

УДК 621.432

doi: 10.32620/aktt.2020.4.04

**Б. Г. ТИМОШЕВСЬКИЙ, О. С. МИТРОФАНОВ,
А. С. ПОЗНАНСЬКИЙ, А. Ю. ПРОСКУРІН**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ РОТОРНО-ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ

У статті розглянуто основні напрямки розвитку створення нових сучасних та вдосконалення існуючих роторно-поршневих двигунів. Встановлено необхідність у проведенні системного аналізу існуючих подібних конструкцій двигунів з метою відокремлення та систематизації їх переваг й недоліків на стадії проектування. В якості аналізу конструкцій та технологій виготовлення існуючих найбільш перспективних роторно-поршневих двигунів розглянуті схеми турбокомпресорного типу, з рухомим блоком циліндрів, двигунів де згоряння проходить за межами робочого циліндру, барабанно-поршневого типу з рухомими камерами згоряння, ротативного детандеру та інші. Встановлено, що будова корпусу роторно-поршневих двигунів з внутрішньою циліндричною поверхнею, в якому розташований ротор з робочими циліндрами, дозволяє створювати економічні і компактні двигуни. Така будова двигунів дозволяє зменшити вібрацію і зробити їх безпечнішими в роботі. Проведено порівняння механізмів руху існуючих роторно-поршневих двигунів. На основі аналізу існуючих схем та конструкцій сучасних роторно-поршневих двигунів спроектовано зразок роторно-поршневого двигуна нової конструкції 12РПД-4,4/1,75. Подані конструкція та основні параметри нового зразка роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 з регульованим золотниковим розподілом повітря. Двигун має дванадцять рівномірно розміщених циліндрів, що забезпечує рівноваженість двигуна та можливість пуску при будь-якому положенні ротора. Конструкція спроектованого двигуна передбачає наявність центрального регулюючого кулачкового вала, поворот якого дає змогу регулювати фази газорозподілу та режими роботи двигуна за рахунок ступеня наповнення циліндра у досить широкому діапазоні. Особливістю конструкції двигуна також є те, що регулюючий кулачок дає змогу змінювати напрямки обертання центрального ротора. Встановлено, що конструкція механізму руху двигуна 12РПД-4,4/1,75 є простішою за будовою та технологією виробництва, а також надійнішою порівняно з подібними існуючими роторно-поршневими двигунами.

Ключові слова: роторно-поршневий двигун; кривошипно-шатунний механізм; механізму руху; двигун внутрішнього згоряння; ККД.

Вступ

Розвиток енергетичного машинобудування напряму пов'язаний з розробкою та створенням нових зразків двигунів або вдосконаленням вже існуючих. Впровадження нового типу двигуна, апарату або пристрою залежить від економічної доцільності, тобто економічного ефекту від впровадження. Перш за все, безпосередній вплив на це має саме складність конструкції від якої вже залежить більшість інших факторів. Так, наприклад, від конструкції двигуна залежить складність технологічного процесу виготовлення та відповідно і ціна. Конструктивно складні механізми є менш надійними й довговічними, а також більш дорогі в обслуговуванні та експлуатації.

Таким чином, не залежно від сфери застосування двигуна, на стадії проектування нового опитного зразка необхідно проводити системний аналіз існуючих подібних конструкцій з метою відокремлення та систематизації переваг й недоліків. Це

дасть змогу врахувати попередній досвід проектування та виділити напрямок подальшого вдосконалення.

1. Постановка задачі

Наряду з класичною схемою механізму руху (кривошипно-шатунним механізмом) існує велика кількість різноманітних схем, які мають свої переваги та недоліки. Завдяки своїй малій масі та габаритам, низькому рівню вібрації, високим динамічним характеристикам роторно-поршневі двигуни можуть скласти достатньо високу конкуренцію поршневим двигунам малої потужності з класичною схемою КШМ. Роторні двигуни можуть працювати, як двигун внутрішнього згоряння [1–4], або як пневмодвигун, використовуючи енергію стиснутого газу [5–9].

Достатньо вивченим та розповсюдженим є роторно-поршневий двигун Ванкеля, який знайшов своє застосування в транспортних енергетичних установках [10–14]. Так наприклад, фірми Mazda

Motor Corporation має значний опит в проектуванні, виготовленні та застосуванні роторних двигунів внутрішнього згоряння на автомобілях.

Однак поряд з перевагами роторні двигуни мають і деякі недоліки. Відповідно до основних недоліків можна віднести високу вимогу щодо точності виготовлення та гірше ущільнення робочого простору. Вирішення цих та інших недоліків можна за рахунок вдосконалення існуючих конструкцій, створення принципово нових двигунів, застосування більш точного обладнання при виготовленні тощо. Вибір напрямку вдосконалення напряму пов'язаний з вихідною конструкцією двигуна та її досконалістю. Так, наприклад, роботи [15 – 17] присвячені саме вдосконаленню ущільнення робочих порожнин і тим самим покращенню ефективних показників. Інші дослідники рухаються у напрямку вдосконалення механізму руху та його елементів [18, 19].

До найбільш важливих елементів конструкції відомих роторно-поршневих двигунів можна віднести механізми руху та газорозподілу, а також ущільнення робочих порожнин. Саме ці елементи мають найбільший вплив на надійність та ефективність роботи двигуна.

Основним завданням механізму руху роторно-поршневих двигунів є перетворення зворотно-поступового руху поршня в обертальний рух вихідного валу. Виконуючи свою основну функцію, конструкція механізму руху повинна бути перш за все надійною, безвідмовною, мати низькі механічні втрати, забезпечувати мінімальні габарити двигуна, а також бути простою у виготовленні, зборці та обслуговуванні.

Не менш важливим елементом роторно-поршневого двигуна є механізм газорозподілу. Крім вимог які висуваються до механізму руху, механізм газорозподілу повинен забезпечити мінімальні втрати робочого тіла, можливість регулювання режимів роботи двигуна (за рахунок змінення ступеня наповнення), а також мінімальне значення відносного мертвого об'єму.

Саме тому, аналіз, відокремлення та вибір найбільш прийнятних схем механізму руху й газорозподілу при проектуванні нових зразків двигунів є вкрай важливою задачею.

Мета даної роботи на основі літературних джерел проаналізувати, а також систематизувати переваги і недоліки конструктивних схем та технології виготовлення перспективних зразків роторно-поршневих двигунів.

2. Виклад основного матеріалу

В роботі [12] представлена конструкція роторно-поршневого двигуна, що являє собою гібрид по-

ршневого двигуна внутрішнього згоряння і газової турбіни. Принцип даної конструкції полягає в тому, що як і у газової турбіни на одному валу встановлено і жорстко закріплені ротор компресора і ротор турбіни (рис. 1).

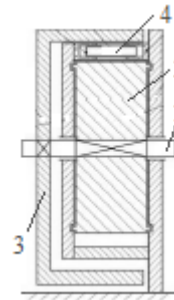


Рис. 1. Принципова схема роторного двигуна внутрішнього згоряння турбокомпресорного типу [12]: 1 – вал двигуна; 2 – ротор компресора; 3 – ротор турбіни; 4 – камера згоряння

Принцип роботи роторного двигуна аналогічний поршневому двигуну, тобто на початку йде такт впуску, потім стиснення робочої суміші в камері згоряння, далі займання робочої суміші в камері згоряння і її випуск в робочу порожнину турбіни, де і відбувається робочий хід, і останнє, випуск відпрацьованих газів. Всі такти роботи даного двигуна відбуваються одночасно за один оборот валу двигуна, що призводить до зниження «марних» витрат і підвищення ККД. Газорозподільний механізм золотникового типу. За рахунок цього забезпечується ущільнення робочого циліндру. Запропонована конструкція газорозподільного механізму має просту кінематичну схему, оскільки всі її деталі здійснюють обертальний рух.

В патенті [1] представлено будову роторно-поршневого двигуна з блоком циліндрів, що обертаються, в якому виконані циліндричні камери згоряння для розміщення в них поршнів та шестерно-кривошипно-шатунного силового механізму (рис. 2)

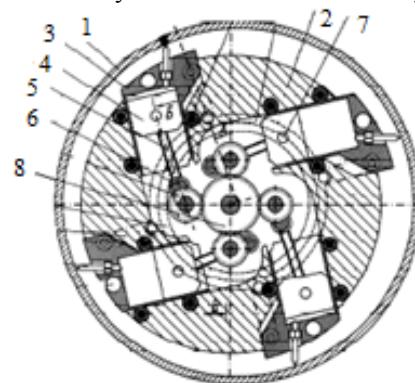


Рис. 2. Конструктивна схема роторно-поршневого двигуна внутрішнього згоряння [1]: 1 – корпус; 2 – блок циліндрів; 3 – плаваючий циліндр; 4 – поршень; 5 – шатун; 6 – кривошип; 7 – поршневий палець; 8 – блок шестерень

Даний двигун відрізняється від подібних тим, що в ньому додатково введені плаваючі циліндри 3. Кожний плаваючий циліндр складається з гільзи та асиметричної кришки циліндру й встановлений з можливістю його зворотно-поступального руху в відповідній циліндровій камері блоку циліндрів 2. Така конструкція двигуна забезпечує подовжене розширення газів в робочих камерах плаваючих циліндрів 3, орієнтування бокових сил, які діють на циліндро-поршкову групу, в сторону обертання блока циліндрів на початковому та кінцевому етапах тактів «розширення», що забезпечує їх взаємною компенсацію. За рахунок цього підвищується економічність двигуна (підвищення потужності без збільшення подачі палива), зменшуються втрати крутного моменту, а також представляється можливість розвивати підвищені обороти порівняно з двигунами внутрішнього згоряння, які мають класичну схему кривошипно-шатунного механізму (за рахунок передаточного відношення рухомих та нерухомих шестерень).

В патенті [2] представлено роторно-поршневий двигун, в якому згоряння повітряно-газової суміші відбувається не в циліндрах (рис. 3). Циліндри 3 з поршнями 4 забезпечують додаткову камеру згоряння стисненою повітряно-газовою сумішшю. Газ, що виходить після запалювання з камери згоряння, розташованої поза ротором, призводить в рух ротор 2. Завдяки розподілу процесів стиснення і згоряння підвищується ККД, зменшується вібрація і підвищується ресурс двигуна. Такий тип двигуна внутрішнього згоряння відрізняється тим, що він має менші габарити, легше за вагою, має високу потужність і незважаючи на це економічний, має низьку витрату палива, при цьому може використовуватися паливо з високою температурою займання. Даний двигун має кругову форму ротора і має зміщену від центру вісь обертання. Це виключає складний еліпсоїдний рух і забезпечує гарне ущільнення окремих робочих камер.

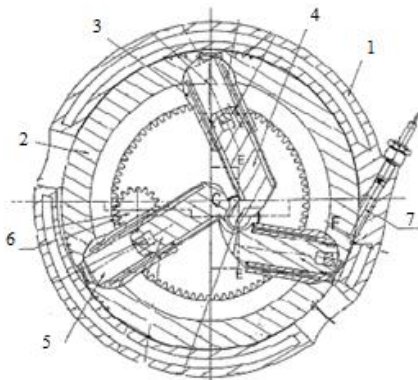


Рис. 3. Конструктивна схема роторно-поршневого двигуна [2]: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – циліндр; 4 – поршень; 5 – робоча камера; 6 – зубчатий вінець; 7 – камера згоряння

Конструкцію роторного двигуна барабанно-поршневого типу з рухомими камерами згоряння (рис. 4) наведено в патенті [3]. У циліндричному корпусі 1 розташований барабан 3 з можливістю його обертання в корпусі навколо центральної осі двигуна. На поверхні барабана виконані два і більше отвори, що утворюють робочі циліндри 5. Кривошипно-шатунний механізм реалізований у вигляді класичного. Рух поршня 6 приводиться в дію за допомогою обертання колінчатого валу 4, з'єднаного з поршнем 6 шатуном 7. Поверхня барабана має технологічні поглиблення для зменшення тертя при роботі двигуна і виступаючу частину у вигляді доріжки по всій поверхні барабана, що служить для закривання отворів в циліндричному корпусі та ущільнення робочого циліндру. Результатом такої конструкції є зниження складності, підвищення надійності та стабільності роботи, збільшення потужності, зменшення розмірів і маси двигуна.

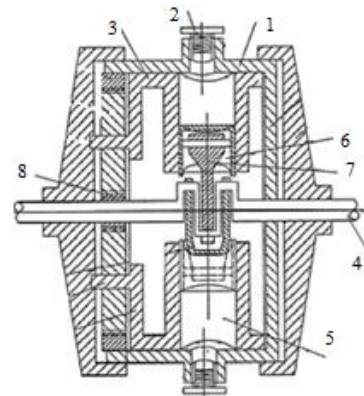


Рис. 4. Конструктивна схема роторного двигуна барабанно-поршневого типу з рухомими камерами згоряння [3]: 1 – корпус; 2 – компресійні втулки; 3 – барабан; 4 – колінчатий вал; 5 – робочий циліндр; 6 – поршень; 7 – шатун; 8 – блок шестерень

В патенті [4] представлено варіант роторно-поршневого двигуна, в якому робочі циліндри з поршнями розташовані і жорстко закріплені всередині ротора (рис. 5). Механізм руху поршнів 4, виконаний у вигляді шатунів 5, шарнірно з'єднаних з поршнями циліндрів і встановлених з можливістю обертання. Шатуни робочих циліндрів 5 виконані дугоподібної форми, а осі робочих циліндрів зміщені в протилежні сторони від осі обертання ротора 2, що дозволяє зменшити горизонтальну складову сили тиску поршня на стінку циліндра, підвищує крутний момент, а отже, ефективність роботи роторно-поршневого двигуна.

Виконання на внутрішній поверхні корпусу 1 ексцентрично виконаної розточки, розташованої в зоні впускного каналу, дозволяє надійно проводити ущільнення робочих циліндрів при впуску повітря в нагнітальний циліндр і перепуску його в нагнітальну камеру.

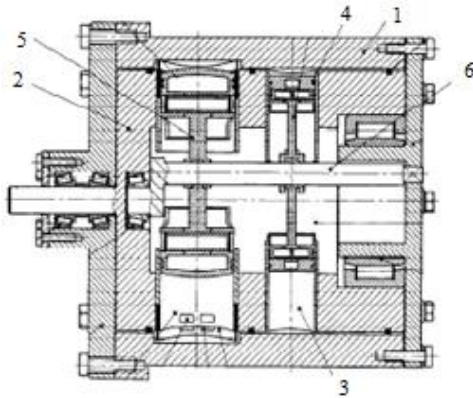


Рис. 5. Конструктивна схема роторно-поршневого двигуна [4]: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – циліндр; 4 – поршень; 5 – шатун; 6 – колінчатий вал

Дана конструкція двигуна передбачає зменшення сил інерції, вібрації, підвищення надійності запуску двигуна, спрощення і здешевлення системи газорозподілу.

Конструкцію ротативного детандеру, для перетворення потенціальної енергії стисненого газу в механічну енергію, представлено в патенті [5]. Детандер (рис. 6) включає кільцевий блок циліндрів, розміщені в циліндрах поршні, механізм зворотно-поступального руху поршнів і циліндрів та клапанний пристрій. Кривошипно-шатунний механізм даної конструкції схожий на КШМ класичного двигуна внутрішнього згорання.

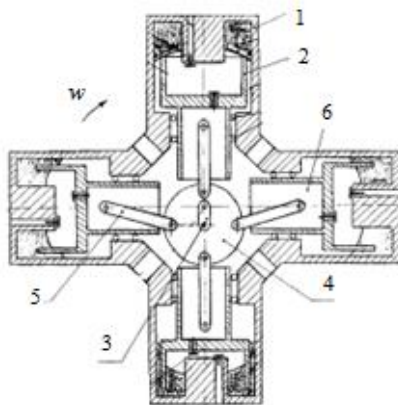


Рис. 6. Конструктивна схема ротативного детандеру [5]: 1 – кільцевий блок циліндрів; 2 – поршень; 3 – нерухомий кривошип; 4 – диск; 5 – шатун; 6 – крейцкопф

Поршні 2 розміщені своїми відкритими торцями всередину циліндрів 1 з гарантованим зазором між поршнями та циліндрами. Зазори і порожнини даного ротативного детандеру заповнені рідиною, що компенсує за рахунок різниці статичних тисків стовпів рідини в порожнинах і в зазорах різницю тиску газу всередині поршнів. У запропонованій конструкції детандера відсутнє тертя ковзання між

поршнями і циліндрами, що підвищує його механічний ККД.

На машинобудівному підприємстві ТОВ «Мотор-Плюс» спроектовано зразок роторно-поршневого двигуна нової конструкції 12РПД-4,4/1,75 (рис. 7). Основні параметри двигуна 12РПД-4,4/1,75 наведені в табл. 1. При проектуванні та створенні роторно-поршневого двигуна використано досвід підприємства у створенні подібних типів двигунів [6]. У конструкцію нового роторно-поршневого двигуна внесено значний ряд принципів змін та враховано всі недоліки, що підтверджено патентом [7].

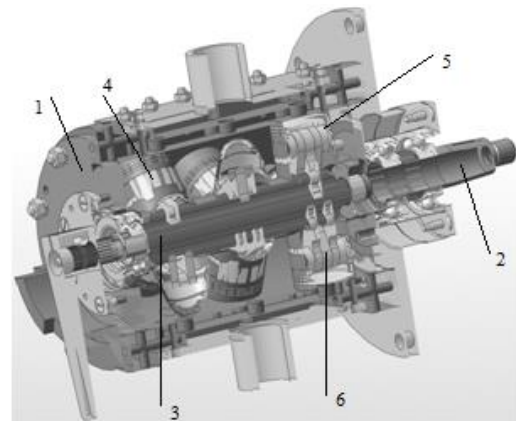


Рис. 7. Роторно-поршневий двигун 12РПД-4,4/1,75 [7]: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – кулачок; 4 – поршень; 5 – поршневий палець; 6 – рухома ланка

Таблиця 1

Основні параметри зразка роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75

№ з.п.	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
1	Діаметр циліндра	мм	44
2	Хід поршня	мм	17,5
3	Відношення S/D	–	0,4
4	Кількість циліндрів	–	12
5	Робочий об'єм	см ³	320,6
6	Відносний мертвий об'єм	–	0,015

У конструкції даного роторно-поршневого двигуна, для розподілу повітря використовуються впускні та випускні отвори, перекриття яких здійснюється центральним ротором 2. Таким чином центральний ротор 2 виконує функцію золотника та корпусу, в якому рухаються поршні 4. Поршні зв'язані між собою за допомогою плаваючих пальців 5 та жорстких ланок 6 таким чином, що утворюють шарнірний чотирикутник. У центрі шарнірного чотирикутника розміщено регулюючий кулачок 3, який дозволяє змінювати кут відкриття органів газообміну і тим самим регулювати режими роботи роторно-поршневого двигуна. Також регулюючий кулачок 3 дає змогу змінювати напрямок обертання центрального

ротора. Така конструкція КШМ є простою, надійною та простою у виготовленні. Застосування золотникового розподілу повітря забезпечує досить просту та компактну конструкцію та досить добре ущільнення робочого циліндру. Двигун має 12 рівномірно розміщених циліндрів, що забезпечує зрівноваженість двигуна та можливість пуску при будь-якому положенні ротора. Роторно-поршневий двигун 12РПД-4,4/1,75 є короткоходовим, відношення ходу поршня S до діаметра циліндра D дорівнює $S/D = 0,4$. Це дало змогу зробити двигун більш компактним та легким. Маса основних деталей двигуна 12РПД-4,4/1,75 та їх фотографії наведені в табл. 2. Співвідношення мас деталей механізму руху до корпусних деталей двигуна складає 76,5 %.

Результати аналізу механізму руху розглянутих роторно-поршневих двигунів приведені в порівняльній таблиці 3.

Таблиця 2

Маса та фотографії основних деталей
двигуна 12РПД-4,4/1,75

№ з.п.	Назва деталі	Маса, кг	Вигляд
1	корпус двигуна	6,185	
2	ротор центральний	10,320	
3	кулачок регулюючий	0,585	
4	поршень у зборі з кільцями	0,049	
5	поршневий палець	0,021	
6	рухома ланка (4 ланки одного циліндру)	0,156	

Таблиця 3

Основні результати порівняння механізму руху роторно-поршневих двигунів

№ з.п.	Тип двигуна	Кількість деталей механізму руху	Назва деталі	Технологія виготовлення	Матеріал деталей
1	2	3	4	5	6
1	Турбокомпресорний [12]	4	Колінчатий вал	Заготовки отримують ковкою у закритих штампах. Перед механічною обробкою заготовки нормалізують. Механічна обробка на станках з ЧПК.	Сталі 45, 45Х, 45Г2, 50Г
			Шатун	Заготовки отримують штамповкою у закритому штампі з подальшою термічною обробкою. Механічна обробка заготовки.	Вуглецеві сталі 40, 45, 50; леговані 45Х, 40ХН, 12Х2Н4ВА
			Поршневий палець	Точіння з подальшою термічною обробкою (цементування з закалюванням та відпуском).	Вуглецеві сталі 15, 20, 40; леговані 15Х, 20Х, 12ХН3А, 20ХГР
			Поршень	Заготовки отримують литтям, або гарячою штамповкою. Після механічної обробки термічна обробка.	Ливарні сплави алюмінію АЛ1, АЛ25 або сплави які деформуються АК4, АК4-1
2	3 рухомих блоком циліндрів [1]	6	Плаваючий циліндр	Заготовку отримують методом відцентрового лиття. Зносостійкість поверхонь підвищують пористим хромуванням чавунних та азотуванням сталейних циліндрів.	Чавун марок СЧ30, СЧ35, ЧН1ХМД, ЧН20М2Ш, або сталь 35ХМЮА, 38ХМЮА
			Поршень	Заготовки отримують литтям, або гарячою штамповкою. Після механічної обробки термічна обробка.	Ливарні сплави алюмінію АЛ1, АЛ25 або сплави які деформуються АК2, АК4
			Шатун	Заготовки отримують штамповкою у закритому штампі з подальшою термічною обробкою. Механічна обробка заготовки.	Вуглецеві сталі 40, 45, 50; леговані 45Х, 40ХН, 12Х2Н4ВА
			Кривошип	Заготовки отримують ковкою у закритих штампах. Перед механічною обробкою заготовки нормалізують. Механічна обробка на станках з ЧПК.	Сталі 45, 45Х, 45Г2, 50Г
			Палець	Точіння з подальшою термічною обробкою (цементування з закалюванням та відпуском).	Вуглецеві сталі 15, 20, 40; леговані 15Х, 20Х, 12ХН3А, 20ХГР
			Блок шестерень	Заготовку отримують ковкою або литтям. Поковки або штамповки нормалізуються або піддаються оджигу. Механічна обробка заготовки.	Леговані сталі 40Х, 38ХА, 40ХН, 40ХС

Продовження таблиці 3

Основні результати порівняння механізму руху роторно-поршневих двигунів

1	2	3	4	5	6
3	Згоряння не в циліндрі [2]	3	Поршень	Заготовки отримують литтям, або гарячою штамповкою. Після механічної обробки термічна обробка.	Ливарні сплави алюмінію АЛ1, АЛ25 або сплави які деформуються АК2, АК4
			Ротор	Заготовку отримують методом відцентрового лиття.	Чавун марок СЧ30, СЧ35, ЧН1ХМД, ЧН20М2Ш, або сталь 35ХМЮА, 38ХМЮА
			Зубчатий вінець	Заготовку отримують литтям. Поковки нормалізуються або піддаються оджигу. Механічна обробка заготовки.	Леговані сталі 40Х, 38ХА, 40ХН, 40ХС
4	Барабанного типу з рухомими камерами згоряння [3]	6	Барабан	Заготовку отримують методом лиття. Зносостійкість поверхонь циліндрів підвищують пористим хромуванням чавунних та азотуванням сталей.	Чавун марок СЧ30, СЧ35, ЧН1ХМД, ЧН20М2Ш, або сталі 35ХМЮА, 38ХМЮА
			Колінчатий вал	Заготовки отримують ковкою у закритих штампах. Перед механічною обробкою заготовки нормалізують. Механічна обробка на станках з ЧПК.	Сталі 45, 45Х, 45Г2, 50Г
			Поршень	Заготовки отримують литтям, або гарячою штамповкою. Після механічної обробки термічна обробка.	Ливарні сплави алюмінію АЛ1, АЛ25 або сплави які деформуються АК2, АК4
			Палець	Точіння з подальшою термічною обробкою (цементування з закалюванням та відпуском).	Вуглецеві сталі 15, 20, 40; леговані 15Х, 20Х, 12ХН3А, 20ХГР
			Шатун	Заготовки отримують штамповкою у закритому штампі з подальшою термічною обробкою. Механічна обробка заготовки.	Вуглецеві сталі 40, 45, 50; леговані 45Х, 40ХН, 12Х2Н4ВА
			Блок шестерень	Заготовку отримують ковкою або литтям. Поковки або штамповки нормалізуються або піддаються оджигу. Механічна обробка заготовки.	Леговані сталі 40Х, 38ХА, 40ХН, 40ХС
5	Циліндри з поршнями розташовані в роторі [4]	5	Ротор	Заготовку отримують методом лиття. Зносостійкість поверхонь циліндрів підвищують пористим хромуванням чавунних та азотуванням сталей.	Чавун марок СЧ30, СЧ35, ЧН1ХМД, ЧН20М2Ш, або сталь 35ХМЮА, 38ХМЮА
			Поршень	Заготовки отримують литтям, або гарячою штамповкою. Після механічної обробки термічна обробка.	Ливарні сплави алюмінію АЛ1, АЛ25 або сплави які деформуються АК2, АК4
			Палець	Точіння з подальшою термічною обробкою (цементування з закалюванням та відпуском).	Вуглецеві сталі 15, 20, 40; леговані 15Х, 20Х, 12ХН3А, 20ХГР
			Шатун	Заготовки отримують штамповкою у закритому штампі з подальшою термічною обробкою. Механічна обробка заготовки.	Вуглецеві сталі 40, 45, 50; леговані 45Х, 40ХН, 12Х2Н4ВА
			Колінчатий вал	Заготовки отримують ковкою у закритих штампах. Перед механічною обробкою заготовки нормалізують. Механічна обробка на станках з ЧПК.	Сталі 45, 45Х, 45Г2, 50Г
6	Ротативний детандер [5]	5	Кривошип	Заготовки отримують ковкою у закритих штампах. Перед механічною обробкою заготовки нормалізують. Механічна обробка на станках з ЧПК.	Сталі 45, 45Х, 45Г2, 50Г
			Шатун	Заготовки отримують штамповкою у закритому штампі з подальшою термічною обробкою. Механічна обробка заготовки.	Вуглецеві сталі 40, 45, 50; леговані 45Х, 40ХН, 12Х2Н4ВА
			Диск	Лазерне різання, термічна обробка (закалювання та відпуском).	Леговані сталі 40Х, 45Х, 40ХН
			Поршень/крейцкопф	Заготовки отримують литтям, або гарячою штамповкою. Після механічної обробки термічна обробка.	Ливарні сплави алюмінію АЛ1, АЛ25 або сплави які деформуються АК2, АК4
			Поршневий палець	Точіння з подальшою термічною обробкою (цементування з закалюванням та відпуском).	Вуглецеві сталі 15, 20, 40; леговані 15Х, 20Х, 12ХН3А, 20ХГР

Продовження таблиці 3

Основні результати порівняння механізму руху роторно-поршневих двигунів

1	2	3	4	5	6
7	Роторно-поршневий двигун 12РПД-4,4/1,75 [7]	5	Ротор	Заготовку отримують методом лиття з подальшою механічною обробкою.	Чавун з шароподібним графітом ВЧ 50
			Кулачок	Заготовки отримують ковкою. Перед механічною обробкою заготовки нормалізують. Механічна обробка спец фрезою.	Леговані сталі ШХ15, ШХ15СГ, 12ХНЗА
			Поршневий палець	Точіння з подальшою термічною обробкою (цементування з закалюванням та відпуском).	Вуглецеві сталі 15, 20, 40; леговані 15Х, 20Х, 12ХНЗА, 20ХГР
			Поршень	Заготовки отримують литтям, або гарячою штамповкою. Після механічної обробки термічна обробка.	Ливарні сплави алюмінію АЛ1, АЛ25 або сплави які деформуються АК2, АК4
			Рухомі ланка	Лазерне різання, термічна обробка (закалювання та відпуском).	Леговані сталі 40Х, 45Х, 40ХН

Проведений аналіз конструкцій та технологій виготовлення існуючих найбільш перспективних роторно-поршневих двигунів дозволяє встановити наступне. Виконання корпусу роторно-поршневих двигунів (саме така будова й спроектованого зразка роторно-поршневого двигуна нової конструкції 12РПД-4,4/1,75) з внутрішньою циліндричною поверхнею, в якому розташований ротор з робочими циліндрами, дозволяє створювати економічні і компактні двигуни без зовнішніх деталей що обертаються. Така будова двигунів дозволяє зменшити вібрацію і зробити їх безпечнішими в роботі. Конструкція механізму руху двигуна 12РПД-4,4/1,75 є простішою за будовою та технологією виробництва порівняно з подібними роторно-поршневими двигунами.

Таким чином, спроектований зразок роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 являється перспективним шляхом в напрямку розвитку сучасних роторно-поршневих двигунів, потребує подальших досліджень основних параметрів двигуна, робота є актуальною та викликає значний практичний інтерес.

Висновки

Розглянуто основні напрямки розвитку створення нових сучасних та вдосконалення існуючих роторно-поршневих двигунів.

Проведено порівняння механізмів руху існуючих найбільш перспективних роторно-поршневих двигунів – турбокомпресорного типу, з рухомим блоком циліндрів, двигунів де згорання проходить за межами робочого циліндру, барабанно-поршневого типу з рухомими камерами згорання, ротативного детандеру та ін.

Встановлено, що будова корпусу роторно-поршневих двигунів з внутрішньою циліндричною поверхнею, в якому розташований ротор з робочими циліндрами, дозволяє створювати економічні і ком-

пактні двигуни без зовнішніх деталей що обертаються.

На основі проведеного аналізу встановлено, що конструкція механізму руху спроектованого двигуна 12РПД-4,4/1,75 є простішою за будовою та технологією виробництва, а також надійнішою порівняно з подібними існуючими роторно-поршневими двигунами.

Література

1. Пат. на изобретение Российской Федерации №2309 272 С2. Двигатель внутреннего сгорания [Текст] / Малащенко Ю.К. ; 2006121795/06 ; 27.10.2007 – Бюл. №30.
2. Пат. на изобретение Российской Федерации №2392 460 С2. Роторно-поршневой двигатель внутреннего сгорания [Текст] / Пелов И. С.; 2007133506/06 ; 20.06.2010 – Бюл. №17.
3. Пат. на изобретение Российской Федерации №2400 640 С2. Двигатель внутреннего сгорания [Текст] / Шлык В. М.; 2008139674/06 ; 27.09.2010 – Бюл. №27.
4. Пат. на изобретение Российской Федерации №2472 018 С2. Роторно-поршневой двигатель [Текст] / Пирогов С. В. ; 2011109769/06 ; 10.01.2013 – Бюл. №1.
5. Пат. на изобретение Российской Федерации №2513 068 С1. Ротативный двигатель [Текст] / Куликов Л. Б. ; 2013111590/06 ; 20.04.2014 – Бюл. №11.
6. Пат. на винахід України №7592. Поршнева машина [Текст] / Волощук О. І., Шабалін Ю. В., Фролов В. К., Тетерев В. С. ; Український науково-дослідний інститут технології суднобудування ; 4345140/SU ; 29 вересня 1995 р. – Бюл. № 3.
7. Пат. на винахід України № 120489. Поршнева машина [Текст] / Митрофанов О. С., Шабалін Ю. В., Бірюк Т. Ф., Єфеніна Л. О. ; заявл. № а201902189 10.09.2019 р. ; 10.12.2019 р. – Бюл. № 23.
8. Патент РФ №2151880. Роторный двигатель [Текст] / Кривов Б. Н. ; заявл. 17.04.1998 г.; 27.06.2000 г.

9. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 1541401 А1. Героторный пневмомотор [Текст] / Барилевич В. Н., Золотых А. В., Татаренко В. П., Богомол Т. Н. ; заявитель Научно-производственное объединение самоходной горной техники «Криворожжрудмаш». – № 4387737/25-29 ; заявл. 20.01.1988 г. ; 07.02.1990 г. – Бюл. № 5.

10. Злотин, Г. Н. Особенности рабочего процесса и пути повышения энергетической эффективности роторно-поршневых двигателей Ванкеля [Текст] : монография / Г. Н. Злотин, Е. А. Федянов. – Волгоград, 2010. – 120 с.

11. Разработка односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора на основе современной комплексной методики расчёта [Текст] / А. Н. Костюченко, А. А. Зеленцов, П. В. Семенов и др. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 5 (47). – Ч. 2. – С. 173-181.

12. Токарев, А. Н. Роторный двигатель внутреннего сгорания турбокомпрессорного типа [Текст] / А. Н. Токарев. – Издат. LAP LAMBERT Academic Publishing; ФРГ, Немецкая Национальная Библиотека, 2014 – 81 с.

13. Патент РФ № 2538990, МПК F02B 53/08. Роторно-поршневой двигатель внутреннего сгорания [Текст] / Токарев А. Н., Токарев М. Ю., Байкалов М. С., Попов А. С., Сильченко И. А. ; 04.06.2013 г. Бюл. № 1.

14. Developed Technologies of the New Rotary Engine (RENESIS) [Text] / Masaki Ohkubo, Seiji Tashima, Ritsuharu Shimizu, Suguru Fuse and Hiroshi Ebino // SAE Paper. – 2004. – № 2004-01-1790. – 13 p.

15. Исследование величины утечки воздуха в физической модели роторного двигателя турбокомпрессорного типа [Текст] / А. Н. Токарев, Е. А. Дубов, А. В. Горяев, В. В. Хлопцев // Журнал «Ползуновский альманах». – Барнаул : Алт. гос. техн. ун-т, 2017. – Т. 1, № 3. – С. 5-8.

16. Шаталов, И. К. Утечки в поршневых компрессорах при работе на разных рабочих телах [Текст] / И. К. Шаталов, Ю. А. Антипов, А. Н. Белозеров // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 2. – С. 39-41.

17. Юша, В. Л. Оценка применимости бесконтактных уплотнений в рабочих камерах объемных компрессоров [Текст] / В. Л. Юша, А. А. Гуров, А. К. Беззатеев // Компрессорная техника и пневматика. – 2006. – № 2. – С. 28-31.

18. Котлов, А. А. Исследование влияния числа пластин на производительность ротационного пластинчатого компрессора [Текст] / А. А. Котлов, О. Ю. Устюшенкова, Б. С. Хрусталева // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 2. – С. 42-46.

19. Гринев, Д. В. Синтез и кинематический анализ рычажно-кулачкового механизма преобразования движения роторно-лопастного двигателя с внешним подводом тепла [Текст] / Д. В. Гринев, М. А. Донченко, Ю. Н. Журавлев, А. Л. Перминов //

Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 12. – С. 30–35.

References

1. Malashenkov, Yu. K. Dvigatel` vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine]. Patent RF, no. 2309 272 C2, 2007.

2. Pelov, I. S. Rotorno-porshnevoj dvigatel` vnutrennego sgoraniya [Rotary piston internal combustion engine]. Patent RF, no. 2392 460 C2, 2010.

3. Shly`k, V. M. Dvigatel` vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine]. Patent RF, no. 2400 640 C2, 2010.

4. Pirogov, S. V. Rotorno-porshnevoj dvigatel` [Rotary piston engine]. Patent RF, no. 2472 018 C2, 2013.

5. Kulikov, L. B. Rotativny` dvigatel` [Rotary engine]. Patent RF, no. 2513 068 C1, 2014.

6. Voloshhuk, O. I., Shabalin, Yu. V., Frolov, V. K., Tyetyeryev, V. S. Porshneva mashy`na [Piston machine]. Patent UA, no. 7592, 1995.

7. My`trofanov, O. S., Shabalin, Yu. V., Biryuk, T. F., Yefenina, L. O. Porshneva mashy`na [Piston machine]. Patent UA, no. 120489, 2019.

8. Krivov, B. N. Rotorny` dvigatel` [Rotary engine]. Patent RF, no. 2151880, 2000.

9. Barilovich, V. N., Zoloty`kh, A. V., Tatarenko, V. P., Bogomol T. N. Gerotorny` pnevmomotor [Gerotor pneumatic motor]. Opisaniye izobreteniya k avtorskomu svidetel'stvu, no. 4387737/25-29, 1990.

10. Zlotin, G. N., Fedyanov, E. A. Osobennosti rabocheho proczessa i puti povыsheniya e`nergeticheskoy e`ffektivnosti rotorno-porshnevyy`kh dvigatelej Vankelya [Features of the working process and ways to increase the energy efficiency of Wankel rotary piston engines]. Volgograd, 2010. 120 p.

11. Kostyuchenkov, A. N., Zelenczov, A. A., Semenov, P. V., Minin, V. P. Razrabotka odnosekcziionogo rotorno-porshnevogo dvigatelya-demonstratora na osnove sovremennoj kompleksnoj metodiki raschyota [Development of a single-section rotary piston demonstrator engine based on a modern integrated calculation method]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aeorokosmicheskogo universiteta – Vestnik of Samara Aerospace University, no. 5(47), vol. 2, 2014, pp. 173-181.

12. Tokarev, A. N. Rotorny` dvigatel` vnutrennego sgoraniya turbokompressornogo tipa [Turbocharged rotary internal combustion engine]. LAP LAMBERT Academic Publishing; FRG, Nemeckzaya Naczional`naya Biblioteka, 2014. 81 p.

13. Tokarev, A. N., Tokarev, M. Yu., Bajkalov, M. S., Popov, A. S., Sil`chenko, I. A. Rotorno-porshnevoj dvigatel` vnutrennego sgoraniya [Rotary piston internal combustion engine]. Patent RF, no. 2538990, 2013.

14. Masaki Ohkubo, Seiji Tashima, Ritsuharu Shimizu, Suguru Fuse and Hiroshi Ebino. Developed Technologies of the New Rotary Engine (RENESIS). SAE Paper, 2004, no. 2004-01-1790. 13 p.

15. Tokarev, A. N., Dubov, E. A., Goryaev, A. V., Khlopchev, V. V. *Issledovanie velichiny utechki vozdukh v fizicheskoy modeli rotornogo dvigatelya turbokompressorного типа* [Investigation of air leakage in a physical model of a turbocharger-type rotary engine]. *Journal "Polzunovskiy Almanach" – Zhurnal «Polzunovskiy almanakh»*, vol. 1, no. 3, 2017, pp. 5-8.

16. Shatalov, I. K., Antipov, Yu. A., Belozerov, A. N. *Utechki v porshnevnykh komp-ressorakh pri rabote na raznykh rabochikh telakh* [Leaks in piston compressors when working on different working fluids]. *Kompressorная техника i pnevmatika – Compressor technology and pneumatics*, 2013, no. 2, pp. 39-41.

17. Yusha, V. L., Gurov, A. A., Bezzateev, A. K. *Otsenka primenimosti beskontaktnykh uplotnenij v rabochikh kamerakh ob'emnykh kompressorov* [Evaluation of the applicability of non-contact seals in the working chambers of volumetric compressors]. *Kom-*

pressorная техника i pnevmatika – Compressor technology and pneumatics, 2006, no. 2, pp. 28-31.

18. Kotlov, A. A., Ustyushenkova, O. Yu., Khrustalev, B. S. *Issledovanie vliyaniya chisla plastin na proizvoditel'nost' rotatsionnogo plastinchatogo kompressora* [Study of the influence of the number of plates on the performance of a rotary vane compressor]. *Kompressorная техника i pnevmatika – Compressor technology and pneumatics*, 2013, no. 2, pp. 42-46.

19. Grinev, D. V., Donchenko, M. A., Zhuravlev, Yu. N., Perminov, A. L. *Sintez i kinematicheskij analiz ry'chazhno-kulachkovogo mekhanizma preobrazovaniya dvizheniya rotorno-lopastnogo dvigatelya s vneshnim podvodom tepla* [Synthesis and kinematic analysis of the lever-cam mechanism for converting the motion of a rotary vane engine with external heat supply]. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal – Handbook. An Engineering journal*, 2008, no. 12, pp. 30-35.

Надійшла до редакції 03.06.2020, розглянута на редколегії 15.08.2020

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РОТОРНО-ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Б. Г. Тимошевский, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин

В статье рассмотрены основные направления развития создания новых современных и совершенствования существующих роторно-поршневых двигателей. Установлена необходимость в проведении системного анализа существующих подобных конструкций двигателей с целью отделения и систематизации их преимуществ и недостатков на стадии проектирования. В качестве анализа конструкции и технологии изготовления существующих наиболее перспективных роторно-поршневых двигателей рассмотрены схемы турбокомпрессорного типа с подвижным блоком цилиндров, двигателей в которых сгорания проходит за пределами рабочего цилиндра, барабанно-поршневого типа с подвижными камерами сгорания, ротативных детандеров и др. Установлено, что строение корпуса роторно-поршневых двигателей с внутренней цилиндрической поверхностью, в котором расположен ротор с рабочими цилиндрами, позволяет создавать экономические и компактные двигатели. Такое строение двигателей позволяет уменьшить вибрацию и сделать их более безопасными в работе. Проведено сравнение механизмов движения существующих роторно-поршневых двигателей. На основе анализа существующих схем и конструкции современных роторно-поршневых двигателей спроектировано образец роторно-поршневого двигателя новой конструкции 12РПД-4,4/1,75. Представлена конструкция и основные параметры нового образца роторно-поршневого двигателя 12РПД-4,4/1,75 с регулируемым золотниковым распределением воздуха. Двигатель имеет двенадцать равномерно размещенных цилиндров, обеспечивает уравнированность двигателя и возможность пуска при любом положении ротора. Конструкция спроектированного двигателя предусматривает наличие центрального регулирующего кулачкового вала, поворот которого позволяет регулировать фазы газораспределения и режимы работы двигателя за счет степени наполнения цилиндра в достаточно широком диапазоне. Особенностью конструкции двигателя также является то, что регулирующий кулачок позволяет изменять направление вращения центрального ротора. Установлено, что конструкция кривошипно-шатунного механизма двигателя 12РПД-4,4/1,75 является простой по строению и технологии производства, а также более надежной по сравнению с подобными существующими роторно-поршневыми двигателями.

Ключевые слова: роторно-поршневой двигатель; кривошипно-шатунный механизм; механизма движения; двигатель внутреннего сгорания; КПД.

ANALYSIS OF THE DESIGN AND TECHNOLOGIES OF MANUFACTURING THE PERSPECTIVE ROTARY-PISTON ENGINE

B. Tymoshevskyy, O. Mytrofanov, A. Poznanskyi, A. Proskurin

The article discusses the main directions of development of creating new modern and improving existing rotary piston engines. The need for a systematic analysis of existing similar engine designs is established to separate and systematize their advantages and disadvantages at the design stage. As an analysis of the design and manufacturing technology of the existing most promising rotary piston engines, turbocompressor-type circuits with a movable cyl-

inder block is considered, the engines in which the combustion takes place outside the working cylinder, the drum-piston type with movable combustion chambers, rotary expanders, etc. It is established that the structure of the housing of rotary piston engines with an internal cylindrical surface, in which the rotor with working cylinders is located, allows the creation of economical and compact engines. This structure of the engines allows you to reduce vibration and make them safer to use. A comparison of the mechanisms of motion of existing rotary piston engines. Based on the analysis of existing schemes and the design of modern rotary piston engines, a sample of a new design 12 RPE-4.4/1.75 rotary piston engine is designed. The design and basic parameters of a new model of the 12 RPE-4.4/1.75 rotary piston engine with adjustable spool air distribution are presented. The engine has twelve evenly spaced cylinders, provides a balanced engine, and the ability to start at any position of the rotor. The design of the engine designed provides for a central control cam shaft, the rotation of which allows you to adjust the valve timing and engine operation due to the degree of filling of the cylinder in a fairly wide range. A feature of the design of the engine is also that the control cam allows you to change the direction of rotation of the central rotor. It was found that the design of the crank mechanism of the 12 RPE-4.4/1.75 engine is simple in structure and production technology, as well as more reliable compared to similar existing rotary piston engines.

Keywords: rotary piston engine; crank mechanism; movement mechanism; internal combustion engine; efficiency.

Тимошевський Борис Георгійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Митрофанов Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Познанський Андрій Станіславович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Проскурін Аркадій Юрійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Boris Tymoshevskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: borys.tymoshevskiy@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-4649-702X, Scopus Author ID: 6506269318.

Oleksandr Mytrofanov – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mitrofanov.al.ser@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-3460-5369, Scopus Author ID: 57201666852, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=L-btXZ4AAAAJ&hl=uk>

Andrii Poznanskyi – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: andreypoznansky@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-4351-7504, Scopus Author ID: 57203622477, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=nFsARZAAAAAJ>

Arkadii Proskurin – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-5225-6767, Scopus Author ID: 57203617130, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=LCGxGC8AAAAJ&hl=uk>