

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Митрофанов Олександр Сергійович



УДК 621.486

**ЕФЕКТИВНІСТЬ РОТОРНО-ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ
ІЗ ШАРНІРНО-КУЛАЧКОВИМ МЕХАНІЗМОМ ПЕРЕТВОРЕННЯ РУХУ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Миколаїв – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

Тимошевський Борис Георгійович, доктор технічних наук, професор, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, м. Миколаїв, завідувач кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація».

Офіційні опоненти:

Воронков Олександр Іванович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Міністерство освіти і науки України, м. Харків, професор кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння»;

Варбанець Роман Анатолійович, доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, м. Одеса, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація»;

Білоусов Євген Вікторович, доктор технічних наук, доцент, Херсонська державна морська академія, Міністерство освіти і науки України, м. Херсон, доцент кафедри «Експлуатація суднових енергетичних установок».

Захист відбудеться 23 вересня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України за адресою: Україна, 54007, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9, корп. 1, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України за адресою: Україна, 54007, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9 та за електронною адресою: <http://www.nuos.edu.ua/nauka/specializovani-vcheni-radi/specializovana-vchena-rada-d-38-060-01/zdobuvachi-2021-roku/mitrofanov-oleksandr-sergijovich/>

Автореферат розіслано 09 серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 38.060.01
д-р техн. наук, професор

А. П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Однією з найважливіших вимог, які висуваються до обладнання гірничодобувної, хімічної, нафтогазової промисловостей, є забезпечення пожежної та вибухової безпеки. За цим критерієм пневмодвигуни мають значну перевагу над іншими видами двигунів: наприклад, двигунами внутрішнього згоряння або електродвигунами, а в деяких випадках використання пневмодвигунів є безальтернативним. Крім безпекових переваг пневмодвигуни, у порівнянні з іншими двигунами, також мають невелику відносну масу, стійкі до перевантажень, досить прості в конструкції, що, в свою чергу, забезпечує надійність в експлуатації та низьку собівартість. Окрім зазначених галузей промисловості пневмодвигуни знайшли своє широке застосування в машинобудуванні, транспорті, суднобудуванні та океанотехніці, на будівництві, в системах пожежогасіння, системах утилізації енергії стиснутого природного газу газорозподільчих станцій та магістральних газопроводів, а також у багатьох нових напрямках, наприклад, таких, як альтернативна енергетика.

Енергетична установка, яка використовує енергію стиснутого робочого тіла, складається з підсистем стиснення і накопичення робочого тіла, двигуна, що працює на ньому, та з'єднуючих елементів. Ефективність таких установок є досить низькою (у середньому складає близько 5...15 %), що, насамперед, пов'язане з багаторазовим перетворенням енергії. Загальне енергоперетворення в таких установках складається з процесів перетворення енергії при стисненні (перетворення електричної енергії приводу в механічну роботу компресора, що забезпечує стиснення робочого тіла) та розширенні (перетворення потенціальної енергії стиснутого робочого тіла при розширенні у механічну роботу двигуна).

Компенсувати витрати енергії підприємств на стиснення та підготовку робочого тіла (які подекуди можуть досягати до 60 % усіх витрат енергії підприємством, наприклад, у гірничодобувній галузі) можна за рахунок підвищення ККД пневмодвигунів, тобто підвищити ефективність енергетичної установки на стадії перетворення потенціальної енергії стиснутого робочого тіла при розширенні у механічну роботу пневмодвигуна. Такі методи підвищення ефективності перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла у механічну, як покращення технології виготовлення пневмодвигунів із застосуванням нових сучасних матеріалів, удосконалення їх конструкції майже вичерпали свій потенціал. Поряд із цими методами підвищення ефективності пневмодвигунів існує підхід, що має значний потенціал розвитку та полягає у розробці принципово нових за конструкцією високоефективних двигунів.

Необхідність зниження енергетичних витрат установок, що використовують потенційну енергію стиснутого робочого тіла, визначає **запит практики**, спрямований на підвищення ефективності перетворення енергії шляхом розробки та впровадження в промисловість нових енергоефективних машин об'ємної дії. Розробка нових двигунів дозволить задовольнити специфічні експлуатаційні вимоги нових сучасних напрямків застосування, а також забезпечити зниження масогабаритних показників, надійність та працездатність на всіх експлуатаційних режимах незалежно від умов експлуатації.

Уперше систематизований аналіз термодинамічних процесів поршневих пневмодвигунів було розглянуто в працях А. С. Іллічова. Подальший розвиток і значний

вклад у теорію робочого циклу машин об'ємної дії зробили такі вчені, як А. П. Герман, К. С. Борисенко, Н. Г. Верескунов, Г. З. Ярмоленко, В. І. Дегтярьов, А. А. Боровков, В. А. Мурзін, Г. М. Колобердян, В. Д. Зіневич, С. В. Калекін, В. С. Калекін, А. М. Туренко, В. О. Богомоллов, Ф. І. Абрамчук, О. І. Воронков, С. С. Жилін, І. М. Нікітченко, А. І. Харченко, О. Ю. Лінков, А. Egli, S. K. Grinel, J. M. Corberan, R. Davies, S. Lee, F. Scheideman, J. Venkatesan, J. Hafner. Дослідженням особливостей роботи та теплообміном у машинах об'ємної дії займалися такі вчені: Б. С. Фотін, П. І. Пластинін, І. К. Прилуцький, І. Б. Пірумов, В. Л. Юша, А. І. Прилуцький та ін. Огляд нових наукових досліджень у напрямку проектування й розрахунку машин об'ємної дії показав, що прослідковується тенденція постійного розширення сфер застосування й номенклатури двигунів, що, у свою чергу, викликає необхідність проведення додаткових теоретичних та експериментальних досліджень процесів у нових двигунах.

Таким чином, **науково-прикладною проблемою**, яка вирішується у дисертаційній роботі, є підвищення ефективності застосування енергетичного потенціалу стиснутого робочого тіла шляхом раціональної організації робочого процесу перетворення потенційної енергії в механічну роботу, а саме забезпечення збільшення повноти розширення, зменшення зворотного стиснення та газодинамічних втрат робочого тіла у машинах об'ємної дії в енергетичних установках на їх базі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами та планами. Наукова робота виконана за тематикою досліджень кафедри двигунів внутрішнього згорання, установок і технічної експлуатації відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних держбюджетних та госпдоговірних робіт НУК імені адмірала Макарова, спрямованих на застосування альтернативних джерел енергії в енергетичних установках. Деякі положення дисертаційної роботи пов'язані з проведенням комплексної науково-дослідної роботи, де автор був виконавцем («Розробка технології отримання та безпечного акумулювання водню з сірководню Чорного моря» номер державної реєстрації: 0111U007283).

Метою дослідження дисертаційної роботи є підвищення ефективності використання низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в машинах об'ємної дії при перетворенні у механічну роботу в енергетичних установках.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії в роторно-поршневих двигунах об'ємної дії.

Предметом дослідження є параметри, характеристики та закономірності процесів перетворення енергії, які відбуваються у роторно-поршневих двигунах об'ємної дії.

Робочою науковою гіпотезою наукового дослідження є твердження, що підвищення ефективності перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в механічну роботу в машинах об'ємної дії досягається поєднанням переваг організації робочого процесу ротаційних та поршневих двигунів (регулювання початку і тривалості процесу наповнення, збільшення повноти розширення робочого тіла, зниження мертвого об'єму та газодинамічних втрат при газообміні) шляхом нових конструктивних рішень (поєднання зворотно-поступального руху поршня при одночасному його обертанні разом з ротором).

Для підвищення ефективності процесу перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла при розширенні в машинах об'ємної дії пропонується використати ідею поєднання конструкцій руху ведучої ланки ротаційних (обертвий рух) та поршневих (зворотно-поступовий рух) двигунів, що забезпечить урахування переваг й особливостей організації робочих процесів двох різних типів двигунів.

Задачі наукового дослідження

1. Аналіз процесів, технічного рівня, умов експлуатації, переваг і недоліків застосування, особливостей конструкції машин об'ємної та динамічної дії, що випускаються серійно, а також можливих перспективних видів з метою виявлення резервів і напрямків підвищення їх ефективності.

2. Створення фізичної моделі підсистеми ЕУ з використання стиснутого робочого тіла та її елементів на базі дослідного зразка роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху, а також розробка програми проведення експериментальних досліджень процесів у них і параметрів роботи.

3. Визначення експериментальним шляхом закономірностей зміни енергетичних та економічних показників роботи роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху, а також дослідження впливу на них експлуатаційних параметрів двигуна (обертів і робочого тиску) й регулювання тривалості процесу наповнення.

4. Удосконалення математичної моделі робочого циклу машин об'ємної дії, що передбачає врахування впливу особливостей поєднання переваг організації робочого процесу ротаційних і поршневих двигунів через конструкцію механізму руху та газообміну.

5. Виявлення закономірностей взаємного впливу конструктивних (діаметр робочого циліндра, хід поршня, відносний мертвий об'єм), експлуатаційних (оберти й робочий тиск) і регулюючого (ступеня наповнення робочого циліндра) параметрів на індикаторні показники роботи при перетворенні низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в роторно-поршневих двигунах об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху.

6. Синтез нових науково обґрунтованих схемних рішень енергетичних установок різного призначення на базі роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом руху та дослідження показників ефективності перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в двигунах залежно від умов їх експлуатації.

7. Розробка загальних основ конструювання й проектування роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом руху, а також відповідних рекомендацій щодо стендових та контрольних випробувань і тривалості проведення обкатки.

8. Апробація та впровадження результатів наукового дослідження ефективності роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом руху енергетичних установок з машинами об'ємної дії.

Методи дослідження:

– системний аналіз конструктивних схем та перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в машинах об'ємної дії;

– експериментальне дослідження для визначення зміни основних параметрів роботи роторно-поршневих двигунів на різних експлуатаційних режимах;

– розрахунково-аналітичний аналіз впливу параметрів роботи роторно-поршневого двигуна на його енергетичні й економічні показники на базі математичного моделювання робочих процесів.

За результатами проведених науково-технічних досліджень розроблено **концепцію** підвищення ефективності перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла у механічну роботу машин об'ємної дії шляхом поєднання переваг організації робочого процесу ротаційних та поршневих двигунів, а саме забезпеченням регулювання початку й тривалості процесу наповнення, збільшення повноти розширення робочого тіла та зниження мертвого об'єму й газодинамічних втрат при газообміні, що реалізується за рахунок використання нових конструктивних рішень механізму руху і газообміну у вигляді шарнірно-кулачкового механізму руху.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що для підвищення ефективності застосування низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в машинах об'ємної дії при перетворенні у механічну роботу в енергетичних установках:

1) уперше експериментально й теоретично доведено, що збільшення повноти розширення та зменшення зворотного стиснення і газодинамічних втрат низькопотенційного робочого тіла досягаються використанням у роторно-поршневих двигунах об'ємної дії для перетворення поступального руху поршня в обертальний рух ротора шарнірно-кулачкового механізму, а також регулюванням тривалості процесу наповнення, що, відповідно, дозволяє зменшити питому масу на 17...50 %, збільшити відношення пускового крутного моменту до номінального до 11 %, а також зменшити питому витрату робочого тіла (енергії) на 15...24 % у порівнянні із серійними поршневими машинами об'ємної дії із золотниковим газорозподілом, які застосовують як механізм руху кривошипно-шатунний механізм;

2) уперше визначено та експериментально підтверджено, що більш ефективним підходом до регулювання навантаження роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом руху є регулювання тривалості процесу наповнення (за рахунок зміни фаз газообміну), збільшення якого у 1,43...2,45 рази забезпечує підвищення ефективної потужності у 1,10...1,91 рази, а раціональне співвідношення заданої потужності двигуна, його робочого тиску та ступеня наповнення (у межах 0,2...0,4) дає змогу покращити процес перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в механічну роботу й забезпечити зниження питомої ефективної витрати робочого тіла до 10,1 %;

3) уперше експериментально визначено вплив тривалості процесу наповнення робочого циліндра на значення тиску відпрацьованого повітря у випускному колекторі роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху та встановлено, що зменшення ступеня наповнення у 1,43...2,45 рази знижує тиск відпрацьованого повітря у 1,16...2,16 рази, тим самим зменшуючи газодинамічні втрати на випуску;

4) уперше експериментально визначено, що організація процесу газообміну (зміна початку та кінця процесів впуску і випуску) за рахунок використання шарнірно-кулачкового механізму руху в умовах робочого тиску 0,4...0,8 МПа забезпечує діапазон зміни тиску відпрацьованого повітря у випускному колекторі роторно-поршневого двигуна на рівні 0,010...0,075 МПа, що не перевищує та є значно нижчим від

допустимих значень (0,105...0,120 МПа) для машин об'ємної дії;

5) уперше експериментально визначено діапазон максимального падіння температури повітря від початкового значення зберігання до кінцевого на випуску з роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху для робочого тиску 0,4...0,8 МПа, який складає 35...43 К, а також встановлено вплив обертів двигуна на зниження температури повітря при дроселюванні та розширенні у робочому циліндрі (збільшення обертів у 2,35 разів збільшує падіння температури при дроселюванні в 1,23 рази, при цьому зміна температури при розширенні, залежно від обертів, не перевищує 4,5 %), що дало змогу оцінити ефективність і працездатність двигуна за умов від'ємних температур зберігання робочого тіла (-5...-20 °С);

6) уперше для роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху методом фізичного й математичного моделювання для різних експлуатаційних параметрів (оберти і робочий тиск) встановлено вплив конструктивних параметрів, таких, як діаметр робочого циліндра, хід поршня, відносний мертвий об'єм (зменшення відношення ходу поршня до діаметра робочого циліндра у 1,5 рази знижує питому індикаторну витрату робочого тіла до 60,8 % при одночасному незначному зниженні потужності двигуна до 8,0 %, а зменшення відносного мертвого об'єму в 1,25 рази знижує питому індикаторну витрату робочого тіла до 27,7 % та збільшує потужність двигуна до 28,2 %) на зміну показників їх роботи при перетворенні потенційної енергії стиснутого робочого тіла в механічну роботу.

Набуло подальшого розвитку теоретичні основи конструювання й проектування роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху за рахунок розробки загального компоновання двигуна, схеми підведення робочого тіла та конструкції основних вузлів і деталей, а також вибору способу ущільнення та конструктивного виконання механізму руху, що спрямовано на спрощення виготовлення, збирання, а також поліпшення експлуатації й обслуговування.

Удосконалено:

– метод визначення необхідної кількості теплоти для підігріву стиснутого робочого тіла на вході у впускний ресивер роторно-поршневого двигуна за рахунок отриманої експериментальної залежності зміни падіння температури відпрацьованого повітря від обертів і тиску у впускному ресивері за умов забезпечення допустимого значення температури відпрацьованого робочого тіла на виході (встановлена мінімально допустима температура зберігання робочого тіла, за якої ще можлива робота двигуна без підігріву та яка складає 0...-5 °С);

– кінематику механізму руху роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху за рахунок визначення геометричного зв'язку між ходом поршня двигуна, довжиною ланки рухомого чотирикутника та кутом між ланками, що дозволило отримати залежності для визначення переміщення, швидкості й прискорення поршня залежно від кута повороту ротора.

Базуючись на отриманих наукових результатах, сформульовано нові **наукові положення**.

1. Поєднання переваг організації робочого процесу ротаційних і поршневих двигунів шляхом застосування шарнірно-кулачкового механізму руху в роторно-поршневих двигунах об'ємної дії забезпечує регулювання процесу наповнення, збільшення

повноти розширення робочого тіла, зменшення зворотного стиснення, а також відсутність мертвого об'єму, що сприяє підвищенню в 1,18...1,32 рази ефективності перетворення низькопотенційної енергії робочого тіла (витрата повітря на 1 кВт потужності) без попереднього його підігріву в порівнянні із серійними поршневыми машинами об'ємної дії із золотниковим газорозподілом та кривошипно-шатунним механізмом руху.

2. Шарнірно-кулачковий механізм руху з відношенням ходу поршня до діаметра робочого циліндра менше одного дає змогу здійснювати два робочих цикли за один оберт ротора, регулювати ступінь наповнення, а також рівномірне розміщення циліндрів по всій довжині ротора в роторно-поршневих двигунах об'ємної дії, забезпечує компактність та знижує питому масу двигуна у 1,2...2,0 рази у порівнянні із серійними поршневыми машинами об'ємної дії з кривошипно-шатунним механізмом руху.

3. Шарнірно-кулачковий механізм руху й система газорозподілу з можливістю регулювання ступеня наповнення робочого циліндра, що на ньому базується, забезпечують практично відсутність відносного мертвого об'єму (значення ϵ_0 не перевищує 0,015 та обумовлене лише технологічними зазорами) й збільшують відношення пускового крутного моменту до номінального до 1,11 рази у порівнянні із серійними поршневыми машинами об'ємної дії із золотниковим газорозподілом і кривошипно-шатунним механізмом руху.

Наукове значення отриманих результатів полягає у розвитку основ та принципів перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в механічну роботу за рахунок поєднання особливостей і переваг організації робочого процесу різних типів двигунів, що є теоретичною базою для реалізації концепції підвищення ефективності машин об'ємної дії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що розроблено:

- новий напрям у конструюванні та проектуванні двигунів об'ємної дії, технології виготовлення й збирання основних складальних вузлів та деталей роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом руху;
- рекомендації щодо вибору необхідних матеріалів для виготовлення деталей роторно-поршневого двигуна, а також установа необхідного зазору між сполучними парами з урахуванням робочої температури деталей;
- метод і програму проведення експериментальних досліджень експлуатаційних режимів та робочих процесів роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху;
- програму проведення стендових випробувань роторно-поршневих двигунів при серійному виробництві, а також послідовність і тривалість проведення обкатки та контрольних випробувань;
- рекомендації щодо розвитку теорії розрахунку робочого циклу машин об'ємної дії, що стосуються врахування особливостей кінематики шарнірно-кулачкового механізму руху;
- схемні й технічні рішення енергетичних установок на базі роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху.

Достовірність результатів роботи, висновків та рекомендацій підтверджується значною кількістю експериментальних досліджень дослідного зразка роторно-

поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху; використанням у математичній моделі робочого циклу фундаментальних рівнянь термодинаміки тіла змінної маси, газової динаміки, тепло- і масообміну, що забезпечує задовільне узгодження змодельованих та експериментально отриманих основних параметрів роботи двигуна на всьому експлуатаційному діапазоні.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та результати, які подані в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто протягом 2014–2021 років у Центрі перспективних енергетичних технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова та на Машинобудівному підприємстві «Мотор-Плюс». До особистого внеску здобувача належать:

- постановка та обґрунтування проблеми дослідження, мети й основних завдань;
- участь у проектуванні та створенні дослідного зразка роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху на базі Машинобудівного підприємства «Мотор-Плюс»;

- проектування й створення експериментального стенда і системи вимірювання;
- розробка програми та проведення експериментальних досліджень;
- обробка й аналіз експериментальних даних та встановлення закономірностей впливу експлуатаційних параметрів і конструктивних особливостей роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху на зміну показників його роботи;

- розвиток теорії розрахунку робочого циклу машин об'ємної дії у частині опису кінематики шарнірно-кулачкового механізму руху;

- виявлення закономірностей впливу конструктивних, експлуатаційних а також регулюючого параметрів роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху на зміну їх показників роботи;

- розробка основ конструювання й технології виготовлення роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху;

- розробка схемних рішень та визначення ефективності застосування роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху в ЕУ різного призначення.

Упровадження результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію і були використані на Машинобудівному підприємстві «Мотор-Плюс» (м. Миколаїв) при проектуванні та реалізації проектів енергетичних установок з роторно-поршневими двигунами об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху різного призначення згідно з вимогами замовника; на Машинобудівному підприємстві «МОТОРСЕРВІСПРОМ» (м. Миколаїв) при виконанні проектних робіт і оцінці енергетичних й економічних показників серії пневмодвигунів (12РПД 44/1,75; 20РПД 4,5/1,75; 20РПД 3,0/1,15); на підприємстві «ТЕПЛОМАШПРОГРЕС» (м. Миколаїв) при модернізації пневматичного приводу суднового крана з вантажопідйомністю до 1000 кг; при розробці проектної документації вібраційного живильника для випуску і доставки руди на підприємстві «БІЗНЕС-СЕРВІС-БЮРО» (Миколаївська обл.); на підприємстві «ШИПСЕРВІС» (м. Миколаїв) при розробці проекту та проведенні модернізації платформного електричного візка ЕТ-2054 (електрокар) вантажо-

підйомністю 2 т на пневматичний привід; у підготовці технічної документації з модернізації виробничого обладнання підприємствами «АВИАФИНСЕРВИС» (м. Миколаїв) і «Енерготехнологія» (Миколаївська обл.); у навчальному процесі кафедри ДВЗ, У та ТЕ при підготовці бакалаврів і магістрів Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова в курсах лекцій, при проведенні практичних, індивідуальних та лабораторних занять з дисциплін «Двигуни нетрадиційних схем», «Суднові допоміжні механізми», а також при виконанні розрахункових завдань, у курсовому й дипломному проектуванні.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації були представлені на науково-практичних семінарах кафедри двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування; на XXIV Міжнародному Конгресі двигунобудівників, присвяченому 90-річчю Генерального конструктора Ф. М. Муравченка (с. Коблеве, Миколаївська область, 2019 р.); на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування», присвяченій 150-літтю від дня народження Некрасова І. С. (м. Миколаїв, 2020 р.); на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування» (м. Миколаїв, 2020 р.); на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», присвяченій 100-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв, 2020 р.); на XXV Міжнародному Конгресі двигунобудівників, присвяченому 90-річчю Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», 75-річчю ДП «Івченко-Прогрес», 100-річчю академіка Писаренка Г. С. (дистанційна форма відео-аудіоконференції на платформі ZOOM, 2020 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 26 друкованих наукових праць, з них 21 основна публікація, у тому числі 15 у наукових спеціалізованих виданнях, рекомендованих переліком ДАК МОН України (з них 5 одноосібні), 6 публікацій в іноземних фахових виданнях, включених до Міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection. Крім того, за матеріалами дослідження отримано один патент на винахід України та опубліковано одну колективну монографію у зарубіжному виданні англійською мовою. До додаткових публікацій належать 3 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу та шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 411 сторінки, список використаних джерел містить 327 найменувань та розміщений на 33 сторінках. Крім того, робота проілюстрована 164 рисунками, містить 37 таблиць та 16 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** надана загальна характеристика дисертації, а саме обґрунтована актуальність наукового дослідження, сформульовані мета й головні задачі, визначено об'єкт та предмет; викладені наукова новизна і практична цінність одержаних результатів дослідження, а також зазначено особистий внесок здобувача, подано дані щодо апробації результатів роботи та публікацій за темою наукового дослідження.

У **першому розділі** проаналізовано конструкцію, принцип роботи й сфери застосування різних типів серійних двигунів об'ємної та динамічної дії, що дозволило виділити ряд експлуатаційних переваг і недоліків їх використання у різних сферах промисловості. Проведено аналіз можливих альтернативних машин об'ємної дії та конструктивних ідейних рішень у них. Виділено основні переваги та недоліки цих рішень, пов'язаних з експлуатацією і технологією виготовлення. Виявлено значний вплив конструктивного виконання та організації робочого процесу в двигунах на ефективність перетворення потенційної енергії стиснутого робочого тіла.

Розгорнутий аналіз вітчизняних та зарубіжних публікацій установив, що низька ефективність існуючих і поява нових перспективних енергетичних установок, які застосовують потенційну енергію стиснутого робочого тіла (у середньому складає близько 5...15 %, що пов'язане з багаторазовим перетворенням енергії), обумовлює необхідність створення нових енергоефективних машин об'ємної дії для комплексного вирішення науково-прикладної проблеми ефективності використання енергетичних ресурсів, що є актуальною та пріоритетною проблемою в енергетиці. Комплексне вирішення зазначеної проблеми дисертаційної роботи потребує розробки нових засад щодо проектування і технології виготовлення нового типу машин об'ємної дії, розробки нових розрахункових схем, алгоритмів та математичних моделей, створення й аналізу відповідних схемних рішень енергетичних установок на базі нових двигунів, розробки методики визначення оптимальних параметрів і режимів роботи, а також глибокого системного експериментального дослідження для визначення параметрів та характеристик робочого процесу, ефективних показників і режимів роботи.

У **другому розділі** розроблена загальна методологія проведення дисертаційної роботи, яка відображена у вигляді технологічної карти наукового дослідження. На основі запиту практики визначені мета дисертації та її робоча гіпотеза, а також виділені задачі дисертаційної роботи. Розглянуті основні методи й загальна методика дослідження роторно-поршневого двигуна, які відповідають задачам дисертації та є загальноприйнятими, що дозволило отримати достовірні й достатньо точні результати. Засобами досягнення поставленої мети наукового дослідження є теоретичні та експериментальні методи. Відповідно до цілей роботи сформульовано задачі експериментального дослідження й обрано методи його проведення, що дало змогу перевірити адекватність математичної моделі робочого циклу роторно-поршневого двигуна, а також експериментально встановити вплив основних параметрів, режимів роботи та інших факторів на ефективність перетворення енергії стиснутого робочого тіла. До основних завдань при проведенні експериментального дослідження належать:

- проектування конструкції та розробка технології виготовлення роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху;
- розробка схеми і підбір обладнання для експериментального стенда;
- створення експериментального стенда для дослідження параметрів роботи роторно-поршневого двигуна;
- створення системи вимірювання й реєстрації параметрів роторно-поршневого двигуна, а також спеціального програмного забезпечення для їх обробки, побудови залежностей та аналізу;
- дослідження параметрів робочого циклу роторно-поршневого двигуна;

– дослідження режимів роботи й особливостей експлуатації та обслуговування роторно-поршневого двигуна;

– визначення впливу параметрів робочого циклу на енергетичні й економічні показники двигуна.

З теоретичних методів дослідження в роботі широко використовувався метод математичного моделювання. Сформульовано основні вимоги до математичної моделі робочого циклу роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху.

У **третьому розділі** наведені опис конструкції дослідного зразка роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху 12РПД 4,4/1,75 (рис. 1), програма проведення його науково-дослідних випробувань, відомості про експериментальний стенд, систему вимірювання та реєстрації отриманих результатів, а також основні результати експериментальних досліджень.

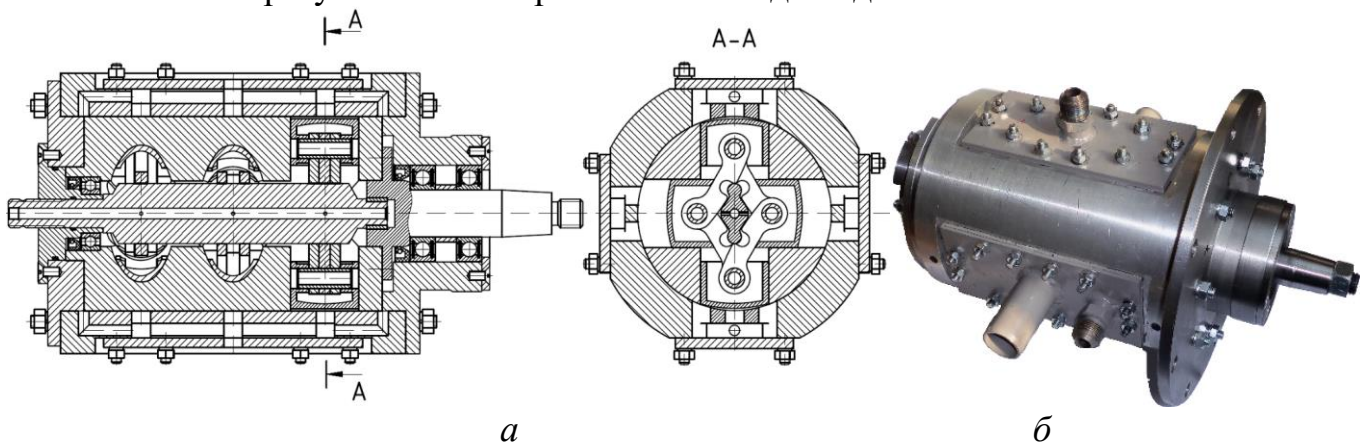


Рис. 1. Дослідний зразок роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху 12РПД 4,4/1,75: *а* – конструктивна схема; *б* – загальний вигляд

Для проведення експериментальних досліджень на Машинобудівному підприємстві ТОВ «Мотор-Плюс» було спроектовано та виготовлено дослідний зразок роторно-поршневого двигуна 12РПД 4,4/1,75, на конструкцію якого отримано Патент на винахід України № 120489. Експериментальні дослідження нового зразка роторно-поршневого двигуна проводилися на спеціально створеному стенді, схема якого подана на рис. 2, а фотографії – на рис. 3. Двигун містить корпус, в якому розміщений ротор з радіальними попарно опозитними 12 циліндрами та розташованими в них 12 поршнями. Поршні сполучені між собою за допомогою пальців та жорстких ланок з утворенням шарнірного чотирикутника, в якому співвісно ротору розміщений регулюючий кулачок. Кулачок виконаний у вигляді стрижня з поперечним перерізом у формі криволінійного ромба зі скругленими вершинами та можливістю повороту. Бічна поверхня кожної з ланок описана радіусом та має пази, які обмежені дугою кола з радіусом, що дорівнює радіусу скруглення вершини регулюючого кулачка. Роторно-поршневий двигун працює наступним чином. Робоче тіло подається через впускний ресивер, і у момент відкриття ротором впускних отворів починається процес наповнення робочого циліндра. Стиснуте робоче тіло починає тиснути на поршні, які із зусиллям рухаються до осі ротора, кожен при цьому передає зусилля двом симетрично розташованим щодо кожного поршня ланкам. При цьому ланки, які взаємодіють зі

скругленими вершинами кулачка, повертаються, впираючись скругленими пазами у вершини кулачка, що знаходиться в нерухомому стані, внаслідок чого ротору надається обертальний рух. При перекритті ротором впускних отворів поршень продовжує рухатися до нижньої мертвої точки, відповідно відбувається процес розширення стиснутого робочого тіла у робочому циліндрі. Випуск відпрацьованого робочого тіла починається в момент відкриття ротором випускних отворів.

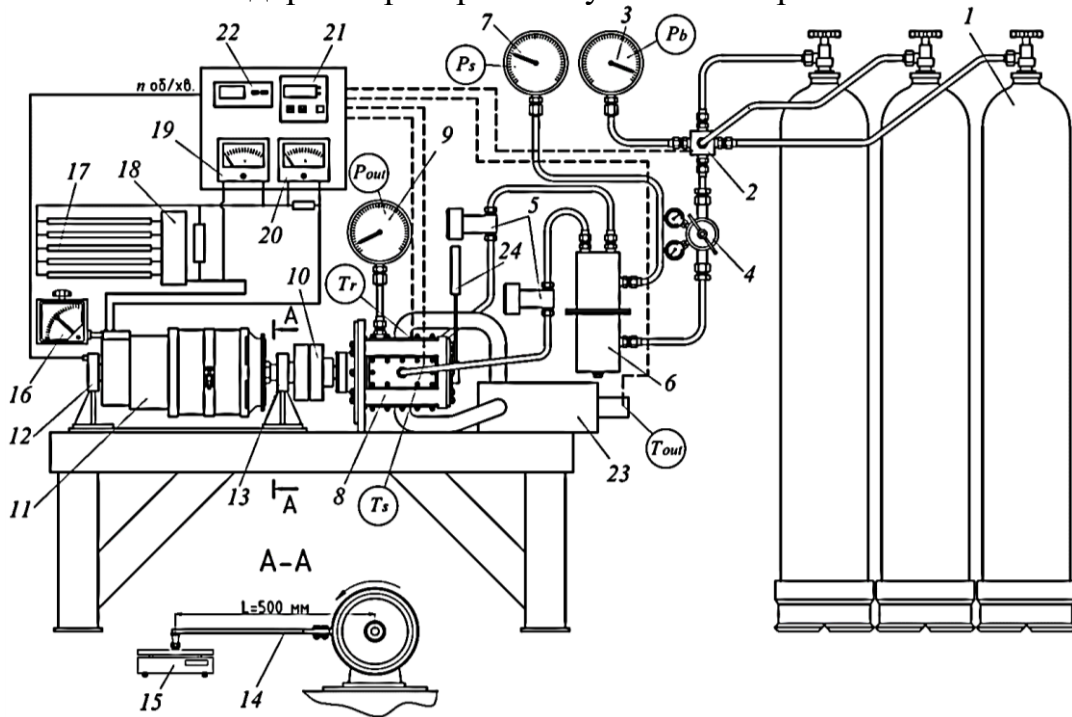


Рис. 2. Принципова схема експериментальної установки:

1 – балони зі стиснутим повітрям; 2 – розподільник високого тиску; 3 – манометр визначення тиску в балонах; 4 – повітряний редуктор; 5 – запірний кран; 6 – повітряний ресивер розподілу низького тиску; 7 – манометр визначення тиску у впускних ресиверах двигуна; 8 – роторно-поршневий двигун 12РПД 4,4/1,75; 9 – манометр визначення тиску у випускних ресиверах двигуна; 10 – втулково-пальцева муфта з'єднання двигуна та генератора; 11 – генератор навантаження ГС-24А; 12 – ліва опора кінця генератора; 13 – права опора кінця генератора; 14 – важіль для визначення крутного моменту; 15 – ваги; 16 – керування навантаження генератора; 17 – блок ТЕНів; 18 – блок керування ТЕНів; 19 – вольтметр; 20 – амперметр; 21 – вимірювач-регулятор багатфункціональний восьмиканальний «ОВЕН» УКТ38-Щ4.ТП; 22 – тахометр; 23 – глушник шуму; 24 – важіль регулювання положення кулачкового вала

Після проходження нижньої мертвої точки поршень починає рухатися від осі ротора, виштовхуючи залишки відпрацьованого робочого тіла через випускні отвори у випускний колектор. Після перекриття ротором випускних отворів відбувається стиснення залишків робочого тіла у робочому циліндрі. Поворот регулюючого кулачка дозволяє змінювати ступінь наповнення робочого циліндра, тим самим регулювати навантаження двигуна, а також покращувати процес перетворення потенційної енергії стиснутого робочого тіла. Особливістю здійснення робочого процесу роторно-поршневого двигуна є те, що шарнірно-кулачковий механізм та механізм газорозподілу

дають змогу регулювати ступінь наповнення, впливаючи тим самим на процес наповнення робочого циліндра, а також збільшувати повноту розширення робочого тіла та зменшувати зворотне стиснення. При цьому конструкція двигуна забезпечує відсутність мертвого об'єму (значення ϵ_0 не перевищує 0,015 та обумовлене лише технологічними зазорами й відношенням $S/D < 1$, що значно знижує втрати тиску робочого тіла при здійсненні впуску та зменшує протитиск на випуску). Крім того, застосування шарнірно-кулачкового механізму руху дозволяє здійснювати два робочих цикли за один оберт ротора, що у значній мірі знижує питому масу двигуна.

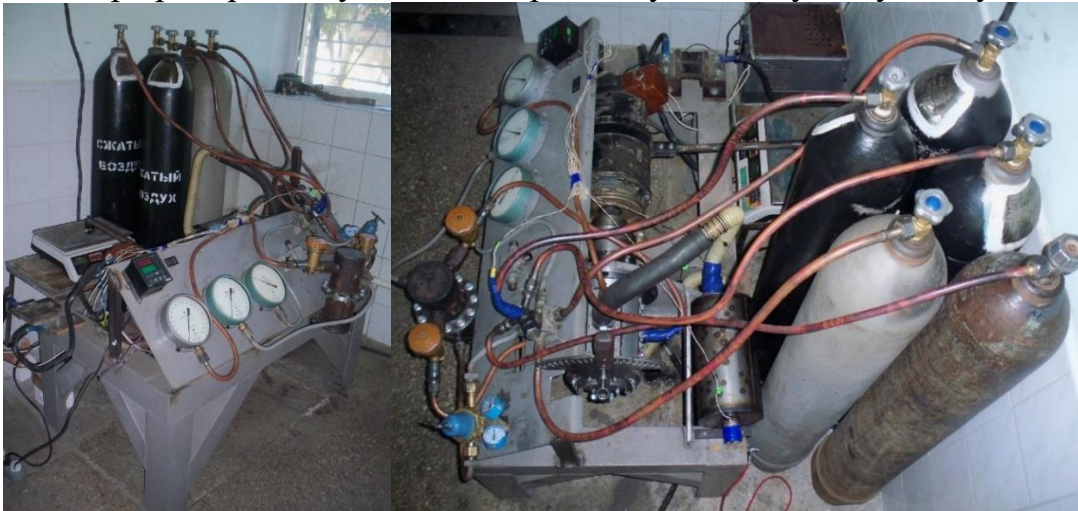


Рис. 3. Загальний вигляд експериментального стенда та панелі приладів

Отримано характеристики зміни основних показників роботи дослідного зразка роторно-поршневого двигуна для діапазону тиску повітря у впускному ресивері 0,4...0,8 МПа. Так, на рис. 4 наведені результати експериментальних досліджень зміни основних ефективних показників без регулювання ступеня наповнення робочого циліндра (регулюючий кулачок знаходився у середньому положенні) залежно від таких експлуатаційних параметрів, як робочий тиск повітря у впускному ресивері P_s , а також оберти двигуна n . Установлено, що максимальні значення питомої ефективної роботи l_e на всьому діапазоні зміни тиску у впускному ресивері роторно-поршневого двигуна знаходяться у межах 800...1000 об/хв та складають 57...72 кДж/кг. Мінімуми $l_e = f(P_s, n)$ знаходяться за максимальних та мінімальних значень обертів. Це можна пояснити тим, що за мінімальних обертів двигуна значний вплив на ефективність перетворення потенційної енергії стиснутого робочого тіла мають витоки, а за максимальних зростають газодинамічні та механічні втрати (хоча витоки зменшуються). Відповідно зазначений діапазон обертів двигуна є найбільш раціональним з точки зору питомої ефективної роботи. В умовах проведення експерименту (без регулювання ступеня наповнення робочого циліндра $P_s = 0,4...0,8$ та $n = 400...1400$ об/хв) максимальне значення досягнутої потужності складає $N_e = 1,7...2,5$ кВт, крутного моменту – $M_k = 13,0...18,2$ Н·м, а середній ефективний тиск – $p_e = 0,13...0,18$ МПа. Максимальні значення M_k та N_e відповідають різним значенням обертів роторно-поршневого двигуна. Так, найбільші значення потужності двигуна досягаються за максимальних обертів (1200...1400 об/хв), тоді як максимальні значення крутного моменту та середнього ефективного тиску знаходяться у межах обертів 1000...1200 об/хв.

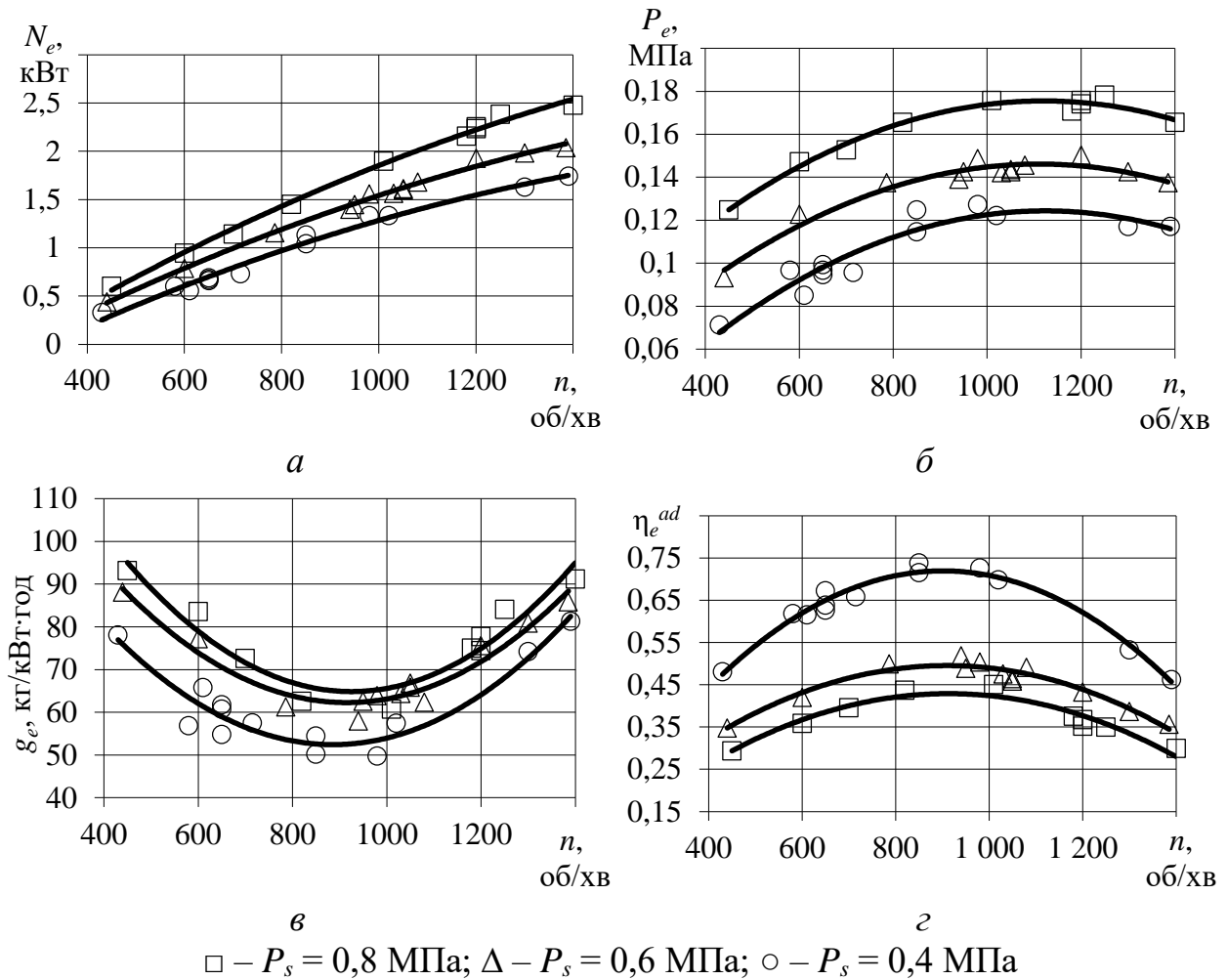
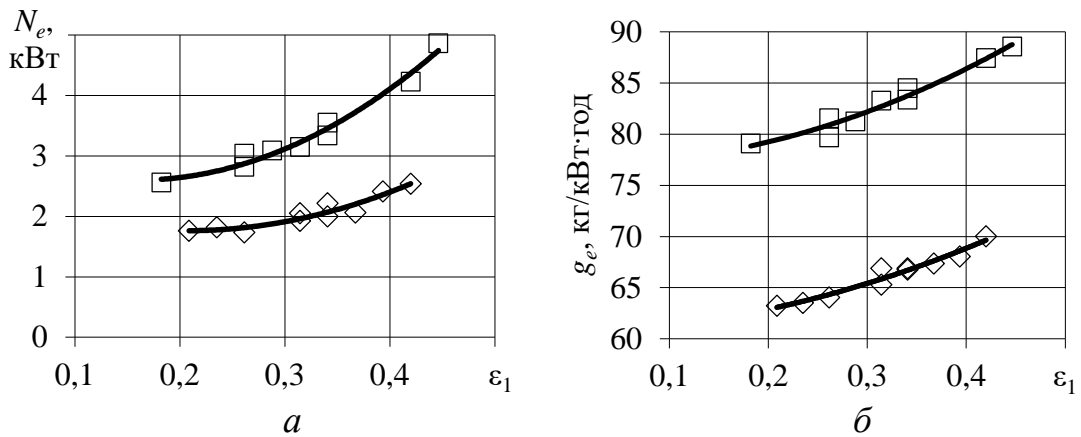


Рис. 4. Зміна ефективних показників роботи роторно-поршневого двигуна 12РПД 4,4/1,75: *a* – ефективна потужність; *б* – середній ефективний тиск; *в* – питома ефективна витрата стиснутого повітря; *г* – ефективний адіабатичний ККД

Відповідно до отриманих результатів мінімальні значення питомої ефективної витрати стиснутого робочого тіла знаходяться у діапазоні обертів двигуна 800...1000 об/хв, що відповідає середній швидкості поршня 0,93...1,17. Для режиму випробувань $P_s = 0,8$ МПа – $g_e = 60,8...93,2$ кг/кВт·год; для $P_s = 0,6$ МПа – $g_e = 57,9...88,1$ кг/кВт·год; $P_s = 0,4$ МПа – $g_e = 49,7...81,3$ кг/кВт·год. Визначено, що максимальні значення ККД для всіх значень тиску стиснутого повітря у впускному ресивері знаходяться у межах обертів роторно-поршневого двигуна 800...1000 об/хв, при цьому найбільша ефективність перетворення потенційної енергії стиснутого робочого тіла $\eta_e^{ad} = 0,73$ спостерігається при $P_s = 0,4$ МПа. Збільшення тиску P_s із 0,4 до 0,8 МПа призводить до зниження ККД на 38 % (із 0,73 до 0,45), однак ефективна потужність двигуна зростає на 46 % (із 1,3 до 1,9 кВт).

Визначено вплив регулювання ступеня наповнення робочого циліндра роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху на ефективність процесу перетворення потенційної енергії стиснутого робочого тіла. На рис. 5 подано експериментальні залежності зміни ефективної потужності та питомої ефективної витрати стиснутого робочого тіла двигуна залежно від зміни ступеня наповнення.



□ – $P_s = 0,7$ МПа, $n = 1550$ об/хв; ◇ – $P_s = 0,5$ МПа, $n = 1200$ об/хв

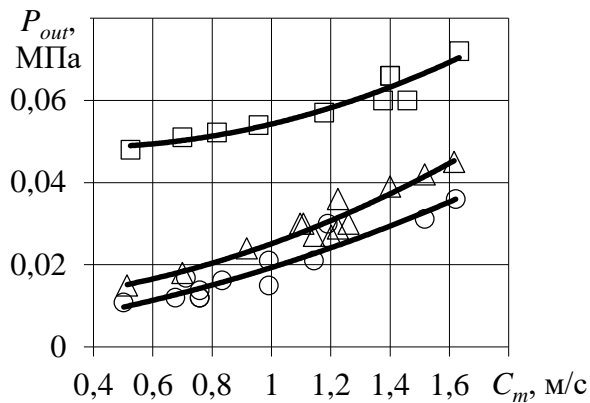
Рис. 5. Зміна показників роботи роторно-поршневого двигуна 12РПД 4,4/1,75 при регулюванні ступеня наповнення: а – ефективна потужність; б – питома ефективна витрата стиснутого робочого тіла

Подані залежності відповідають двом експлуатаційним режимам, які відрізняються за тиском у впускному ресивері та обертами двигуна. У першому випадку робочий тиск у впускному ресивері двигуна складає 0,7 МПа й оберти склали 1550 об/хв, а в другому випадку – $P_s = 0,5$ МПа та $n = 1200$ об/хв. Відповідно до отриманих результатів на режимі випробувань $P_s = 0,7$ МПа зі зростанням ступеня наповнення у 2,4 рази ефективна потужність роторно-поршневого двигуна збільшується у 1,9 рази, а на режимі $P_s = 0,5$ МПа зі зростанням ε_1 у 2 рази N_e збільшується у 1,5 рази. Це пояснюється тим, що зі збільшенням ступеня наповнення збільшується площа індикаторної діаграми за рахунок зростання тривалості процесу наповнення, а також тим, що процес розширення відбувається за більших значень тиску в робочому циліндрі.

Відповідно до отриманих результатів експериментальних досліджень зі зниженням значення ступеня наповнення знижується ефективна витрата стиснутого робочого тіла та підвищується ефективний адіабатний ККД. Для режиму випробувань $P_s = 0,7$ МПа при зменшенні ступеня наповнення на 59 % питома ефективна витрата стиснутого повітря знижується на 11 %, на режимі випробувань $P_s = 0,5$ МПа при зменшенні ε_1 на 50 % g_e знижується на 10 %. Крім того, відповідно до отриманих експериментальних даних ефективний адіабатичний ККД на режимі $P_s = 0,4$ за рахунок регулювання ступеня наповнення збільшується до 0,76.

Установлено вплив параметрів n та тиск P_s на газодинамічні втрати. Так, підвищення тиску P_s збільшує тиск відпрацьованого робочого тіла у впускному колекторі P_{out} . На рис. 6 наведено вплив середньої швидкості поршня та тиску у впускному ресивері роторно-поршневого двигуна на значення тиску відпрацьованого робочого тіла у впускному колекторі без регулювання ступеня наповнення робочого циліндра. Збільшення обертів знижує витоки повітря за рахунок зменшення часу, відведеного на здійснення робочого циклу, тоді як механічні та газодинамічні втрати, навпаки, збільшуються. Так, за мінімальних обертів двигуна значення тиску P_{out} залежно від тиску P_s знаходиться у межах $P_{out} = 0,011 \dots 0,048$ МПа, тоді як за максимальних обертів – $P_{out} = 0,036 \dots 0,075$ МПа. Підвищені значення тиску відпрацьованого робочого тіла у впускному колекторі двигуна напряму пов'язані зі встановленням глушника

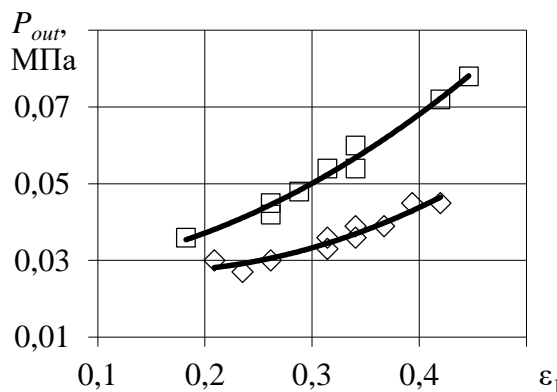
шуму. При проведенні ряду досліджень за його відсутності значення тиску P_{out} на номінальному режимі роботи та максимальних обертах не перевищувало 0,018 МПа.



□ – $P_s = 0,8$ МПа; Δ – $P_s = 0,6$ МПа; ○ – $P_s = 0,4$ МПа

Рис. 6. Зміна тиску відпрацьованого робочого тіла у випускному колекторі (без регулювання ступеня наповнення) залежно від експлуатаційного режиму

Установлено вплив ступеня наповнення робочого циліндра роторно-поршневого двигуна на значення тиску відпрацьованого робочого тіла. Так, при збільшенні ε_1 процес розширення закінчується за більших значень тиску в робочому циліндрі, що відповідно сприяє зростанню значення тиску відпрацьованого робочого тіла у випускному колекторі роторно-поршневого двигуна (рис. 7).



□ – $P_s = 0,7$ МПа, $n = 1550$ об/хв; ◇ – $P_s = 0,5$ МПа, $n = 1200$ об/хв

Рис. 7. Зміна тиску відпрацьованого робочого тиску у випускному колекторі залежно від ступеня наповнення для різних експлуатаційних режимів

Відповідно до отриманих результатів на режимі випробувань $P_s = 0,7$ МПа зі зростанням ступеня наповнення у 2,4 рази значення тиску відпрацьованого робочого тіла зростає у 2,1 рази, а на режимі $P_s = 0,5$ МПа зі зростанням ε_1 у 2 рази збільшується у 1,5 рази. Так, в умовах проведення експериментальних досліджень на всьому діапазоні зміни ступеня наповнення значення тиску відпрацьованого повітря випускної системи роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху також не перевищувало 0,075 МПа.

Проведено експериментальні дослідження зміни температури робочого тіла в процесі перетворення енергії, починаючи від температури зберігання у витратних балонах до температури відпрацьованого робочого тіла у випускному колекторі роторно-поршневого двигуна, що дозволило оцінити працездатність двигуна 12РПД

4,4/1,75 в умовах низьких температур. Зниження температури робочого тіла спостерігається при дроселюванні від тиску зберігання у балонах до необхідного робочого тиску двигуна, а також при розширенні у робочому циліндрі. На рис. 8,а наведені експериментальні результати величини зміни температури стиснутого робочого тіла в результаті дроселювання в газовому редукторі. Значення ΔT_p залежить від початкових значень тиску P_6 і температури зберігання T_6 , кінцевого тиску редукування P_s , а також від швидкості потоку робочого тіла, яка, в свою чергу, пов'язана з обертами двигуна n . Так, згідно з отриманими результатами максимальне падіння температури при тиску у впускному ресивері 0,8 МПа складе приблизно 21 К. Причому зі зростанням обертів двигуна від мінімальних до максимальних падіння температури збільшиться приблизно на 7 К. На рис. 8,б подана зміна величини падіння температури стиснутого робочого тіла ΔT_d при розширенні у робочому циліндрі роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху з врахуванням обертів ротора n , а також температури T_s і тиску P_s у впускному ресивері. Відповідно до отриманих експериментальних даних падіння температури у результаті розширення складає приблизно 22 К. При цьому варто відзначити, що зміна обертів двигуна має незначний вплив на падіння температури при розширенні та знаходиться в межах 1 К.

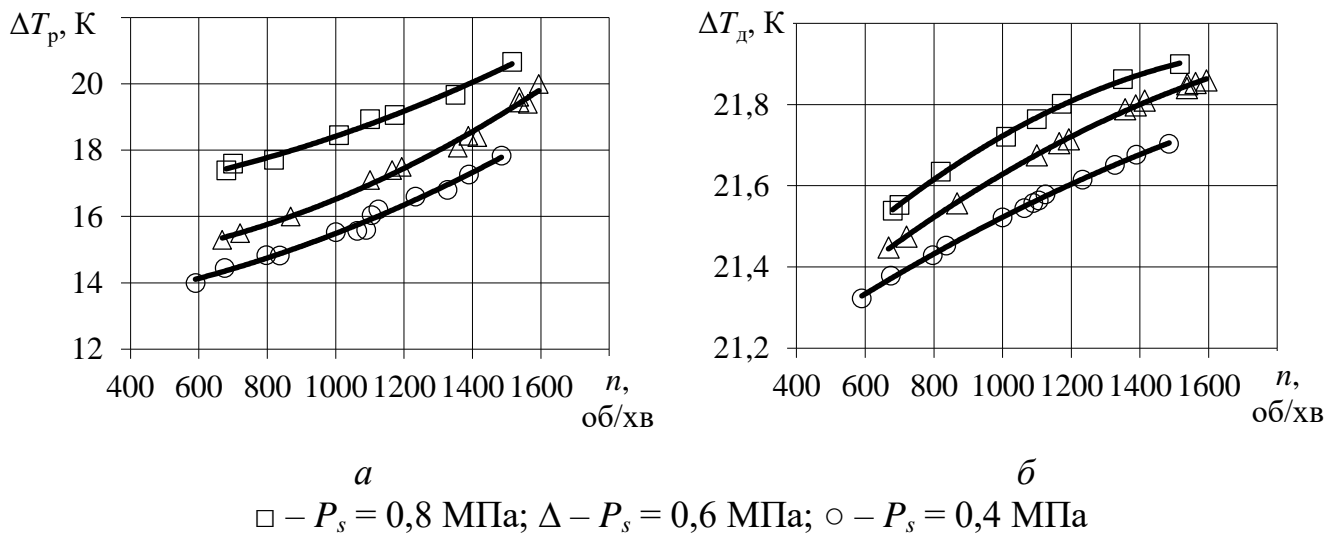


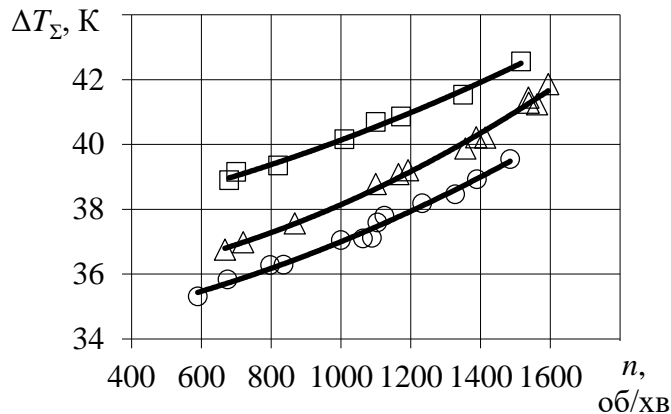
Рис. 8. Зміна величини падіння температури стиснутого робочого тіла на різних етапах перетворення енергії залежно від робочого тиску та обертів двигуна: а – при дроселюванні в газовому редукторі ΔT_p ; б – при розширенні у циліндрі ΔT_d

Установлене загальне значення падіння температури відпрацьованого робочого тіла T_{out} (рис. 9). Відповідно до режиму експлуатації роторно-поршневого двигуна загальне падіння температури від початкового значення зберігання у балоні T_6 складає від 35 до 43 К. Визначено, що при експлуатації роторно-поршневого двигуна із шарнірно-кулачковим механізмом руху в умовах плюсових значень температури зберігання стиснутого робочого тіла додатковий підігрів його на вході у впускний ресивер, з точки зору забезпечення працездатності двигуна, не потребується. Введення підігріву може бути розглянуто лише для покращення енергоперетворення.

На основі обробки та узагальнення експериментальних даних зміни мінімальної температури відпрацьованого робочого тіла роторно-поршневого двигуна від обертів

n та тиску у впускному ресивері P_s за умов відсутності підігріву робочого тіла на впуску запропоновано залежність для оцінки загального падіння температури

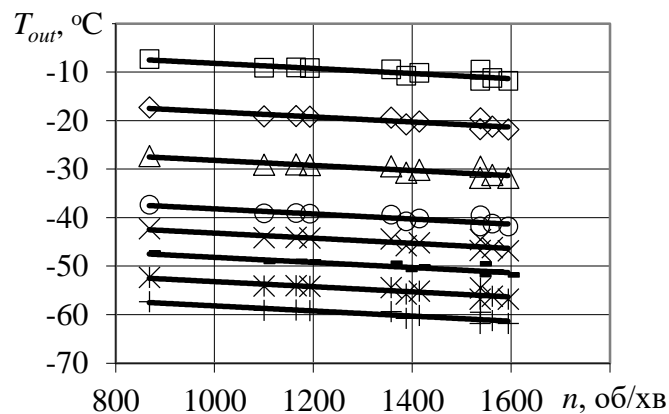
$$\Delta T_{out} = (-1,7P_s^2 + 4,3P_s + 2,3)10^{-3}n + 4,7P_s^2 - 0,7P_s + 33 \text{ К.}$$



□ – $P_s = 0,8$ МПа; Δ – $P_s = 0,6$ МПа; ○ – $P_s = 0,4$ МПа

Рис. 9. Зміна величини сумарного падіння температури стиснутого робочого тіла ΔT_{out} залежно від тиску у впускному ресивері та оберту двигуна

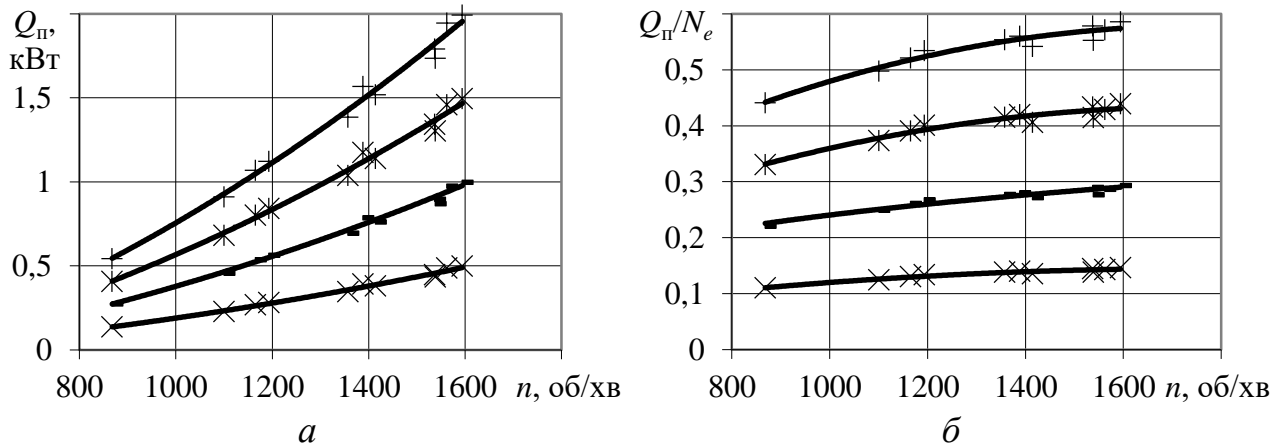
Виконана оцінка необхідної кількості підведеної енергії $Q_{п}$ для підігріву робочого тіла на вході у впускний ресивер роторно-поршневого двигуна при мінусових значеннях його зберігання. На рис. 10 наведено зміну температури відпрацьованого робочого тіла T_{out} залежно від початкової температури зберігання T_b та оберту n для робочого тиску 0,6 МПа. Відповідно до отриманих даних мінімальна температура зберігання T_b , за якої ще можлива робота двигуна без підігріву, складає $0 \dots -5$ °С.



□ – $T_b = 30$ °С; ◇ – $T_b = 20$ °С; Δ – $T_b = 10$ °С; ○ – $T_b = 0$ °С; × – $T_b = -5$ °С;
 - – $T_b = -10$ °С; * – $T_b = -15$ °С; + – $T_b = -20$ °С

Рис. 10. Зміна температури відпрацьованого робочого тіла T_{out} залежно від температури зберігання T_b та оберту роторно-поршневого двигуна n при $P_s = 0,6$ МПа

На рис. 11 подані зміна $Q_{п}$ та відношення $Q_{п}/N_e$ залежно від T_b і n , при цьому температура відпрацьованого робочого тіла не перевищує $T_{out} = -42$ °С. Відповідно до отриманих даних величина підігріву для діапазону температур $T_b = -5 \dots -20$ °С складатиме $Q_{п} = 0,14 \dots 1,99$ кВт, а відношення $Q_{п}/N_e$ знаходиться у межах $0,11 \dots 0,58$, причому найбільше значення відповідає максимальному навантаженню й температурі $T_b = -20$ °С.



× – $T_b = -5$ °C; - – $T_b = -10$ °C; * – $T_b = -15$ °C; + – $T_b = -20$ °C

Рис. 11. Оцінка необхідної кількості енергії підігріву робочого тіла для діапазону температур зберігання $-5 \dots -20$ °C: *a* – необхідна кількість підведеної енергії; *б* – відношення необхідної кількості підведеної енергії до ефективної потужності двигуна

Аналіз отриманих результатів показав низьку ефективність використання роторно-поршневих двигунів за мінусових температур зберігання стиснутого робочого тіла, оскільки для забезпечення нормального їх функціонування необхідно відбирати частину виробленої потужності для підігріву робочого тіла перед розширенням.

У четвертому розділі обґрунтовані вимоги до математичної моделі робочого циклу роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху. Базуючись на роботах таких учених, як А. С. Іллічов, А. П. Герман, К. С. Борисенко, Н. Г. Верескунов, Г. З. Ярмоленко, В. І. Дегтярьов, А. А. Боровков, В. А. Мурзін, Г. М. Колобердян, В. Д. Зіневич, С. В. Калекін, В. С. Калекін, А. М. Туренко, В. О. Богомоллов, Ф. І. Абрамчук, О. І. Воронков, С. С. Жилін, І. М. Нікітченко, А. І. Харченко, В. М. Манойло, О. Ю. Ліньков, Б. С. Фотін, П. І. Пластинін, І. К. Прилуцький, І. Б. Пірумов, В. Л. Юша, А. І. Прилуцький, а також на отриманих експериментальних даних було розроблено математичну модель робочого циклу роторно-поршневого двигуна, яка враховує особливості його кінематики. В основу числового розрахунку робочого процесу роторно-поршневого двигуна у відкритій термодинамічній системі покладено універсальне узагальнене диференціальне рівняння, яке має вигляд

$$\frac{dp}{d\varphi} = p \left[\frac{\sum_1^{n_1} dl_j}{c_v T M} - \frac{d(c_v)_T}{c_v} + \left(1 - \frac{c_{vm}}{c_v} \right) \frac{\sum_1^{n_1} dM}{M d\varphi} - k \frac{dV}{V d\varphi} - \frac{\sum_1^{n_2} dQ_{cti}}{c_v T M} \right],$$

де dQ_{cti} – обмін теплоти зі стінками теплосприймаючих поверхонь; dl_j – елементарна ентальпія мас, що надходять або залишають робочий циліндр двигуна; c_v , c_{vm} – питома ізохорна істинна та середня теплоємність робочого тіла відповідно; T , p – відповідно температура й тиск робочого тіла; v – молярна маса; μ – молекулярна маса; φ – змінне значення кута повороту ротора; k – показник адиабати; n – частота обертання ротора; dM – елементарна маса, що надходить або залишає робочий циліндр.

Для визначення основних складових узагальненого диференціального рівняння застосовуються наступні залежності:

– елементарна ентальпія мас робочого тіла, що надходять або залишають робочий простір:

$$\sum_1^n \frac{dI_j}{d\varphi} = \sum_1^n c_{pmj} T_j \frac{dM_j}{d\varphi} ;$$

– обмін теплоти зі стінками теплосприймаючих поверхонь

$$dQ = \sum_1^l \frac{dQ_{cvi}}{d\varphi} = \sum_1^l \alpha_{ri} F_i (T - T_{cvi}) \frac{1}{6n} ;$$

– коефіцієнт тепловіддачі (формула Прилуцького)

$$\alpha_r = \frac{\lambda}{D} A \cdot \left(\frac{\rho \cdot w \cdot D}{\mu} \right)^{0,6} .$$

Для визначення відносної зміни об'єму робочого простору $dV/Vd\varphi$ необхідно чітко знати положення поршня у будь-який момент повороту ротора, тобто фактично знати закон руху. Схема перетворення поступального руху поршня в обертальний рух ротора роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху (рис. 12) має значні відмінності від відомих класичних та нетрадиційних схем, що підтверджено патентом на винахід.

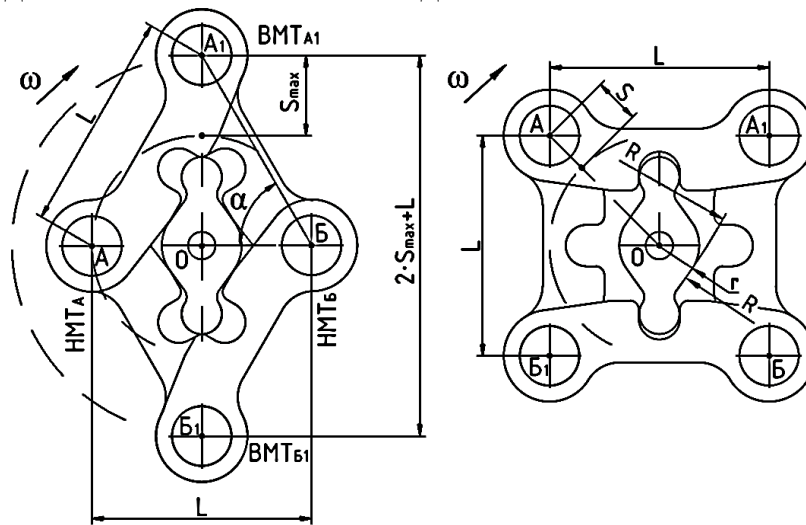


Рис. 12. Загальна кінематична схема шарнірно-кулачкового механізму руху

Було визначено безрозмірне переміщення $s(\varphi)$, швидкість $v(\varphi)$ та прискорення $j(\varphi)$ поршня двигуна у вигляді гармонічного ряду:

$$s(\varphi) = \frac{S(\varphi)}{S_{\max}} ; v(\varphi) = \frac{V(\varphi)}{S_{\max} \omega} ; j(\varphi) = \frac{J(\varphi)}{S_{\max} \omega^2} ; S_{\max}(60^\circ) = L \left(\sqrt{\frac{3}{4}} - \frac{1}{2} \right) \approx 0,366L ;$$

$$s(\varphi) = a_0 - [a_1 \cos(2\varphi) + a_2 \cos(4\varphi) - a_3 \cos(6\varphi) + a_4 \cos(8\varphi)] ;$$

$$v(\varphi) = 2a_1 \sin(2\varphi) + 4a_2 \sin(4\varphi) - 6a_3 \sin(6\varphi) + 8a_4 \sin(8\varphi) ;$$

$$j(\varphi) = 4a_1 \cos(2\varphi) + 16a_2 \cos(4\varphi) - 36a_3 \cos(6\varphi) + 64a_4 \cos(8\varphi) ;$$

де $a_0 = 5328,6726 \cdot 10^{-4}$; $a_1 = 0,5$; $a_2 = 334,3203 \cdot 10^{-4}$; $a_3 = 5,8 \cdot 10^{-4}$; $a_4 = 152,3437 \cdot 10^{-7}$ – сталі гармонічного ряду; ω – кутова швидкість, c^{-1} ; L – довжина між центрами рухомої ланки, м.

Отримане рівняння переміщення поршня дозволило визначити приріст об'єму робочого простору та відповідно відносну зміну об'єму робочого простору:

$$dV = V_s (2a_1 \sin(2\varphi) + 4a_2 \sin(4\varphi) - 6a_3 \sin(6\varphi) + 8a_4 \sin(8\varphi)) d\varphi ;$$

$$\frac{dV}{V d\varphi} = \frac{(2a_1 \sin(2\varphi) + 4a_2 \sin(4\varphi) - 6a_3 \sin(6\varphi) + 8a_4 \sin(8\varphi))}{\left(\frac{1}{\varepsilon - 1} + a_0 - [a_1 \cos(2\varphi) + a_2 \cos(4\varphi) - a_3 \cos(6\varphi) + a_4 \cos(8\varphi)] \right)}.$$

Для оцінки адекватності математичної моделі виконане зіставлення розрахункових та експериментально отриманих значень параметрів робочого циклу роторно-поршневого двигуна. Згідно з виконаним зіставленням розрахункових та експериментальних даних зміни параметрів роботи двигуна максимальна відносна середньоквадратична похибка не перевищує 7 % (рис. 13).

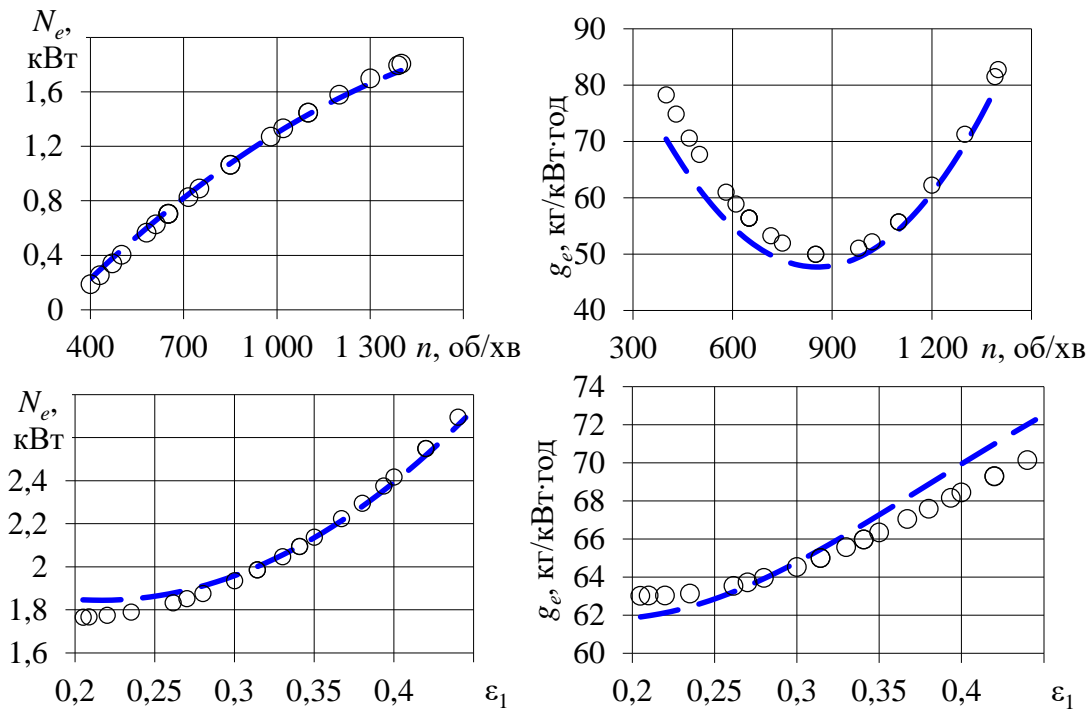


Рис. 13. Порівняння експериментальних та розрахункових показників роторно-поршневого двигуна 12РПД 4,4/1,75: \circ – експеримент; — — — — — розрахунок

Виконано дослідження впливу конструктивних параметрів роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху на ефективність перетворення потенційної енергії стиснутого робочого тіла у робочому циліндрі. Визначено, що при зменшенні відносного мертвого об'єму ε_0 на 20 % питома індикаторна витрата робочого тіла знижується на 27,7 % та збільшується індикаторна потужність на 28,2 % (рис. 14). Забезпечення мінімального значення ε_0 на стадії проектування та при виготовленні роторно-поршневого двигуна, а також покращення точності виготовлення його елементів, що сприятиме мінімізації витоків робочого тіла із циліндра, є одним зі способів покращення його індикаторних показників. Установлено, що зменшення відношення S/D на 33,3 % призводить до зниження питомої індикаторної витрати робочого тіла на 60,8 %, при цьому індикаторна потужність двигуна знижується лише на 8 % (рис. 15). Підвищення індикаторних показників роторно-поршневого двигуна зі зменшенням відношення S/D , а відповідно, й C_m пов'язане, насамперед, з

покращенням процесів впуску та випуску робочого тіла. Зменшення C_m сприяє зниженню втрати тиску робочого тіла при впуску в циліндр роторно-поршневого двигуна та зменшенню значення протидії потоку відпрацьованого робочого тіла при випуску.

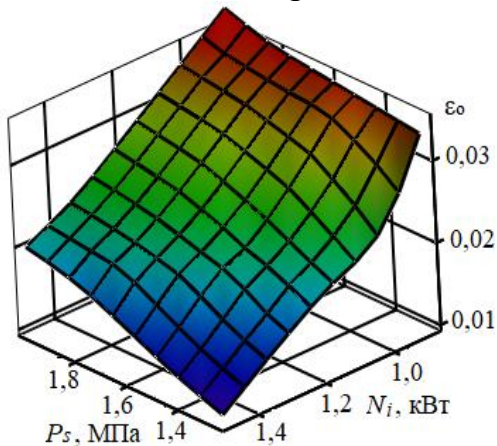


Рис. 14. Вплив ϵ_0 та P_s на індикаторну потужність

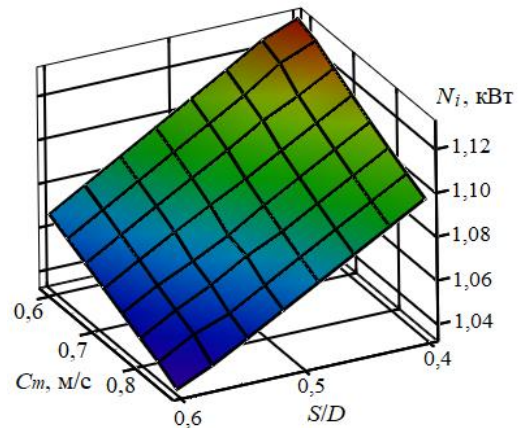


Рис. 15. Вплив відношення S/D та C_m на індикаторну потужність

Виконано дослідження впливу геометричних розмірів робочого циліндра (діаметра й ходу поршня) та складу робочого тіла на зміну циліндрової потужності роторно-поршневого двигуна і годинну витрату газу. На рис. 16 подано результати моделювання різних за діаметром циліндра та ходом поршня типорозмірів роторно-поршневих двигунів при роботі на повітрі, а на рис. 17 – залежності зміни параметрів роботи двигуна від складу робочого тіла.

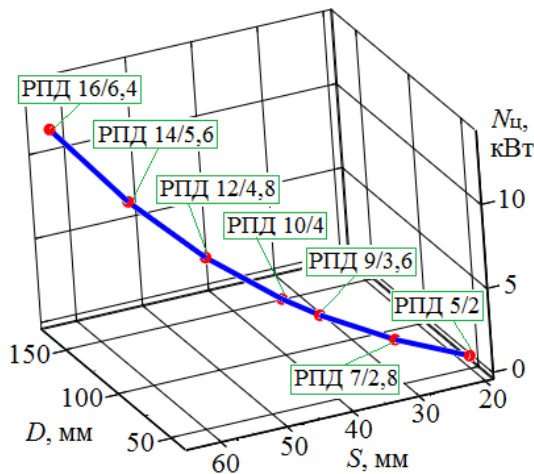
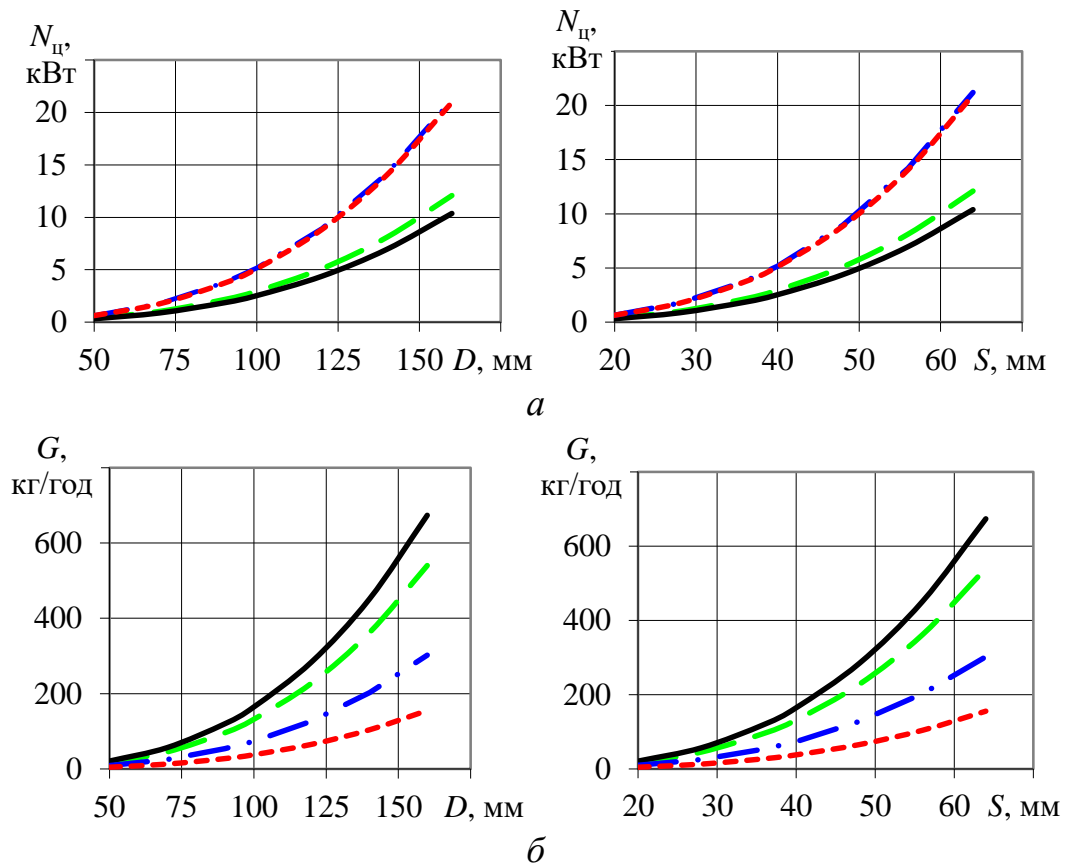


Рис. 16. Залежність циліндрової потужності повітряного роторно-поршневого двигуна від діаметра циліндра D та ходу поршня S

Відповідно до отриманих даних один і той же двигун залежно від застосовуваного робочого тіла має різні ефективні показники роботи, тобто прослідковується залежність роботи роторно-поршневого двигуна від хімічного складу та властивостей робочого тіла. За однакових геометричних розмірів двигуна та його органів газообміну властивості робочого тіла напряму впливають на характер процесу наповнення розширення й випуску. Так, наприклад, зменшення густини робочого тіла на 34 % збільшує потужність двигуна на 18 % за інших однакових геометричних параметрів двигуна.



— — вуглекислий газ; - - - повітря; - - - синтез-газ; - - - водень

Рис. 17. Параметри роботи роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху залежно від геометричних розмірів робочого циліндра: а – циліндрова потужність; б – годинна витрата робочого тіла

У п'ятому розділі виконано аналіз та узагальнення результатів дослідження ефективності використання роторно-поршневих двигунів в існуючих і перспективних енергетичних установках різного призначення. На рис. 18 наведена оцінка виробленої ефективної потужності двигунами різного типу за умов витрати $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря, а на рис. 19 – порівняння кінцевої вартості 1 кВт виробленої енергії з урахуванням витрат на генерацію стиснутого повітря (вартість 1 кВт·год для промислових підприємств обрано у розмірі 3,62 грн).

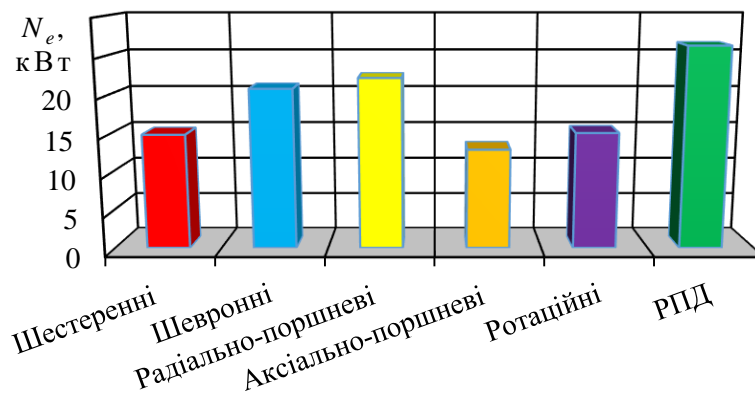


Рис. 18. Оцінка виробленої ефективної потужності двигунами різного типу за умов витрати $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря

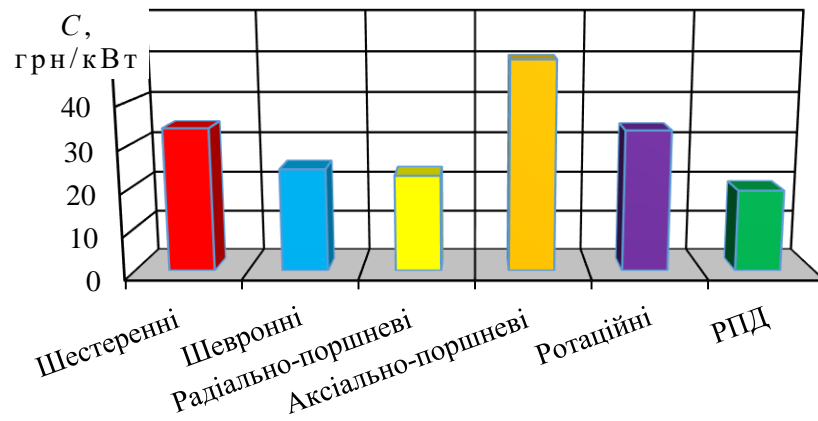


Рис. 19. Порівняння кінцевої вартості 1 кВт виробленої енергії пневмодвигунами різного типу

Подано порівняння параметрів двигунів різних типів з роторно-поршневими, а також доведено ефективність та перспективність застосування нових двигунів у порівнянні із серійними машинами об'ємної дії.

Виконано аналіз та теоретичні дослідження реалізації концепції створення перспективних енергетичних установок різного призначення на базі роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху.

1. Досліджено можливість використання роторно-поршневих двигунів у транспортних енергетичних установках. Розроблено принципові схеми транспортних установок міських автомобілів з обмеженням швидкості руху при роботі на стиснутому повітрі у 50 км/год, розраховано показники динамічності та визначені параметри розгону транспортних засобів. На рис. 20 наведена принципова схема екологічно чистої енергетичної транспортної установки, в якій запропоновано застосовувати коробку передач, а також регулювання робочого тиску двигуна у межах 1,2...2,0 МПа для забезпечення зміни крутного моменту в процесі розгону транспортного засобу.

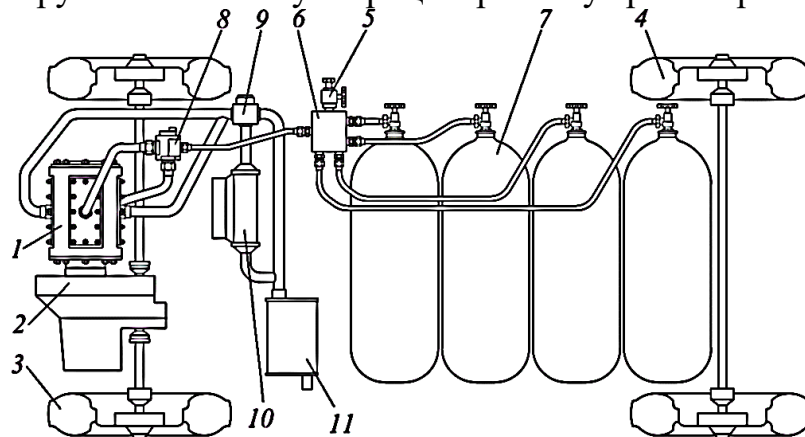


Рис. 20. Принципова схема енергетичної транспортної установки: 1 – роторно-поршневий двигун; 2 – трансмісія переднього ведучого моста; 3 – колеса переднього ведучого моста; 4 – колеса заднього неведучого моста; 5 – клапан заправки витратних балонів; 6 – розподільник стиснутого повітря; 7 – балони зберігання стиснутого повітря; 8 – повітряний редуктор з електронним керуванням; 9 – клапан перепуску відпрацьованого повітря; 10 – теплообмінник системи кондиціонування автомобіля; 11 – глушник випуску відпрацьованого повітря

Тобто на початку руху (зрушення з місця) робочий тиск складатиме 2,0 МПа, а при поступовому наборі швидкості транспортним засобом його значення буде знижуватися до 1,2 МПа. Регулювання тиску дозволило забезпечити прийнятні динамічні характеристики автомобіля при збільшенні запасу ходу. Отримані графіки тягового балансу, динамічна характеристика, а також залежності зміни прискорень при розгоні автомобіля (рис. 21). Крім того, визначено необхідний час та шлях розгону, залежності яких від швидкості руху транспортного засобу наведено на рис. 22. Установлено, що розгін автомобіля до максимальної швидкості у 50 км/год складатиме 28 с, а шлях розгону – 300 м. На базі запропонованої схеми рис. 20 розроблено паралельну схему гібридної транспортної установки, в якій звичайний ДВЗ та роторно-поршневий двигун пов'язані між собою за допомогою трансмісії ведучого моста. Використання запропонованої паралельної схеми дозволяє застосовувати тепло відпрацьованих газів ДВЗ для підігріву стиснутого повітря перед розширенням, а також надлишкову енергію ДВЗ для живлення компресора високого тиску підкачки витратних балонів.

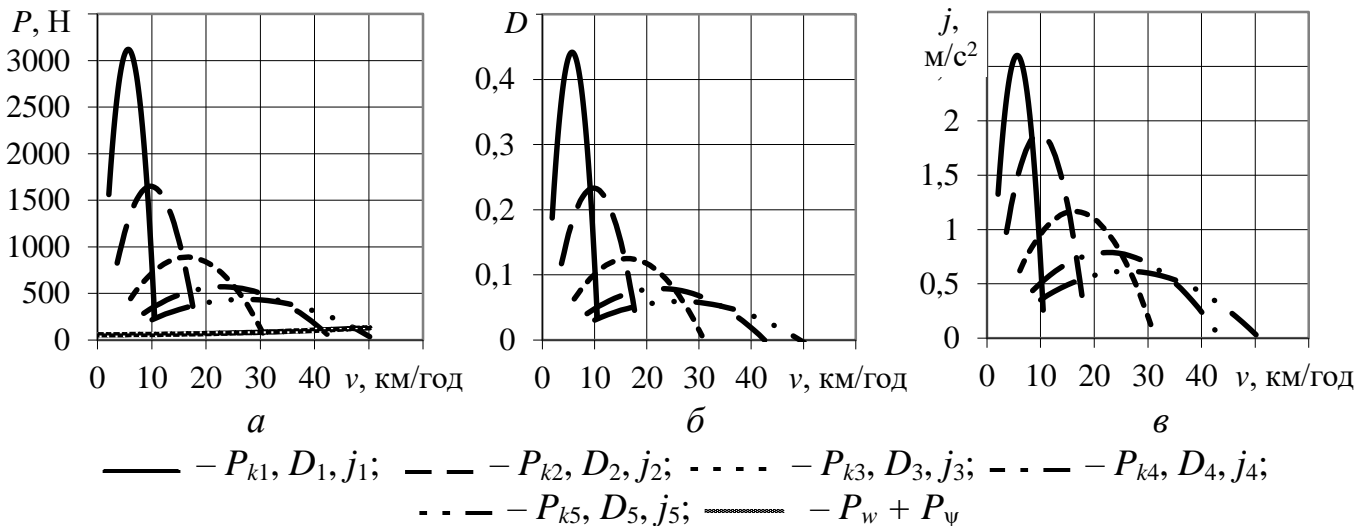


Рис. 21. Показники динамічності та приємності транспортного засобу: а – графіки тягового балансу; б – динамічна характеристика; в – графіки прискорення при розгоні

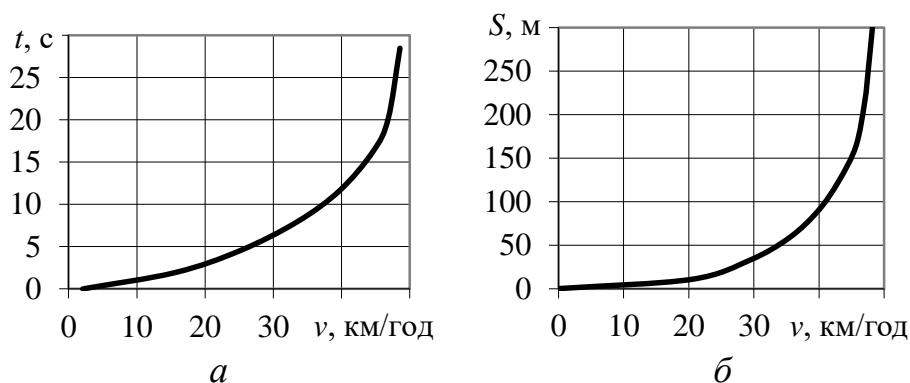


Рис. 22. Залежності часу й шляху розгону автомобіля при регулюванні робочого тиску повітря та застосуванні коробки передач: а – час розгону; б – шлях розгону

Визначено, що тривалість руху гібридного автомобіля при використанні лише роторно-поршневого двигуна зі швидкістю 50 км/год без паралельної підзарядки на одному балоні зі стиснутим повітрям об'ємом 100 л, температурою зберігання 20 °С, початковим тиском 35 МПа та кінцевим 2 МПа складає близько 22 км.

Запас ходу транспортного засобу розраховувався виходячи з умов руху автомобілю прямою ділянкою дороги зі сталою швидкістю. При цьому враховувалися питома витрата робочого тіла двигуном та можливість розрядки балонів до мінімально можливого, з точки зору забезпечення роботи двигуна, тиску. Крім того, при розрахунках період розгону та витрати робочого тіла не враховувалися.

2. Досліджено можливість застосування роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху в газотранспортних та газорозподільних системах як детандер-генераторів. На базі ГРС-5 розроблено принципову схему автоматизованої газорозподільної станції з утилізацією надлишкового тиску природного газу за рахунок використання роторно-поршневих двигунів (рис. 23).

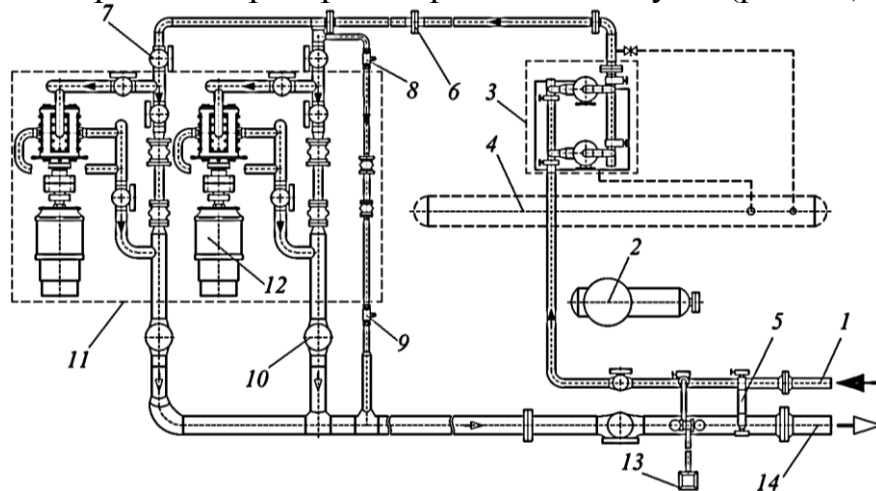


Рис. 23. Загальна схема ГРС з утилізацією надлишкового тиску природного газу: 1 – трубопровід подачі газу від магістрального трубопроводу; 2 – блок одоризації; 3 – блок очищення; 4 – блок збору конденсату; 5 – блок відключення; 6 – пристрій вимірювання витрати газу; 7, 8, 9 – прохідний пробковий кран; 10 – шаровий кран; 11 – пункт редукування та утилізації надлишкового тиску; 12 – роторно-поршневий детандер-генератор; 13 – свічка; 14 – вихідний трубопровід низького тиску

У запропонованій схемі роторно-поршневий двигун працює за навантажувальною характеристикою при зміні тиску природного газу в напірній магістралі в межах 1,2...5,5 МПа, при цьому ефективна потужність роторно-поршневого двигуна змінювалася у межах 29...132 кВт (рис. 24).

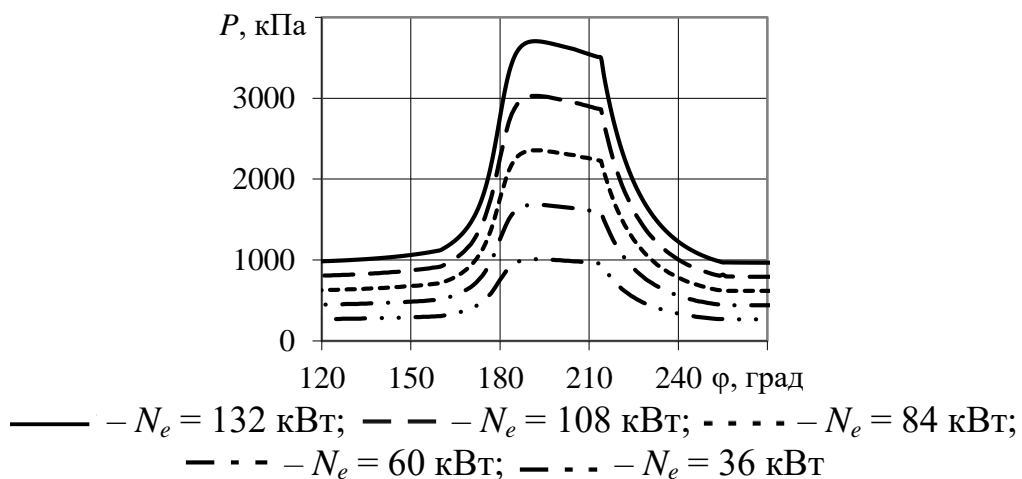


Рис. 24. Індикаторні діаграми на різних режимах експлуатації детандера

Середня швидкість поршня двигуна складала $C_m = 1,178$ м/с, що значно зменшує втрати тиску природного газу при наповненні та зменшує опір при випуску. Визначено, що застосування роторно-поршневих детандерів із шарнірно-кулачковим механізмом руху для утилізації при редукуванні на автоматизованій газорозподільній станції з місячною витратою природного газу $0,6 \dots 3,3$ млн м³/місяць дозволяє регенерувати від 9 до 89 МВт енергії щомісяця.

3. Досліджено можливість використання роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху в енергетичних установках акумулювання надлишкової електричної енергії, виробленої з відновлювальних джерел енергії. Розроблено принципові схеми вітрової електростанції із системою акумулювання надлишкової електричної енергії. Запропоновано відмовитися від застосування спалювання природного газу для додаткового підігріву стиснутого повітря перед розширенням за рахунок використання роторно-поршневих двигунів.

На рис. 25 подана схема енергетичної установки акумулювання надлишкової електричної енергії у вигляді стиснутого повітря адіабатичного типу.

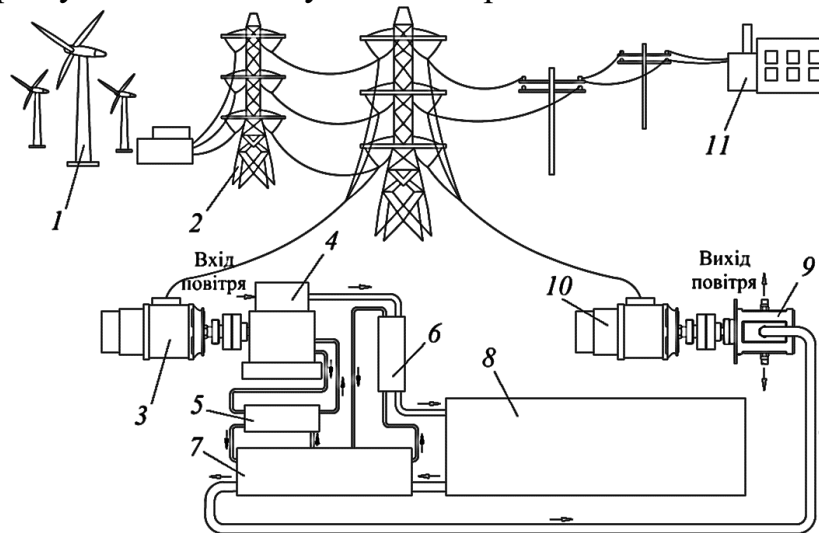


Рис. 25. Загальна схема вітрової електростанції із системою акумулювання надлишкової електричної енергії: 1 – джерело електричної енергії; 2 – високовольтні лінії електропередач; 3 – електродвигун; 4 – повітряний компресор; 5 – охолоджувач компресора; 6 – охолоджувач повітря; 7 – тепловий акумулятор; 8 – акумулятор стиснутого повітря; 9 – роторно-поршневий; 10 – генератор електричного струму; 11 – споживач електричної енергії

У наведеній схемі тепло, яке виділяється при стисненні повітря, а також тепло від водяного контуру системи охолодження компресора накопичуються в спеціальному тепловому акумуляторі, а при розрядженні акумулятора повітря віддається стиснутому повітрю перед розширенням.

Визначено, що застосування акумуляторів тепла для підігріву температури стиснутого повітря на 80 °С перед розширенням дозволяє підвищити індикаторну роботу циклу і середній індикаторний тиск на 11 % (що відображене збільшенням площі індикаторної діаграми на рис. 26). При цьому загальний ККД енергоперетворення в запропонованій енергетичній установці акумулювання стиснутого повітря зростає до 46 %.

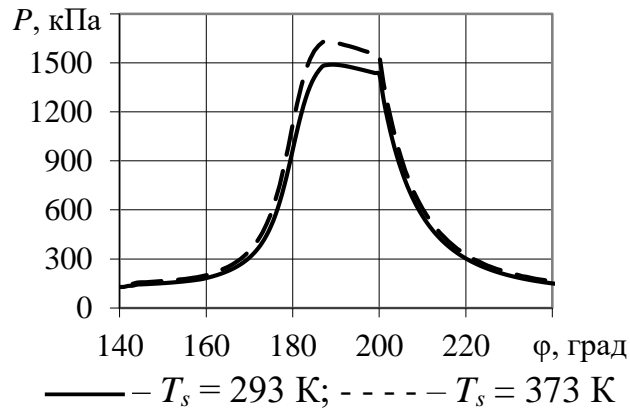
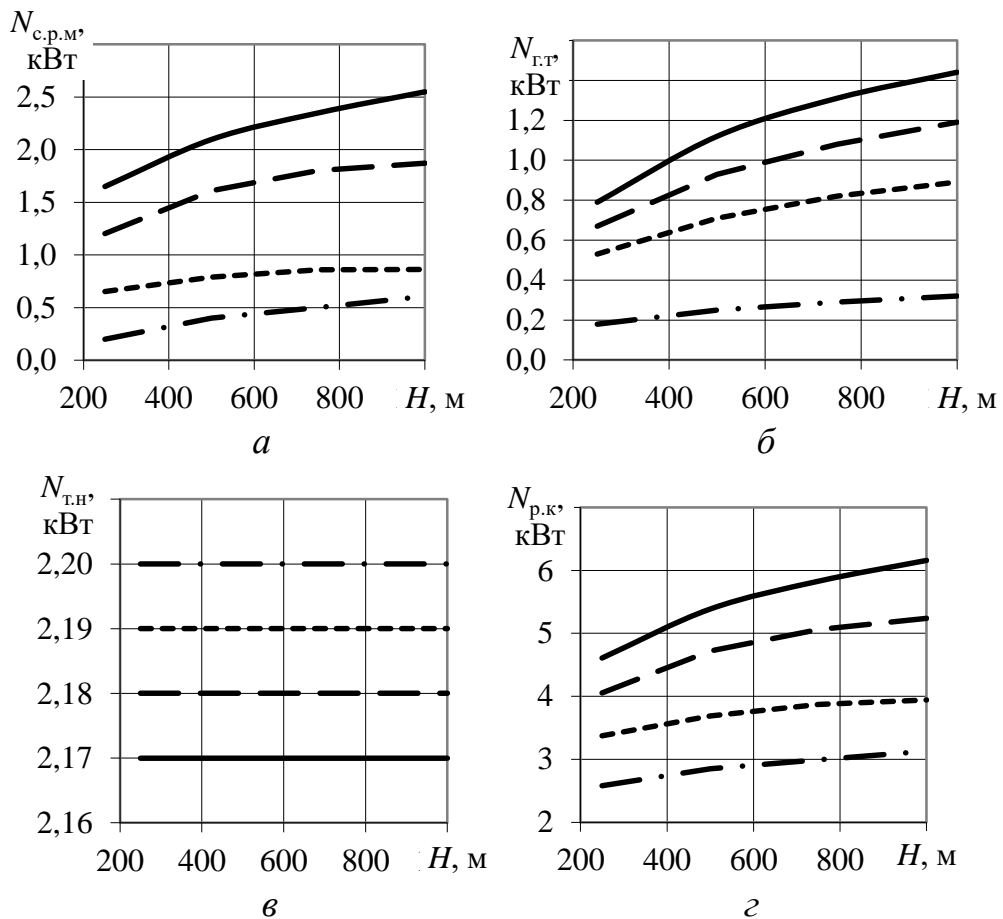


Рис. 26. Зміна індикаторної діаграми роторно-поршневого двигуна залежно від підігріву стиснутого повітря перед розширенням

4. Досліджено ефективність використання роторно-поршневих двигунів в енергетичних установках отримання та безпечного акумулювання водню із сірководню Чорного моря (рис. 27). Оцінена ефективність застосування роторно-поршневих двигунів у технологічному процесі видобутку та акумулювання водню із сірководню для добової витрати морської води об'ємом $100 \text{ м}^3/\text{добу}$.



— — $10,0 \text{ м}^3/\text{м}^3$; - - - $7,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$; - · - · - $5,0 \text{ м}^3/\text{м}^3$; · · · · $2,0 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Рис. 27. Ефективна потужність контурів регенерації енергії: а – ефективна потужність сірководневої роторно-поршневої розширювальної машини; б – ефективна потужність гідравлічної турбіни морської води; в – ефективна потужність генерації термонасосної установки; г – загальна ефективна потужність регенерації енергії

Потужності регенераційних енергетичних установок (див. рис. 27) при добовому видобутку $100 \text{ м}^3/\text{добу}$ морської води, діапазоні вмісту сірководню $2 \dots 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ та залежно від глибини занурення $H = 250 \dots 1000 \text{ м}$ складають:

- потужність, яка вироблена гідравлічною турбіною, $N_{\text{г.т}} = 0,18 \dots 1,44 \text{ кВт}$;
- потужність, яка вироблена роторно-поршневою розширювальною машиною, $N_{\text{с.р.м}} = 0,20 \dots 2,55 \text{ кВт}$;
- потужність генерації термонасосної установки $N_{\text{т.н}} = 2,17 \dots 2,20 \text{ кВт}$.

Установлено, що загальна потужність, вироблена у результаті регенерації енергії, складає від $2,55$ до $6,19 \text{ кВт}$. Ефективна потужність енерготехнологічної установки видобування та сепарації H_2S із морської води при добовому видобутку $100 \text{ м}^3/\text{добу}$ та діапазоні вмісту сірководню $2 \dots 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ складає $N_e^{\text{H}_2\text{S}} = 9,35 \dots 51,39 \text{ кВт}$. Частка ефективної потужності енерготехнологічної установки з видобутку водню, яка припадає на роторно-поршневу розширювальну машину, за умов добової витрати морської води об'ємом $100 \text{ м}^3/\text{добу}$ складає $2,14 \dots 4,96 \%$.

5. Досліджено ефективність використання роторно-поршневих двигунів в енергетичних установках з двигунами внутрішнього згоряння як одного зі ступеня утилізації енергії відпрацьованих газів. Як перший ступінь утилізації тепла ВГ двигуна з іскровим запалюванням 1Ч 6,8/5,4 було обрано роторно-поршневий двигун 8РПД 3,6/1,5 (8 циліндрів діаметром 36 мм та ходом 15 мм). На рис. 28 наведено залежність ефективної потужності роторно-поршневого двигуна та його обертів від витрати ВГ. Зі зростанням вихідної потужності ДВЗ зростає кількість ВГ, а отже, зростає потужність роторно-поршневого двигуна. Так, при досягненні ДВЗ потужності в $2,5 \text{ кВт}$ потужність роторно-поршневого двигуна складає 1 кВт при 756 об/хв . Визначено, що застосування роторно-поршневого двигуна дає змогу збільшити загальну потужність енергетичної установки до 37% .

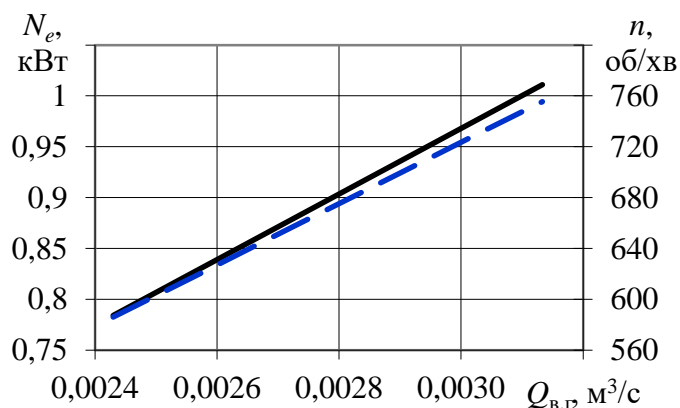


Рис. 28. Залежність параметрів роботи роторно-поршневого двигуна 8РПД 3,6/1,5 від витрати відпрацьованих газів:

— — ефективна потужність; — — частота обертання ротора

У шостому розділі наведено результати реалізації наукового дослідження в практику проектування та створення роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху. Подано загальні основи конструювання та комплектування елементів роторно-поршневих двигунів різного призначення, розглянуто

питання щодо загального компоновання двигуна й схеми підведення повітря, конструювання основних вузлів та деталей, вибору схеми механізму руху, а також особливостей ущільнення. Наведено практичні рекомендації щодо технології виготовлення та збирання основних складальних вузлів і деталей. Визначено, а також розроблено практичні рекомендації щодо встановлення необхідного зазору між сполучними парами (поршень–робочий циліндр та ротор–корпус двигуна) з урахуванням робочої температури деталей і за умов забезпечення працездатності на всіх експлуатаційних режимах та мінімальних втрат робочого тіла (рис. 29 і 30). Визначено вплив використаних матеріалів та зазорів у сполучних парах на величину втрати робочого тіла й масу двигуна. Розроблено практичні рекомендації щодо обкатки та контрольних випробувань нових зразків роторно-поршневих двигунів.

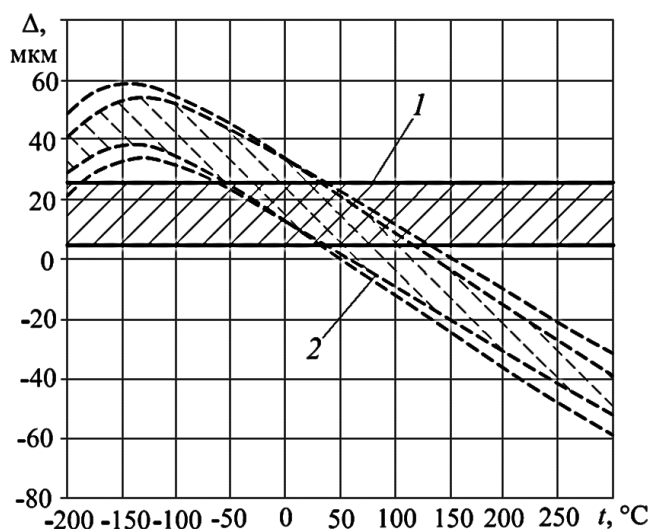


Рис. 29. Зміна поля допуску торцевого зазору між робочим циліндром та поршнем: 1 – чавунний циліндр і чавунний поршень; 2 – чавунний циліндр та алюмінієвий поршень

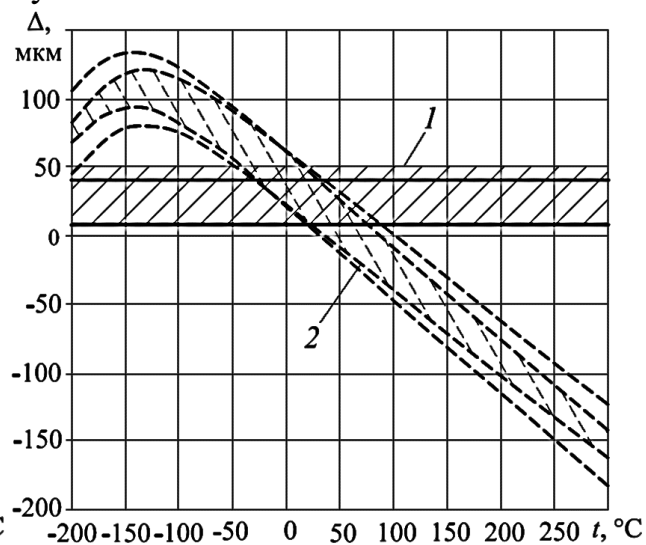


Рис. 30. Зміна поля допуску торцевого зазору між корпусом і ротором: 1 – корпус зі вставною чавунною втулкою та чавунний ротор; 2 – алюмінієвий корпус і чавунний ротор

Наведена реалізація результатів наукового дослідження роторно-поршневих двигунів на об'єктах промисловості:

- розроблено проект модернізації пневматичного приводу суднового допоміжного крана з вантажопідйомністю до 1000 кг, що дозволило знизити питому витрату стиснутого повітря на 34...48 %, а отже, знизити енерговитрати на стиснення повітря;

- розроблено проект модернізації платформного електричного візка ЕТ-2054 (електрокар) вантажопідйомністю 2 т шляхом заміни електричної системи приводу електрокари та електричного двигуна на пневматичний, що дало змогу відмовитися від застосування достатньо дорогих та невеликих за терміном роботи акумуляторних батарей (вартість батареї складає близько 34 % від вартості самого електричного візка);

- розроблено проект модернізації виробничого обладнання підприємств, а саме переносного свердлильного верстата СПС-50 з електромагнітною основою та гірського свердла СРЗ, що забезпечило зниження питомої ефективної витрати стиснутого повітря на 48 і 37,7 % відповідно;

– розроблено проект модернізації вібраційного живильника типу ВВДР для випуску й доставки руди.

У додатках подано патент на конструкцію роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху, наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи в практику проектування та створення нових двигунів («Мотор-Плюс» і «МОТОРСЕРВІСПРОМ»), впровадження на об'єктах промисловості («ТЕПЛОМАШПРОГРЕС», «ШИПСЕРВІС», «АВИАФИНСЕРВІС» «БІЗНЕС-СЕРВІС-БЮРО» та «Енерготехнологія»), а також у навчальний процес (НУК ім. адм. Макарова).

ВИСНОВКИ

1. Вирішена актуальна науково-прикладна проблема зниження енергетичних витрат машин об'ємної дії, що застосовують потенційну енергію стиснутого робочого тіла, за рахунок розробки, дослідження процесів перетворення потенційної енергії та впровадження в промисловість нових енергоефективних роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом руху.

2. Розроблено програму проведення експериментальних досліджень експлуатаційних режимів та робочих процесів роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху, що дозволила якісно та кількісно оцінити особливості перетворення потенційної енергії стиснутого робочого тіла у новій технічній системі. У результаті проведення експериментальних досліджень отримано наступні результати:

– встановлено, що використання шарнірно-кулачкового механізму для перетворення поступального руху поршня в обертальний рух ротора й регулювання ступеня наповнення робочого циліндра зменшило питому витрату робочого тіла на 15...24 % відносно серійних поршневих машин об'ємної дії із золотниковим газорозподілом та кривошипно-шатунним механізмом руху;

– визначено, що застосування шарнірно-кулачкового механізму руху забезпечило зменшення питомої маси на 17...50 % та збільшення відношення пускового крутного моменту до номінального на 11 % порівняно із серійними поршневими машинами об'ємної дії із золотниковим газорозподілом та кривошипно-шатунним механізмом руху;

– встановлено, що ефективним способом регулювання навантаження роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом руху є ступінь наповнення робочого циліндра, збільшення якого в 1,43...2,45 рази забезпечило підвищення ефективної потужності у 1,10...1,91 раз, при цьому ефективна витрата стиснутого робочого тіла зросла лише у 1,03...1,12 раз;

– встановлено, що раціональне регулювання ступеня наповнення робочого циліндра дозволило покращити процес перетворення енергії й забезпечити зниження питомої ефективної витрати робочого тіла до 10,1 %;

– визначено вплив ступеня наповнення на значення тиску відпрацьованого повітря у випускному колекторі та встановлено, що збільшення ступеня наповнення у 1,43...2,45 рази підвищує тиск відпрацьованого повітря у 1,16... 2,16 рази;

– встановлено, що величина максимального падіння температури робочого тіла від початкового значення зберігання у балоні до значення на виході з двигуна для діапазону робочого тиску 0,4...0,8 МПа складає 35...43 К;

– визначено, що збільшення обертів двигуна у 2,35 рази призводить до зниження температури робочого тіла після редуктора у 1,23 рази, тоді як зміна температури при розширенні залежно від обертів не перевищує 4,5 %;

– отримано рівняння для визначення зміни падіння температури відпрацьованого робочого тіла роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху від обертів ротора та тиску у впускному ресивері, що дало змогу визначити необхідну кількість теплоти для підігріву стиснутого робочого тіла на вході у впускний ресивер за умов від'ємних температур його зберігання.

3. Визначено кінематику механізму руху роторно-поршневого двигуна об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху за рахунок встановлення геометричного зв'язку між ходом поршня двигуна, довжиною ланки рухомого чотирикутника й кутом між ланками, що дозволило отримати залежності для визначення переміщення, швидкості та прискорення поршня відносно кута повороту ротора, а також, базуючись на фундаментальних рівняннях термодинаміки, газової динаміки, тепло- і масообміну, розробити адекватну дійсним процесам математичну модель розрахунку робочого циклу (максимальна відносна середньоквадратична похибка не перевищує 7 %).

4. Встановлено закономірності впливу конструктивних (діаметр робочого циліндра, хід поршня, відносний мертвий об'єм), експлуатаційних (оберти та робочий тиск) і регулюючого (ступеня наповнення робочого циліндра) параметрів на зміну індикаторних показників роботи при перетворенні потенційної енергії стиснутого робочого тіла в роторно-поршневих двигунах об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху, що дало змогу проектувати двигуни різних типорозмірів з максимальними параметрами енергоефективності.

5. Методами математичного моделювання на базі аналізу ефективності роботи нових енергетичних установок різного призначення, які використовують енергію стиснутого робочого тіла, підтверджена перспективність та доцільність застосування роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху, а саме розглянута можливість використання двигуна у складі:

– енергетичної транспортної установки, що забезпечує розгін екологічно чистого транспортного засобу при повному навантаженні до швидкості у 50 км/год за 20,1, а також запас ходу на одному балоні зі стиснутим повітрям об'ємом 100 л, з температурою зберігання 20 °С, робочим тиском двигуна 2,0 МПа, початковим тиском 35 МПа та розрядкою до 94,3 % близько 22 км;

– автоматизованої газорозподільної станції як утилізатора енергетичного потенціалу стиснутого природного газу, що за умов місячної витрати природного газу 0,6...3,3 млн м³/місяць дало змогу отримати щомісяця від 9 до 89 МВт енергії внаслідок утилізації енергії надлишкового тиску природного газу;

– енергетичних установок акумулювання надлишкової електричної енергії, виробленої з відновлювальних джерел енергії, у вигляді стиснутого повітря, що дало змогу відмовитися від спалювання природного газу (забезпечити нульові викиди

CO₂), а додаткове використання тепла, яке виділяється при стисненні повітря, для його підігріву до 80 °С перед розширенням дозволило підвищити індикаторну роботу циклу і середній індикаторний тиск на 11 % при загальному збільшенні ККД енергоперетворення всієї установки до 46 %;

– енергетичних установок отримання та безпечного акумулювання водню із сірководню Чорного моря як сірководневого детандера, що за умови добового видобутку морської води 100 м³/добу, діапазону вмісту сірководню 2...10 м³/м³ та залежно від глибини занурення 250...1000 м дало змогу отримати 0,20...2,55 кВт енергії, що складає близько 2,14...4,96 % від загальної ефективної потужності енерготехнологічної установки з видобутку водню;

– енергетичних установок із ДВЗ як утилізатора енергії відпрацьованих газів, що дає змогу збільшити загальну потужність енергетичної установки до 37 %.

6. Розроблено загальні основи конструювання й компоновання роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху (розглянуто схеми підведення робочого тіла, конструкцію основних вузлів і деталей, вибір способу ущільнення та конструктивного виконання механізму руху), практичні рекомендації щодо вибору необхідних матеріалів для виготовлення деталей, а також установа необхідного зазору між сполучними парами з урахуванням робочої температури деталей, що забезпечило спрощення технології виготовлення, збирання, обслуговування й експлуатації та дозволило оцінити працездатність двигуна, зміну його маси і величини втрат робочого тіла.

7. Розроблено програму проведення стендових випробувань, а також послідовності й тривалості проведення обкатки і контрольних випробувань роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху при серійному виробництві, що забезпечило реалізацію впровадження двигунів нового типу на різних об'єктах промисловості.

8. Отримані результати дисертації впроваджено: при проектуванні та реалізації проектів енергетичних установок з роторно-поршневими двигунами різного призначення на Машинобудівному підприємстві «Мотор-Плюс»; при виконанні проектних робіт і оцінці енергетичних й економічних показників серії пневмодвигунів (12РПД 4,4/1,75; 20РПД 4,5/1,75; 20РПД 3,0/1,15) на Машинобудівному підприємстві «МОТОСЕРВІСПРОМ»; при модернізації пневматичного приводу суднового крана з вантажопідйомністю до 1 т на підприємстві «ТЕПЛОМАШПРОГРЕС»; при розробці проектної документації вібраційного живильника для випуску і доставки руди на підприємстві «БІЗНЕС-СЕРВІС-БЮРО»; при розробці проекту та проведенні модернізації платформного електричного візка ЕТ-2054 (електрокар) вантажопідйомністю 2 т на підприємстві «ШИПСЕРВІС»; при підготовці технічної документації з модернізації виробничого обладнання на підприємствах «АВИАФИНСЕРВИС» і «Енерготехнологія», а також у навчальному процесі кафедри ДВЗ У та ТЕ при підготовці бакалаврів і магістрів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова в курсах лекцій, при проведенні практичних, індивідуальних та лабораторних занять з дисциплін «Двигуни нетрадиційних схем», «Суднові допоміжні механізми», а також при виконанні розрахункових завдань, у курсовому і дипломному проектуванні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових спеціалізованих виданнях, рекомендованих переліком ДАК МОН України та в іноземних фахових виданнях, включених до Міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Mytrofanov O. S. Analysis of the development and current state of the use of power plants based on pneumatic engines. *Shipbuilding & marine infrastructure* [Фахове видання України]. 2018. № 2 (10). С. 14–26. **Видання входить до бази даних Index Copernicus International.**

2. Mytrofanov O., Poznanskyi A., Proskurin A., Shabalin Yu. Research into the recovery of exhaust gases from ICE using an expansion machine and fuel conversion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4/5 (100). P. 32–38. **Видання входить до МНБ Scopus.** Автором розроблена схема енергетичної установки з використанням роторно-поршневої розширювальної машини як першого ступеня утилізації тепла відпрацьованих газів. Отримані залежності параметрів роботи роторно-поршневого двигуна від витрати робочого тіла, а також залежності ступеня конверсії етанолу від температури реакції. Виконана загальна оцінка ефективності енергетичної установки з глибокою утилізацією тепла відпрацьованих газів.

3. Тимошевський Б. Г., Митрофанов О. С. Дослідження параметрів роботи роторно-поршневого двигуна. *Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал* [Фахове видання України]. 2019. № 1. С. 3–8. **Видання входить до Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA), Google Scholar.** Автором виконано оцінку та аналіз впливу основних параметрів роторно-поршневого двигуна нової конструкції на ефективність енергоперетворення, а також отримано залежності зміни індикаторних показників двигуна, таких, як потужність, питома витрата повітря, середній тиск й індикаторний ККД.

4. Ткач М. Р., Митрофанов О. С., Познанський А. С. Особливості кінематики роторно-поршневого двигуна нової конструкції. *Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал* [Фахове видання України]. 2019. № 2. С. 31–35. **Видання входить до Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA), Google Scholar, WorldCa, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), DRIVER.** Автором виконано кінематичний аналіз схеми руху роторно-поршневого двигуна нової конструкції, запропоновано залежності визначення безрозмірних переміщення, швидкості та прискорення поршня залежно від кута повороту ротора, а також визначено коефіцієнти гармонічного ряду в зазначених залежностях.

5. Показники сірководневої роторно-поршневої розширювальної машини у складі енерготехнологічної установки / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов, А. Ю. Проскурін, Ю. М. Галинкін. *Авиационно-космическая техника и технология* [Фахове видання України]. 2019. № 8 (160). С. 5–9. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автором визначена ефективність використання роторно-поршневого двигуна як розширювальної машини у складі перспективної енерготехнологічної установки видобування сірководню з глибин Чорного моря. Установлено потужності розширювальної машини, а також отримано індикаторні діаграми та залежності зміни індикаторних показників залежно від газовмісту сірководню у морській воді та глибини занурення трубопроводу.

6. Митрофанов О. С. Математична модель робочого циклу роторно-поршневого двигунів. *Shipbuilding & marine infrastructure* [Фахове видання України]. 2019. № 1 (11). С. 58–65. **Видання входить до бази даних Index Copernicus International.**

7. Митрофанов О. С. Стенд для випробування та дослідження роторно-поршневих двигунів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова* [Фахове видання України]. 2019. № 1 (475). С. 51–57. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

8. Митрофанов О. С. Дослідження впливу параметрів робочого процесу на ефективні показники роторно-поршневого двигуна. *Shipbuilding & marine infrastructure* [Фахове видання України]. 2020. № 1 (13). С. 17–24. **Видання входить до бази даних Index Copernicus International.**

9. Mytrofanov O. S., Proskurin A. Yu., Poznanskyi A. S. Experimental research of the prototype of the rotary-piston engine of the transport hybrid power plant. *Shipbuilding & marine infrastructure* [Фахове видання України]. 2020. № 2 (14). С. 38–45. **Видання входить до бази даних Index Copernicus International.** Автором проведено експериментальні дослідження дослідного зразка роторно-поршневого двигуна, а також виконано обробку та узагальнення експериментальних даних. Отримано й проаналізовано основні експлуатаційні характеристики та встановлено діапазон зміни ефективних показників і крутного моменту пневмодвигуна залежно від його обертів для різних значень тиску повітря у впускному ресивері.

10. Митрофанов О. С. Перспективи використання роторно-поршневих двигунів в енергетичних установках акумулювання електричної енергії. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова* [Фахове видання України]. 2020. № 1 (479). С. 35–41. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

11. Mytrofanov O. S., Proskurin A. Yu. Increasing energy efficiency of natural gas reduction due to use of rotary piston engines. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова* [Фахове видання України]. 2020. № 3 (481). С. 40–47. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).** Автором розроблена схема автоматизованої газорозподільної станції з утилізацією надлишкового тиску природного газу, а також виконана оцінка об'ємів утилізованої енергії. Отримано залежності зміни ефективних показників роторно-поршневого детандера та його індикаторні діаграми залежно від робочого тиску газу.

12. Тимошевський Б. Г., Митрофанов О. С., Познанський А. С., Проскурін А. Ю. Аналіз конструкції та технології виготовлення перспективних роторно-поршневих двигунів. *Авиационно-космическая техника и технология* [Фахове видання України]. 2020. № 4 (164). С. 28–37. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автором проаналізовано особливості конструкції та принцип роботи різних типів механізмів руху перспективних роторно-поршневих двигунів. Виконана оцінка надійності та технологічності виготовлення нових конструкцій механізму руху.

13. Ткач М. Р., Проскурін А. Ю., Митрофанов О. С., Галинкін Ю. М. Підвищення ефективності технології отримання водню шляхом використання регенераційного контуру з роторно-поршневою розширювальною машиною. *Авиационно-космическая техника и технология* [Фахове видання України]. 2020. № 7 (167). С. 12–18. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автором виконана оцінка ефективності використання роторно-поршневого двигуна 20РПД-4,4/1,75 як розширювальної машини у складі енерготехнологічної установки виробництва водню. Визначена частка потужності регенераційного контуру, яка припадає на розширювальну машину.

14. Ткач М. Р., Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю., Познанський А. С. Дослідження параметрів роботи роторно-поршневого пневмодвигуна транспортної енергетичної установки. *Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал* [Фахове видання України]. 2020. № 1. С. 28–35. **Видання входить до Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA), Google Scholar, WorldCa, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), DRIVER.** Автором розроблена принципова схема екологічно чистої транспортної енергетичної установки на базі роторно-поршневого пневмодвигуна РПД-4,4/1,75. Визначені зовнішня швидкісна характеристика, складові силового балансу та динамічного фактора транспортного засобу для всіх передач і швидкостей руху для діапазону значень робочого тиску повітря у впускному ресивері 1,2...2,0 МПа. Виконана оцінка шляху та часу розгону.

15. Тимошевський Б. Г., Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю., Познанський А. С. Вибір зазорів циліндро-поршневих сполучень роторно-поршневих двигунів. *Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал* [Фахове видання України]. 2020. № 2. С. 3–8. **Видання входить до Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA), Google Scholar, WorldCa, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), DRIVER.** Автором проаналізовано вплив величини встановленого зазору циліндро-поршневого сполучення роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 на його працездатність і надійність. Розроблено практичні рекомендації щодо вибору оптимального зазору залежно від матеріалу сполучних пар (поршень і робочий циліндр) та їх робочої температури.

16. Mytrofanov O., Proskurin A., Poznanskyi A. Determining the effective indicators of a rotary-piston motor operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5/8 (107). P. 80–85. **Видання входить до МНБ Scopus.** Автором проведено експериментальні дослідження дослідного зразка роторно-поршневого двигуна РПД-4,4/1,75, а також виконано обробку та узагальнення експериментальних даних. Отримано залежності зміни ефективних та експлуатаційних показників роботи пневмодвигуна та діапазони обертів, що відповідають максимальній ефективності. Визначено зміну економічних показників двигуна (питома ефективна витрата робочого тіла та ефективний адіабатний ККД).

17. Mytrofanov O., Proskurin A. Determining a change in the compressed air temperature during the operation of a rotary piston engine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6/8 (108). P. 25–31. **Видання входить до МНБ Scopus.** Автором проведено експериментальні дослідження зміни температури повітря в енергетичній установці з дослідним зразком роторно-поршневого пневмодвигуна РПД-

4,4/1,75, обробку та узагальнення експериментальних даних, визначення залежностей зміни температури робочого тіла на всіх етапах енергоперетворення; виконано оцінку необхідної кількості енергії для підігріву повітря на вході у впускний ресивер.

18. Mytrofanov O., Proskurin A. Analysis of Efficiency of Rotary Piston Engines Use at Power Plants for Surplus Electrical Energy Accumulation. *Problemele Energeticii Regionale*. 2020. Vol. 4 (48). P. 58–68. **Видання входить до МНБ – Web Of Science Core Collection.** Автором розроблено принципові схеми установок акумулювання надлишкової електричної енергії у вигляді стиснутого повітря, а також виконано оцінку ефективності застосування роторно-поршневих двигунів у їх складі. Отримані залежності зміни відносної ефективної потужності та відносного крутного моменту, а також температури повітря в роторно-поршневих двигунах. Виконана оцінка впливу підігріву стиснутого повітря перед розширенням у роторно-поршневому двигуні на ефективність енергоперетворення акумуляторної установки.

19. Mytrofanov O. S., Proskurin A. Yu. Experimental study of the influence of the degree of filling on the effective indicators of a rotary piston engine. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова [Фахове видання України]*. 2020. № 4 (482). С. 29–35. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).** Автором проведено експериментальні дослідження та отримано залежності зміни ефективних показників роботи роторно-поршневого двигуна від ступеня наповнення робочого циліндра, а також виконано аналіз впливу ступеня наповнення на ефективність енергоперетворення стиснутого повітря.

20. Mytrofanov O., Proskurin A. Analysis of compressed air energy conversion processes in a rotary piston air motor. *Problemele Energeticii Regionale*. 2021. Vol. 1 (49). P. 39–48. **Видання входить до МНБ – Web Of Science Core Collection.** Автором проведено експериментальні дослідження, а також виконано обробку та узагальнення експериментальних даних. Ексергетичним методом термодинамічного аналізу визначено ефективність енергоперетворення (ексергетичний ККД) та розподіл ексергетичних потоків процесу розширення стиснутого повітря у робочому циліндрі роторно-поршневого двигуна. Виконана оцінка енергетичних втрат у двигуні.

21. Mytrofanov O., Proskurin A., Poznanskyi A. Research of rotary piston engine use in transport power plants. *Transport problems*. 2021. Vol. 16, Issue 1. P. 165–178. **Видання входить до МНБ Scopus.** Автором розроблена принципова схема гібридної транспортної енергетичної установки на базі роторно-поршневого пневмодвигуна. Визначені зовнішня швидкісна характеристика пневмодвигуна, складові силового балансу та динамічного фактора, а також виконана оцінка шляху й часу розгону. Виконана оцінка запасу ходу гібридного автомобіля на стиснутому повітрі.

Монографії

Mytrofanov O. S., Proskurin A. Yu. Transport power plants with rotary piston air engines. Prospects and priorities of research in science and technology : collective monograph. Vol. 2. Riga : Baltija Publishing, 2020. P. 106–123. Автору належать розробка принципових схем транспортних енергетичних установок з роторно-поршневими двигунами, визначення їх ефективності та показників динамічності, а також параметрів розгону.

Патенти на винахід за темою дисертаційної роботи

Поршнева машина : пат. на винахід України. № 120489 / О. С. Митрофанов, Ю. В. Шабалін, Т. Ф. Бірюк, Л. О. Єфеніна; заявник та власник патента ТОВ «Мотор-Плюс», Митрофанов О. С., Шабалін Ю. В., Бірюк Т. Ф., Єфеніна Л. О.; заявл. № а201902189 10.09.2019 р.; опубл. 10.12.2019 р. Бюл. № 23.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Тимошевський Б. Г., Митрофанов О. С., Познанський А. С., Проскурін А. Ю. Експериментальний стенд для дослідження дослідного зразка роторно-поршневого двигуна РПД-4,4/1,75. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали XI Міжнарод. наук.-техн. конф. : в 2 ч. Ч. 1. Миколаїв : НУК, 2020. С. 313–315. *Автором розроблено експериментальний стенд та систему вимірювання для дослідження роторно-поршневих двигунів.*

2. Ткач М. Р., Познанський А. С., Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю. Особливості конструкцій перспективних роторно-поршневих двигунів. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали XI Міжнарод. наук.-техн. конф. : в 2 ч. Ч. 1. Миколаїв : НУК, 2020. С. 316–318. *Автором проаналізовано особливості конструкції та технології виготовлення роторно-поршневих двигунів.*

3. Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю., Познанський А. С. Експериментальні дослідження ефективних показників роторно-поршневих двигунів. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. Миколаїв : НУК, 2020. С. 155–159. *Автором розроблено експериментальний стенд і проведено експериментальні дослідження дослідного зразка роторно-поршневого двигуна, а також виконано обробку та узагальнення експериментальних даних.*

АНОТАЦІЯ

Митрофанов О. С. Ефективність роторно-поршневих двигунів із шарнірно-кулачковим механізмом перетворення руху. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності використання енергетичного потенціалу стиснутого робочого тіла шляхом раціональної організації робочого процесу перетворення потенційної енергії в механічну роботу, а саме забезпеченням збільшення повноти розширення, зменшенням зворотного стиснення та газодинамічних втрат робочого тіла у машинах об'ємної дії в енергетичних установках на їх базі. За результатами проведених науково-технічних досліджень розроблено концепцію підвищення ефективності перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла у механічну роботу машин об'ємної дії шляхом поєднання переваг організації робочого процесу ротаційних та поршневих двигунів, а саме забезпеченням регулювання початку й тривалості процесу наповнення, збільшенням повноти розширення робочого тіла та зниженням мертвого об'єму й газодинамічних втрат при газообміні, що реалізується за рахунок за-

стосування нових конструктивних рішень механізму руху і газообміну у вигляді шарнірно-кулачкового механізму руху. Це дало змогу зменшити питому масу на 17...50 %, збільшити відношення пускового крутного моменту до номінального на 11 %, зменшити питому витрату робочого тіла на 15...24 % у порівнянні із серійними поршне-вими машинами об'ємної дії із золотниковим газорозподілом та кривошипно-шатунним механізмом руху. Наукове значення отриманих результатів полягає у розвитку основ та принципів перетворення низькопотенційної енергії стиснутого робочого тіла в механічну роботу за рахунок поєднання особливостей і переваг організації робочого процесу різних типів двигунів, що є теоретичною базою для реалізації концепції підвищення ефективності машин об'ємної дії. Практичне значення виконаної роботи полягає в нових розроблених і науково-обґрунтованих основах проектування та створення високоефективних роторно-поршневих двигунів об'ємної дії із шарнірно-кулачковим механізмом руху, а також енергетичних установок різного призначення на їх базі, що має істотне значення для розвитку промисловості. Отримані результати є теоретичною основою подальших наукових досліджень різних енергетичних установок на базі роторно-поршневих двигунів, технічного вдосконалення та підвищення енергоефективності, а розроблені загальні основи конструювання роторно-поршневих двигунів дають можливість створення високоефективних двигунів різного цільового призначення.

Ключові слова: роторно-поршневий двигун об'ємної дії; шарнірно-кулачковий механізм руху; механізм газорозподілу; стиснуте робоче тіло; робочий процес.

АННОТАЦИЯ

Митрофанов А. С. Эффективность роторно-поршневых двигателей с шарнирно-кулачковым механизмом преобразования движения. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова. – Николаев, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной проблемы повышения эффективности использования энергетического потенциала сжатого рабочего тела путем рациональной организации рабочего процесса преобразования потенциальной энергии в механическую работу, а именно обеспечением увеличения полноты расширения, уменьшением обратного сжатия и газодинамических потерь рабочего тела в машинах объемного действия в энергетических установках на их базе. По результатам проведенных научно-технических исследований разработана концепция повышения эффективности преобразования низкопотенциальной энергии сжатого рабочего тела в механическую работу машин объемного действия путем объединения преимуществ организации рабочего процесса ротационных и поршневых двигателей, а именно обеспечением регулирования начала и продолжительности процесса наполнения, увеличением полноты расширения рабочего тела и снижением мертвого объема и газодинамических потерь при газообмене, что реализуется за счет применения новых конструктивных решений механизма движения и газообмена в виде шарнирно-кулачкового механизма движения. Это позволило уменьшить удельную массу на

17...50 %, увеличить отношение пускового крутящего момента к номинальному на 11 %, уменьшить удельный расход рабочего тела на 15...24 % по сравнению с серийными поршневыми машинами объемного действия с золотниковым газораспределением и кривошипно-шатунным механизмом движения. Научное значение полученных результатов заключается в развитии основ и принципов преобразования низкопотенциальной энергии сжатого рабочего тела в механическую работу за счет сочетания особенностей и преимуществ организации рабочего процесса различных типов двигателей, что является теоретической базой для реализации концепции повышения эффективности машин объемного действия. Практическое значение состоит в новых разработанных и научно обоснованных основах проектирования и создания высокоэффективных роторно-поршневых двигателей объемного действия с шарнирно-кулачковым механизмом движения, а также энергетических установок различного назначения на их базе, что имеет существенное значение для развития промышленности. Полученные результаты являются теоретической основой дальнейших научных исследований различных энергетических установок на базе роторно-поршневых двигателей, технического совершенствования и повышения энергоэффективности, а разработанные общие основы конструирования роторно-поршневых двигателей дают возможность создавать высокоэффективные двигатели различного целевого назначения.

Ключевые слова: роторно-поршневой двигатель объемного действия; шарнирно-кулачковый механизм движения; механизм газораспределения; сжатое рабочее тело; рабочий процесс.

ABSTRACT

Oleksandr S. Mytrofanov. The efficiency of rotary-piston engines with hinge-cam motion conversion mechanism. – Qualifying scientific work as a manuscript.

A thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.05.03 – Engines and Power Plants. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ministry of Education and Science of Ukraine, Mykolaiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and applied problem of increasing the efficiency of using the energy potential of compressed working fluid by rational organization of the working process of potential energy converting into mechanical work, namely, ensuring the increase in the expansion completeness, reducing the reverse compression and gas-dynamic losses of the working fluid in the volumetric machines in power plants based on them. In the course of the study, the analysis and systematization of the design features, the principle of operation and the areas of application of various types of serial machines of volumetric and dynamic action, as well as possible alternative machines of volumetric action and constructive ideological solutions in them were carried out. A number of operational advantages and disadvantages of their use in various industries are highlighted.

An experimental power plant was developed on the basis of a prototype of a rotary-piston positive displacement engine with hinge-cam motion mechanism, as well as a research program. The regularities of changes in the energy and economic indicators of the operation of a rotary-piston engine with hinge-cam motion mechanism were experimentally

determined, and the effect on them of the operating parameters of the engine (speed and working pressure) and regulation of the duration of the filling process was investigated.

A mathematical model has been developed for calculating the working cycle of a rotary piston positive displacement engine with hinge-cam motion mechanism, which involves taking into account the influence of the features of the combination of the advantages of organizing the working process of rotary and piston engines due to the design of the movement and gas exchange mechanism.

The analysis and generalization of the results of the study of the efficiency of using positive displacement rotary-piston engines with hinge-cam motion mechanism in existing and prospective power plants for various purposes are carried out.

Based on the results of scientific and technical research, a concept has been developed to improve the efficiency of converting low-potential energy of a compressed working fluid into mechanical work of positive displacement machines by combining the advantages of organizing the working process of rotary and reciprocating engines, namely by ensuring regulation of the beginning and duration of the filling process, increasing the completeness of expansion of the working fluid and a decrease in dead volume and gas-dynamic losses during gas exchange, which is realized through the use of new design solutions for the movement and gas exchange mechanism in the form of hinge-cam motion mechanism. This made it possible to reduce the specific gravity by 17...50 %, increase the ratio of the starting torque to the nominal torque by 11 %, and reduce the specific consumption of the working fluid by 15...24 % compared to serial piston displacement machines with spool valve timing and crank connecting rod motion mechanism.

The scientific significance of the obtained results lies in the development of the foundations and principles of converting low-potential energy of the compressed working fluid into mechanical work by combining the features and advantages of organizing the working process of various types of engines, which is the theoretical basis for implementing the concept of increasing the efficiency of volumetric machines.

The practical significance lies in the newly developed and scientifically grounded foundations for the design and creation of highly efficient rotary-piston positive displacement engines with hinge-cam motion mechanism, as well as power plants for various purposes based on them, which is essential for the development of industry. The results obtained are the theoretical basis for further scientific research of various power plants based on rotary piston engines, technical improvement and energy efficiency increase, and the developed general foundations for the design of rotary piston engines make it possible to create highly efficient engines for various purposes.

Keywords: rotary-piston volumetric engine; hinge-cam motion mechanism; gas distribution mechanism; compressed working fluid; working process.

Митрофанов Олександр Сергійович

**ЕФЕКТИВНІСТЬ РОТОРНО-ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ
ІЗ ШАРНІРНО-КУЛАЧКОВИМ МЕХАНІЗМОМ ПЕРЕТВОРЕННЯ РУХУ**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю
05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Підписано до друку 06.08.2021. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам. № 28/21.

Видавець і виготівник ФОП Турубара В.В.
вул. Наваринська, 5/17, м. Миколаїв, 54001, тел.: (067) 800-70-70
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4626 від 9.10.2013