

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ВОРОНКОВ ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ

УДК 621.486

**МЕТОДОЛОГІЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОЧОГО
ПРОЦЕСУ ПНЕВМОДВИГУНА КОМБІНОВАНОЇ
ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ МІСЬКОГО АВТОМОБІЛЯ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Абрамчук Федір Іванович,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет, завідувач кафедри
двигунів внутрішнього згоряння.

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

доктор технічних наук, професор
Тимошевський Борис Георгійович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння;

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

Захист відбудеться «24» травня 2017 р. о 13⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, конференц-зала.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розісланий «21» квітня 2017 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доцент, кандидат технічних наук



Р. В. Смолянук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні два десятиріччя у світовому автомобілебудуванні зростає рівень застосування комбінованих енергетичних установок, які складаються з традиційного двигуна внутрішнього згоряння та допоміжного, як правило, менш потужного електродвигуна. Допоміжний двигун використовується у тих умовах експлуатації, за яких двигун внутрішнього згоряння працює неекономічно та з високим рівнем шкідливих викидів (рух у щільному потоці транспорту, паркування тощо). Використання таких комбінованих енергетичних установок на практиці дозволяє економити до 30 % палива і суттєво знизити викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Однак під час використання електродвигуна в автомобілі виникає ряд недоліків: водій перебуває поряд із джерелом потужного електромагнітного випромінювання, шкідливого для здоров'я людини; відбувається забруднення навколишнього середовища під час виробництва та утилізації акумуляторних батарей, що відпрацювали свій термін; наявна додаткова маса електрообладнання; спостерігається неефективна робота за низьких температур тощо.

Альтернативою електродвигуну в автомобільних комбінованих енергетичних установках є екологічно чистий, більш простий, надійніший в роботі пневматичний двигун, який не має цих недоліків. На початку 2000-х років з'явилися публікації, пов'язані із застосуванням пневмодвигуна на сучасному автомобілі. Але на сьогодні відсутні дані про теоретичні й експериментальні дослідження пневматичного двигуна для автомобіля. Розробці методології створення високоефективних робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля і присвячено дисертаційну роботу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукова робота пов'язана з тематикою дослідження кафедри ДВЗ ХНАДУ з 2006 р. до 2017 р. і спрямована на підвищення енергетичних, економічних і екологічних показників міського автомобіля шляхом удосконалення пневматичного двигуна, його комбінованої енергетичної установки.

Дослідження виконано відповідно до основних положень «Транспортної стратегії України на період до 2020 року» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 року № 2174-1). Напрямок досліджень, основні положення дисертаційної роботи пов'язані з планом держбюджетних наукових робіт Харківського національного автомобільно-дорожнього університету «Теоретичні основи створення пневматичної силової установки для екологічно чистого автомобіля» у 2009 р. (ДР № 0109V001351) та у 2011 р. (ДР № 0111V001501); «Застосування пневмодвигунів на транспорті» (ДР № 0116V004628).

Під час проведення держбюджетних та госпдоговірних робіт за поданою тематикою автор був відповідальним виконавцем та безпосередньо виконав основну частину наукових досліджень, узагальнив отримані результати.

Мета дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методології організації робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки міського автомобіля, з урахуванням одержання максимальної потужності за мінімальної витрати стисненого повітря, що дозволяє підвищити його економічні та екологічні показники.

Основні завдання дослідження:

1. Розробити методологію організації робочих процесів пневмодвигуна для комбінованих енергетичних установок міського автомобіля за умов одержання максимальної потужності за мінімальної витрати стисненого повітря.

2. Розробити метод дослідження та математичну модель пристрою повітроподачі, що дозволяє розрахувати його необхідні параметри для подачі стисненого повітря, а також відводу відпрацьованого повітря пневмодвигуна.

3. Розробити метод визначення необхідної потужності пневмодвигуна для досягнення максимальної швидкості руху автомобіля з урахуванням конкретизації маршрутів і часу, який дозволить розрахувати швидкість та прискорення автомобіля з комбінованою енергетичною установкою.

4. Розробити метод експериментальних досліджень робочих процесів пневмодвигунів з підігрівом і без підігріву стисненого повітря з різними системами повітророзподілу.

5. Виконати фізичне та математичне моделювання робочих процесів пневмодвигуна, провести оптимізаційні дослідження і рекомендувати його визначальні безрозмірні конструктивні параметри.

6. За результатами запропонованої методології організації робочих процесів пневмодвигуна визначити необхідну кількість теплоти, що потрібна для мінімального підігріву стисненого повітря на вході, та вплив температури стисненого повітря на показники робочого процесу пневмодвигунів із золотниковим та клапанним повітророзподілом.

Об'єкт дослідження – робочі процеси пневмодвигунів як допоміжного силового агрегату комбінованої енергетичної установки міського автомобіля.

Предмет дослідження – методологія організації робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки міського автомобіля.

Методи дослідження. В основу дисертаційного дослідження покладені фундаментальні положення теорії робочих процесів пневмодвигунів і двигунів внутрішнього згоряння з використанням методів:

- математичного моделювання робочих процесів у повітророзподільнику і циліндрі пневмодвигуна;
- фізичного моделювання газових процесів у повітророзподільнику і циліндрі пневмодвигуна;
- експериментального дослідження для визначення індикаторних і ефективних показників пневмодвигуна;
- чисельного інтегрування та математичної статистики.

Наукова новизна результатів.

Уперше:

– розроблено метод математичного моделювання конструктивних параметрів золотникового механізму на основі R-функцій, який дозволяє розраховувати робочі процеси повітророзподільника пневматичного поршневого двигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля;

– розроблено метод визначення необхідної потужності пневмодвигуна для досягнення максимальної швидкості руху автомобіля з урахуванням конкретизації маршрутів і часу, який дозволяє розрахувати швидкість та прискорення автомобіля з комбінованою енергетичною установкою;

– розроблено метод визначення необхідної кількості теплоти для підігріву стисненого повітря на впуску та впливу його температури під час впуску на показники робочого процесу пневмодвигуна із золотниковим і клапанним повітророзподілом, від яких залежать величини потужності, економічності, надійності;

– встановлено оптимальний зв'язок між потужністю і витратою стисненого повітря та визначальними конструктивними і регулювальними параметрами, їх вплив на робочі процеси пневматичного двигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля, які суттєво відрізняються від взаємозв'язків робочих процесів відомих промислових пневмодвигунів, що використовуються в гірничій та нафтогазовидобувній галузях промисловості;

– запропоновано метод визначення впливу визначальних конструктивних та регулювальних параметрів пневмодвигуна на його показники, в якому отримано критерій оцінки якості робочих процесів, що дозволяє під час здійснення розрахунків робочого процесу з використанням статичної моделі визначати дійсне значення індикаторної роботи та циклового масового заряду;

– розроблено метод експериментальних випробувань пневмодвигунів з золотниковим і клапанним повітророзподілом для перевірки теоретичних досліджень на адекватність та уточнення коефіцієнтів і критеріїв з метою вдосконалення його робочих процесів.

Отримало подальший розвиток:

– математичне моделювання робочих процесів пневмодвигуна із золотниковим і клапанним повітророзподілом на основі статичної та динамічної моделей з підігрівом і без підігріву стисненого повітря на впуску;

– розкриття якісної та кількісної термодинамічної сутності визначальних конструктивних параметрів (ступіня наповнення, ступіня зворотного стиснення, відносної величини шкідливого об'єму) і регулювальних параметрів у процесі перетворення потенційної енергії стисненого повітря, що впливають на індикаторні та ефективні показники пневматичного двигуна; проведено їх оптимізацію, а також надано рекомендації щодо їх вибору;

– математичне моделювання робочих процесів пневмодвигуна, на підставі якого встановлено взаємозв'язок між температурою високого підігріву стисненого повітря на впуску та індикаторними показниками, що дозволяє вийти на новий рівень організації робочих процесів пневмодвигуна.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розв'язанні важливої наукової та народногосподарської проблеми, пов'язаної з розробкою пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля:

- створено автоматизований моторний стенд для досліджень робочих процесів пневмодвигунів комбінованої енергетичної установки з підігрівом і без підігріву повітряного заряду з різними системами повітророзподілу;
- розроблено метод та програми розрахунку робочих процесів пневматичних двигунів як з підігрівом стисненого повітря, так і без нього;
- запропоновано та експериментально встановлено значення критерію якості робочого процесу за його коефіцієнтами, що характеризує енергетичну й екологічну ефективність пневмодвигуна та його конструктивну досконалість;
- запропоновано способи підігріву повітряного заряду пневмодвигунів, які захищені патентами України [33–38];
- запропоновано рекомендації щодо вибору раціональних конструктивних і регулювальних параметрів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля;
- запропоновано метод дорожніх випробувань автомобіля з пневмодвигуном.

Результати дослідження робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля пройшли апробацію та впроваджені на АТ «Харківський тракторний завод», ДП «Завод імені Малишева», КП «Харківське конструкторське бюро машинобудування імені А.А. Морозова», в ПрАТ «Промстроймонтаж» м. Краматорськ та в ХНАДУ.

Розроблені та встановлені моторні і безмоторні стенди для проведення досліджень пневматичних двигунів, в тому числі з підігрівом стисненого повітря під час впуску, які використовуються в лабораторії ДВЗ ХНАДУ в наукових і навчальних цілях.

Методика вибору параметрів і розрахунку робочого процесу пневмодвигуна впроваджена на кафедрі ДВЗ ХНАДУ в навчальному процесі підготовки студентів за напрямками 6.05050304, 7.05050304 та 8.05050304.

Особистий внесок здобувача.

Дисертація ґрунтується на результатах науково-дослідних робіт, які були проведені автором особисто або у співавторстві протягом 2007–2017 рр. згідно з державними програмами і господарським договором.

Сформульовано і обґрунтовано напрямки, цілі і завдання дослідження; розроблено методологію організації робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля; розроблено методи теоретичних і експериментальних досліджень; розроблено математичні моделі, проведено багатофакторну оптимізацію, запропоновано критерій якості робочих процесів; узагальнено отримані результати та здійснено їх впровадження у виробництво та навчальний процес.

Основні положення дисертаційного дослідження відображені в наукових працях, опублікованих як у співавторстві [1–8, 10, 11, 13–17, 25–38], так і одноосібно [9, 12, 18–22].

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:

– здійснено аналіз перспективності застосування пневмодвигунів на автомобілях та створено основні положення для формування методології організації робочих процесів пневмодвигунів комбінованої енергетичної установки міського автомобіля [1, 2];

– визначено потужності пневмодвигуна у складі комбінованої енергетичної установки, що необхідні для руху автомобіля в міських умовах з щільним потоком руху за створеним методом [15, 17];

– створено метод розрахунку золотникового механізму повітророзподілу пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля, а також запропоновано підхід щодо обґрунтування параметрів газоповітряних механізмів клапанних пневмодвигунів та їх елементів [1, 5, 8, 9, 14, 16];

– запропоновано методи теоретичного дослідження, математичні моделі та алгоритми розрахунків робочих процесів пневмодвигунів для автомобілів, а також метод моделювання пневмодвигунів з високим підігрівом стисненого повітря на впуску [1, 3, 4, 11, 33–38];

– створено метод експериментальних досліджень робочих процесів пневмодвигуна з підігрівом і без підігріву стисненого повітря, на основі яких проведено оптимізацію індикаторних показників пневмодвигунів [1, 6, 7, 10, 12, 13, 18–23, 24–32].

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на науково-технічних конференціях ХНАДУ і семінарах кафедри ДВЗ ХНАДУ (м. Харків, 2007–2014 рр.); на 74-й науково-технічній та науково-методичній конференції університету, присвяченій 80-річчю ХНАДУ (м. Харків, 2010 р.); на V Міжнародній науково-практичній конференції «Еколого-правові та економічні аспекти техногенної безпеки регіонів» (м. Харків, 2010 р.); на XV Міжнародному конгресі двигунобудування (с. Рибаче, АР Крим, 2010 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Двигун-2010» (Росія, м. Москва, МВТУ імені Н. Баумана, 2010 р.); на XVII Міжнародному конгресі двигунобудування (с. Рибаче, АР Крим, 2012 р.); на 6-х Луканінських читаннях «Рішення енерго-екологічних проблем в автотранспортному комплексі» (Росія, м. Москва, 2013 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 100-річчю від дня народження В.К. Нікітіна, 80-річчю від дня заснування кафедри автомобілів і 50-річчю від дня заснування ЛША «Проблеми і перспективи автомобілебудування та автомобільного транспорту» (м. Харків, 2011 р.); на Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з Дня народження А.Б. Гредескула «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців» (м. Харків, 2016 р.).

У повному обсязі дисертаційна робота розглядалася й отримала схвалення на розширеному засіданні кафедри ДВЗ ХНАДУ в 2016 році.

Публікації.

Результати дисертації відображені в 38 публікаціях, у тому числі в монографії, 20 статтях у фахових виданнях за переліком МОН України, 2 статті надруковані у зарубіжних журналах та збірниках наукових праць, 9 – у матеріалах і тезах міжнародних наукових конференцій. За матеріалами дослідження отримано 4 патенти України на корисну модель і 2 патенти України на винахід.

Одноосібно опубліковано 7 статей.

Структура й обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 393 сторінки, 28 таблиць і 142 рисунки, список використаних джерел на 25 сторінках, який містить 239 найменувань, і додатки на 85 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано стан та актуальність наукової проблеми, подано загальну характеристику роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет, основні завдання дослідження та шляхи їх розв'язання. Викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, показано апробацію роботи.

У **першому розділі** розглянуто шляхи вдосконалення автомобіля із застосуванням комбінованих енергетичних установок. Обґрунтовано концепцію створення сучасної комбінованої енергетичної установки для міського автомобіля, яка складається з різних енергетичних модульних елементів (двигуна внутрішнього згоряння та пневмодвигуна). Робота комбінованої енергетичної установки не виключає окремої або взаємодії різних енергетичних модулів залежно від призначення автотранспортного засобу та компоувальної схеми.

Проведено аналіз розрахункових методик за даними досліджень прототипів шахтних пневмомоторів, визначено конструкцію та схеми розташування пневмодвигуна на автомобілі, обґрунтовано вимоги до його робочих процесів.

Аналіз літературних джерел із вдосконалення автомобільного транспорту, підвищення його екологічності, економічності та пошуку альтернативних палив показав, що протягом останніх десятиліть увага автомобілебудівників до використання стисненого повітря як енергоносія для автомобільних силових установок помітно зросла. На міжнародних виставках останніх років були представлені автомобілі із пневматичними силовими установками із системою Hybrid Air та Air різних фірм: Cadillac Aera, Honda Air і Volvo Air Motion, Peugeot-Citroën C4 Cactus AIRFLOW 2L. Фірма MDI (Moteur Development International)

заявила, що розробила автомобілі з пневмодвигуном, що стали відомі під назвою MDI Airpod, MDI Airpod Baby, MDI Air One, MDI Air City, MDI Air Mini, і готова налагодити виробництво автомобілів з пневмодвигунами в Індії, Мексиці, США. В Австралії в місті Мельбурн розпочато експлуатацію автомобіля на стисненому повітрі австралійської фірми Enginear. Помітний внесок у розвиток автотранспорту з пневмодвигунами зробили вчені і винахідники з різних країн: Guy Negre, Di Pietro, Mekkis, Shaaf, Virovich, Stansfield, Stravbridch, Yuan, Dean Benstead, М. Пустинський, О. Збарський та ін.

У міських автомобілях пневмодвигун використовується на режимах як із малим навантаженням (рушання, розгін, гальмування, виїзд із гаража або паркінгів, рух у щільному транспортному потоці), так із середнім навантаженням. Це свідчить про доцільність використання в автомобілях на таких режимах не двигунів внутрішнього згоряння, які в таких умовах працюють вкрай неефективно з підвищеною витратою палива та забрудненням повітря шкідливими речовинами, а екологічно чистих пневмодвигунів у складі комбінованої енергетичної установки.

Серед відомих конструкцій пневматичних двигунів для використання на автомобілі найбільш раціональним є поршневий пневмодвигун завдяки можливості його використання в одному блоці з ДВЗ, регульованому ступеню наповнення, наявності значного пускового крутного моменту, сприятливій тяговій характеристиці, допущенню перевантаження, найменшим втратам стисненого повітря на витоки та іншим перевагам.

За результатами аналізу численних сучасних зарубіжних та вітчизняних робіт сформульовано основні вимоги до робочих процесів поршневого пневмодвигуна та його визначальних конструктивних параметрів, тим самим узагальнено міжнародний досвід розвитку поршневих автомобільних пневматичних двигунів та комбінованих енергетичних установок.

Проведено аналіз методів дослідження робочих процесів пневмодвигунів, розроблених для використання в гірничовидобувній промисловості, що розглядаються в роботах А.П. Германа, А.С. Іллічова, К.С. Борисенка, Н.Г. Верескунова, Г.З. Ярмоленка, В.І. Дегтярьова, А.А. Боровкова, В.А. Мурзіна, Г.М. Колобердяна, В.Д. Зіневича, В.С. Калекіна та інших.

Для автомобільних пневмодвигунів різної розмірності важливого наукового та практичного значення набуває розробка методології організації робочих процесів з урахуванням чинників, що швидко змінюються в агрегатах та механізмах повітроподачі, впливу підігріву стисненого повітря, різних швидкісних і навантажувальних режимів роботи пневмодвигуна, яка дозволяє отримати індикаторні та ефективні його показники на етапі проектування.

Тому в цьому дисертаційному дослідженні запропоновано структуру методології організації робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки міського автомобіля (рис. 1).

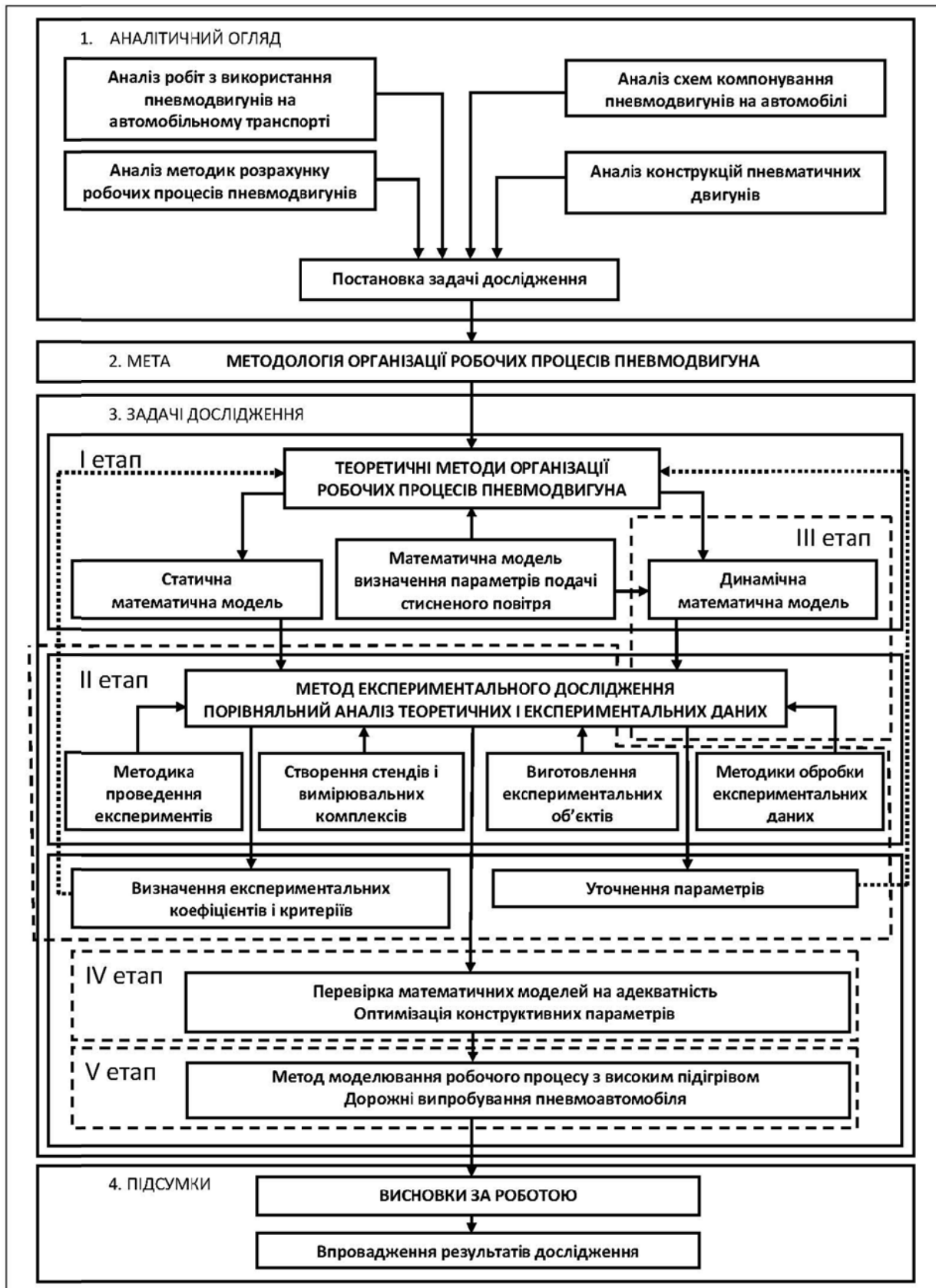


Рисунок 1 – Структурна схема дисертаційної роботи

На першому етапі за запропонованим методом визначається потужність пневмодвигуна, здійснюються розрахункові дослідження з визначення параметрів елементів пневмодвигуна і виготовлення його експериментальних деталей. Результати дослідження робочих процесів пневмодвигуна ґрунтуються на основі статичної розрахункової моделі К.С. Борисенка.

На другому етапі за запропонованим методом здійснюються моторні випробування пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом без підігріву і з підігрівом стисненого повітря, з метою уточнення значень конструктивних і регулювальних параметрів, емпіричних коефіцієнтів та критеріїв; у процесі розрахунково-експериментальних досліджень здійснюється аналіз впливу конструктивних і регулювальних параметрів на показники пневматичного двигуна, визначаються область зміни параметрів та функціональні обмеження.

На третьому етапі здійснюється узагальнення отриманих основних результатів теоретичних і експериментальних досліджень робочих процесів у пневмодвигунах автомобілів в уточненій теоретичній метод, який ґрунтується на динамічній моделі розрахунку робочих процесів В.Д. Зіневича та В.Г. Дяченка, оцінюється вплив конструктивних параметрів на індикаторні та ефективні показники пневмодвигуна.

На четвертому етапі проводяться експериментальні моторні дослідження, які дозволяють оцінити адекватність теоретичного методу та виконати порівняльний аналіз експериментальних результатів з теоретичним дослідженням. Обґрунтовуються рекомендації з вибору конструктивних і регулювальних параметрів робочих процесів пневмодвигуна. На основі уточненої розрахункової моделі та експериментальних досліджень проводиться оптимізація конструктивних і режимних параметрів пневмодвигуна з метою визначення мінімальної витрати стисненого повітря на режимах максимальної потужності.

На п'ятому етапі здійснюється моделювання параметрів розрахунку робочих процесів пневмодвигуна з високим підігрівом і проводяться дорожні випробування автомобіля з пневмодвигуном.

У **другому розділі** представлено метод визначення потужності пневмодвигунів для міських автомобілів з урахуванням умов роботи транспортного засобу в місті за умов обмеження запасу стисненого повітря. Одним з факторів, що визначає потужність автомобільних установок, є швидкість руху транспортного засобу на основних вулицях міста. Наприклад, для м. Харкова такими є центральна вулиця Сумська (на ділянці від вулиці Весніна до площі Конституції) і вулиця Пушкінська (на ділянці від вулиці Весніна до площі Конституції). Вибір цих вулиць обумовлений наявністю інтенсивного руху легкових автомобілів та маршрутних автобусів громадського транспорту, які працюють на паливі з нафти, що призводить до граничного забруднення навколишнього середовища.

Розроблено заходи щодо підвищення ефективності функціонування автомобіля в умовах щільного транспортного потоку і визначено такі параметри руху автомобіля, як уповільнення під час зупинки та прискорення у разі повернення до транспортного потоку. Як технічний засіб для фіксації параметрів руху транспортних засобів у центральній частині м. Харкова був застосований GPS-навігатор. Отримані значення швидкості руху оброблені в пакеті Statistika 10.

Для центральної частини міста Харкова в денний час є характерною дуже низька швидкість руху маршрутних транспортних засобів, середнє значення якої протягом робочого дня склало $V_{\text{сер}} = 11,29$ км/год на вул. Сумській та $V_{\text{сер}} = 14,56$ км/год на вул. Пушкінській.

Прискорення автомобіля на початку руху в умовах щільного транспортного потоку та під час руху з максимальною швидкістю до 30 км/год також відбувається з підвищеним забрудненням повітря. Теоретична залежність для безперервного розгону отримана за допомогою регресійного аналізу.

Транспортні засоби (мікроавтобус та легковий автомобіль) з пневматичним двигуном повинні розвинути максимальну швидкість 30 км/год, маючи потужність двигуна $N_{V_{\text{max}}} = 12,5$ кВт і $N_{V_{\text{max}}} = 5,8$ кВт. Визначення потужності та динамічних характеристик пневмодвигуна було розраховано для цих транспортних засобів за допомогою тягово-швидкісного аналізу руху автомобіля.

За статичною моделлю робочих процесів визначаються основні індикаторні енергетичні та економічні показники теоретичного циклу пневмодвигуна, коефіцієнт корисної дії, обчислюються чотири визначальних параметри: один регульовальний – тиск стисненого повітря на вході p_s , МПа, і три конструктивних безрозмірних – відносний шкідливий об'єм ε_0 , ступінь наповнення ε_1 і ступінь зворотного стиснення ε_5 .

Для пневмодвигунів проведено розрахункові дослідження щодо визначення розмірів деталей і механізмів.

На підставі аналізу кінематики та зрівноваженості поршневого пневмодвигуна, що працює за двотактним робочим циклом, змінено форму колінчастого вала та обрано противаги, що дозволяють зрівноважити основні сили і моменти.

Створено метод визначення параметрів золотникового повітророзподільника. Моделі елементів золотникового повітророзподільника зображені в програмному пакеті Autodesk Inventor (рис. 2, а). Для визначення основних характеристик у повітророзподільнику було виконано моделювання руху потоків повітря в золотниковому повітророзподільнику за допомогою програми Autodesk Simulation CFD (рис. 2, б).

Задавались параметри елементів конструкції та робочого тіла, граничні умови. Для відображення потоку використовуються траєкторні криві.

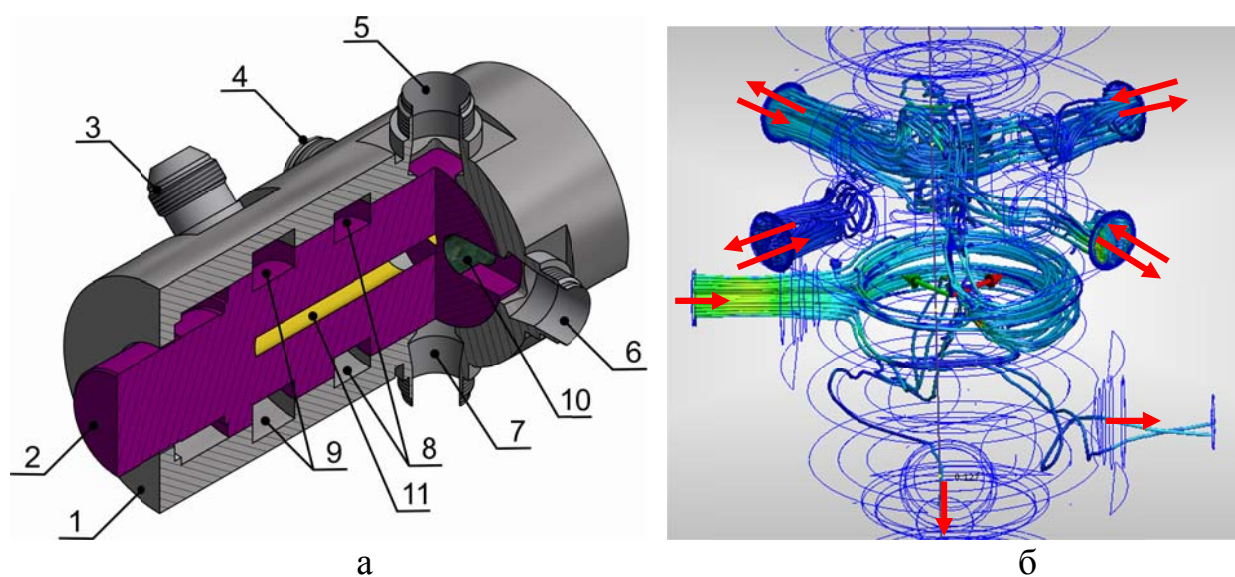


Рисунок 2 – Золотник у зборі (а) і рух потоку повітря в золотнику (б):
 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – штуцер випускного каналу; 4, 5, 6, 7 – штуцери каналів підводу-відводу повітря до циліндрів; 8 – канавка для підводу стисненого повітря; 9 – канавка для відпрацьованого повітря; 10 – канал впуску і випуску повітря; 11 – центральний повітряний канал

Для уточнення розрахунків прохідних перетинів у золотнику і визначення витрат повітря використовувалася методика із застосуванням R-функцій. Описуючи області перетину отворів, застосовуємо R-кон'юнкцію такого вигляду:

$$\omega(x, y) = \omega_1(x, y) \underset{R}{\wedge} \omega_2(x, y) = 0, \quad (1)$$

де $\omega_1(x, y) = 0$ – функція, що описує отвір ротора; $\omega_2(x, y) = 0$ – функція, що описує отвір статора

$$\omega_1 \underset{R}{\wedge} \omega_2 = \omega_1 + \omega_2 - \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}. \quad (2)$$

Закономірності зміни площі прохідних перетинів за кутом повороту кривошипа колінчастого вала використані в загальній програмі динамічного розрахунку робочих процесів пневмодвигуна. Розроблено методику розрахунку золотникового повітророзподільника обертового типу, яка дозволила визначити основні параметри елементів його конструкції.

У математичній моделі робочих процесів поршневого кривошипного пневмодвигуна використано експериментально отриманий уточнювальний критерій оцінки якості робочого процесу, що описується новими безрозмірними коефіцієнтами $\eta_{пд}$ та $\eta_{пн}$.

Коефіцієнт практичної реалізації повноти індикаторної діаграми $\eta_{\text{пд}}$ відрізняється від раніше запропонованих урахуванням впливу тиску p_s , температури T_s та обертів колінчастого вала n

$$\eta_{\text{пд}} = F_i^{\text{д}} / F_i^{\text{т}} = p_i^{\text{д}} / p_i^{\text{т}}, \quad (3)$$

де $F_i^{\text{д}}$, $p_i^{\text{д}}$ – площа та середній індикаторний тиск дійсної індикаторної діаграми;

$F_i^{\text{т}}$, $p_i^{\text{т}}$ – площа та середній індикаторний тиск теоретичної індикаторної діаграми.

Коефіцієнт повноти наповнення $\eta_{\text{пн}}$ (відношення дійсної циклової витрати стисненого повітря $G_{\text{ц}}^{\text{д}}$ до теоретичної) $G_{\text{ц}}^{\text{т}}$

$$\eta_{\text{пн}} = \frac{G_{\text{ц}}^{\text{д}}}{G_{\text{ц}}^{\text{т}}}. \quad (4)$$

Дійсна циклова витрата повітря $G_{\text{ц}}^{\text{д}}$ визначена під час випробувань пневмодвигуна на режимі максимальної потужності N_e^{max} , з урахуванням тиску p_s і температури на впуску T_s та обертів колінчастого вала n .

Третій розділ присвячено розробці методу експериментального дослідження визначення конструктивних параметрів пневмодвигунів та їх елементів із золотниковим повітророзподілом. До розділу включено експериментальну методику проведення експерименту та визначення дійсних величин індикаторних й ефективних показників роботи пневмодвигунів із отриманням безрозмірних коефіцієнтів і критерію, що характеризують енергетичну та економічну ефективність робочих процесів двигуна: коефіцієнта практичної реалізації повноти індикаторної діаграми відносно статичної моделі, коефіцієнта повноти наповнення відносно статичної моделі й коефіцієнта технічних втрат повітря.

Розроблено методики експериментальних випробувань пневмодвигунів із підігрівом повітря і без підігріву. Стендова система живлення пневмодвигуна стисненим повітрям містить балони з газовим рамповим редуктором, витратоміром, повітряним ресивером низького тиску, електричним нагрівачем, повітряним фільтром і з'єднувальними трубопроводами. Створений експериментальний стенд дозволяє проводити випробування пневмодвигуна з тиском стисненого повітря 0,5–2,5 МПа і температурою від 0 до 120 °С. Для підтримки заданого рівня температури стисненого повітря перед витратоміром використовується електричний водоповітряний нагрівач, після витратоміра – повітряний нагрівач.

На етапі випробувань без підігріву стисненого повітря на вході ($T_s = 293\text{K}$) знято характеристики за умови $p_s = 0,5; 0,7; 0,9; 1,1$ МПа, що мають практичне значення. Проаналізовано діапазон зміни максимальних

потужностей пневмодвигуна, що може бути прийнятним у разі застосування пневмодвигуна на автомобілі, призначеного для використання на маршрутах інтенсивного руху автотранспорту, де максимальна швидкість руху сягає до 30 км/год.

Під час стендових випробувань пневмодвигуна визначено вплив на основні індикаторні та ефективні показники робочого процесу підігріву стисненого повітря на вході в повітророзподільну систему за температури $t_s = 90\text{--}95\text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає межі нагрівальної здатності систем масляного і водяного охолодження ДВЗ, яку імітує повітронагрівач. Під час підігріву повітря на вході в пневмодвигун величина тиску повітря відповідала $p_s = 0,7\text{ МПа}$ та $p_s = 0,9\text{ МПа}$.

Створено методику для обробки експериментальних даних. Для реєстрації швидкоплинних процесів використовувався розроблений на кафедрі ДВЗ ХНАДУ вимірювально-обчислювальний комплекс «ІВК-ДВЗ». Вимірювальний комплекс функціонує на базі персонального комп'ютера і модуля аналого-цифрового перетворювача, а також програмного забезпечення, комплекту периферійних пристроїв вимірювальної апаратури у складі датчиків, підсилювачів електричних сигналів, джерел живлення та електричних ліній з'єднання (рис. 3). Для отримання і подальшої обробки індикаторних діаграм за допомогою комплексу «ІВК-ДВЗ» використовується програма Power Graph, яка дозволяє визначити p_i для кожної індикаторної діаграми в автоматичному режимі. Під час обробки багаторазових вимірювань визначалися середнє арифметичне значення величин, що замірюються, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, помилка середнього арифметичного, довірна ймовірність.

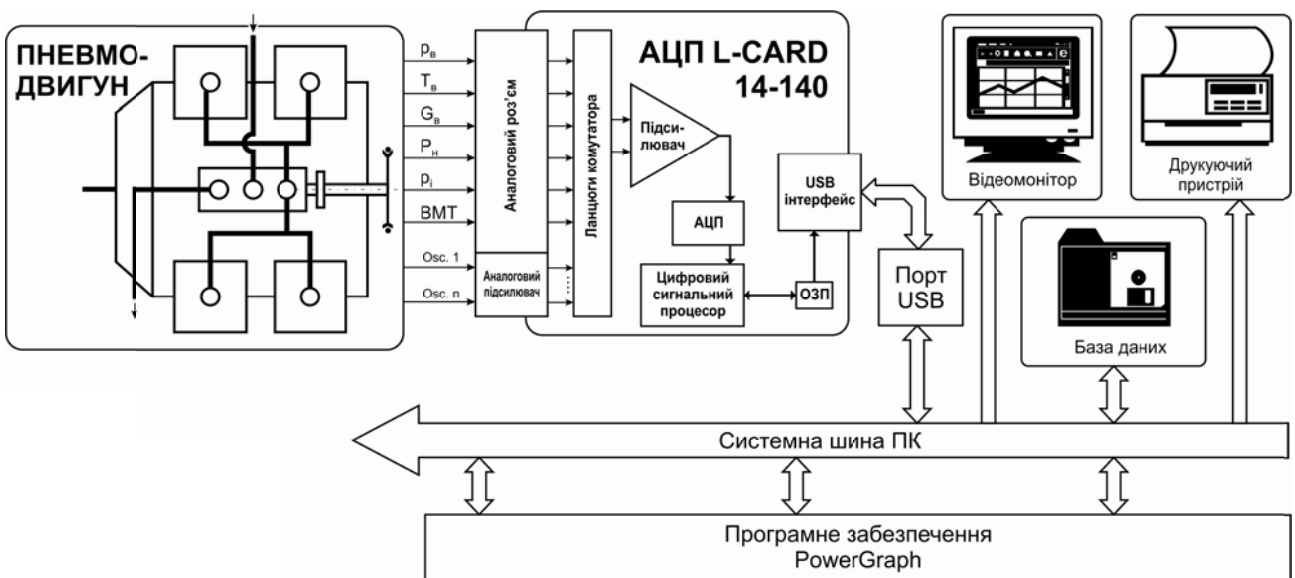


Рисунок 3 – Схема вимірювально-обчислювального комплексу

Моторні випробування пневмодвигунів, пов'язані з дослідженням їх робочих процесів, проводились здобувачем спільно із співробітниками кафедри ДВЗ ХНАДУ.

Наведено порівняльний аналіз результатів експериментального дослідження робочих процесів пневмодвигуна із золотниковим повітророзподільником, визначено вплив на індикаторні показники робочих процесів та ефективні показники пневмодвигуна частоти обертання колінчастого вала n , тиску стисненого повітря на вході в пневмодвигун p_s і його температури $T_s = 293$ К (рис. 4, 5).

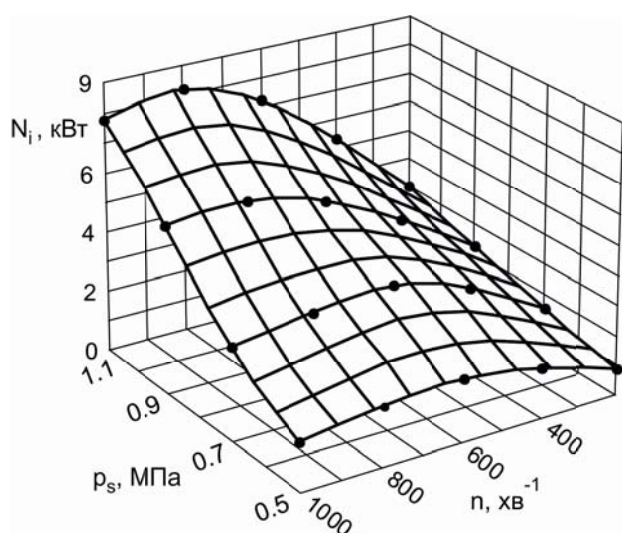


Рисунок 4 – Зміна за швидкісними характеристиками індикаторної потужності пневмодвигуна N_i без підігріву стисненого повітря на вході

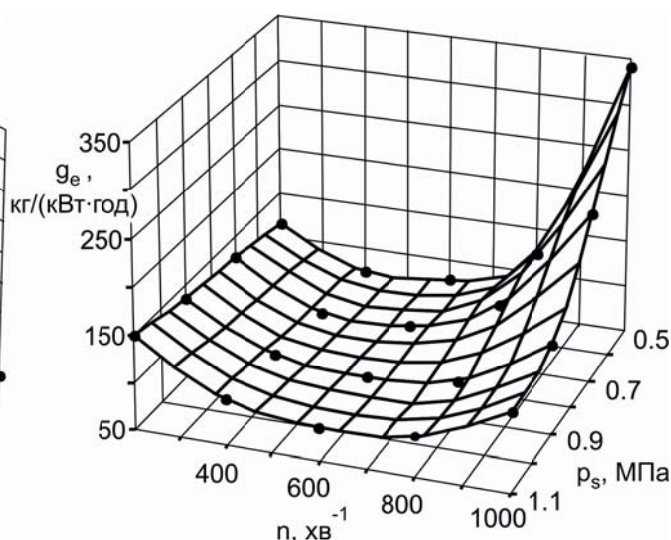


Рисунок 5 – Зміна питомої ефективної витрати стисненого повітря g_e пневмодвигуна за швидкісними характеристиками без його підігріву на вході

Встановлено закономірності зміни індикаторних показників робочих процесів та ефективних показників роботи автомобільного поршневого пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом на режимах швидкісних характеристик для широкого діапазону тиску повітря на вході. Практичне та наукове значення результатів експериментальних досліджень пневмодвигуна полягає у виявлених закономірностях фізичної сутності термодинамічних процесів, що відбуваються в циліндрі двигуна, факторів, що впливають на ці процеси під час виникнення втрат енергії у разі перетворення потенційної енергії стисненого повітря в корисну механічну роботу.

З проведених досліджень випливає, що з максимальним ефективним коефіцієнтом корисної дії η_e пневмодвигун працює за умови найнижчого тиску стисненого повітря на вході у двигун ($p_s = 0,5$ МПа). На цьому режимі питома витрата енергоносія $g_e = 78,0$ кг/(кВт·год), ефективний коефіцієнт корисної дії $\eta_e = 0,46$. У разі збільшення тиску на вході p_s зростає питома витрата енергоносія g_e та годинні витрати стисненого повітря G_r , за цих умов багаторазово зростає ефективна потужність двигуна N_e . За швидкісною

характеристикою найвищим тиском на вході $p_s = 1,1$ МПа (збільшився у 2,2 раза), потужність двигуна зростає з 1,57 до 6,24 кВт (збільшилась у 3,97 раза).

Виявлено закономірність зниження температури повітря на випуску t_B за умови збільшення обертів колінчастого вала пневмодвигуна (рис. 6).

$$t_B = -0,01264 \cdot n - 12,1 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

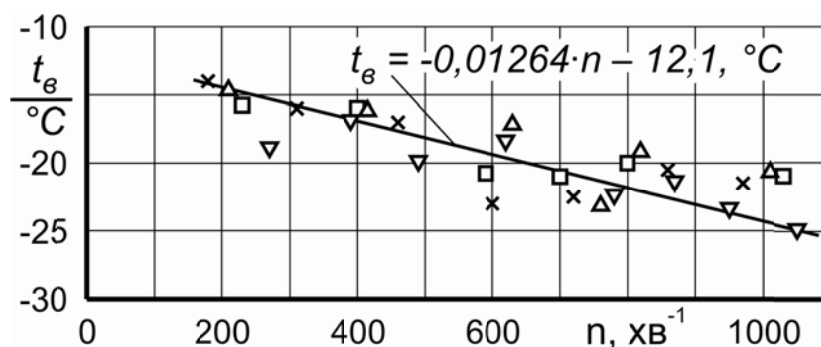


Рисунок 6 – Залежність температури відпрацьованого повітря на виході з пневмодвигуна від частоти обертання колінчастого вала:

$$\begin{array}{ll} \times - p_s = 0,5 \text{ МПа}; & \Delta - p_s = 0,7 \text{ МПа}; \\ \square - p_s = 0,9 \text{ МПа}; & \nabla - p_s = 1,1 \text{ МПа} \end{array}$$

Рівень температури на випуску t_B є показником надійності роботи пневмодвигуна без обмерзання випускних каналів та можливих порушень умов змащування його деталей.

Наведено результати експериментального дослідження впливу підігріву стисненого повітря на вході в пневмодвигун (рис. 7, 8). Зберігання на борті автомобіля запасу стисненого повітря під високим тиском (20–50 МПа і більше) пов'язане зі зниженням тиску до значень робочого (0,4–2,5 МПа) і з неминучим падінням за цих умов його температури: чим вище тиск у балоні й нижче його початкова температура, тим більше охолоджується повітря в газовому редукторі. Без попереднього підігріву стисненого повітря температура в кінці процесу розширення знижується до $t_3 = (-50 \text{ } ^\circ\text{C})$. Тривала робота пневмодвигуна призводить до обмерзання випускних каналів, порушення умов змащення деталей циліндро-поршневої групи. Все це неминуче спричиняє потребу в підігріванні повітря до мінімально допустимої температури $t_s = (-5 \text{ } ^\circ\text{C})$ перед надходженням у пневмодвигун що відображено у запропонованих патентах.

У роботі розроблено метод з визначення величини теплової енергії $Q_{\text{під}}$, витраченої на мінімально необхідний підігрів повітря, що враховує ефект її зниження під час дроселювання в газовому редукторі $t_{\text{ред. в}}$.

Підігрів стисненого повітря на вході $t_s = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$ не впливає на зміну циклової індикаторної роботи L_i , середнього індикаторного тиску p_i ,

індикаторної потужності N_i . Підігрів повітря зменшує масовий цикловий заряд на 23–24 % за умови циклової роботи $L_i = \text{const}$.

Під час підігріву повітря на вході у пневмодвигун величина N_e на режимах швидкісних характеристик підвищується з 2,92 до 3,24 кВт у разі $p_s = 0,7$ МПа та з 4,25 до 4,61 кВт за умови $p_s = 0,9$ МПа, наведених на графіку (рис. 7). З графіків (рис. 8) видно, що під час підігріву повітря на вході у пневмодвигун величина ефективної питомої витрати стисненого повітря g_e на режимах швидкісних характеристик знижується з 74 кг/(кВт год) до 55 кг/(кВт год) за умови $p_s = 0,7$ МПа та з 82 кг/(кВт год) до 57,5 кг/(кВт год) за умови $p_s = 0,9$ МПа, що відповідає 26–30 %. Зниження показників g_e у цьому разі відбувається не завдяки досконалості робочого процесу, а внаслідок зниження густини повітря і механічних втрат.

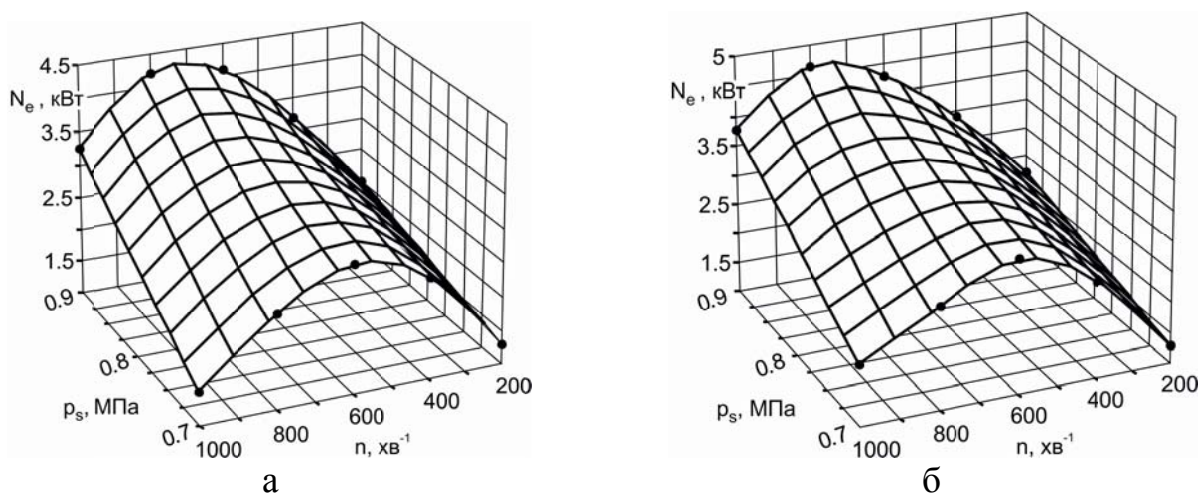


Рисунок 7 – Зміна ефективної потужності пневмодвигуна за швидкісними характеристиками без підігріву (а) та з підігрівом (б) стисненого повітря на вході

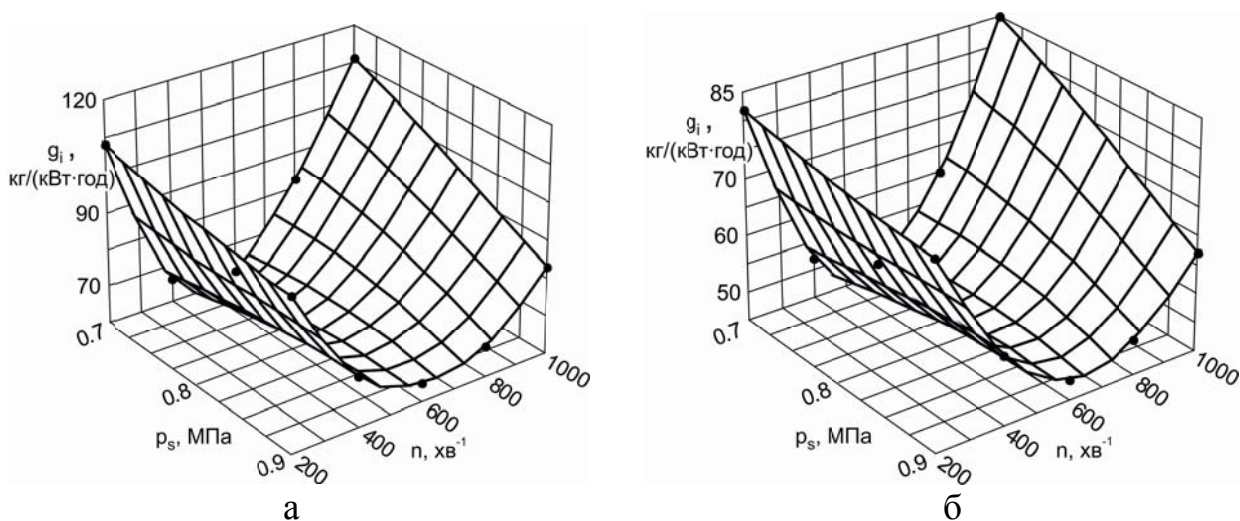


Рисунок 8 – Зміна питомої індикаторної витрати стисненого повітря без підігріву (а) та з його підігрівом (б)

Зниження величини витрати повітря практично повністю відповідає зниженню густини $\rho_{\text{п}}$, яка відбувається з 8,324 до 6,368 кг/ м³ або на 23,5 % за умови $p_s = 0,7$ МПа, на 24,5 % за умови $p_s = 0,9$ МПа, але об'ємна величина витрат стисненого повітря $V_{\text{г}}$ від його підігріву на вході у пневмодвигун залишається такою самою, як і під час роботи пневмодвигуна без підігріву.

На рис. 9 наведено експериментальні значення зміни коефіцієнта практичної реалізації повноти індикаторної діаграми $\eta_{\text{пд}}$, що залежать від тиску стисненого повітря на вході p_s , температури T_s і частоти обертання вала двигуна n . Тоді дійсне значення середнього індикаторного тиску $p_i^{\text{д}} = p_i^{\text{т}} \cdot \eta_{\text{пд}}$ є добутком значення середнього індикаторного тиску теоретичного циклу $p_i^{\text{т}}$ і значення коефіцієнта практичної реалізації повноти індикаторної діаграми $\eta_{\text{пд}}$.

На рис. 10 наведено зміни коефіцієнта повноти наповнення пневмодвигуна $\eta_{\text{пн}}$ за швидкісними характеристиками, що дозволяють розв'язувати обернену задачу визначення дійсного значення циклової витрати стисненого повітря $G_{\text{ц}}^{\text{д}} = G_{\text{ц}}^{\text{т}} \cdot \eta_{\text{пн}}$.

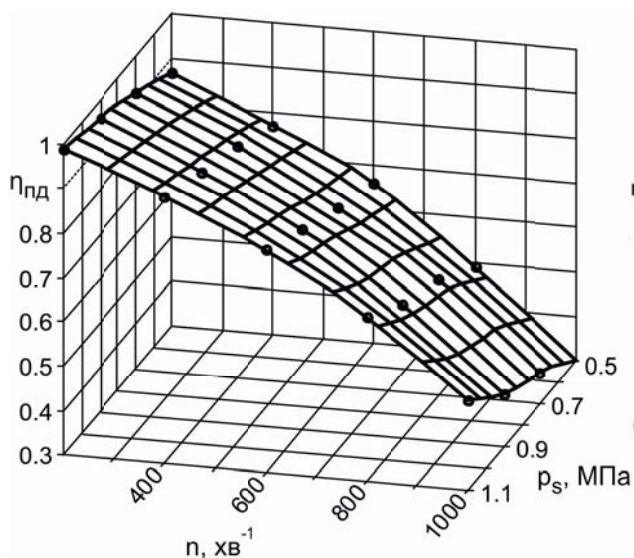


Рисунок 9 – Зміна за швидкісними характеристиками коефіцієнта практичної реалізації повноти індикаторної діаграми $\eta_{\text{пд}} = f(n, p_s)$ за умови $T_s = \text{const}$

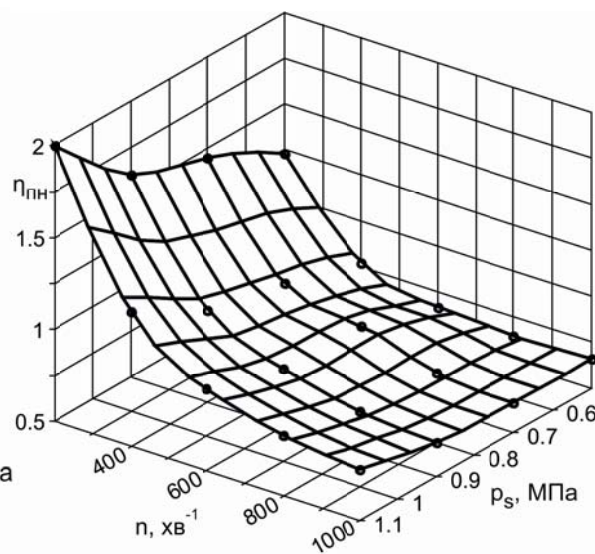


Рисунок 10 – Зміна за швидкісними характеристиками коефіцієнта повноти наповнення $\eta_{\text{пн}} = f(n, p_s)$ за умови $T_s = \text{const}$

Оскільки коефіцієнти $\eta_{\text{пд}}$ і $\eta_{\text{пн}}$ є величинами відносними, то на значення цих коефіцієнтів для цього пневмодвигуна істотно впливають тільки регульовальні параметри: тиск p_s і частота обертання n за умови $T_s = \text{const}$. Визначальні конструктивні параметри (ступінь наповнення ε_1 , ступінь зворотного стиснення ε_5 і відносно шкідливий об'єм ε_0) впливають на $\eta_{\text{пд}}$ і $\eta_{\text{пн}}$ несуттєво.

Під час розрахунково-експериментального дослідження визначено вплив конструктивних параметрів пневмодвигуна і параметрів енергоносія на зміну практичної реалізації коефіцієнта повноти індикаторної діаграми $\eta_{\text{пд}} = f(n, p_s, T_s, f_s)$ [1].

Підігрів стисненого повітря на впуску дозволяє збільшити також максимально припустимий ступінь розширення робочого тіла в циліндрі пневмодвигуна, що додатково підвищує його економічність.

Аналіз експериментальних даних показав, що зниження маси витоків практично повністю відповідає зниженню густини повітря, що надходить до циліндра, обумовленої підігрівом. Коефіцієнт витоків $\eta_{\text{вт}}$ змінюється від 0,6 за умови $n = 200 \text{ хв}^{-1}$ до 0,01 за умови $n = 1000 \text{ хв}^{-1}$.

Під час підігріву стисненого повітря потужність механічних втрат N_m знижується з 1,5 до 1 кВт за умови $p_s = 0,7 \text{ МПа}$ та з 2,5 до 2 кВт за умови $p_s = 0,9 \text{ МПа}$. Розрахунково-експериментальне дослідження (табл. 1) дозволило визначити тиск механічних втрат пневмодвигуна p_m

$$p_m = a + b \frac{S \cdot n}{30}, \quad (6)$$

де S – хід поршня, м;

n – частота обертання колінчастого вала, хв^{-1} ;

a, b – постійні коефіцієнти.

Таблиця 1 – Значення постійних коефіцієнтів a і b для розрахунку механічних втрат

Коефіцієнти	Тиск на впуску p_s , МПа			
	0,7		0,9	
	без підігріву	з підігрівом	без підігріву	з підігрівом
a	0,53	0,281	0,5	0,4389
b	0,1057	0,1068	0,284	0,141

У пневмодвигуні із золотниковим механізмом не вдалося конструктивно знизити шкідливий об'єм, високу втрату на витки стисненого повітря та забезпечити регулювання фаз наповнення. Недоліки золотникового повітророзподільника у разі застосування клапанного повітророзподільного механізму можуть бути виключені.

У **четвертому розділі** наведено теоретичний метод розрахунку робочих процесів пневмодвигуна, що ґрунтується на динамічній моделі В.Д. Зіневича та В.Г. Дяченка із внесеними вдосконаленнями. Метод враховує зміни геометричних розмірів впускної системи, фаз газорозподілу, висоти підйому клапана, тиску, швидкості і температури повітря на впуску і випуску та дозволяє визначити вплив цих та інших конструктивних параметрів на показники робочих процесів пневмодвигуна.

Ефективна площа прохідних перерізів випускних і впускних клапанів, фази газорозподілу із клапанним повітророзподілом, як і в традиційних двигунах внутрішнього згоряння, визначається за умови досягнення максимального значення ефективного ККД пневмодвигуна. Для випускних клапанів цій умові для значення середньої швидкості поршня $C_n < 15$ м/с відповідає кут повороту кривошипа на початку відкриття випускних клапанів $0-50^\circ$ п.к.в. до НМТ поршня робочого циліндра, кут закриття випускних клапанів – $90-130^\circ$ п.к.в. після НМТ. Для впускного клапана кут повороту кривошипа початку відкриття впускного клапана – $0-10^\circ$ п.к.в. до ВМТ поршня робочого циліндра; момент закриття впускного клапана на режимі максимальної потужності – за умови положення поршня $20-60^\circ$ п.к.в. після ВМТ.

Метод дослідження робочих процесів пневмодвигуна із золотниковим і клапанним повітророзподілом на основі розрахунку робочих процесів з динамічної моделі дозволяє:

– отримати розрахункові індикаторні діаграми робочого процесу, адекватні діаграмам, знятим під час експериментальних випробувань пневмодвигуна на експериментальному стенді в умовах без підігріву і з підігрівом стисненого повітря на вході на режимах швидкісних і навантажувальних характеристик за заданих значень тиску p_s і температури T_s на вході;

– визначити за розрахунковою індикаторною діаграмою й експериментальними даними механічного ККД, індикаторні та ефективні показники робочих процесів пневмодвигуна.

Система диференціальних рівнянь для визначення параметрів стисненого повітря в надпоршневій порожнині пневмодвигуна містить:

– рівняння масового балансу

$$dM = dM_s - dM_{в}; \quad (7)$$

– рівняння енергетичного балансу (рівняння першого закону термодинаміки)

$$dQ = dI - Vdp; \quad (8)$$

– рівняння стану

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV_n - dV_x}{V} - \frac{dT}{T} = \frac{dM}{M}. \quad (9)$$

Після перетворень зміна тиску стисненого повітря в надпоршневій порожнині протягом нескінченно малого проміжку часу (кута повороту $d\varphi = bnd\tau$) набуває вигляду

$$dp = \frac{kp}{V} \left\{ \frac{1}{\rho} (dM_s \cdot a_s - dM_B) + V(\beta - 1)dx + \frac{k-1}{k} \cdot \frac{dQ \pm dQ_T}{p} - dV_n \right\}. \quad (10)$$

Для кінцевого значення розрахункового кроку відповідного кута повороту кривошипа ($d\varphi = 0,1 - 5^\circ$ п.к.в.)

$$\Delta p_i = \frac{k_i p_i}{V_i} \left[\frac{1}{\rho_i} (\Delta M_{сци} \cdot a_{si} - \Delta M_{цви}) + \frac{k_i - 1}{k_i} \cdot \frac{\pm \Delta Q_{Ti}}{p_i} - \Delta V_{ni} \right]. \quad (11)$$

За відсутності підігріву стисненого повітря на впуску $dQ = 0$.

Тут p_i, V_i – тиск і об'єм стисненого повітря на початку розрахункового кроку;

$k_i = k_s = 1,4$ – показник адіабати стисненого повітря на початку розрахункового кроку перед впускними клапанами (величина постійна);

$\rho_i = \frac{p_i}{RT_i}$ – густина стисненого повітря в надпоршневій порожнині на

початку розрахункового кроку;

T_i – температура стисненого повітря на початку розрахункового кроку;

$\Delta M_{сци} = \rho_s \cdot (\mu_{si} \cdot f_{si})_{сеп} \cdot W_{сци} \cdot \frac{\Delta \varphi_i}{6n}$ – маса стисненого повітря, що надійшла

до надпоршневої порожнини протягом розрахункового кроку;

$\rho_s = \frac{p_s}{RT_s}$ – густина стисненого повітря перед впускним клапаном;

$(\mu_{si} \cdot f_{si})_{сеп}$ – середнє значення ефективної площі прохідного перерізу впускного клапана на розрахунковій ділянці;

$W_{сци} = \sqrt{2 \frac{k_s}{k_s - 1} RT_s \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_s} \right)^{\frac{k_s - 1}{k_s}} \right]}$ – швидкість стисненого повітря в

розрахунковому прохідному перерізі впускного клапана;

$a_{si} \cong T_s / T_i$ – коефіцієнт, що враховує вплив змішування стисненого повітря, яке надійшло, і робочого тіла в надпоршневій порожнині (для дослідної схеми організації робочих процесів $a_{si} \cong 1$);

$\Delta M_{сци} = \rho_i \cdot \left(\frac{p_T}{p_i} \right)^{\frac{1}{k_i}} \cdot (\mu_{vi} \cdot f_{vi})_{сеп} \cdot W_{цви} \cdot \frac{\Delta \varphi_i}{6n}$ – маса стисненого повітря, що

вийшло з надпоршневої порожнини на розрахунковій ділянці;

$\rho_i \cdot \left(\frac{p_T}{p_i}\right)^{\frac{1}{k_i}}$ – густина стисненого повітря в розрахунковому перерізі

випускних клапанів;

$(\mu_{vi} \cdot f_{vi})_{\text{сер}}$ – середнє значення ефективної площі прохідних перерізів випускних клапанів;

$$W_{\text{цви}} = \sqrt{2 \frac{k_s}{k_s - 1} RT_i \left[1 - \left(\frac{p_T}{p_i}\right)^{\frac{k_i - 1}{k_i}} \right]}$$
 – швидкість стисненого повітря в

розрахунковому прохідному перерізі випускних клапанів.

Визначивши зміну тиску стисненого повітря на розрахунковій ділянці, обчислюємо значення параметрів стисненого повітря в кінці розрахункового кроку.

За результатами розрахунку циклу визначаються індикаторна робота стисненого повітря за цикл, індикаторна потужність двигуна, витрата стисненого повітря за годину, індикаторний ККД пневмодвигуна, ефективна потужність пневмодвигуна, ефективний ККД.

Програма розрахунку робочих процесів у надпоршневій порожнині пневмодвигуна розроблена в середовищі Delphi 6.

Вихідною точкою для розрахунку дійсного циклу взято параметри стисненого повітря в момент закриття випускного клапана. Параметри тіла у впускному і випускному каналах вважалися незмінними, оскільки газодинамічні процеси у впускних і випускних каналах у двигуні, внаслідок відносно невеликої довжини каналів і відносно невисоких значень максимальних швидкостей потоків робочого тіла в каналах, мають незначний вплив на вибір площі прохідних перетинів клапанів, фаз газорозподілу та індикаторні показники циклу.

До цього розділу входить четвертий етап досліджень, в якому наводиться адекватність теоретичних розрахунків індикаторних та ефективних показників моторним випробуванням пневмодвигуна із клапанним повітророзподілом (рис. 11).

Під час досліджень робочих процесів пневмодвигунів з різним повітророзподілом аналізувалися експериментальні та розрахункові індикаторні діаграми.

Для пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом розрахункове й експериментальне дослідження проводились на режимах з $p_s = 0,7$ МПа та $0,9$ МПа з підігрівом повітря та без підігріву. Для клапанного пневмодвигуна за умови $p_s = 1,5-2,0$ МПа без підігріву.

У ході досліджень визначалися показники: L_i – індикаторна робота, кДж; N_i – індикаторна потужність, кВт.

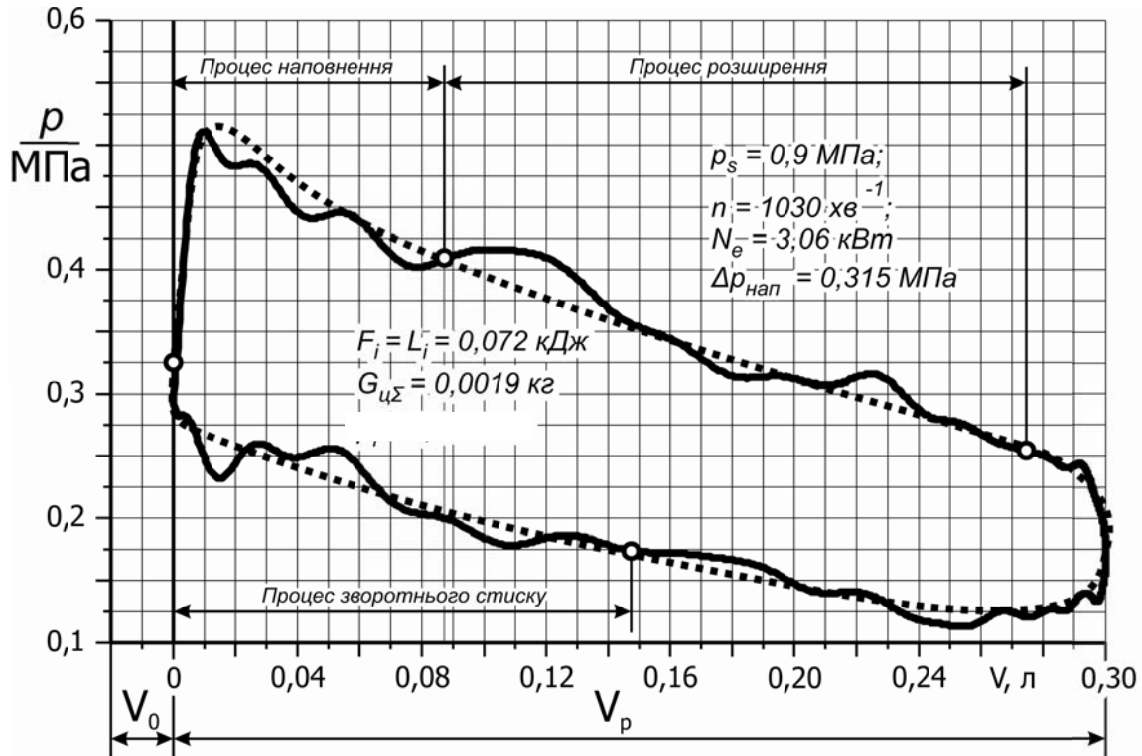


Рисунок 11 – Індикаторна діаграма пневмодвигуна на швидкісному режимі $n = 1030 \text{ хв}^{-1}$ і тиску стисненого повітря на вході $p_s = 0,9 \text{ МПа}$: --- – розрахунок; ———— – експеримент

Похибка між розрахунковою та дійсною індикаторними діаграмами не перевищує 3 %.

У п'ятому розділі розроблено рекомендації щодо вибору конструктивних і регульовальних параметрів пневмодвигунів. Уперше детально розкрито значення визначальних трьох конструктивних безрозмірних параметрів (відносний шкідливий об'єм ε_0 , ступінь наповнення ε_1 і ступінь зворотного стиснення ε_5) і регульовального параметра – тиску стисненого повітря на вході p_s у процесі перетворення потенційної енергії стисненого повітря, що надходить у циліндр, у механічну роботу і вплив цих параметрів на потужність, витрату повітря і ККД поршневого пневматичного двигуна.

Дослідження проводилося за таких умов:

– розрахунок робочих процесів виконувався для режимів максимальної ефективної потужності N_e^{\max} за умови тисків стисненого повітря на вході, що відповідають експериментальним швидкісним характеристикам ($p_s = 0,5; 0,7; 0,9$ і $1,1 \text{ МПа}$) і незмінній температурі на вході $20 \text{ }^\circ\text{C}$;

– протитиск на виході вважався незмінним ($p_b = 0,12 \text{ МПа}$);

– частота обертання колінчастого вала відповідає режимам N_e^{\max} ;

– механічний ККД і уточнювальні коефіцієнти та критерії, що залежать від тиску стисненого повітря на вході у пневмодвигуни і частоти обертання вала, бралися за експериментальними даними.

Збільшення відносного шкідливого об'єму ε_0 завжди спричиняє зростання корисної площі індикаторної діаграми F_i , тобто корисної індикаторної роботи L_i , а отже, і зростання індикаторної N_i й ефективної потужностей N_e пневмодвигуна. Однак цей позитивний ефект від збільшення шкідливого об'єму є незначним порівняно з негативним – збільшенням витрат стисненого повітря. Підвищення потужності пневмодвигуна всього на 28 % за умови збільшення шкідливого об'єму збільшує споживання стисненого повітря майже в 2,5 раза.

Не змінюючи визначальних конструктивних параметрів ε_5 , ε_0 , ε_1 , можна отримати те саме підвищення потужності N_e (на 28 %) за рахунок підвищення тиску на вході з 0,50 до 0,58 МПа. Такий спосіб отримання більш високої потужності пневмодвигуна є економічно вигідним, оскільки питома витрата повітря g_e не тільки не зростає, але й дещо знижується з 49,2 до 48,0 кг/(кВт·год), а годинна витрата збільшується на 25 %.

У поданому розрахунково-експериментальному дослідженні температура повітря $t_3 = (-50\text{ }^\circ\text{C})$ у кінці процесу розширення відповідає мінімально допустимій розрахунковій температурі в кінці адіабатного розширення вологого повітря з відносною вологістю $\varphi = 1$. Показник політропи для повітря такої вологості становить за дослідними даними $n_p = 1,32$.

Такий рівень температури t_3 за температури навколишнього середовища $t_{н.с} = (+20\text{ }^\circ\text{C})$ досягається, якщо ступінь наповнення $\varepsilon_1 = 0,4$. Саме цю величину ступіня наповнення взято за раціональну для пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом, де конструктивно можливе мінімальне значення відносного шкідливого об'єму може бути не менше $\varepsilon_0^{\min} = 0,4$.

Поршневі пневмодвигуни із клапанним повітророзподілом, які переважно мають порівняно невеликий шкідливий об'єм (у межах $\varepsilon_0 = 0,04\text{--}0,06$), можуть бути без зворотного стиснення.

У випадку поршневих пневмодвигунів із золотниковим повітророзподілом, де відносна величина шкідливого об'єму конструктивно не може бути зменшена нижче $\varepsilon_0 = 0,4\text{--}0,5$, використання зворотного стиснення поліпшує на 8–10 % економічність робочого процесу, але одночасно втрати ефективної потужності становлять від 10 до 28 %. Якщо виходити тільки з умови досягнення максимальної економічності двигуна, то рівень g_e^{\min} за всіх значень тиску стисненого повітря на вході досягається у разі однієї і тієї самої міри зворотного стиснення $\varepsilon_5 = 0,7$.

У роботі було виконано порівняння результатів розрахунків робочих процесів пневмодвигуна з різними системами повітророзподілу, з реальними та рекомендованими розмірами камери стиснення (табл. 2). Розрахунок параметрів наведено для максимальних потужностей експериментальних двигунів.

Таблиця 2 – Техніко-економічні показники пневмодвигунів з різними системами повітророзподілу

№ з/п	Назва показників і параметрів	Варіанти			
		двигун із золотниковим повітророзподілом		двигун із клапанним повітророзподілом	
1	2	3		4	
1	Тип двигуна	2-тактний		2-тактний	
2	Діаметр циліндра, мм	76		92	
3	Хід поршня, мм	66		92	
4	Система повітропостачання	балони із стисненим повітрям, $p_{\text{бал}} = 20 \text{ МПа}$			
5	Конструктивні параметри: – відносний шкідливий об'єм ε_0 – ступінь наповнення ε_1 – ступінь зворотного стиснення ε_5	0,935 0,288 0,491	0,4 0,4 0,7	0,121 0,4 0	0,121 0,4 0
6	Тиск на впуску, МПа	1,1	1,1	1,5	2,0
7	Температура повітря на впуску, К	293	293	293	293
8	Ефективна потужність, кВт	6,22	5,8	19,9	27,7
9	Крутний момент, Н·м	76	67	244	339
10	Номінальна частота обертання колінчастого вала, хв^{-1}	780	780	780	780
11	Індикаторний ККД η_i	0,340	0,285	0,392	0,401
12	Механічний ККД η_m	0,793	0,776	0,892	0,889
13	Ефективний ККД η_e	0,270	0,221	0,350	0,357
14	Питома витрата повітря g_e , кг/(кВт·год)	91,5	71,5	41,9	40,5

За даними розрахунково-експериментальних досліджень робочих процесів поршневого пневмодвигуна визначено раціональні значення визначальних безрозмірних конструктивних параметрів: ступіня наповнення для пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом $\varepsilon_1 = 0,4$; ступіня зворотного стиснення $\varepsilon_5 = 0,7$.

Найбільший вплив на зміну питомої витрати повітря g_i та індикаторної потужності N_i , окрім конструктивних параметрів ε_0 , ε_1 і ε_5 , припадає на тиск стисненого повітря на впуску p_s і частоту обертання колінчастого вала двигуна n .

Запропоновано два рівняння множинної нелінійної регресії для N_e та g_e за методом найменших квадратів (із використанням тільки подвійних взаємодій між незалежними змінними).

Для перевірки адекватності запропонованих моделей використовується дисперсійний аналіз.

Рівняння множинної нелінійної регресії для ефективної потужності N_e

$$\begin{aligned} N_e = & -1,24 + 2,16\varepsilon_0 + 2,07\varepsilon_1 + 0,001\varepsilon_5 + 1,66p_s - 0,0034n - 4,2\varepsilon_0\varepsilon_1 + \\ & + 3,59\varepsilon_0\varepsilon_5 + 1,41\varepsilon_0p_s + 0,0026\varepsilon_0n + 0,37\varepsilon_1\varepsilon_5 + 5,83\varepsilon_1p_s + \\ & + 0,0033\varepsilon_1n - 0,13\varepsilon_5p_s - 0,0021\varepsilon_5n + 0,0036p_s n - 4,24\varepsilon_0^2 - \\ & - 3,8\varepsilon_1^2 - 1,14\varepsilon_5^2 - 0,42p_s^2 - 2,05 \cdot 10^{-6} n^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Модель є адекватною, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,997$.

Рівняння множинної нелінійної регресії для g_e

$$\begin{aligned} g_e = & 130,42 - 131,79\varepsilon_0 - 82,37\varepsilon_1 - 0,001\varepsilon_5 - 109,06p_s - \\ & - 0,016n + 47,36\varepsilon_0\varepsilon_1 - 117,56\varepsilon_0\varepsilon_5 + 103,01\varepsilon_0p_s + \\ & + 0,12\varepsilon_0n - 52,54\varepsilon_1\varepsilon_5 + 36,97\varepsilon_1p_s + 0,087\varepsilon_1n - \\ & - 65,05\varepsilon_5p_s - 0,107\varepsilon_5n + 0,032p_s n + 89,23\varepsilon_0^2 + \\ & + 59,202\varepsilon_1^2 + 128,309\varepsilon_5^2 + 51,554p_s^2 - 8,28 \cdot 10^{-6} n^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Модель g_e є адекватною; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,66$.

Для пошуку рішень було обрано цільову функцію з метою визначення таких параметрів, як ε_0 , ε_1 , ε_5 , p_s та n , щоб досягти максимальної потужності пневмодвигуна N_e за мінімальної питомої витрати стисненого повітря

$$y = \frac{N_e^{\gamma_1}}{g_e^{\gamma_2}} \rightarrow \max, \quad (14)$$

де γ_1 , γ_2 – параметри, що дозволяють варіювати ступінями важливості значень N_e та g_e відповідно, причому $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$.

Оптимізація параметрів ε_0 , ε_1 , ε_5 , p_s та n проводилася за допомогою програми роботи з електронними таблицями Excel методом узагальненого зниженого градієнта в умовах обмежень.

За даними розрахунків за умови $\gamma_1 = 0,5$ та $\gamma_2 = 0,5$ отримано такі оптимальні параметри: $\varepsilon_0 = 0,4$, $\varepsilon_1 = 0,4$, $\varepsilon_5 = 0,75$, $p_s = 1,1$ та $n = 780$. У цьому випадку $N_e = 5,79$ кВт та $g_e = 57,88$ кг/(кВт · год).

У шостому розділі наведено результати дорожніх випробувань пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом на автомобілі.

Експериментальні дослідження проводилися на базі автомобіля ЗАЗ із пневмодвигуном, що має золотниковий повітророзподіл. Пневмоавтомобіль розроблено на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (рис. 12).



Рисунок 12 – Автомобіль ЗАЗ із пневмодвигуном для дорожніх випробувань

Під час дорожніх випробувань здійснювалися:

- перевірка вибору раціональних параметрів енергетичної силової установки під час руху автомобіля в місті;
- оцінка можливості руху автомобіля з альтернативною силовою установкою за умови швидкостей, що не перевищують установленної середньої швидкості руху в місті Харкові;
- перевірка адекватності вибору параметрів пневматичної силової установки відповідного до типу автомобіля, що бере участь у дорожньому русі.

За результатами розрахунку та випробувань побудовані графіки, наведені на рис. 13.

Порівнюючи результати розрахунків з результатами експериментальних досліджень автомобіля ЗАЗ, які проводилися в дорожніх умовах (повна маса пневмоавтомобіля враховувала масу причепа), маємо, що параметри розгону автомобіля в дорожніх умовах на першій, другій, третій і четвертій передачах збігаються з теоретичними розрахунками (рис. 13). У цьому випадку автомобіль у реальних дорожніх умовах здатний розігнатися за допомогою чотирьох передач до 30 км/год. Визначені прискорення j автомобіля на різних передачах та за різних швидкостей.

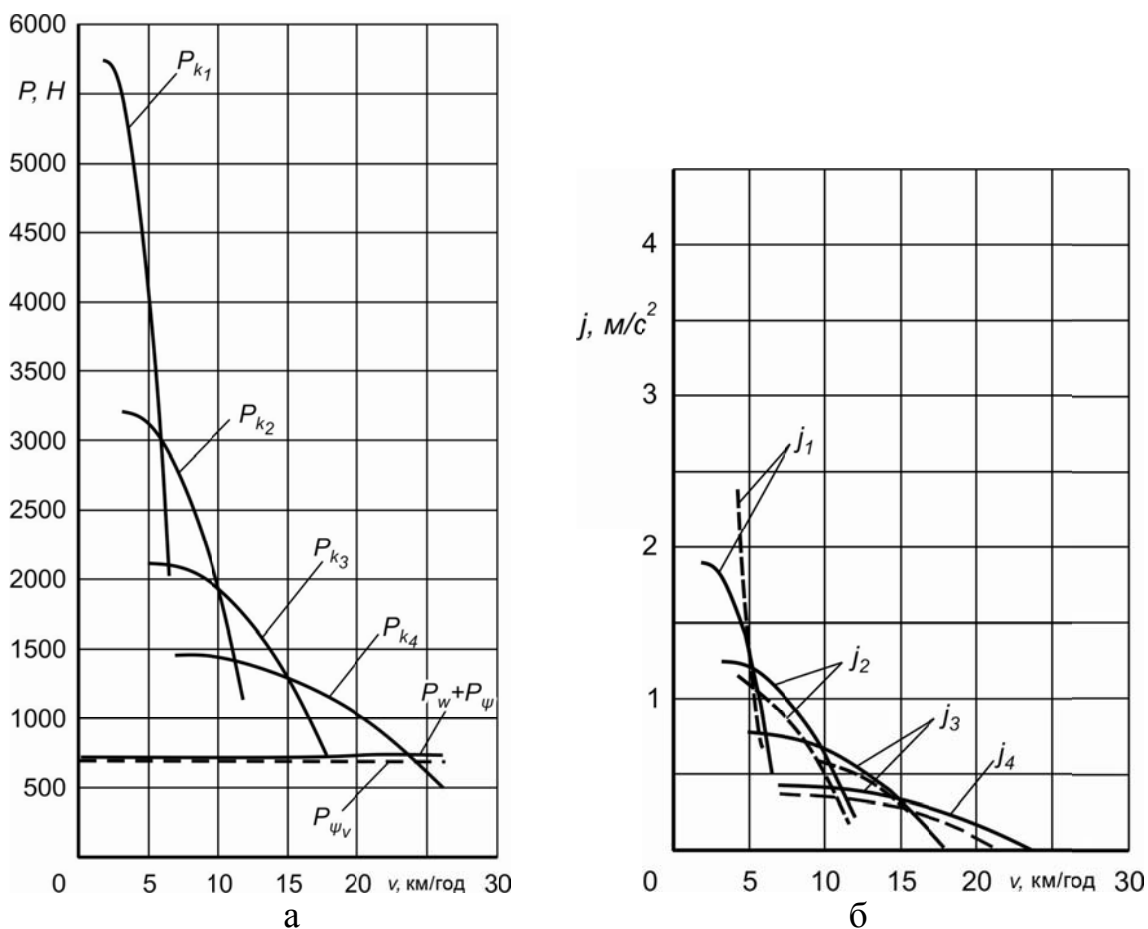


Рисунок 13 – Графіки, отримані за результатами тягового розрахунку автомобіля із пневмодвигуном: а – силовий баланс автомобіля із пневматичним двигуном під час руху в умовах міста; б – прискорення автомобіля з пневматичним двигуном під час руху в умовах міського циклу на першій, другій, третій та четвертій передачах: ---- за результатами експерименту; — за результатами розрахунків

Отже, якщо проаналізувати розрахунки, наведені на рис.13, та порівняти їх з експериментальними дослідженнями, можна зробити висновок, що легковий автомобіль ЗАЗ, обладнаний пневматичним двигуном, здатний рухатися в місті зі швидкістю до 30 км/год, одночасно долати сумарний дорожній опір на першій передачі не меншій ніж 0,325, нахил дороги близько 2,2 %. З графіків (рис. 13, б) видно, що експериментальні криві прискорення автомобіля на 2, 3 і 4-й передачах відрізняються від теоретичних у менший бік. Це пов'язано зі зміною реальної зовнішньої швидкісної характеристики пневмодвигуна внаслідок зниження тиску стисненого повітря в балонах.

Під час моделювання робочих процесів пневмодвигунів з високим підігрівом розрахункове дослідження виконано з різними температурами на вході. Для моделювання процесів у циліндрі пневмодвигуна з високим підігрівом до 800 К індикаторні показники наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Зміни потужності й витрат повітря у пневмодвигуні з високим підігрівом

Параметри	Без підігріву	400 К	500 К	600 К	700 К
Максимальна температура циклу T , К	300	400	500	600	700
Питома витрата повітря g_i , кг/кВт·год	74	55	44	36	31
Індикаторна потужність N_i , кВт	7,29	7,46	7,63	7,74	7,77
Індикаторний ККД	0,22	0,29	0,36	0,44	0,51

Температура стисненого повітря обмежувалася температурою деталей циліндро-поршневої групи.

Аналізуючи індикаторні показники пневмодвигуна з високим підігрівом, можна дійти висновку про створення нового рівня робочих процесів автомобільного пневмодвигуна, який відображений у запропонованому патенті.

Сумісна робота пневмодвигуна і ДВЗ у складі комбінованої енергетичної установки показує, що на обертах до 800–1000 хв^{-1} доцільно використовувати пневмодвигун. Для більш навантажених режимів роботи застосовується ДВЗ. Залежно від компоновальної схеми двигуни можуть працювати окремо чи разом (рис. 14).

Під час роботи пневмодвигуна без підігріву в складі комбінованої енергетичної установки витрати пального і токсичність відпрацьованих газів дорівнюють нулю.

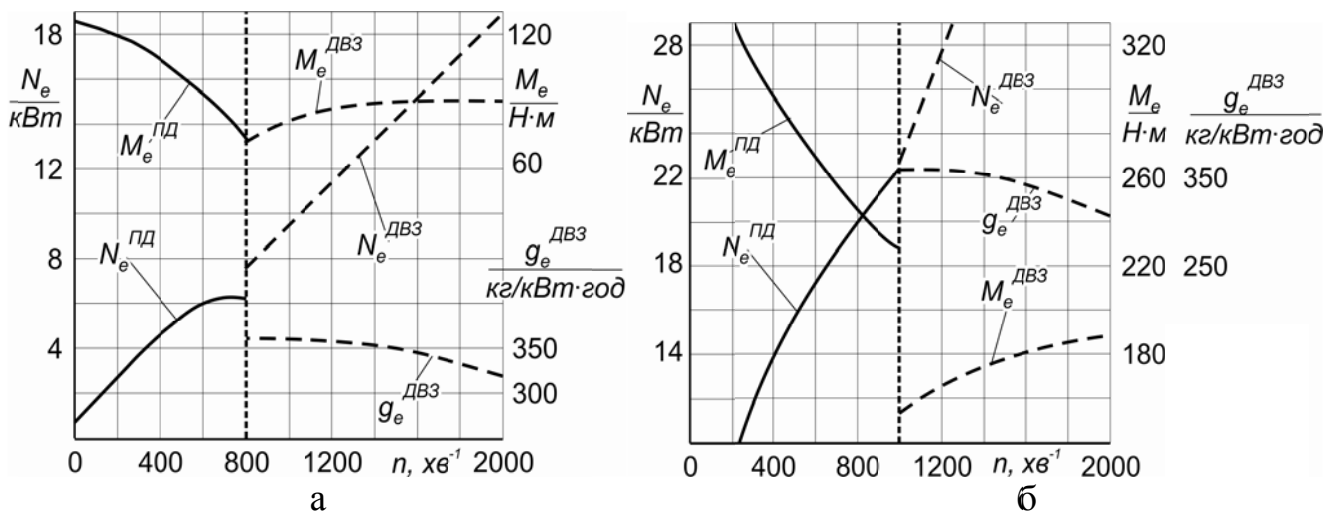


Рисунок 14 – Швидкісні характеристики комбінованих енергетичних установок: а – із золотниковим повітророзподілом; б – з клапанним повітророзподілом

Достовірність побудованих моделей підтверджується проведенням порівняльного аналізу розрахункових і експериментальних даних, які узгоджувалися із результатами інших авторів, використанням дисперсійного аналізу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено методологію організації робочих процесів пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки автомобіля, який має більш високі показники економічності й екологічності порівняно із ДВЗ на визначених режимах роботи, що є актуальним для міст з інтенсивним рухом транспорту, а також для специфічних підприємств гірничої та нафтогазовидобувної промисловості.

У дисертаційному дослідженні отримано такі результати:

1. На підставі аналізу, інтеграції та систематизації існуючих та одержаних результатів із застосуванням пневмодвигуна на автомобілях запропоновано методологію організації робочих процесів пневмодвигуна, яка містить:

– розробку теоретичного методу організації робочих процесів пневмодвигуна на базі статичної й динамічної розрахункових моделей, які відрізняються від відомих теоретичних методів організації робочого процесу пневмодвигунів, що застосовуються в інших галузях промисловості, конструктивними особливостями конвертованих автомобільних двигунів та наявністю підігріву стисненого повітря на впуску;

– розробку методу експериментального дослідження робочих процесів пневмодвигуна з підігрівом і без підігріву стисненого повітря із золотниковим і клапанним повітророзподілом, що дозволяє провести дослідження робочого процесу більш деталізовано та досконало;

– розробку методу визначення впливу конструктивних та регулювальних параметрів на показники пневмодвигуна з використанням статичної моделі, в якому отримано критерій якості робочих процесів, що уможливило застосування його в розрахунках для визначення дійсного значення індикаторної роботи та циклового масового заряду;

– розробку методу визначення впливу конструктивних та регулювальних параметрів пневмодвигуна з використанням динамічної моделі, який дозволяє під час виконання розрахунків робочого процесу обчислювати дійсні значення його індикаторної діаграми, індикаторних і ефективних параметрів, що є основою організації ефективних робочих процесів автомобільних пневмодвигунів;

– виявлення закономірностей між конструктивними показниками та параметрами робочих процесів пневмодвигунів, що дозволяє використовувати розроблену методологію для різних розмірностей поршневіх автомобільних пневмодвигунів;

– проведення оптимізації витрати стисненого повітря залежно від визначальних безрозмірних конструктивних і режимних параметрів пневмодвигуна $g_e = f_1(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_5, p_s, n)$ за умови максимальної потужності $N_e = f_2(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_5, p_s, n)$.

2. Розроблено метод розрахунку процесу повітроподачі для визначення необхідних дійсних параметрів впускних і випускних каналів за допомогою R-функцій, швидкості, температури і витрати стисненого повітря золотникового повітророзподільника, який дозволяє інтегруватися в загальну динамічну модель розрахунку робочих процесів пневмодвигуна.

3. Розроблено метод визначення необхідної потужності пневмодвигуна для досягнення максимальної швидкості руху автомобіля, з урахуванням конкретизації маршрутів і часу, який дозволив розрахувати швидкість та прискорення автомобіля з комбінованою енергетичною установкою.

4. За результатами експериментальних досліджень отримано такі результати:

– досягли номінальної потужності відповідно $N_e = 6,22$ кВт і $N_e = 19,9$ кВт за умови питомих витрат стисненого повітря $g_e = 91,45$ кг/(кВт · год) та $g_e = 41,9$ кг/(кВт · год) поршневі автомобільні пневмодвигуни із золотниковим і клапанним повітророзподілом без підігріву;

– досягли номінальної потужності відповідно $N_e = 6,78$ кВт, $N_e = 20,02$ кВт, за умови питомих витрат стисненого повітря $g_e = 61,1$ кг/(кВт · год) та $g_e = 31,1$ кг/(кВт · год) поршневі автомобільні пневмодвигуни із золотниковим і клапанним повітророзподілом з підігрівом.

5. Розроблено метод визначення величини кількості теплоти у процесі підігріву стисненого повітря для отримання мінімально необхідної температури на вході в пневмодвигун та впливу температури стисненого повітря на показники робочого процесу пневмодвигунів із золотниковим і клапанним повітророзподілом.

6. Встановлено:

– під час організації роботи автомобільних пневмодвигунів без підігріву концентрація шкідливих речовин у відпрацьованих газах дорівнює нулю;

– залежності механічних витрат пневмодвигуна.

7. Виконано фізичне та математичне моделювання робочих процесів, рекомендовано визначальні безрозмірні конструктивні параметри пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом:

– відносний шкідливий об'єм $\varepsilon_0 = 0,4$;

– ступінь наповнення $\varepsilon_1 = 0,4$;

– ступінь зворотного стиснення $\varepsilon_5 = 0,7$.

8. За допомогою моделювання високого підігріву стисненого повітря на впуску до 800 °К отримані показники потужності $N_e = 7,77$ кВт і питомої витрати повітря $g_e = 31$ кг/кВт · год, що вказують на новий рівень якості робочих процесів, які відбуваються в циліндрі пневмодвигуна.

9. Здійснено впровадження результатів дисертаційного дослідження у наступних організаціях:

– КП «Харківське конструкторське бюро машинобудування імені А.А. Морозова» – методики комп'ютерного графічного моделювання робочих процесів автомобільного пневматичного поршневого пневмодвигуна, результатів експериментальних досліджень, результатів впливу підігріву стисненого повітря на показники пневмодвигуна;

– ДП «Завод імені Малишева» – математичної моделі робочого процесу автомобільного поршневого пневмодвигуна, методики комп'ютерного графічного моделювання робочих процесів пневмодвигуна, результатів експериментальних досліджень;

– АТ «ХТЗ» – моделювання робочого процесу автомобільного пневмодвигуна, комп'ютерних технологій обробки і збереження науково-технічної й конструкторської документації, результатів експериментальних випробувань автомобільного поршневого пневмодвигуна для внутрішньоцехового транспорту;

– ПрАТ «Промстроймонтаж» – математичної моделі робочого процесу автомобільного поршневого пневмодвигуна для використання на внутрішньоцеховому транспорті, результатів розрахункових випробувань автомобільних поршневих пневмодвигунів на базі ДВЗ ЗМЗ-402, можливість автономної роботи пневмодвигуна від балонів з урахуванням підігріву повітря на впуску;

– у навчальний процес кафедри ДВЗ ХНАДУ для підготовки студентів за напрямами 6.05050304, 7.05050304 та 8.05050304 – «Двигуни та енергетичні установки».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

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

Публікації в наукових фахових виданнях:

2. 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. науч. тр. – 2010. – Вып. 48. – С. 200–206.

3. Двигатель внешнего сгорания – проблемы, перспективы / В. Г. Дьяченко, А. И. Воронков, О. Ю. Линьков, И. Н. Никитченко // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. науч.-техн. журн. НТУ «ХПИ». – 2010. – № 1. – С. 113–118.

4. 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. науч. тр. – 2011. – Вып. 53. – С. 32–44.

5. О выборе рациональных задаваемых параметров работы поршневого пневмодвигателя с клапанным воздухораспределением / Ф. И. Абрамчук, А. И. Харченко, С. С. Жилин и др. // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. ХНАДУ–2011. – Вып. 27. – С. 141–147.

6. 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. науч. тр. ХНАДУ – 2011. – Вып. 28. – С. 75–80.

7. Стенд для випробування і дослідження пневмодвигунів / Ф. І. Абрамчук, О. І. Воронков, А.І. Харченко та ін. // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. науч.-техн. журн. НТУ «ХПИ». – 2011. – № 2. – С. 113–118.

8. 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. журн. НТУ «ХПИ». – 2012. – № 1. – С. 53–55.

9. Воронков А.И. Исследование по разработке конструкции коленчатого вала поршневого автомобильного пневмодвигателя / А. И. Воронков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. ХНАДУ – 2013. – Вып. 32. – С. 36–40.

10. Экспериментальное исследование рабочего процесса пневмодвигателя / Ф. И. Абрамчук, А. И. Харченко, А. И. Воронков и др. // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 79.–С. 208–213.

Публікації в наукових періодичних виданнях іноземних держав з напряду:

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

12. Воронков А. И. Влияние подогрева сжатого воздуха на эксергетический эффективный КПД и надежность работы автомобильного пневматического двигателя / А. И. Воронков // Вестник ТАДИ: науч.-техн. журн. – 2016. – № 2/3. – С. 42–46.

Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

13. 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.

14. Воронков А.И. Золотниковое воздухораспределение пневмодвигателя гибридной силовой установки автомобиля на базе бензинового двигателя / А. И. Воронков, С. С. Жилин, И. Н. Никитченко // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 63. – С. 36–40.

15. Воронков О. І. Визначення вихідних енергетичних параметрів транспортного засобу з пневматичним двигуном / О. І. Воронков, Д. М. Леонтъев, Е. В. Тесленко // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 33. – С. 70–76.

16. Воронков О. І. Визначення часу перетину в золотниковому розподільнику пневмодвигуна / О. І. Воронков, О. Ю. Лісіна, І. М. Нікітченко // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 34. – С. 39–43.

17. Параметры движения маршрутного автомобильного пассажирского транспорта в центральной части г. Харькова / П. Ф. Горбачов, А. И. Воронков, А. С. Колий, И. Н. Никитченко // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 60. – С. 34–37.

18. Воронков А. И. Изменение энергетических индикаторных показателей пневмодвигателя по скоростным характеристикам без подогрева заряда на впуске / А. И. Воронков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 35. – С. 94–99.

19. Воронков А. И. Изменение экономических индикаторных показателей пневмодвигателя по скоростным характеристикам / А. И. Воронков // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 67. – С. 13–18.

20. Воронков А. И. Изменение эффективных экономических показателей работы пневмодвигателя по скоростным характеристикам / А. И. Воронков // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2015. – Вып. 68. – С. 57–61.

21. Воронков А.И. Изменение эффективных энергетических показателей пневмодвигателя по скоростным характеристикам / А. И. Воронков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2015. – Вып. 36. – С. 105–109.

22. Воронков А. И. Изменение по скоростным характеристикам показателей рабочего процесса при подогреве сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель / А. И. Воронков // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2015. – Вып. 71. – С. 13–16.

23. Воронков А. И. Определение минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в автомобильный пневмодвигатель при различных условиях эксплуатации / А. И. Воронков, Э. В. Тесленко, Т. А. Удовик // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2016. – Вып. 75. – С. 100–108.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

24. Воронков О. І. Пневмодвигун екологічно чистої комбінованої установки міського автомобіля / А. І. Воронков, І. М. Нікітченко // 74-а науково-технічна й науково-методична конференція університету, присвячена 80-річчю ХНАДУ. – Харків: ХНАДУ, 2010. – С. 9.

25. Воронков А. И. Экологически чистый тепловой двигатель для транспортных средств / А. И. Воронков, И. Н. Никитченко, Ю. Г. Ляшкова // Эколого-правові й економічні аспекти техногенної безпеки регіонів: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. – Харків: ХНАДУ, 2010. – С. 23.

26. Двигатель внешнего сгорания / В. Г. Дьяченко, О. Ю. Линьков, А. И. Воронков, И. Н. Никитченко // Двигатель-2010: материалы Международной научно-технической конференции. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2010. – С. 167–171.

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

28. Воронков А. И. Зависимость эффективной мощности и удельного расхода сжатого воздуха от степени наполнения цилиндров поршневого пневмодвигателя / А. И. Воронков // Проблемы та перспективи автомобілебудування та автомобільного транспорту: програма Міжнар. наук.-техн. конференції присвяченої 100-річчю з дня народження В.К. Нікітіна, 80-річчю з дня заснування кафедри автомобілів та 50-річчю з дня заснування лабораторії швидкісних автомобілів, (Харків, 3–4 листопада 2011 р.). – Харків: ХНАДУ, 2011. – С. 11.

29. Воронков О. І. Розробка та дослідження нагрівача стисненого повітря, що надходить до пневмодвигуна / О. І. Воронков, І. М. Нікітченко // 76-а науково-технічна й науково-методична конференція університету. – Харків: ХНАДУ, 2012. – С. 9.

30. Воронков А. И. Влияние подогрева сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель гибридной силовой установки автомобиля / А. И. Воронков, И. Н. Никитченко // 6-е Луканинские чтения. Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе: тезисы докладов международной научно-технической конференции, (Москва, 26 янв. 2013 г.). – М.: МАДИ, 2013. – С. 67–69.

31. Швидкісні характеристики пневмодвигуна, одержаного конвертуванням з ДВЗ / Ф. І. Абрамчук, О. І. Воронков, С. С. Жилін, І. М. Нікітченко // 77-а науково-технічна й науково-методична конференція університету. – Харків: ХНАДУ, 2013. – С. 50–53.

32. Воронков А. И. Определение минимально необходимого подогрева сжатого воздуха на входе в автомобильный пневмодвигатель при различных

условиях эксплуатации / А. И. Воронков, Э. В. Тесленко, Т. А. Удовик // Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців: матеріали міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з дня народження А. Б. Гредескула. – Харків: ХНАДУ, 2016. – С. 15.

Свідчення про реєстрацію авторського права на твір та патенти:

33. Пат. 70248 Україна МПК 7 В60К 5/00. Комбінована силова установка транспортного засобу / Туренко А. М., Абрамчук Ф. І., Манойло В. М., Жилін С. С., Харченко А. І., Воронков О. І., Нікітченко І. М.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201109362; заявл. 26.07.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11.

34. Пат. 82136 Україна МПК 7 В60К 6/00. Комбінована силова установка автотранспортного засобу / Абрамчук Ф. І., Манойло В. М., Жилін С. С., Харченко А. І., Воронков О. І., Нікітченко І. М., Ліпінський М. С., Разарьонов Л. В.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201300167; заявл. 03.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.

35. Пат. 106558 Україна МПК 7 F02В 47/00, F02В 33/00. Спосіб роботи поршневого теплового двигуна / Дьяченко В. Г., Ліньков О. Ю., Воронков О. І., Нікітченко І. М.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № a201307018; заявл. 04.06.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17.

36. Пат. 103978 Україна МПК 7 В60К 6/00. Комбінована силова установка автотранспортного засобу / Абрамчук Ф. І., Манойло В. М., Жилін С. С., Нікітченко І. М., Воронков О. І., Ліпінський М. С., Харченко А. І., Разарьонов Л. В.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № a201300162; заявл. 03.01.2013 р.; опубл. 10.12.2013 р., Бюл. № 23.

37. Пат. 100503 Україна МПК 7 В60К 6/00. Комбінована силова установка автотранспортного засобу / Воронков О. І., Нікітченко І. М., Тесленко Е. В., Ліньков О. Ю., Назаров А. О.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201501594; заявл. 24.02.2015 р.; опубл. 27.07.2015 р., Бюл. № 14.

38. Пат. 101604 Україна МПК 7 В60К 6/00 В60К 5/00 F28С 3/00. Комбінована силова установка автотранспортного засобу / Воронков О. І., Нікітченко І. М., Тесленко Е. В., Ліньков О. Ю., Назаров А. О.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201502228; заявл. 13.03.2015 р.; опубл. 25.09.2015 р., Бюл № 18.

АНОТАЦІЯ

Воронков О.І. Методологія організації робочого процесу пневмодвигуна комбінованої енергетичної установки міського автомобіля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. –Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2017.

Дисертацію присвячено вирішенню проблеми розробки методології організації робочих процесів пневмодвигуна комбінованої силової установки автомобіля, який має більш високі показники економічності й екологічності порівняно із ДВЗ при низьких обертах колінчастого вала, що є актуальною для міст з інтенсивним рухом транспорту, а також для специфічних підприємств гірничої та нафтогазовидобувної галузі. У дослідженні проведено аналіз, інтеграцію та систематизацію існуючих робіт із використання пневмодвигунів на автомобілях, розроблено теоретичні основи організації робочих процесів пневмодвигунів на базі статичної і динамічної розрахункових моделей, які відрізняються від моделей для пневмодвигунів, що застосовуються в різних галузях промисловості. Розроблено метод розрахунку процесу повітроподачі для визначення необхідних параметрів впускних і випускних каналів, швидкості, температури і витрати повітря золотникового повітророзподільника. За результатами дисертаційного дослідження розроблено програмне забезпечення для моделювання робочих процесів автомобільних пневмодвигунів з підігрівом та без нього.

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

АННОТАЦИЯ

Воронков А. И. Методология организации рабочего процесса пневмодвигателя комбинированной энергетической установки городского автомобиля. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2017.

В диссертационной работе предложена методология организации рабочих процессов пневмодвигателя комбинированной энергетической установки автомобиля, которая включает:

– разработку теоретического метода организации рабочих процессов пневмодвигателя на базе статической и динамической расчетных моделей,

отличающихся от известных теоретических методов организации рабочего процесса пневмодвигателей, которые применяются в других областях промышленности, конструктивными особенностями конвертируемых автомобильных двигателей и наличием подогрева сжатого воздуха на впуске;

– разработку метода определения влияния конструктивных и регулировочных параметров на показатели пневмодвигателя по статической модели, в котором получен критерий качества рабочих процессов, что сделало возможным применение его в расчетах для определения действительного значения индикаторной работы и циклового массового заряда;

– разработку метода экспериментального исследования рабочих процессов пневмодвигателя с подогревом и без подогрева сжатого воздуха с золотниковым и клапанным воздухораспределением, что позволяет провести исследование рабочих процессов более совершенно;

– разработку метода определения влияния конструктивных и регулировочных параметров пневмодвигателя с использованием динамической модели, позволяющих во время выполнения расчетов рабочего процесса определять действительные значения индикаторной диаграммы, индикаторных и эффективных показателей двигателя, который является основой организации эффективных рабочих процессов автомобильных пневмодвигателей;

– разработку метода определения необходимого количества теплоты для подогреву сжатого воздуха и моделирование влияния его температуры во время впуска на показатели рабочего процесса пневмодвигателя с золотниковым и клапанным воздухораспределением, от которых зависят величины мощности, экономичности, надежности;

– выявление закономерностей между конструктивными показателями и параметрами рабочих процессов пневмодвигателя, позволяющих использовать разработанную методологию для разных размерностей поршневых автомобильных пневмодвигателей;

– проведение оптимизации удельного расхода сжатого воздуха в зависимости от определяющих безразмерных конструктивных и режимных параметров пневмодвигателя $g_e = f_1(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_3, p_s, n)$ при максимальной мощности $N_e = f_2(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_3, p_s, n)$.

Разработан метод расчетов процесса воздухоподачи для определения необходимых параметров впускных и выпускных каналов, используя R-функции, скорости, температуры и расходов сжатого воздуха золотникового воздухораспределителя, который позволяет интегрироваться в общую динамическую модель расчетов рабочих процессов пневмодвигателя.

Разработан метод определения необходимой мощности пневмодвигателя для достижения максимальной скорости движения автомобиля, с учетом конкретизации маршрутов и времени, который позволил рассчитать скорость и ускорение автомобиля с комбинированной энергетической установкой.

Разработан метод экспериментальных исследований пневмодвигателей с разными системами воздухораспределения:

- поршневых автомобильных пневмодвигателей с золотниковым и клапанным воздухораспределением без подогрева, которые достигли номинальной мощности $N_e = 6,22$ кВт и $N_e = 19,9$ кВт соответственно при удельных затратах сжатого воздуха $g_e = 91,45$ кг/(кВт · ч) и $g_e = 41,9$ кг/(кВт · ч);

- поршневых автомобильных пневмодвигателей с золотниковым и клапанным воздухораспределением с подогревом, которые достигли номинальной мощности $N_e = 6,78$ кВт, $N_e = 20,02$ кВт, соответственно при удельных расходах сжатого воздуха $g_e = 61,1$ кг/(кВт · ч) и $g_e = 31,1$ кг/(кВт · ч);

Установлено:

- при организации работы автомобильных пневмодвигателей без подогрева концентрация вредных веществ в отработавших газах равна нулю;

- зависимости механических потерь пневмодвигателя.

Выполнено физическое и математическое моделирование рабочих процессов, обоснованные и рекомендованные определяющие безразмерные конструктивные параметры пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением: относительный вредный объем $\varepsilon_0 = 0,4$; степень наполнения $\varepsilon_1 = 0,4$; степень обратного сжатия $\varepsilon_5 = 0,7$.

С помощью моделирования высокого подогрева сжатого воздуха на впуске до 700 °К; полученные показатели мощности $N_e = 7,77$ кВт и удельного расхода воздуха $g_e = 31$ кг/кВт · ч, что указывают на новый уровень качества рабочих процессов, которые происходят в цилиндре пневмодвигателя.

Проведена оптимизация расхода сжатого воздуха в зависимости от определяющих безразмерных конструктивных и режимных параметров пневмодвигателя $g_e = f_1(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_5, p_s, n)$ при максимальной мощности $N_e = f_2(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_5, p_s, n)$.

Проведены дорожные испытания легкового автомобиля с пневмодвигателем.

Результаты внедрены на ведущих машиностроительных заводах г. Харькова и в учебный процесс в ХНАДУ.

Ключевые слова: комбинированная энергетическая установка, пневмодвигатель, золотниковое и клапанное газораспределение, индикаторная диаграмма, подогрев сжатого воздуха.

ABSTRACT

Voronkov O.I. Methodology of organizing the work process of the pneumatic engine for the town car combined power plant. – Manuscript.

Thesis for a Doctor Degree in Engineering Science, specialty 05.05.03 – Engines and Power Plants. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2017.

The thesis deals with solving the problem of developing the methodology of organizing the work processes of the pneumatic engine for the automobile combined power plant with higher economic and environmental parameters compared to the internal combustion engine at low frequencies of the crankshaft rotation, that is important for cities with heavy traffic as well as for specific enterprises of mining and oil-and-gas industries. In the course of the research the analysis, integration and systematization of the existing works devoted to the use of pneumatic engines in automobiles have been carried out, the theoretical fundamentals of organizing the work processes of pneumatic engines based on the static and dynamic computer models that differ from models for pneumatic engines used in various industries have been developed. The method to calculate the air supply process for determining the necessary parameters of inlet and outlet channels, speed, temperature, and air consumption of the spool-type air distributor has been designed. According to the results of the research the software for modeling the work processes of the automobile pneumatic engines with and without heating has been developed.

Keywords: combined power plant, pneumatic engine, spool-type and valve gas distribution, indicator chart, compressed air heating.

Підписано до друку 28.03.2017 р. Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman Суг . Віддруковано на ризографі.
Ум. друк. арк. 1,8.
Зам. № 163/17. Тираж 100 прим. Ціна договірна

ВИДАВНИЦТВО

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Видавництво ХНАДУ, 61200, Харків-МСП, вул. Ярослава Мудрого, 25.
Тел. /факс: (057)700-38-72; 707-37-03**

*Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення
та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, видавничої продукції, серія виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04 2002 р.*