

Корисна модель належить до двигунів зовнішнього згоряння, а саме стосується вільно поршневих стірлінгподібних систем із клапанним керуванням робочим тілом та окремими регенераторами, і може бути використана як автономне джерело електроенергії, для утилізації тепла в промисловій когенераційній системі, а також для роботи за зворотним циклом у криогенних охолоджувачах, для інфрачервоних сенсорів, квантових комп'ютерів, тощо.

Крім цього, запропонована корисна модель може бути використана в галузі, де потрібно перетворювати тепло різного походження, наприклад сонячне, високотемпературних атомних реакторів, пальників з форсункою, що працюють на дизельному паливі, бензині, природному газі, біопаливі, промислових відходів у механічну чи електричну енергію з підвищеним термодинамічним ККД на рівні консервативного орієнтиру 53-55 % та електричного ККД 45-47 %, оптимального орієнтиру термодинамічного ККД 56-58 % електричного 47-49 %, при удосконаленні регенераторів та системи термоізоляції термодинамічний ККД 58-60 % електричний 49,3-51 % при ефективності лінійного електрогенератора $\eta_{\text{ген}}=0,85$.

Запропонована корисна модель передбачає створення системи ефективного перетворення різниці температур робочого тіла між нагрівачем і охолоджувачем у механічну та електричну енергію.

Відомі традиційні вільно поршневі стірлінг-двигуни з однією гарячою та однією холодною камерою, які досягають реального ККД на рівні 30-35 %. Однак відсутність чіткого відсікання мертвого об'єму охолоджувачів та спільна гаряча й холодна зона без клапанів, неможливість незалежного управління потоками гарячого й холодного робочого тіла - спричиняють додаткові втрати теплової енергії.

Відомий двигун Стірлінга, що містить щонайменше один циліндр витіснювача, в якому переміщається витіснювальний поршень, що розділяє об'єм циліндра на гарячу та холодну порожнини. При цьому нагрівач, регенератор та охолоджувач встановлені послідовно в магістралі, що з'єднує гарячу та холодну порожнини. Охолоджувач містить циліндричну сорочку охолодження, заповнену охолоджувальною рідиною і охоплює циліндр з поршнем, з двома кільцевими колекторами, підключеними до патрубків підведення і відведення рідини. Охолоджувач, виконаний за типом "труба в трубі", містить кільцеві канали, утворені за допомогою втулок з внутрішніми отворами, розташованими рівномірно по діаметру циліндра в сорочці охолодження, за якими циркулює робоче тіло. [Патент RU № 2100634, Опубліковано: 27.12.1997].

Недоліком даного пристрою є недостатній теплообмін циліндричних стінок каналів охолоджувача з робочим середовищем, що зменшує ефективність двигуна. Другим недоліком є те, що витіснювальний поршень періодично входить в гарячу зону, це призводить до додаткових вимог для ущільнювачів та збільшує затрати енергії на тертя.

З рівня техніки не виявлено технічного рішення, аналогічного запропонованому, яке б одночасно забезпечувало вільно поршкову генерацію та клапанне відсікання мертвих об'ємів охолоджувачів у фазі розширення і використання двох холодних циліндрів та одного нагрівача з можливим досягненням ККД на рівні 58-60 %.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення економічного вільно-поршневого двигуна зовнішнього згоряння з високими показниками ККД, надійності і розширеними технологічними можливостями за рахунок можливості роботи його в зворотному циклі у криогенних охолоджувачах.

Поставлену задачу вирішено у вільно-поршковому двигуні зовнішнього згоряння, що містить щонайменше один вільно-поршковий лінійний генератор з двома холодними циліндрами, а саме лівим і правим, в кожному з яких є власні поршні з неодимовими магнітами, які нерухомо закріплені на штоку з можливістю руху сумісно з ним відносно бокових стінок циліндрів і статора, на якому розміщено котушки з обмотками, а на корпусах правого і лівого холодних циліндрів закріплені датчики Холла, при цьому правий і лівий холодні циліндри зв'язані окремо кожен за допомогою правого і лівого байпасних патрубків, кожен з яких має зворотні клапани, з правим і лівим охолоджувачами через правий і лівий відсічні подвійні клапани, кожен охолоджувач розташований в окремому кожусі, який має патрубки для підводу води для охолодження, при цьому між охолоджувачами в корпусі розташована система дуплексного клапана, що має шток з тарілками на кінцях, соленоїдні котушки, неодимовий магніт і патрубки, за допомогою яких дуплексний клапан сполучено з лівим і правим регенераторами з пористою структурою зі спечених тонких металевих сіток всередині, над регенераторами розташовано нагрівач, що має верхній колектор з лівими і правими трубками, а також нижній лівий колектор і нижній правий колектор, з якими сполучені лівий і правий регенератори.

Технічним результатом запропонованої корисної моделі є узгодження фаз стиснення/розширення та керування потоком робочого газу системою дуплексного клапана.

В запропонованій корисній моделі фаза розширення та фаза стиснення робочого тіла газу гелію проходить одночасно і симетрично у правому та лівому циліндрах, наприклад, якщо у правому циліндрі йде процес нагрівання та фаза розширення газу гелію, то за рахунок роботи розширення - у лівому циліндрі симетрично йде фаза стиснення та охолодження, потім фази розширення та фази стиснення в циліндрах змінюються на протилежні і за один коливальний цикл у двигуні здійснюється дві фази розширення та дві фази стиснення. Управління фазами термодинамічного процесу здійснюється електронним блоком керування за сигналами датчиків Холла, що дає керуючі імпульси

для дуплексного клапана та правих і лівих відсічних подвійних клапанів охолоджувачів. Ізотермічне стиснення в холоді при температурі 40 °С та нагріванні нагрівача до високих температур 750-830 °С і створення великої різниці тисків між об'ємом розширення та об'ємом стиснення при відсіканні мертвого великого об'єму охолоджувача відсічним клапаном у фазі розширення, де нагрітий газ реалізує високий тиск в об'ємі розширення до 170 бар у той час, коли початковий тиск в об'ємі стиснення 64 бар з початковою моментальною різницею тисків між об'ємом розширення та об'ємом стиснення до 106 бар, що впливає на підвищення ККД до 58-60 %. Наявність дуплексного клапана та відсічних клапанів усувають "мертвий" об'єм охолоджувача на стороні розширення. Розширення газів реалізується через лівий та правий байпасні патрубки, кожен зі своїм зворотним клапаном. Застосування двох холодних циліндрів та одного нагрівача, а також використання системи дуплексного клапана дає можливість узгоджувати фази стиснення/розширення й керувати потоком робочого газу, мінімізуючи втрати енергії. Наявність байпасних патрубків зі зворотними клапанами та системи дуплексного клапана дозволяє ефективно керувати потоками. Наявність охолоджувачів з відсічними клапанами, що відводять тепло від циліндрів тільки у фазі стиснення, у фазі розширення охолоджувачі відключені відсічним клапаном, що дозволяє стискати газ при 40 °С, наближаючись до ізотермічного процесу, що знижує витрати на стиснення. Механічна енергія коливань поршнів передається без кривошипних механізмів, простою змінною індукцією магнітів у котушках, це дозволяє досягати вищого ККД. Робота поршнів відбувається в холодній зоні, оскільки газ, що проходить через регенератори в холодні циліндри з гарячої зони, охолоджений регенераторами та має температуру 60 °С, холодні циліндри поршнів ззовні термоізолювані, щоб попередити втрати теплової енергії циклу, що дає можливість використання різноманітного ущільнення, наприклад, дозволяє застосовувати тефлон або гумові ущільнення з малим тертям. Наявність системи дуплексного клапана, відсічних клапанів охолоджувачів, байпасних патрубків зі зворотними клапанами дає змогу газу не "зависати" у проміжних великих об'ємах охолоджувачів у фазі розширення, що дає змогу нагріти охолоджені молі газу до високих температур регенераторами та догріти нагрівачем і підвищити початковий моментальний тиск у фазі розширення до 170-180 бар. У моменти стиснення нагрівач разом з двома регенераторами відсікається, тому мінімізується мертвий об'єм у фазі стиснення і стиснення у холодній зоні є майже ізотермічне. Якщо фаза розширення проходить, наприклад, з правої сторони, то газ, нагріваючись всередині нагрівача до температури 750-830 °С, проходить через правий регенератор, повертаючи частину теплової енергії регенератору, далі з правого регенератора через відкритий дуплексний клапан та відкритий правий байпасний патрубок - до порожнини правого циліндра. В цей період великий мертвий об'єм правого охолоджувача буде відсічений правим відсічним подвійним клапаном. Наявність байпасних патрубків також сприяє підвищенню термодинамічного ККД.

По розрахункам, система без байпасних патрубків та відсічних подвійних клапанів не буде мати термодинамічний ККД вище 30 %.

У підсумку, ізотермічне стиснення через наявність охолодження, дуплексного клапана, відсічних клапанів охолоджувачів, байпасних патрубків зі зворотними клапанами знижує витрати на стиснення. При відкритті дуплексного клапана з двох сторін у зоні 80-90 % ходу поршня до/від мертвої точки починається фаза витіснення, наприклад, з лівого циліндра та лівого охолоджувача. Дуплексний клапан, перемикаючись, буде відкритим з лівої та правої сторони протягом 1,5-2,5 мс, різниця тисків при відкритті клапана буде 6-10 бар між лівим об'ємом стиснення та правим об'ємом розширення. Завдяки руху правого та лівого поршня газ гелій, при сталій різниці тиску 6-7 бар, з лівого охолоджувача при відкритому дуплексному клапані з обох сторін, витісняється в лівий регенератор, далі витіснені холодні молі будуть витіснити гарячий газ, що залишився з минулого циклу в лівому регенераторі до нагрівача, а з нагрівача гарячий розширений газ буде витіснений через протилежний правий регенератор. У правому регенераторі буде забрана частина теплової енергії газу, що витіснилась з нагрівача, далі газ витісняється в розширений правий циліндр через правий байпасний патрубок з температурою 60 °С. Далі дуплексний клапан відсікає праву розширену зону, після цього з правої сторони починається фаза стиснення, а з лівої - фаза розширення, де швидко відключається лівий охолоджувач, що значно зменшує "мертвий" об'єм розширення, лівий поршень майже дійшов до ВМТ, а холодні молі газу за 1,5 мс після закриття дуплексним клапаном правого розширеного циліндра, нагріваючись, піднімають тиск гарячої вже лівої зони розширення до розрахованих 170-180 бар, ця енергія розширення газу використовується на протилежне стиснення правого об'єму газу, що розширився у минулому циклі та корисну роботу, причому частина енергії стиснення повертається в цикл через регенератори в наступній гарячій фазі, розширюючись у нагрівачі. Вільно-поршнева передача, мінімальне механічне тертя і легка автоколивальна стабілізація, використання кількох регенераторів зменшує втрати на теплообмін.

Отже, система створена таким чином, що у фазі стиснення відсікаються мертві об'єми нагрівача і двох регенераторів, у фазі розширення відсікаються великі мертві об'єми охолоджувачів, що призводить до значного підвищення ККД та зниження кінцевих втрат.

У сукупності це забезпечує підвищений термодинамічний ККД на рівні 58-60 %, що призведе до збільшення загального електричного ККД у діапазоні близько 49,3-51 %. ККД до 58-60 % від підведеного тепла, замість звичайних 30-35 %. Перевагою заявленої корисної моделі є гнучка масштабованість, можливість використання одного, двох або чотирьох лінійних генераторів, з однаковою кількістю теплообмінних вузлів.

Завдяки зменшенню фрикційних втрат робота двигуна здійснюється без використання мастила. Вищезазначені термодинамічні показники, за умов високої якості регенераторів $\epsilon \approx 0,98$, мінімальних втрат у механічних вузлах та ефективного лінійного генератора $\eta = 0,85$, є конкурентоспроможними - навіть у тих нішах, де стандартні ДВЗ-електрогенератори зазвичай мають загальний електричний ККД на рівні 25-35 %. Конструкція заявленої корисної моделі дозволяє працювати двигуну у зворотному циклі, тобто виконувати роботу холодильника в криогенних установках.

На доданих кресленнях пояснюється суть заявленої корисної моделі.

На фіг. 1 схематично зображено дуплексний вільно-поршневий двигун з удосконаленою клапанною системою, фронтальний вигляд у розрізі.

На фіг. 2 зображено вигляд зверху.

На фіг. 3 зображено вигляд збоку.

Вільно-поршневий двигун зовнішнього згоряння містить щонайменше один вільно поршневий лінійний генератор 1, який має правий 2 і лівий 3 холодні циліндри з поршнями 4, 5, відповідно, і статор 6 з котушками 7. Поршні 4, 5 з'єднані штоком 8, на якому розташовані неодимові магніти 9, і розміщені поршні 4, 5 в циліндрах 2, 3 з можливістю руху відносно бокових стінок циліндрів 2, 3 і статора 6. На корпусах правого 2 і лівого 3 холодних циліндрів встановлені датчики Холла 10, які відстежують положення поршнів 4, 5. Правий 2 і лівий 3 холодні циліндри зв'язані окремо кожен зі своїм охолоджувачем 11, 12, відповідно, за допомогою байпасних патрубків, а саме: правого байпасного патрубка 13 з правим зворотним клапаном 14 та лівого байпасного патрубка 15 з лівим зворотним клапаном 16.

Правий охолоджувач 11 має правий відсічний подвійний клапан 17, а лівий охолоджувач 12 має лівий відсічний подвійний клапан 18. Охолоджувачі 11, 12 розташовані всередині кожухів 19, 20 з патрубками 21, 22 для підводу води до цих охолоджувачів. Температура охолоджувачів підтримується на рівні 40 °C. Холодні циліндри 2, 3 поршнів 4, 5 ззовні можуть мати термоізоляцію, а температура в циліндрах 2 буде 60 °C після проходження газу через ефективні регенератори. Робоче тіло системи газ (гелій) охолоджується до $\sim 40-60$ °C.

Між охолоджувачами 11, 12 з відсічними подвійними клапанами 17, 18 в корпусі розташована система дуплексного клапана 23, яка і має шток 24 із двома "тарілками" 25, 26 на кінцях, призначених для двох потоків робочого тіла з лівої й правої сторони, соленоїдні котушки 27, неодимовий магніт 28 для електричного привідного переміщення штока 24. Крім цього, дуплексний клапан 23 на кінцях має патрубки 29, 30, якими він з'єднаний з лівим регенератором 31 і з правим регенератором 32, відповідно. Регенератори 31, 32 всередині мають пористі структури зі спечених тонких металевих сіток, що зберігають тепло від гарячого газу першого півциклу й повертають його холодному газу в наступному півциклі. Над регенераторами 31, 32 розміщено нагрівач 33, що має нижній лівий колектор 34, яким він з'єднаний з регенератором 31, і нижній правий колектор 35, яким він з'єднаний з регенератором 32. Нагрівач 33 має ліві трубки 36 та праві трубки 37, що входять у верхній колектор 38. Завдяки використанню тугоплавкого матеріалу Inconel температура нагрівача 33 досягає 750-830 °C при зовнішньому згорянні, пальник, сонячний концентратор, тощо.

Робота вільно-поршневого двигуна відбувається наступним чином.

Початковий стан.

Поршень 4 у правому холодному циліндрі 2 і поршень 5 у лівому 3 холодному циліндрі перебувають у певному середньому положенні. Робочий газ гелій при тиску приблизно 64 бар знаходиться у всій системі і зокрема в охолоджувачах 11, 12 при температурі 40 °C. В циліндрах газ завжди буде мати температуру близько до 60 °C після проходження газу з нагрівача 33 через ефективні регенератори 31, 32, де охолоджуються до 60 °C. Газ циркулює таким чином до циліндрів 2, 3, завдяки системі дуплексного клапана 23, відсічним подвійним клапанам 17, 18 та зворотним клапанам 14, 16, у напрямку тільки з регенераторів 31, 32 у фазі розширення, а виходить з циліндрів 2, 3 у охолоджувачі 11, 12 тільки у фазі стиснення.

Поршні 4, 5 з неодимовими магнітами 9 - це рухомі маси вільно-поршневого лінійного генератора всередині статора 6 з котушками 7. Увесь вузол може рухатися в напрямку "ліво-право" у холодних циліндрах 2, 3. Положення поршнів відстежують датчики Холла 10, що передають сигнали на електронний блок керування 39.

1. Фаза стиснення.

У першій фазі правий холодний циліндр 2 з боку правого регенератора 32 перекритий дуплексним клапаном 23. Лівий холодний циліндр 3 з температурою газу в циліндрі 60 °C, відкритий до лівого регенератора 31 через лівий байпасний патрубок 15 з лівим зворотним клапаном 16. Газ у правому холодному циліндрі 2 стискається поршнем 4 з 64 до 79 бар, залежно від розрахованих об'ємів

робочого ходу поршнів та таймінгу дуплексного клапана, в правий охолоджувач 11, прохід до якого відкритий завдяки відкритому правому відсічному клапану 17, причому тепло стиснення відводиться водяним охолоджувачем 11, вода циркулює через патрубки 21, 22 у кожусі 19. Стиснення правого холодного циліндра 2 в охолоджувач 11 відбувається майже ізотермічно, оскільки температура підтримується приблизно на рівні 40-60 °С. Стиснення відбувається до 80-90 % ходу поршня

2. Фаза розширення.

Одночасно в лівому холодному циліндрі 3 відкритий шлях через лівий байпасний патрубок 15 до лівого регенератора 31 і далі до нагрівача 33 через трубки 36, 37, нижніх колекторів 34, 35, верхній колектор 38. Газ високого тиску 170-180 бар й температури (приблизно 750-830 °С) із нагрівача 33 тисне на лівий поршень 5 через лівий байпасний патрубок 15, змушуючи його рухатися в робочому ході, розширення з теплою політропою до $n=1,3$ та передавати механічну енергію при обов'язковому відборі електричної потужності на генератор статор 6, котушки 7. Поршень 5 рухається до 80-90 % ходу від НМТ (нижньої мертвої точки). У процесі руху поршнів 4, 5 разом з магнітами 9, що індукують струм у котушках 7. Газ високого тиску з початкових 170-180 бар при розширенні до 80-90 % ходу від НМТ, тиск знижується до 70-72 бар, що нижче на 6-10 бар відносно правого циліндра.

3. Фаза витіснення при перемиканні за 1,5-2 мс дуплексного клапана.

Коли поршень 4 доходить до 80-90 % ходу від верхньої мертвої точки правого холодного циліндра 2, тиск тут досягає 79 бар при 40 °С завдяки кінетичній енергії, що поршні з неодимовими магнітами 9 дістали від робочого ходу, а поршень 5 в лівому холодному циліндрі 3 навпаки доходить 80-90 % до нижньої мертвої точки, при цьому тиск знижується приблизно до 72-74 бар при 60 °С, електронний блок керування 39 за сигналами датчиків Холла 10 дає імпульс на соленоідні котушки 27 дуплексного клапана 23, дуплексний клапан, перемикаючись буде відкритим з лівої та правої сторони 1,5-2,5 мс, протягом цього часу рухом поршня підтримується різниця тисків 6-10 бар між лівою та правою стороною, завдяки чому за цей час достатня кількість холодних молей з правого відкритого охолоджувача 11 витискається в гарячу зону через правий регенератор 32 в нагрівач 33, а з нагрівача 33 гарячий відпрацьований газ перейде в протилежний лівий регенератор 31, віддаючи йому частину теплової енергії та входячи в протилежний лівий холодний циліндр 3 уже з температурою 60 °С через лівий байпасний патрубок 15, правий охолоджувач 11 на стороні стиснення буде відключено за допомогою правого відсічного подвійного клапана 17 після 1,5-2,5 мілісекунд витіснення, а на стороні кінцевого розширення лівий охолоджувач 12 буде підключено і фаза розширення зміниться на фазу стиснення, а в протилежному циліндрі фаза стиснення змінюється на фазу розширення.

4. Подальше термодинамічне перетворення.

Після перемикання дуплексного клапана 23 газ у лівому холодному циліндрі 3 відсікається й починає стискатися поршнем 5, лівий байпасний патрубок 15 буде відключено лівим зворотним клапаном 16 за рахунок зворотного руху газу, тому газ з лівого холодного циліндра 3 буде проходити через відкритий лівий відсічний подвійний клапан 18 в лівий охолоджувач 12, де буде ізотермічно стискатись до 79 бар. Далі при досягненні лівим поршнем 5 до 80-90 % ходу від верхньої мертвої точки дуплексний клапан 23, перемикаючись, буде відкритим з лівої та правої сторони протягом 1,5-2,5 мс, за цей час при руху поршнів 4, 5 підтримується різниця тисків 4-6 бар між лівою та правою стороною, завдяки чому достатня кількість холодних молей витісняється з лівого охолоджувача 12 в гарячу зону через лівий регенератор 31 в нагрівач 33, а з нагрівача 33 гарячий відпрацьований газ перейде в правий регенератор 32, віддаючи йому енергію та входячи в правий холодний циліндр 2 уже з температурою 60 °С після регенератора через правий відкритий байпасний патрубок 13, лівий охолоджувач 12 буде відключено за допомогою лівого відсічного подвійного клапана 18 після 1,5-2,5 мілісекунд витіснення, а з правої сторони правий охолоджувач 11 буде підключено, і фаза розширення зміниться на фазу стиснення, а в лівому циліндрі 3 фаза стиснення змінюється на фазу розширення. Холодні стиснені молі газу, що пройшли у фазі витіснення через патрубок 30 у правий регенератор 32, будуть нагріватись приблизно 1,5 мс після переключення дуплексного клапана 23 теплом, накопиченим в попередньому циклі, та у нагрівачі у трубах 36, 37 нижніх колекторів 34, 35, верхнього колектора 38 і додатково нагрівається зовнішнім джерелом тепла до 750-830 °С. Після відсічення дуплексним клапаном 23 правого холодного циліндра 3 холодні стиснені молі газу за 1,5-2,5 мс нагріваються і тиск у гарячому об'ємі, куди входить лівий регенератор 31, правий регенератор 32 і нагрівач 33, моментально може піднятися до 170-180 бар, внаслідок чого сила тиску передається через лівий байпасний патрубок 15 на лівий поршень 5, що знаходиться у ВМТ. Початкова моментальна різниця тиску у приблизно 106 бар між лівим 3 та правим 2 холодними циліндрами призводить до робочого руху поршня.

Під час нагріву та розширення газу здійснюється перетворення теплової енергії газу в кінетичну енергію руху поршнів 4, 5 з неодимовими магнітами 9, що індукують струм у котушках 7. У кінці цієї фази лівий поршень 5 знаходиться в НМТ, а правий поршень 4 - ВМТ.

Наступне перемикання дуплексного клапана 23 знову змінює напрямки потоків: лівий холодний циліндр 3 випускає стиснений холодний газ до лівого регенератора 31 і нагрівача 33, а правий холодний циліндр 2 виконує стиснення, процес повторюється.

Завдяки почерговому відсіканню великого мертвого об'єму охолоджувачів лівого та правого у фазі розширення тиск газу, що створюється введенням холодних молей в нагрівач 33 та регенератори 31, 32, через байпасні патрубки 13, 15, ця енергія розширення газу передається на поршні 4, 5 в робочому ході та призводить до ізотермічного стиснення гелію з протилежної сторони в охолоджувачах 11, 12, та корисну роботу, причому велика частина енергії стиснення газу повертається в цикл через регенератори 31, 32 в наступній гарячій фазі, що значно підвищує термодинамічну ефективність циклу. Це відповідає модифікованому циклу Стірлінга-Еріксона, що дозволяє досягти ККД 58-60 % при різниці температури між холодною та гарячою частинами (наприклад 40 °C і 750-830 °C).

Вільно-поршнева конструкція двигуна не потребує складних механічних передач (кривошипів, шатунів, підшипників), що зменшує втрати на тертя. Оскільки поршні 4 і 5 знаходяться у "холодних" частинах циліндрів 2 і 3 з $T \approx 40-60$ °C, можна застосовувати тефлонові кільця для ущільнення та взагалі відмовитися від мастила, мінімізуючи фрикційні втрати.

5. Використання зворотного модифікованого циклу Стірлінга Еріксона.

Якщо застосовувати зворотний цикл (охолодження), робоча камера нагрівача за допомогою процесів розширення може забирати тепло від об'єкта охолодження та під час стиснення передавати це тепло в охолоджувачі 11, 12 й циліндри 2, 3. Останні, у свою чергу, передають тепло через теплообмінники в охолоджувачах 11, 12 воді або іншому середовищу. Розширення газу в камері розширення (нагрівач 33, правий регенератор 31, лівий регенератор 32, лівий байпасний патрубок 15, лівий циліндр 3, що приймають участь в розширенні - залежно від конструктивних особливостей) одночасно стиснення газу буде відбуватись у камері стиснення (правий циліндр 4 та правий охолоджувач 11, що приймають участь в стисненні) фази стиснення та розширення почергово змінюються з лівої та правої сторони завдяки удосконаленій клапанній системі, що спричиняє зниження температури у нагрівачі 33 до криогенних рівнів.

Таким чином, робота дуплексного двигуна зводиться до почергового стиснення гелію в циліндрах 2, 3 з охолоджувачами 11, 12, лівому або правому з однієї сторони, та розширення його в регенераторах 31, 32, нагрівачі 33, що під'єднані до протилежного циліндра за високої температури, з керуванням потоками через дуплексний клапан 23, два регенератора 31 і 32 та одного нагрівача 33 системою відсічних клапанів 17, 18 та байпасних патрубків 13, 15. Поршні 4, 5 вільно коливаються відповідно до фаз стиснення/розширення, перетворюючи теплову енергію на механічну й далі - в електричну в лінійному генераторі 6. Завдяки такій організації процесів двигун може досягти термодинамічного ККД 58-60 %, а електричного ККД у діапазоні близько 49,3-51 % що вище ніж у типових стандартних ДВЗ-електрогенераторів, які зазвичай мають загальний електричний ККД на рівні 25-35 %.

Завдяки їхньому руху в циліндрах одночасно реалізуються процеси стиснення та розширення. Крім цього, є дві холодні камери та один нагрівач, тобто гаряча камера, між якими розташовані два регенератори, лівий та правий. Між кожним регенератором і холодною камерою встановлено дуплексний клапан з електромагнітним соленоїдним чи іншим приводом, що керує потоками робочого газу. Робочий газ (гелій) стискається у холодній камері при температурі приблизно 40-60 °C, після чого відсікається клапаном і проходить через регенератор у нагрівач з температурою 750-830 °C. Паралельно другий поршень виконує робочий хід розширення під підвищеним тиском. Зміна фаз відбувається почергово, що забезпечує модифікований цикл Стірлінга-Еріксона з ізотермічним стисненням з однієї сторони і нагріванням та розширенням газу з теплою політропою до $n=1,3$ за обов'язкового електричного навантаження на генератор з другої сторони, завдяки чому досягається підвищення ККД. Унаслідок такої організації двигун працює в автоколивальному вільно-поршковому режимі. На кожному півциклі один поршень виконує робочий хід, а інший - стиснення. Автоколивання стабілізуються завдяки пружним властивостям газу перепаду тиску, інерції поршнів та керованому перемикаю дуплексного і відсічних клапанів та перепадами тиску зворотних клапанів. Механічна енергія коливань поршнів безпосередньо без кривошипних механізмів передається на кінетичний рух неодимових магнітів, що рухаються і збуджують ЕРС у котушках статора.

Датчики Холла, встановлені поблизу поршнів, фіксують положення магнітів і передають сигнали на електронний блок керування, який точно перемикає дуплексний та відсічні клапани, реалізуючи модифікований цикл Стірлінга-Еріксона. Завдяки мінімізованому тертю через відсутність колінвалів, підшипників, шатунів, двигун має вищий ККД.

Оскільки рухома частина поршнів перебуває у холодній ділянці двигуна, можна використовувати ущільнення у вигляді тефлонових кілець на кожному поршні, що поліпшує фрикційні властивості та зменшує механічне тертя. Також можна не застосовувати мастило, що знижує експлуатаційні витрати.

Тому завдяки певним удосконаленням а саме:

1. Удосконалена система охолодження, завдяки чому всі рухомі поршні разом з лінійним генератором знаходяться в холодній зоні що знижує вимоги до ущільнювачів та знижує фрикційні енергетичні затрати і підвищує ККД

2. Використання оригінального дуплексного клапану приводить до оптимального управління потоками робочого тіла газу гелію в термодинамічних фазах що реалізує модифікований цикл

Стірлінга-Еріксона та зменшує в циклі "мертвий" за рахунок відсічення мертвих об'ємів нагрівача та регенераторів у фазі стиснення, що забезпечує зниження підігріву газу в стисканні, менша політропа (наближення до ≈ 1), менші витрати на стискання.

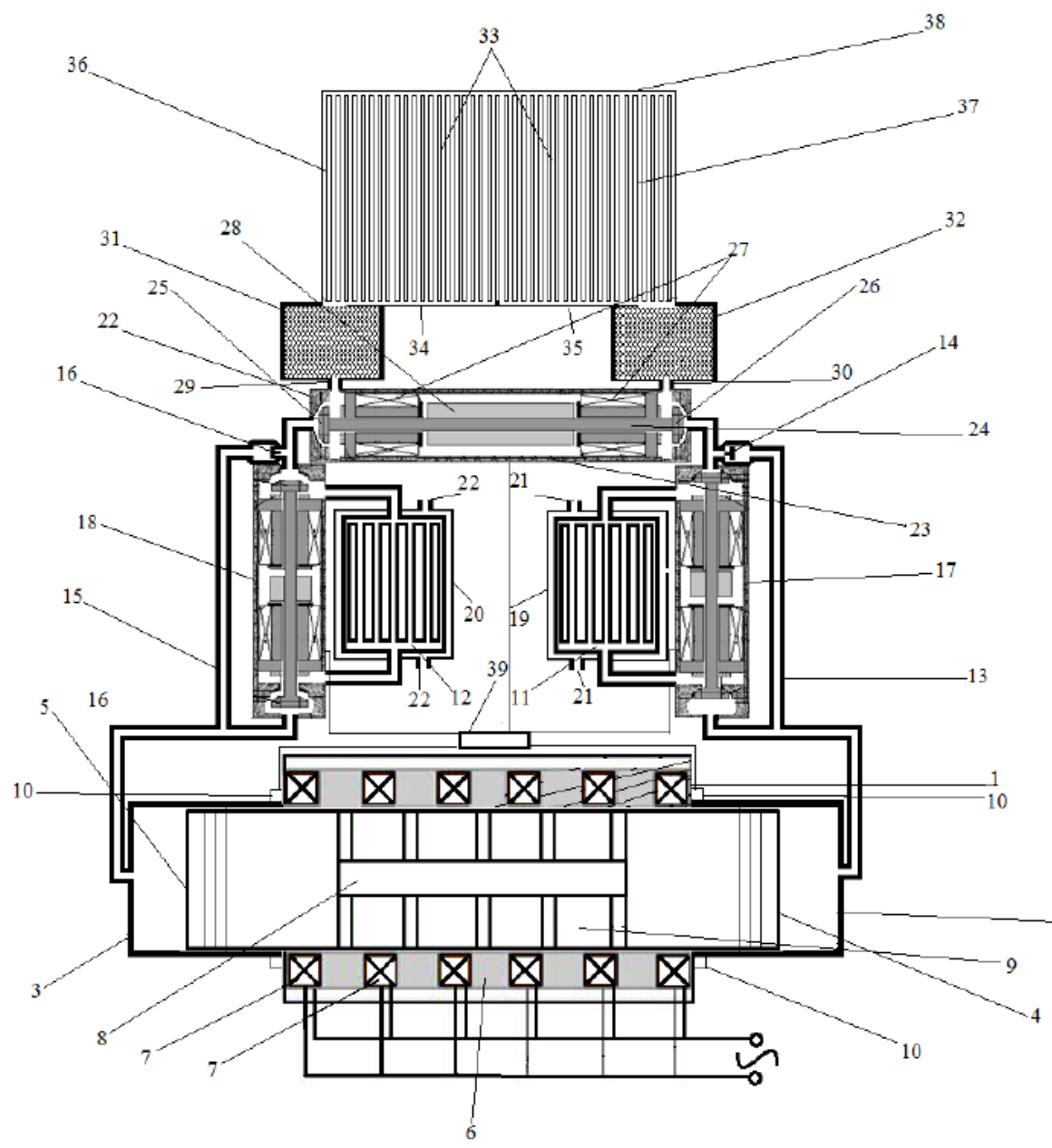
3. Використання оригінальних подвійних відсічних клапанів, що відсікають великі "мертві" об'єми охолоджувачів у фазі розширення, приводить до значного збільшення моментального початкового тиску в об'ємі розширення до 170-180 бар та максимальної різниці тисків між лівим та правим циліндром до 106 бар з теплою політропою до $n=1,3$ (при обов'язковому відборі електричної потужності) що призводить до значного підвищення індикаторної роботи та термодинамічного ККД.

4. Використання тугоплавкого матеріалу Inconel для трубок нагрівача та колекторів, який витримує тривало температуру 750~830 °С при тиску до 170-180 бар завдяки підвищеній температурі, значно зростає різниця температур між нагрівачем та охолоджувачем, що теж підвищує термодинамічний ККД.

Завдяки такій організації процесів в дуплексному двигуні, приводить до підвищення термодинамічного ККД 43-45 %, а електричного ККД у діапазоні близько 40,3-51 %, що вище ніж у типових стандартних ДВЗ-електрогенераторів, які зазвичай мають загальний електричний ККД на рівні 25-35 %, тому заявлене технічне рішення у вигляді дуплексного вільно-поршневого двигуна може бути конкурентоспроможним в нішах, де використовуються ДВЗ-електрогенератори.

Використання запропонованої корисної моделі дозволить отримати високоефективний вільно-поршневий двигун з підвищеним термодинамічний ККД на рівні 58-60 %, що призведе до збільшення загального електричного ККД у діапазоні близько 49,3-51 % і становить ККД до 58-60 % від підведеного тепла, замість звичайних 30-35 %. При використанні зворотного модифікованого циклу Стірлінга-Еріксона, підключаючи пристрій до електроенергії, його можна застосовувати як кріогенну машину для охолодження інфрачервоних сенсорів, квантових комп'ютерів тощо, також кріогенний прилад можна зробити у зменшеному вигляді, наприклад мікромасштабі, для використання в переносному варіанті.

Окрім цього, пристрій може використовувати різні види теплової енергії, а саме: сонячну, геотермальну, високотемпературних атомних реакторів, пальників з форсункою, що працюють на дизельному паливі, бензині, природному газі, біопаливі, промислових відходів і застосовуватися у промислових когенераційних системах, зменшуючи шкідливий вплив на довкілля завдяки скороченню викидів. Це робить пристрій більш екологічно чистим і сталим порівняно з відомими аналогами, що сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля завдяки зниженню викидів шкідливих речовин і робить його екологічно чистішим порівняно з наявними аналогами.



Φir. 1

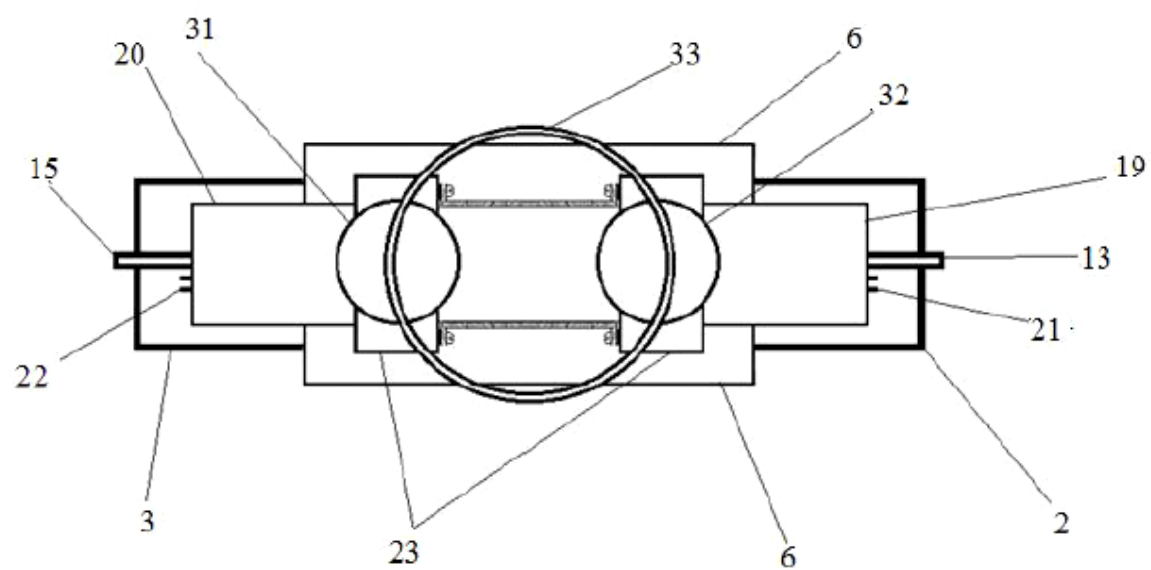


Fig. 2

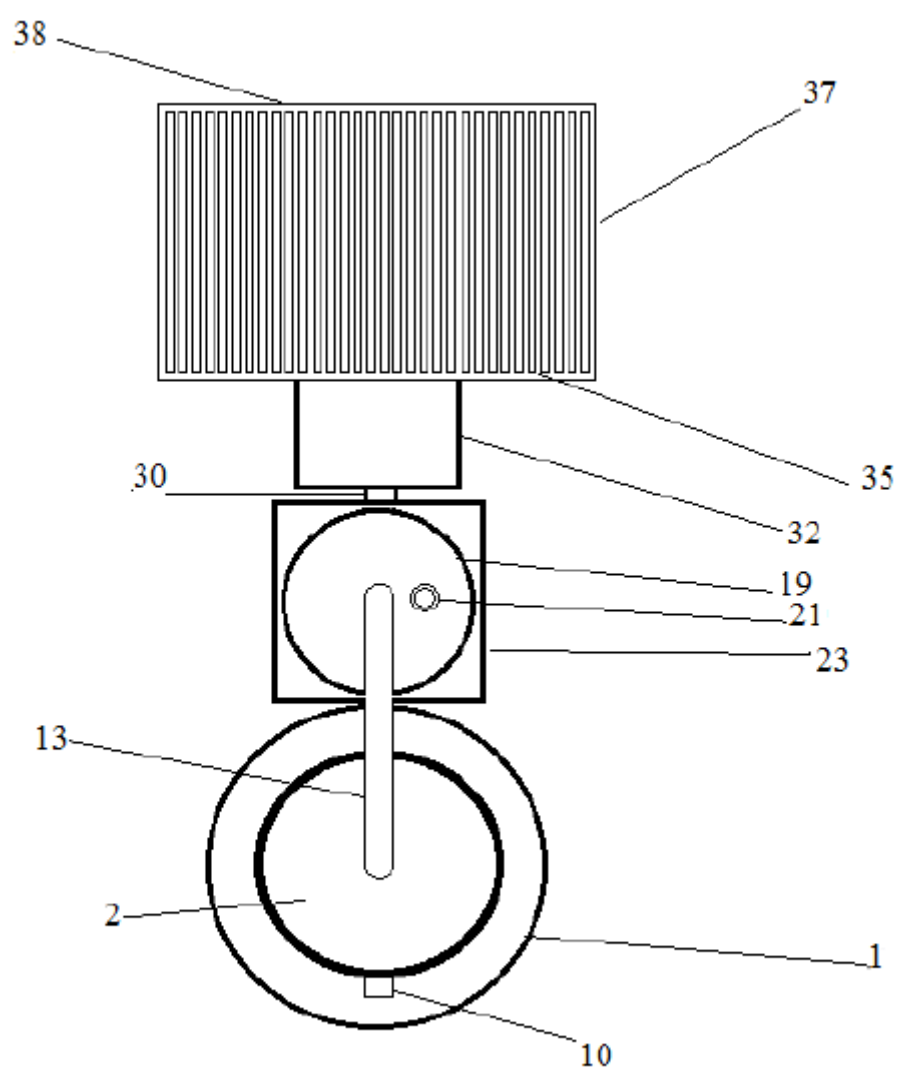


Fig. 3