

- виконані експериментальні дослідження й рекомендовані раціональні параметри стисненого повітря на впуску й органу газорозподілу створеної енергоустановки [6, 8, 9].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались на науково-технічних конференціях ХНАДУ і семінарах кафедри ДВЗ ХНАДУ (м. Харків, 2009–2014 рр), а також на: 74 науково-технічна й науково-методичній конференція університету, присвяченій 80 річчю ХНАДУ (м. Харків, 2010 р); V Міжнародна науково-практична конференція «Еколого-правові й економічні аспекти техногенної безпеки регіонів (м. Харків, 2010 р); XV Міжнародний конгрес двигунобудівників (с. Рибаче, АР Крим, 2010 р); міжнародна науково-технічна конференція

«Двигун-2010» (Росія, м. Москва, МВТУ ім. Н.Є. Баумана, 2010 р); XVII Міжнародний конгрес двигунобудівників (с. Рибаче, АР Крим, 2012 р); 77 науково-технічна й науково-методична конференція університету (м. Харків, 2013 р); 6-і Луканінські читання «Рішення енерго-екологічних проблем в автотранспортному комплексі», (Росія, м. Москва, 2013 р). У повному обсязі дисертаційна робота розглядалася і отримала схвалення на розширених засіданнях кафедри ДВЗ ХНАДУ у 2014 р.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 24 наукові роботи, з них 1 монографія, 13 статей у наукових фахових виданнях, включених в перелік МОН України, 7 у матеріалах і тезах міжнародних наукових конференцій, два патенти на корисну модель України та патент на винахід України.

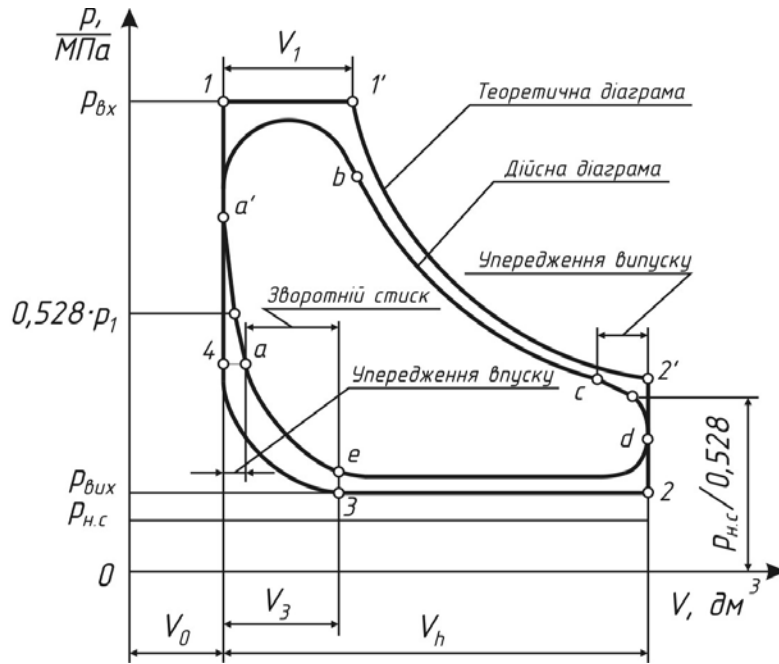
**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, 4 додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 172 с.; з них 35 рисунків за текстом; 15 таблиць за текстом; список використаних джерел із 125 найменуваннями на 12 сторінках; 4 додатки на 33 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й завдання, об'єкт і предмет дослідження. Описано використані методи дослідження й зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Визначено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів. Подано загальну характеристику роботи.

**Перший розділ** присвячено аналізу й обґрунтуванню завдань, пов'язаних з вибором напрямку дослідження з метою поліпшення техніко-економічних показників роботи комбінованої силової установки автомобіля з використанням пневмодвигуна як допоміжного силового агрегату. Вивчено режими роботи автомобіля, що експлуатується в місті. Розглянуто й проаналізовано вимоги, пропоновані до енергетичних установок автомобіля. Проведено вибір типу двигуна. Аналіз показав, що більшість провідних світових виробників розробляють комбіновані силові установки автомобілів в тому числі й із пневмодвигуном (MDI, Tata Motors, концерн PSA) і проводять їх вдосконалення. Обґрунтовано перспективні напрямки створення таких силових установок. Розглянуто їх практичне використання. Обрано тип пневмодвигуна для комбінованої енергоустановки.

**Другий розділ** присвячено математичному моделюванню робочого процесу пневмодвигуна з врахуванням прохідних перетинів золотникового повітророзподільника і підігрівання стисненого повітря на впуску в циліндр пневмодвигуна. За основу взяті існуючі методики, що запропоновані К.С. Борисенко, В.Г. Зиневичем та ін. На рис. 1 приведені теоретична і дійсна індикаторні діаграми поршневого пневмодвигуна.



$V_0$  – об’єм циліндра в ВМТ поршня і об’єм каналу, що з’єднує циліндр із золотником (об’єм шкідливого простору);  $V_1$  – об’єм наповнення;  
 $V_h$  – робочий об’єм циліндра;  $V_3$  – об’єм робочого циліндра на початку зворотнього стиснення;  $\varepsilon_0 = V_0/V_h$  – відносна величина шкідливого простору;  
 $\varepsilon_1 = V_1/V_h$  – ступінь наповнення;  $\varepsilon_3 = V_3/V_h$  – ступінь зворотнього стиску

Рис. 1. Теоретична і дійсна індикаторні діаграми поршневого пневмодвигуна:

Під час виконання розрахунків робочого процесу пневмодвигуна були взяті наступні допущення:

- використовувалась статична модель розрахунку робочого процесу;
- не використовувався глушник шуму під час роботи пневмодвигуна і тиск у випускному каналі брався постійним  $p_{\text{вих}} \approx 1,2 \cdot 10^5$  Па;
- температура в циліндрі на початку ізобарного впуску (точка «1») дорівнює температурі впускного повітря  $T_1 = T_{\text{вх}}$ ;
- температури повітря в точках «3» і «2» також однакові  $T_3 = T_2$ .

Індикаторні показники:

- теоретичний середній індикаторний тиск

$$p_i^T = p_1 \cdot \varepsilon_1 + \frac{1}{n_p - 1} \cdot p_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_0) \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_0}{1 + \varepsilon_0} \right)^{n_p - 1} \right] -$$

$$- p_2 - \frac{p_2}{n_c - 1} (\varepsilon_3 + \varepsilon_0) \left[ \left( \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right)^{n_c - 1} - 1 \right] + p_2 \cdot \varepsilon_3 \quad (1)$$

– дійсний середній індикаторний тиск

$$p_i^D = p_i^T \cdot \eta_{\text{п}} , \quad (2)$$

де  $\eta_{\text{пн}} = f(n, p_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}, f_s)$  – коефіцієнт повноти індикаторної діаграми;

– дійсна циклова індикаторна робота

$$L_{i\text{ц}}^D = p_i^D \cdot V_h \quad (3)$$

– дійсна індикаторна потужність пневмодвигуна

$$N_i^D = L_{i\text{ц}}^D \cdot n_{\text{н}} \cdot z / 60 \quad (4)$$

де  $z=4$  – число циліндрів пневмодвигуна;

– дійсна циклова витрата стисненого повітря (сумарна, з урахуванням витоків)

$$G_{\text{ц}\Sigma}^D = G_{\text{ц}}^T \cdot \eta_{\text{н}} \quad (5)$$

де  $\eta_{\text{нн}}$  – експериментально отриманий коефіцієнт наповнення,

$$\eta_{\text{н}} = \frac{G_{\text{е}}}{G_{\text{е}}^T} . \quad (6)$$

Ефективні показники:

– ефективна циклова робота

$$L_{\text{ец}} = p_e \cdot V_h \quad (7)$$

– ефективна потужність пневмодвигуна

$$N_e = \frac{L_{\text{ец}} \cdot n_{\text{н}} \cdot z}{60} \quad (8)$$

де  $\eta_{\text{мн}}$  – визначений експериментально механічний ККД

– питома витрата стисненого повітря

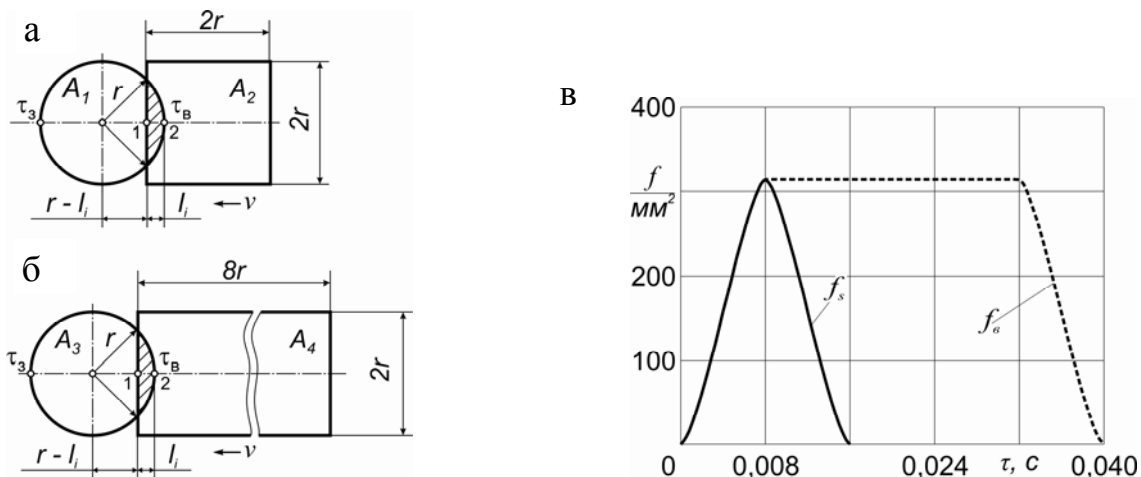
$$g_e = \frac{G}{N_e} \quad (9)$$

– ефективний крутний момент

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \cdot \frac{N_e}{n_{\text{н}}} = 9549,3 \frac{N_e}{n_{\text{н}}} \quad (10)$$



Розроблено методику розрахунку й програму визначення основних конструктивних параметрів прохідних перерізів золотникового повітророзподільника для автомобільного пневмодвигуна. Визначено коефіцієнти витрат через впускні й випускні вікна, підібрано діаметр трубопроводів для покращення процесів впуску й випуску стисненого повітря. Проведено теоретичне дослідження прохідних перетинів золотникового повітророзподільника (рис. 2). Вибрано діапазони змін основних конструктивних параметрів.



а – схема розрахунку прохідних перетинів на впуску при  $A_1 \cap A_2$ ;  
 б – схема розрахунку прохідних перетинів на випуску при  $A_3 \cap A_4$ ; в – змінення площі прохідного перетину за часом на впуску і випуску при  $n = 600 \text{ хв}^{-1}$   
 $r = 10 \text{ мм}$  – радіус кола кромки вікна корпуса золотника спроектованого золотникового повітророзподільника;  $l_i$  – величина ходу ( $l_i = 0 \dots 2r$ )

Рис. 2. Визначення площі прохідного перетину повітророзподільника:

Повітророзподільний пристрій має нерухомі й рухомі вікна. Аналітичні залежності площі прохідного перетину, що змінюється за кутом повороту золотника розраховані в залежності від часу, необхідного для відкриття і закриття вікон:

$$\tau_{\Pi} = \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{з}} = \frac{4r}{\omega R}. \quad (11)$$

Площа перетину при відкритті отвору повітророзподільника:

$$S_i = r^2 \arccos \frac{(r-l_i)}{r} - (r-l_i) \sqrt{2rl_i - l_i^2}. \quad (12)$$

Площа перетину при закритті отвору повітророзподільника:

$$S_i = r^2 \arccos \frac{(l_i-r)}{r} - (l_i-r) \sqrt{2rl_i - l_i^2}. \quad (13)$$

За результатами розрахункових досліджень обрані основні параметри золотникового повітророзподільника – прохідні перетини впускних і випускних вікон та їх взаємне розташування, діаметр впускних і випускних трубопроводів (рис. 1). Для одержання найкращих показників наповнення циліндрів стисненим повітрям і випуску відпрацьованого стисненого повітря взяті такі фази відкриття й закриття вікон у золотниковій коробці: відкриття впускних вікон –  $3^\circ$  до ВМТ; закриття впускних вікон –  $55^\circ$  після ВМТ, відкриття випускних вікон –  $40^\circ$  до НМТ; закриття випускних вікон –  $100^\circ$  після НМТ.

Проведено аналіз систем підігрівання стисненого повітря.

Створено математичну модель для розрахунку теплообмінника системи підігрівання стисненого повітря. Обмежувальним параметром під час розрахунків прийнято мінімальну температуру на випуску  $t_{\text{вип}} = -50^\circ\text{C}$ .

Були визначені основні параметри, що характеризують ефективність роботи теплообмінника:

Проведене розрахункове дослідження показало, що потужність, забезпечувана для підігріву стисненого повітря змінюється залежно від витрат стисненого повітря.

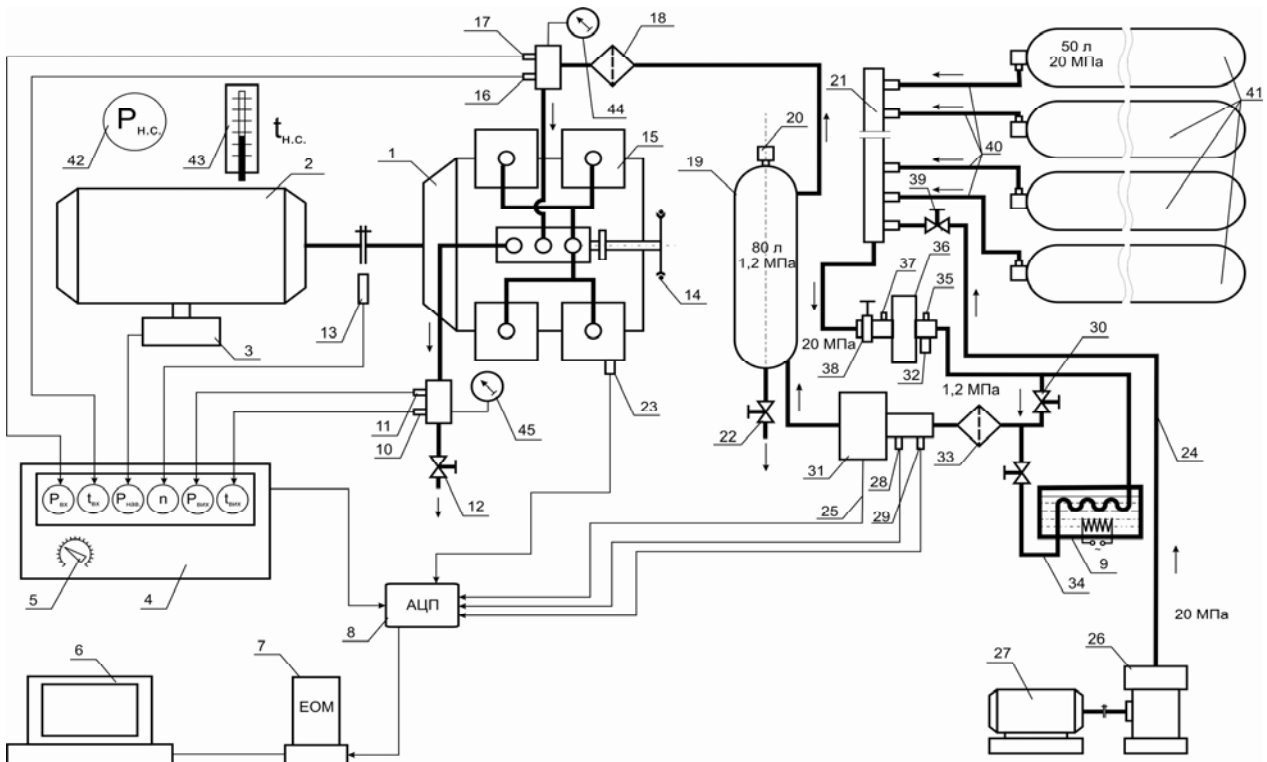
**У третьому розділі** наводиться методика експериментального дослідження поршневого пневмодвигуна, яке проводилося на спеціальному стенді, оснащеному контрольно-вимірювальною апаратурою і обладнаному системами регулювання температури масла й повітря (рис. 3).

Вимірювальна апаратура стенда дозволяє здійснювати:

- вимір параметрів установки для підігрівання повітря на впуску;
- вимір параметрів пневмодвигуна за допомогою спеціальних датчиків;
- обробку експериментальних даних за допомогою персонального комп'ютера з використанням спеціального програмного забезпечення;
- візуальне представлення отриманої інформації, а також результатів її обробки й аналізу в графічному виді на екрані ПК і друк результатів вимірювання й обробки інформації в графічному вигляді на принтері;
- збереження й копіювання експериментальних даних і результатів обробки, їх нагромадження для подальшого аналізу.

Під час проведення випробувань проводилося вимірювання наступних параметрів:

- низьких і високих тисків повітря на впуску в пневмодвигун і в циліндрі пневмодвигуна за допомогою тензодатчиків тисків;
- кута повороту колінчастого вала;
- положення поршня у верхній мертвій точці – за допомогою датчика Холла;
- температур повітря до й після нагрівача, на впуску в пневмодвигун і на випуску за допомогою хромель-копелевих термопар із виведенням інформації на вимірник-регулятор ОВЕН ТРМ 1;
- витрати стисненого повітря через пневмодвигун за допомогою ротацийного витратоміра G160 GMS DY-80 з візуальною й автоматичною фіксацією результатів;



- 1 – пневмодвигун; 2 – електрична балансна машина; 3 – ваговий термінал; 4 – пульт керування; 5 – ручка керування корисним навантаженням пневмодвигуна; 6 – дисплей; 7 – ЕОМ; 8 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 9 – во-до-електричний нагрівач стисненого повітря; 10 – датчик температури; 11 – датчик тиску; 12 – регулювальний кран; 13 – індуктивний датчик частоти обертання; 14 – ланцюгова передача привода золотника; 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 індиціювання циліндра; 24 – стальна труба високого тиску; 25 – інформаційний канал витрати стисненого повітря; 26 – чотиріступінчастий поршневий компресор; 27 – електродвигун привода компресора; 28 – датчик тиску; 29 – датчик температури; 30, 34 – крани регулювання тиску й температури повітря перед пневмодвигуном; 31 – витратомір; 32 – запобіжний клапан; 33 – фільтр; 35 – пружинний манометр; 36 – газовий редуктор рамповий РК3-500-2; 37 – пружинний манометр; 38, 39 – запірні крани; 40 – сталеві труби високого тиску; 41 – балон для повітря високого тиску; 42 – барометр М67; 43 – ртутний термометр; 44, 45 – пружинні манометри

Рис. 3. Схема стенда поршневого пневмодвигуна.

- навантаження на двигун за допомогою вагового терміналу КОДА-2 (модель ДО2.М) з виведенням інформації на ваговимірювальний перетворювач.
- індиціювання двигуна – п'єзоелектричним датчиком з виведенням сигналу через АЦП у ПЕОМ із подальшою реєстрацією й обробкою з використанням програми Power Graph (версія 3.3.8).

Також у розділі розглянуто повітророзподільник газорозподільної системи пневмодвигуна. Описано етапи розробки системи підігрівання стисненого повітря на впуску в пневмодвигун експериментальної установки й методики, взяті під час експериментального дослідження. Створена система підігрівання стисненого повітря, що надходить у циліндри пневмодвигуна до необхідної температури з можливістю зміни її значень у необхідному діапазоні. Похибка між розрахунковою потужністю теплообмінника й отриманим експериментальним значенням склала 0,306 %.

За допомогою вимірювальної апаратури стенда проведено випробування пневмодвигуна із золотниковим газорозподілом і дослідження впливу підігрівання стисненого повітря на впуску на показники роботи пневмодвигуна.

Для оцінки якості робочого процесу пневмодвигуна і обґрунтування вибору основних конструктивних і режимних параметрів, а також оцінки впливу їх зміни на робочий процес, були зняті індикаторні діаграми й навантажувальні характеристики.

Зняті діаграми були оброблені за відомими методиками для отримання індикаторних показників і подальшого розрахунку з визначення ефективних показників і отримання значущих коефіцієнтів для перевірки адекватності математичної моделі. Одна з оброблених індикаторних діаграм представлена на рис. 4, а на рис. 5 – швидкісні характеристики.

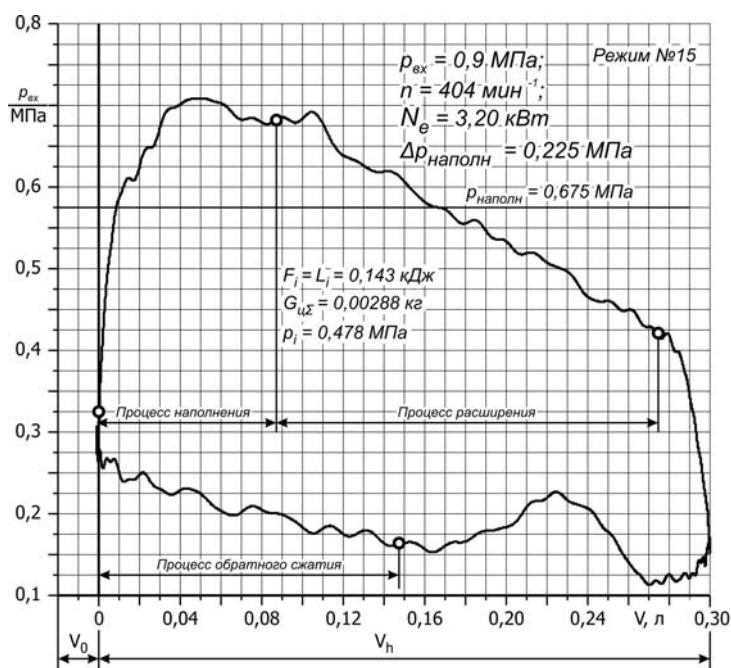


Рис. 4. Індикаторна діаграма пневмодвигуна на швидкісному режимі  $n = 600 \text{ хв}^{-1}$  і тиску повітря на вході  $p_{вх} = 0,9 \text{ МПа}$

Проаналізовано результати дослідження робочого процесу пневмодвигуна, які містять отримані експериментальні дані й дані розрахункового дослідження показників його роботи  $N_i$ ,  $g_{пов}$ ,  $\eta_i$ .

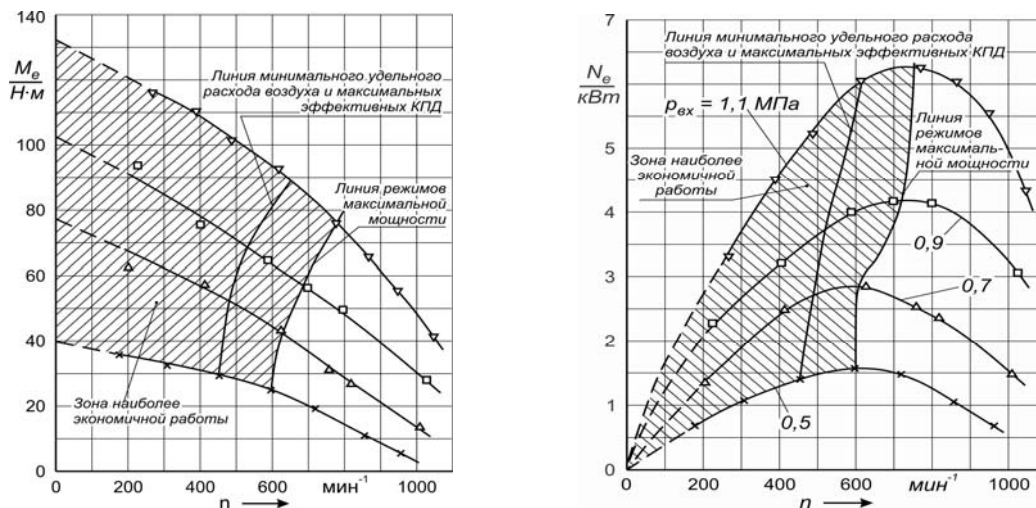


Рис. 5. Швидкісні характеристики за результатами випробувань

Проведено перевірку адекватності запропонованої математичної моделі. Перевірка показала розбіжність експериментальних і розрахункових даних не більше 3 %. Дані дослідження представлені на рис. 6. Експериментальні дані показані лініями, а розрахункові дані позначені точками.

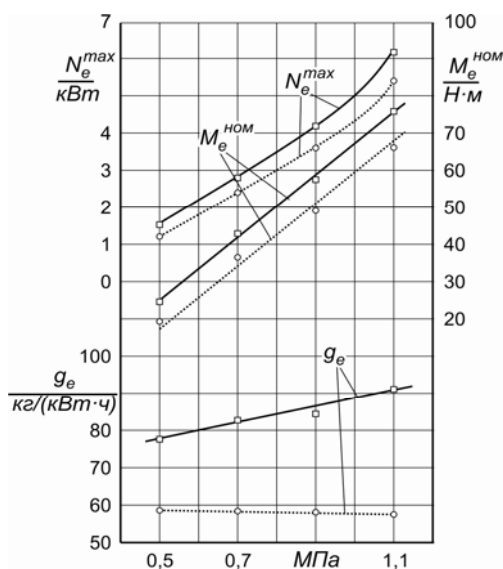


Рис. 6. Перевірка адекватності математичної моделі

..... лінія змінення показників для найкращого співвідношення параметрів на впуску для золотникового повітророзподілу  $\varepsilon_0 = 0,4; \varepsilon_1 = 0,4; \varepsilon_3 = 0,7$

Результати експериментального дослідження показали, що в розглянутому пневмодвигуні організований ефективний робочий процес не поступається за економічністю робочому процесу в пневмодвигунах світових виробників, інформацію про яких наведено в огляді літератури.

У четвертому розділі наведені результати розрахунково-експериментального дослідження пневмодвигуна. Зроблено обґрунтування вибору основних режимних (температури і тиску) і конструктивних (відносного шкідливого простору, ступеня наповнення, ступеня зворотнього стиску) параметрів на індикаторні і ефективні показники робочого процесу пневмодвигуна.

1. Рівень тиску стисненого повітря на впуску у дослідженому діапазоні значно впливає на збільшення ефективних показників пневмодвигуна. При збільшенні тиску удвічі відбувається практично

лінійне збільшення потужності майже у чотири рази і крутного моменту майже у три рази. При цьому збільшення витрати стисненого повітря зростає приблизно на 10 %.

2. Величина відносного шкідливого простору  $\varepsilon_0$  у всіх випадках повинна бути конструктивно мінімально можливою для зниження витрат енергоносія; вивчення публікацій показало, що в поршневих пневмодвигунах з клапанним повітророзподіленням мінімальна величина  $\varepsilon_0$  може досягати 0,05. А в поршневих пневмодвигунах з золотниковим повітророзподіленням  $\varepsilon_0^{\min} = 0,4$ ; величина  $\varepsilon_0$  може в принципі змінюватися незалежно від інших конструктивних параметрів, а також незалежно від режимних параметрів від нуля до скільки завгодно великої величини;

3. Величина ступеня наповнення може вибиратися незалежно від конструктивних і режимних параметрів від максимального значення  $\varepsilon_1^{\max} = 1,0$  до мінімально доцільного, при якому тиск кінця процесу розширення робочого тіла  $p_2'$  стане рівним протитиску на випуску  $p_2$  – у цьому випадку питома витрата енергоносія  $g_e$  буде мінімальною; однак досягнення умови  $p_2' = p_2$  може виявитися недоцільним через неприйнятно низку температуру повітря наприкінці його розширення; для досліджуваного двигуна прийнята мінімально припустима температура кінця процесу розширення  $t_2' = -50^\circ\text{C}$ ; така температура  $t_2'$  досягається при температурі стисненого повітря на вході  $t_{\text{вх}} = +20^\circ\text{C}$  незалежно від тиску на вході  $p_{\text{вх}}$  при  $\varepsilon_1 = 0,4$ ;

4. Ступінь зворотного стиску  $\varepsilon_3$  може мати значення в межах  $0 \div 1,0$ . Однак максимальний ступінь зворотного стиску  $\varepsilon_3^{\max}$  обмежується прийнятими величинами відносного шкідливого простору  $\varepsilon_0$ , тиском стисненого повітря на вході  $p_{\text{вх}}$  і протитиском на випуску  $p_2$  і виражається аналітичною залежністю

$$\varepsilon_3^{\max} = \varepsilon_0 [(p_{\text{вх}} / p_2)^{1/n_c} - 1].$$

Незалежно від величин  $p_{\text{вх}}$  і  $p_2$  при відносному шкідливому просторі  $\varepsilon_0 \leq 0,05 \div 0,06$  (пневмодвигун із клапанним повітророзподіленням) доцільно зворотний стиск не застосовувати ( $\varepsilon_3 = 0$ ), а при  $\varepsilon_0 \geq 0,4$  (пневмодвигун із золотниковим повітророзподіленням) мінімальна питома витрата стисненого повітря  $g_{e\min}$  досягається при  $\varepsilon_3 = 0,7$ .

5. Результатами підігріву споживаного повітря на енергетичні й економічні показники робочого процесу пневмодвигуна (рис. 7) є:

– підвищення температури відпрацьованого повітря від мінусових ( $-18^\circ\text{C}$ ) до плюсових ( $+39^\circ\text{C}$ ) значень, що значно покращує умови роботи системи змащення і позитивно впливає на надійність роботи пневмодвигуна;

– підвищення ефективної потужності на 0,3–0,5 кВт на режимах  $N_e^{\max}$  по швидкісних характеристиках, що становить 14–17 % у порівнянні з рівнем  $N_e$  без підігріву повітря насамперед за рахунок зниження механічних втрат;

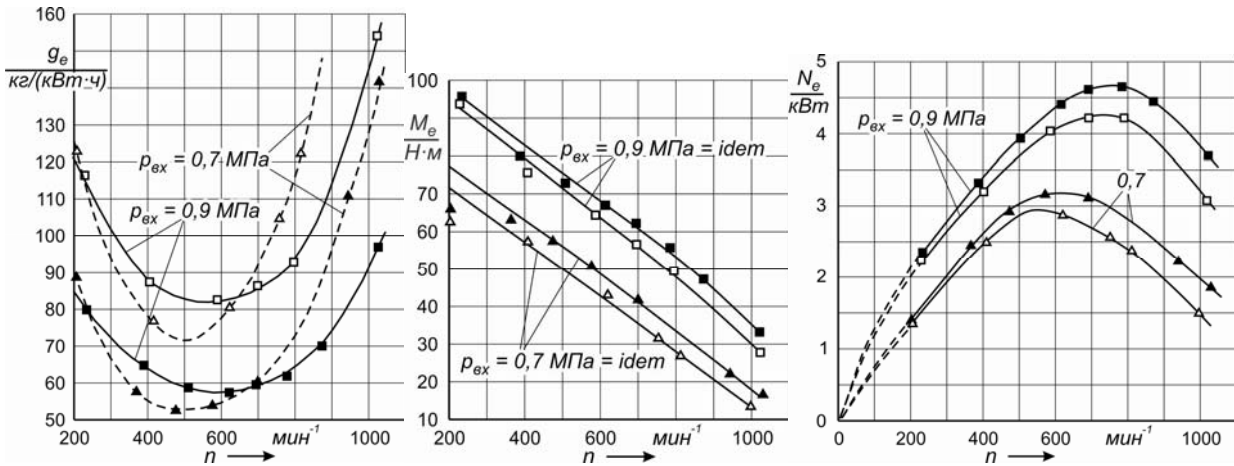


Рис. 7. Ефективні показники за результатами випробувань з підігрівом і без підігріву стисненого повітря на впуску

– істотне поліпшення економічності пневмодвигуна – питома витрата повітря  $g_e$  знизилася на 19–24 % по швидкісних характеристиках, ефективний ККД  $\eta_e$  зріс на 25–40 % по швидкісних характеристиках.

Індикаторні енергетичні показники робочого процесу (циклова індикаторна робота  $L_i$ , середній індикаторний тиск  $p_i$ , індикаторна потужність  $N_i$ ) як показав експеримент, від підігріву повітря на рівні 90–95 градусів практично не залежать; підігрів повітря позитивно впливає тільки на економічні індикаторні показники (масу циклового заряду циліндра  $G_{ц\sigma}$ , питому роботу  $l_i$ , питому витрату повітря  $g_i$ , індикаторний ККД  $\eta_i$ ).

В ході розрахункового дослідження було визначено вплив конструктивних параметрів і параметрів енергоносія на зміну одержаного за результатами стендових випробувань коефіцієнта повноти індикаторної діаграми  $\eta_{\Pi} = f(n, p_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}, f_s)$ .

Використання відомих методик із застосуванням пакету MathLab дозволило визначити ступінь впливу кожного з параметрів на зміну.

Рівняння відгуку, що включає варійовані параметри пневмодвигателя, має вигляд:

$$\begin{aligned} \eta_{\Pi} = & -163,791 + 11,4835 p_{\text{вх}} - 2,53855 \ln(1/n) + 0,92736 T_{\text{вх}} + 5,5526 \ln(f_s) - \\ & - 0,17527 p_{\text{вх}} \ln(1/n) - 0,0421946 p_{\text{вх}} T_{\text{вх}} - 0,0238744 p_{\text{вх}} \ln(f_s) - \\ & - 0,000375801 \ln(1/n) T_{\text{вх}} + 0,032711 \ln(1/n) \ln(f_s) - 0,00370498 T_{\text{вх}} \ln(f_s) + \\ & + 0,0491851 p_{\text{вх}}^2 - 0,233187 \ln^2(1/n) - 0,00147823 T_{\text{вх}}^2 - 0,372084 \ln^2(f_s). \end{aligned}$$

Нормований коефіцієнт детермінації  $R^2 = 92,3$ , тобто модель описує 92,3% зміни  $\eta_{\Pi}$ .

## ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні поставлена та вирішена науково-практична задача з вибору та обґрунтуванню параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля. Розв'язання поставленої задачі дозволило одержати такі наукові та практичні результати:

1. Аналіз літературних джерел, присвячених поршневим пневмодвигунам показав, що на сьогодні відсутня інформація про вибір основних параметрів при проектуванні пневмодвигуна та їх вплив на його показники. В першу чергу це стосується ступеня наповнення  $\varepsilon_1$ ; ступеня зворотного стиснення  $\varepsilon_3$  і величини шкідливого об'єму циліндра  $\varepsilon_0$ ; температури і тиску повітря на вході в циліндр  $T_{вх}$  і  $p_{вх}$ .

2. Розроблено математичну модель робочого процесу пневмодвигуна з золотниковим повітророзподілом і підігріванням стисненого повітря на впуску. За рахунок цього визначені фази газорозподілу для пневмодвигуна з золотниковим повітророзподілом: відкриття впускних вікон –  $3^\circ$  до ВМТ; закриття впускних вікон –  $55^\circ$  після ВМТ; відкриття випускних вікон –  $40^\circ$  до НМТ; закриття випускних вікон –  $100^\circ$  після НМТ. Перевірка адекватності математичної моделі показала, що розбіжність результатів розрахунку і експериментального дослідження не перевищує 10% для тиску на впуску  $p_{вх} = 1,1$  МПа і знижується при менших значеннях  $p_{вх}$ .

3. Розроблено метод експериментального дослідження робочого процесу пневмодвигуна з визначенням індикаторних та ефективних показників.

4. Експериментальне дослідження показало, що підігрів стисненого повітря на вході на  $90-95^\circ \text{C}$  позитивно впливає на робочий процес в циліндрі пневмодвигуна. Температура відпрацьованого повітря на виході з циліндра підвищується від мінусових до плюсових значень. При цьому ефективна потужність  $N_e$  за швидкісними характеристиками зростає на 14–17 %, а питома витрата стисненого повітря  $g_e$  знижується на 19–24 %. Експериментально визначені режими максимальної потужності  $N_e^{\max}$  та режими мінімальної витрати стисненого повітря  $g_e^{\min}$ .

5. Дослідження робочого процесу пневмодвигуна дозволило визначити шляхи поліпшення його ефективних показників: заміна золотникового повітророзподільника на клапанний дозволяє значно збільшити ККД, при значному зниженні питомої витрати стисненого повітря.

6. Розрахунково-експериментальне дослідження впливу визначальних конструктивних параметрів пневмодвигуна на показники робочого процесу дозволило вибрати і обґрунтувати величини цих конструктивних параметрів. За умови мінімізації витрати енергоносія пневмодвигуном визначено такі параметри:

- для золотникового повітророзподілення: шкідливий об'єм циліндра  $\varepsilon_0 = 0,4$ , ступінь наповнення  $\varepsilon_1 = 0,4$ , ступінь зворотного стиску  $\varepsilon_3 = 0,7$ ;
- для клапанного повітророзподілення: шкідливий об'єм циліндра  $\varepsilon_0 = 0,05$ , ступінь наповнення  $\varepsilon_1 = 0,4$ , ступінь зворотного стиску  $\varepsilon_3 = 0$ .



7. Результати дослідження у вигляді методичних вказівок і результати розрахунково-експериментальних досліджень впроваджені й використовуються під час проведення робіт з модернізації силових установок АТ «ХТЗ», під час проведення дослідно-конструкторських робіт на ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова», ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування», науково-дослідній лабораторії ДВЗ ХНАДУ, а також використовується в навчальному процесі при підготовці студентів ХНАДУ спеціальностей 7.05050304, 8.05050304 – двигуни внутрішнього згоряння.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті в наукових фахових виданнях

1. Абрамчук Ф.И. О достоинствах и целесообразности применения поршневого пневмодвигателя в составе автомобильной гибридной установки / Ф.И. Абрамчук, А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // Вестник ХНАДУ: сб. научн. тр. 2010. – Вып. 48. – С. 200–206.
2. Дьяченко В.Г. Двигатель внешнего сгорания – проблемы, перспективы / В.Г. Дьяченко, А.И. Воронков, О.Ю. Линьков, И.Н. Никитченко // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский науч.-техн. журнал НТУ ХПИ. – 2010. № 1. – С. 113–118.
3. Абрамчук Ф.И. Об использовании эксергетического метода при термодинамическом анализе газовых процессов в тепловых машинах / Ф.И. Абрамчук, А.И. Харченко, А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // Вестник ХНАДУ: сб. научн. тр. – 2011. – Вып. 53. – С. 32–44.
4. Абрамчук Ф.И. О выборе рациональных задаваемых параметров работы поршневого пневмодвигателя с клапанным воздухораспределением / Ф.И. Абрамчук, А.И. Харченко, С.С. Жилин, А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – 2011. – Вып. 27. – С. 141–147.
5. Воронков А.И. Транспортное средство с пневматической силовой установкой на базе автомобиля ВАЗ-2104 / А.И. Воронков, И.Н. Никитченко, А.В. Подоляка и др. // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – 2011. – Вып. 28. – С. 75–80.
6. Абрамчук Ф.И. Стенд для випробування і дослідження пневмодвигунів / Ф.И. Абрамчук, О.И. Воронков, А.И. Харченко, С.С. Жилин, І.М. Нікітченко, В.С. Червяк // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. науч.-техн. журнал. – 2011. – № 2. – С. 113–118.
7. Дьяченко В.Г. Обоснование и выбор параметров газоздушных трактов двигателя внешнего сгорания / В.Г. Дьяченко, О.Ю. Линьков, А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. науч.-техн. журнал. – 2012. – № 1. – С. 53–55.
8. Абрамчук Ф.И. Экспериментальное исследование рабочего процесса пневмодвигателя / Ф.И. Абрамчук, А.И. Харченко, А.И. Воронков,

И.Н. Никитченко и др. // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование: сб. науч. тр. – Днепропетровск: ГВУЗ ПГАСА, 2014. Вып. 79.– С. 208–213

9. Воронков А.И. Рабочий процесс автомобильного пневмодвигателя / А.И. Воронков, И.Н. Никитченко: монография. – Харьков: ХНАДУ, 2015. – 200 с.

#### **Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав з напряму**

10. Maamri R. Development of external combustion engine R. Maamri, W. Dyatshenko, O. Linkov, I. Nikitchenko // American Journal of Vehicle Design. – 2013. – Vol. 1, № 2. – P. 25–29.

#### **Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз**

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

12. Воронков А.И. Золотниковое воздухораспределение пневмодвигателя гибридной силовой установки автомобиля на базе бензинового двигателя / А.И. Воронков, С.С. Жилин, И.Н. Никитченко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного технического университета. – Харьков, 2013. – Вып. 63. – С. 36–40.

13. Воронков О.І. Визначення геометрії вікон та витрат стисненого повітря в золотниковому розподільнику пневмодвигуна / О.І. Воронков, О.Ю. Лісіна, І.М. Нікітченко // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Харьков: ХНАДУ. – 2014. – Вып. 34. – С. 39-43.

#### **Опубліковані праці апробаційного характеру**

14. Воронков А.И. Применение поршневого пневмодвигателя в составе гибридной установки автомобиля / А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // 74 науково-технічна й науково-методична конференція університету, присвячена 80 річчю. – 2010. – С. 9.

15. Воронков А.И. Экологически чистый тепловой двигатель для транспортных средств // А.И. Воронков, И.Н. Никитченко, Ю.Г. Ляшкова // V Міжнародна науково-практична конференція «Еколого-правові й економічні аспекти техногенної безпеки регіонів. – м. Харків. – 2010. – С. 23.

16. Дьяченко В.Г. Двигатель внешнего сгорания / В.Г. Дьяченко, О.Ю. Линьков, А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // Международная научно-техническая конференция «Двигатель-2010». – 2010. – С. 167–171.

17. Воронков О.І. Автомобіль ВАЗ 2104 з пневмодвигуном / О.І. Воронков, І.М. Нікітченко // 75 науково-технічна й науково-методична конференція університету. – 2011. – С. 10.

18. Воронков О.І. Розробка та дослідження нагрівача стиснутого повітря, що надходить до пневмодвигуна / О.І. Воронков, І.М. Нікітченко // 76 науково-технічна й науково-методична конференція університету. – 2012. – С. 9.

19. Воронков А.И. 6-е Луканинские чтения. Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе / А.И. Воронков, И.Н. Никитченко // Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – 2013. – С. 67–69.

20. Абрамчук Ф.І. Швидкісні характеристики пневмодвигуна, одержаного конвертуванням з ДВЗ / Ф.І. Абрамчук, О.І. Воронков, С.С. Жилин, І.М. Нікітченко // 77 науково-технічна й науково-методична конференція університету. – 2013. – С. 50–53.

### **Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір та патент**

21. Пат. 70248 Україна МПК 7 В60К 5/00 Комбінована силова установка автотранспортного засобу / Туренко А.Н., Абрамчук Ф.И., Манойло В.М., Жилин С.С., Харченко А.И., Воронков А.И., Никитченко И.Н.; заявитель и правообладатель Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. – № u201109362; заявл. 26.07.2011; опубл. 11.06.2012, бюл. № 11.

22. Пат. 82136 Україна МПК 7 В60К 6/00 Комбінована силова установка автотранспортного засобу / Абрамчук Ф. И., Манойло В.М., Жилин С.С., Харченко А.И., Воронков А.И., Никитченко И.Н., Липинский М.С., Разарьонов Л.В.; власник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201300167; заявл. 03.01.2013; опубл. 25.07.2013, бюл. № 14.

23. Пат. 106558 Україна МПК 7 F02B 47/00, F02B 33/ Спосіб роботи поршневого теплового двигуна / Дяченко В.Г., Ліньков О.Ю., Воронков О.І., Нікітченко І.М.; власник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № a201307018; заявл. 04.06.2013; опубл. 10.09.2014, бюл. № 17.

### **АНОТАЦІЯ**

**Нікітченко І.М.** Вибір і обґрунтування основних параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання одержання комбінованої силової установки транспортного засобу схеми «ДВЗ-пневмодвигун», яка має більш високі показники економічності й екологічності порівняно із ДВЗ; визначення і обґрунтування її основних конструктивних і режимних параметрів, які впливають на індикаторні і ефективні показники.

У роботі проведено аналіз і систематизація досліджень пневмодвигунів, що серійно випускаються в нашій країні й за кордоном, їх робочих процесів, конструкцій і експлуатаційних характеристик.

Розроблено методику й програму розрахунку прохідних перерізів золотникового газорозподільника для пневмодвигуна. За результатами розрахунку спроектовано і виготовлено золотниковий повітродозподільник.

Розроблена методика й програма розрахунку підігрівання стисненого повітря на впуску в пневмодвигун. Виконано аналіз систем підігрівання стисненого повітря. Обрано схему підігрівання. Виготовлено і проведено випробування водо-повітряної та повітряної систем підігрівання стисненого повітря.

На підставі загальних теоретичних положень і проведених раніше експериментів розроблено математичну модель робочого процесу пневмодвигуна, що дозволяє пов'язати показники впускного повітря, індикаторні показники робочого процесу пневмодвигуна й конструктивні параметри ГРМ.

Розроблений метод експериментального дослідження робочого процесу пневмодвигуна. Розроблений і апробований пневмодвигун як складова частина комбінованої силової установки для міського автомобіля, який забезпечує високі техніко-економічні й екологічні показники роботи у порівнянні з базовим варіантом теплового двигуна.

Оцінювання робочого процесу й рівня техніко-економічних показників роботи пневмодвигуна в порівнянні з двигунами аналогічної розмірності показали, що шляхом удосконалення робочого процесу можливе істотне їх підвищення, намічені напрямки такого удосконалення.

Результати дослідження у вигляді методичних вказівок і результати розрахунково-експериментальних досліджень впроваджені й використовуються під час проведення робіт з модернізації силових установок АТ «ХТЗ», під час проведення дослідно-конструкторських робіт на ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова», ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування», науково-дослідній лабораторії ДВЗ ХНАДУ, а також використовується в навчальному процесі при підготовці студентів ХНАДУ спеціальностей 7.05050304, 8.05050304 – двигуни внутрішнього згорання.

*Ключові слова:* комбінована енергетична установка, пневмодвигун, золотниковий газорозподіл, індикаторна діаграма, підігрівання стисненого повітря.

## АННОТАЦІЯ

**Никитченко И.Н.** Выбор и обоснование основных параметров пневмодвигателя комбинированной энергетической установки автомобиля. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи получения комбинированной силовой установки транспортного средства схемы «ДВС-пневмодвигатель», которая имеет более высокие показатели экономичности и экологичности по сравнению с ДВС; определение и обоснование ее основных конструктивных и режимных параметров, которые влияют на индикаторные и эффективные показатели.

В работе проведен анализ и систематизация исследований пневмодвигателей серийно выпускаемых в нашей стране и за рубежом, их рабочих процессов, конструкций и эксплуатационных характеристик.

Разработана методика и программа расчета проходных сечений золотникового газораспределителя пневмодвигателя. По результатам расчета спроектирован и изготовлен золотниковый воздухораспределитель.

Разработана методика и программа расчета подогрева сжатого воздуха на впуске в пневмодвигатель. Изготовлена система подогрева сжатого воздуха на впуске в пневмодвигатель.

На основании общих теоретических положений и проведенных ранее экспериментов разработана математическая модель рабочего процесса пневмодвигателя, что позволяет связать показатели впускного воздуха, индикаторные показатели рабочего процесса пневмодвигателя и конструктивные параметры ГРМ.

Разработан метод экспериментального исследования рабочего процесса пневмодвигателя. Разработан и апробирован пневмодвигатель как составная часть комбинированной силовой установки для городского автомобиля, который обеспечивает высокие технико-экономические и экологические показатели работы по сравнению с базовым вариантом теплового двигателя.

Оценка рабочего процесса и уровня технико-экономических показателей работы пневмодвигателя по сравнению с двигателями аналогичной размерности показали, что путем совершенствования рабочего процесса возможно существенное их повышение, намечены направления такого усовершенствования.

Результаты исследования в виде методических указаний и результаты расчетно-экспериментальных исследований внедрены и используются во время проведения работ по модернизации силовых установок АО «ХТЗ»; во время проведения опытно-конструкторских работ на ГП «Харьковское конструкторское бюро по машиностроению имени А.А. Морозова», ГП «Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению», научно-исследовательской лаборатории ДВС ХНАДУ, а также используется в учебном процессе при подготовке студентов ХНАДУ специальностей 7.05050304, 8.05050304 – двигатели внутреннего сгорания.

*Ключевые слова:* комбинированная энергетическая установка, пневмодвигатель, золотниковый газораспределение, индикаторная диаграмма, подогрев сжатого воздуха.

## ABSTRACT

**Nikitchenko I.N.** The choice and rationale of the main parameters of the pneumatic engine combined power plant of the vehicle. Manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.03 – engines and power plants. Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2015.

The dissertation is devoted to solving actual scientific task of obtaining the combined propulsion vehicle scheme «ICE-pneumatic», which has higher efficiency and environmental performance compared to internal combustion engines; definition and justification of major structural and operational parameters that affect the display and efficient performance.

The paper analyzes and systematization studies pneumatic serially produced in our country and abroad, their work processes, structures and operational characteristics.

The method and calculation program Throat for pneumatic spool.

The method of calculating the heating program and the compressed air at the inlet to the pneumatic. Chosen heating circuit. Manufactured and held air heating systems.

Designed and tested pneumatic engine as part of a combined power plant for urban car which provides high feasibility and environmental performance as compared to the baseline option heat engine, as well as pneumatic silo produced.

Assessment Workflow and level of technical and economic performance of the pneumatic compared with engines of similar dimensions shown that by improving the workflow can significantly improve their scheduled areas such improvement.

*Keywords:* combined power plant, pneumatic, spool valve timing, the indicator chart, compressed air.