

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Трандафілова Володимира Володимировича «Удосконалення газової холодильної машини Стірлінга для одержання помірною холоду»**, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 — «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування»

Актуальність теми дисертації. В даний час холод став обов'язковим елементом сучасного побуту, область його використання є досить широкою. Важко уявити життя великих міст, розвиток харчової промисловості і торгівлі без холодильних машин різної потужності. За допомогою холоду здійснюється кондиціонування повітря у виробничих і побутових приміщеннях. Навіть розвиток спорту пов'язаний з застосуванням холоду для створення штучних ковзанок.

Енергетика і виробництво холоду нерозривно пов'язані між собою. Залежно від холодопродуктивності сучасних холодильних машин їх споживана потужність коливається від декількох десятків ват до тисяч кіловат.

Найбільш поширеними є парокомпресійні холодильні машини (ПХМ). Однак емісія застосовуваних в ПХМ в якості робочих тіл фреонів на рубежі ХХІ-го століття призвела до загострення глобальних проблем, які потребують термінового вирішення: зменшення озонового шару Землі, посилення "парникового ефекту" і т.д. В результаті в 1980-х - 1990-х роках міжнародним співтовариством було прийнято кілька великих міжнародних законопроектів, які в значній мірі посилили вимоги до сучасних систем, що генерують холод, і були спрямовані на стабілізацію і поліпшення екологічної ситуації в зв'язку з небезпекою руйнування озонового шару і глобальним потеплінням.

В даний час досягнута межа вдосконалення парокомпресійних холодильних машин. Незважаючи на дедалі більші витрати на дослідження, помітних позитивних результатів для ПХМ не досягнуто. Більш того, перехід на нові холодоагенти призводить до зниження їх ефективності, значно ускладнює конструкцію і збільшує вартість як самих холодильних агентів, так і парокомпресійних машин в цілому. Ситуацію можна змінити лише за рахунок якісного прориву в холодильній техніці.

У зв'язку з цим відроджується інтерес до використання газових холодильних машин (ГХМ) Стірлінга на рівні помірною холоду. Проблемами створення нових зразків машин Стірлінга і їх виробництвом займається не менше 140 великих компаній і науково-дослідних організацій, багато з яких досягли значних успіхів і вийшли на серійне виробництво. Так, вже найближчим часом в ряді європейських країн і Південній Кореї планується почати масового випуску побутових холодильників на основі холодильних машин Стірлінга з лінійним приводом. Досягнутий рівень в проектуванні машин Стірлінга дозволяє створювати холодильні машини продуктивністю до 100 кВт з ефективністю в

1,5 рази вище, ніж у кращих зразків парокомпресійних холодильних машин. При цьому масогабаритні характеристики машин Стірлінга зменшуються до 20-30% відносно ПХМ.

В останнє десятиріччя з новою силою зріс інтерес до роторно-лопатевої машин газовой холодильних машин (РЛГХМ), які є одним з важливих напрямків процесу удосконалення ГХМ Стірлінга для отримання помірного холоду. Велика перевага по питомо-масовим показникам відкриває широкі можливості застосування роторно-лопатевої газовой холодильної машини для побутової та промислової холодильної техніки. Завдяки обертально-коливальному руху роторів лопатей і зменшенню втрат на тертя в робочих порожнинах при роботі на зазорах РЛГХМ володіє значно більшим ресурсом в порівнянні з поршневыми машинами.

В дисертаційній роботі Трандафілова Володимира Володимировича вирішене **актуальне** науково-прикладне завдання щодо удосконалення газовой холодильної машини Стірлінга та створення роторно-лопатевої холодильної машини, призначеної для використання в діапазоні помірних температур охолодження від 0°C до -100°C.

Мета і завдання дослідження. На основі нових конструктивних підходів розробити методіку проектування і розрахунку роторно-лопатевої газовой холодильної машини (РЛГХМ) двоблочного типу.

Для досягнення поставленої мети були поставлені та вирішені наступні **основні задачі:**

- виявити фактори, що дозволяють забезпечити ефективну роботу РЛГХМ;
- розробити математичну модель для чисельного дослідження параметрів і характеристик РЛГХМ;
- дослідити вплив режимних і геометричних параметрів на енергетичні характеристики холодильної машини;
- провести аналіз процесів роботи РЛГХМ при використанні в ній різних робочих тіл (гелій, азот, метан);
- розробити трьохпоточні пластинчасто-ребристі теплообмінники для РЛГХМ, які є її холодильником і рефрижератором;
- провести оцінку життєвого циклу роторно-лопатевої газовой холодильної машини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до програми фундаментальних і пошукових досліджень згідно з Постановою Верховної Ради України про виконання вимог Кіотського Протоколу від 1 березня 2010 року, а також указу Президента України №174 від 28.02.2008 р. «Про невідкладні заходи щодо забезпечення ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів», Енергетичної стратегії України на період до 2030 року, затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 року № 1071-р.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі вперше:

– розроблена працездатна і ефективна модель конструкції роторно-лопатевої газової холодильної машини; створені твердотільні моделі деталей і вузлів, що входять в конструкцію РЛГХМ;

– створена математична модель термодинамічного циклу реальної РЛГХМ у вигляді диференціальних рівнянь, що описують процеси стиснення і розширення робочого тіла в ізольованому об'ємі порожнини. Ці рівняння складені з урахуванням зміни маси газу в парних порожнинах, а також зміни, в залежності від кута оберту приводного вала, тисків і температур робочого тіла;

– розраховано і спроектовано обладнання для РЛГХМ з метою організації ефективного теплообміну в трьохпоточних протиточних теплообмінниках;

– проведено дослідження впливу режимних і конструктивних параметрів на енергетичні характеристики РЛГХМ в діапазоні температур помірною охолодження (від 0° до -100°C); показано, що використання створеної машини дозволяє досягти підвищення енергоефективності та зменшення масогабаритних характеристик у порівнянні з поршневіми ГХМ Стірлінга, що серійно випускаються;

– виконано аналіз процесів роботи РЛГХМ при використанні різних робочих тіл (гелій, азот, метан); показано, що при заміні гелію у РЛГХМ на інший газ енергетичні показники машини погіршуються.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів підтверджуються:

– коректністю постановки задачі у вигляді системи рівнянь, яка характеризується замкнутістю;

– використанням основних теоретичних положень термодинаміки, газової динаміки, теплофізики, теорії робочих процесів ГХМ при аналізі процесів, що відбуваються в холодильній машині, а також обґрунтованістю припущень, прийнятих при побудові математичної моделі робочих процесів РЛГХМ.

– забезпеченням адекватності математичних моделей результатом чисельного експерименту з максимальними розбіжностями не більше 5%.

– використанням сучасних математичних методів і апробованих програмних засобів проведення чисельних експериментів для оцінки основних показників РЛГХМ.

Дисертація і автореферат цілком відповідають паспорту спеціальності 05.05.14 — «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування».

Практичне значення отриманих результатів: показано, що розроблена роторно-лопатева конструкція має ряд переваг у порівнянні з ГХМ Стірлінга в яких використовується громіздкий кривошипно-шатунний привод;

– створено методику, яка дозволяє визначити закономірності протікання робочих процесів у двохблочній РЛГХМ;

– розроблена математична модель робочого процесу двохблочної РЛГХМ (математична модель може бути використана при створенні перспективних машин РЛГХМ іншого типу);

- розроблена програма чисельного рішення диференціальних рівнянь, що лежать в основі математичної моделі РЛГХМ, дає можливість проектувати машини вказаного типу на інші температурні рівні і холодопродуктивності;
- результати розрахункових досліджень дозволяють більш обґрунтовано задаватися параметрами двохблочної РЛГХМ;
- заміна гелію в РЛГХМ азотом знижує холодопродуктивність на 30%, а холодильний коефіцієнт на – 6%.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів полягає в розробці методів чисельного моделювання робочих процесів, що відбуваються в РЛГХМ, виконанні моделювання та отриманні рекомендацій по конструюванню РЛГХМ та її основних елементів.

Повнота викладення положень дисертації в опублікованих роботах. Основний зміст дисертації відображено в 5 публікаціях, з яких 5 статей опубліковані в спеціалізованих науково-технічних журналах, затверджених ДАК МОН України, які входять до міжнародних наукометричних баз.

Зміст роботи. Дисертація складається із вступу, п'ятих розділів та висновків. Зміст роботи викладено на 142 сторінках основного тексту, включаючи 55 рисунків, 13 таблиць. Список використаних джерел складає 82 найменування.

У *вступі* обґрунтовується актуальність теми дисертації, відображається зв'язок із державними програмами, сформульовані мета і завдання дослідження, а також відзначається наукова новизна, відображається особистий внесок здобувача, приводяться відомості про апробацію основних положень дисертації.

У *першому розділі* наведені результати аналітичного дослідження літературних джерел, які показали, що газові холодильні машини Стірлінга з успіхом використовуються в діапазоні помірних температур (від 0° до -100°С). Серед усіх розглянутих типів газових холодильних машини Стірлінга найбільший потенціал для виробництва холоду у вказаному діапазоні має роторно-лопатева газова холодильна машина. Ця машина характеризується рядом переваг перед іншими типами машин Стірлінга.

Виконаний аналітичний огляд дав можливість вибрати в якості об'єкта дослідження роторно-лопатева газова холодильна машина (РЛГХМ), а також сформувати перелік основних науково-технічних завдань, що підлягають вирішенню.

Другий розділ присвячений опису принципу дії створеної РЛГХМ. Описані конструкція і принцип роботи роторно-лопатевої газової холодильної машини. Зроблено висновок, що завдяки симетричній конструкції РЛГХМ добре врівноважена і створює мінімальний рівень вібрації. На відміну від ГХМ Стірлінга з шатунно-поршневим механізмом руху, у роторно-лопатевої газової холодильної машині менша кількість деталей – корпус і два ротори з лопатями. Місця стикування рухомих деталей утворюються великими поверхнями, що дозволяє досить просто і надійно їх ущільнювати.

Була розглянута кінематична схема та виявлено, що зміна кута між важелями $\varphi(\alpha)$ є гармонійною з періодом, рівним π . Наведена формула для радіусу кочення служить основою для математичного опису кінематики механізму перетворення руху лопатей в робочих блоках РЛГХМ.

Проведено оцінку відхилення теоретичного кута $\varphi(\alpha)$ між важелями від дійсного значення кута між важелями $\bar{\varphi}(\alpha)$ в залежності від кута оберту приводного вала α . Максимальні розбіжності між ними виявляються при куті оберту приводного вала $\alpha=\pi/3$ і складають близько 5° . Зіставлені теоретичні і розрахункові дані, що виявило деякі розбіжності, особливо характерні для прискорень точок і ланок механізму. Це призводить до відмінностей в амплітудах, графіках уздовж вісі, у значеннях при нульовому куті оберту приводного вала і за один повний оберт. Виявлені відхилення пояснюються тим, що комп'ютерна модель є твердотільною і при визначенні швидкостей і прискорень враховує інерційні сили і моменти, що виникають при обертанні механізму, а також характер сполучень ланок механізму перетворення руху. Комп'ютерна модель задається початковими умовами, які враховують моменти прискорення і гальмування.

Однак розбіжності в отриманих результатах незначні (не більше 3%) і не можуть суттєво вплинути на теоретичні показники.

У *третьому розділі* описана чисельна математична модель, розроблена для аналізу робочого процесу, що відбувається в порожнинах РЛГХМ. Математична модель двоблочної РЛГХМ побудована на основі законів збереження енергії і маси відкритої термодинамічної системи і рівнянні стану робочого тіла Клапейрона-Менделєєва.

Враховуючи конструктивні розміри роторно-лопатевої групи холодильної машини і параметрів механізму перетворення руху виведено закон зміни об'єму порожнини між лопатями в залежності від кута α . Визначено об'єми у вузлових точках циклу, в яких початок і кінець кожного процесу відповідають оберту приводного вала на 45° . Показано, що процеси, які відбуваються у двох порожнинах РЛГХМ аналогічні процесам в ідеалізованій ГХМ Стірлінга. Отримані вирази для холодопродуктивності, кількість тепла, що відводиться у навколишнє середовище через холодильник, та холодильного коефіцієнту ідеалізованої РЛГХМ. Виявлено, що холодильний коефіцієнт ідеалізованої машини Стірлінга і РЛГХМ строго рівні холодильному коефіцієнту циклу Карно.

Показано, як суттєво може знижуватися ефективність циклу при використанні адіабатних процесів стиснення і розширення замість ізотермічних. Наведені результати вивчення регенеративних процесів.

Особливістю роторно-лопатевої газової холодильної машини є організація регенеративних процесів при відсутності в ній регенератора традиційного типу. Автор показав, що процеси регенерації можна здійснити з використанням теплоємності маси лопатей машини і ефективного теплообміну

в пластинчасто-ребристих теплообмінниках робочого тіла з верхнім і нижнім джерелами тепла.

У четвертому розділі приведена уточнена методика розрахунку процесів, що враховує всі види втрат від незворотності в РЛГХМ. За основу був узятий цикл ГХМ з адіабатними процесами і регенерацією тепла в квазіізохоричних процесах. Виконані розрахунки характеристик циклу РЛГХМ показали, що при заміні ізотермічних процесів стиснення і розширення на адіабатні процеси ступінь термодинамічної досконалості знижується до 0,36.

Проведено порівняння параметрів газових холодильних машин Стірлінга з РЛГХМ. При однаковій холодопродуктивності $Q_E = 12$ кВт ефективність РЛГХМ у порівнянні з серійними поршневыми ГХМ Стірлінга вище на 15%. За масовими характеристиками у порівнянні з SPC-1 "Stirling Cryogenics» РЛГХМ менше в 2,5 рази, а в порівнянні з КГМ-9000/80 «Геліймаш» – у 15 разів. РЛГХМ характеризується також високою компактністю.

Виконано аналіз процесів роботи РЛГХМ при використанні різних робочих тіл (гелій, азот, метан) на температурному рівні 233 К. Показано, що для всіх робочих тіл холодопродуктивність збільшується із частотою обертання валу і підвищенням тиску заправки.

Охолодження на рівні 173 К можна організувати і на базі пароконденсаторних холодильних машин. Для порівняння з РЛГХМ була обрана ПХМ, призначена для конденсації газів на газозах. ПХМ представляє собою каскадну холодильну машину, яка працює на R717 або R290 в верхньому каскаді і R1150 (етилен) – в нижньому. Розрахунками показано, що розроблена РЛГХМ практично не поступається по термодинамічній ефективності каскадній ПХМ, однак перевершує останню за габаритними показниками, а також експлуатаційним якість і об'ємом капітальних витрат.

У даному розділі проведено чисельне дослідження компактного пластинчасто-ребристих теплообмінних апаратів для роторно-лопатевої газової холодильної машини. Розрахункова модель описує ефект вторинних параметрів, таких як вісева теплопровідність через металеву матрицю теплообмінника. Вивчено вплив геометричних параметрів і коефіцієнта теплопередачі. Отримано графік залежностей довжини, ефективності ребра і падіння тиску в теплообміннику в залежності від товщини ребра і щільності ребрення.

У завершальній частині четвертого розділу, представлена конструкція створеної РЛГХМ, яка характеризується високою ефективністю. Виходячи з проведеної стандартизації та уніфікації машини за рахунок застосування серійно виготовлених деталей запропонована конструкція дозволяє підвищити ступінь конструкторської та технологічної наступності. Зі зменшенням кількості сполучених деталей досягнуто підвищення надійності. Використання природних робочих тіл знижує шкідливий вплив на навколишнє середовище.

У п'ятому розділі досліджений життєвий цикл роторно-лопатевої газової холодильної машини. Оцінювався вплив технологій РЛГХМ від їх виробництва до кінця терміну служби для порівняння їх з реальним аналогом. Було визначено,

що виробництво, монтаж, експлуатація і утилізація РЛГХМ завдає на 37% менший шкідливий вплив на навколишнє середовище, ніж газова холодильна машина Стірлінга SPC-1.

Мова і стиль роботи. Матеріали роботи викладені послідовно, стиль оформлення відповідає вимогам до друкованих праць. Автореферат вірно відображає зміст дисертації.

За змістом дисертації та автореферату є наступні **зауваження та дискусійні положення:**

1. Останній пункт Практичного значення, на мій погляд, більш відноситься до висновків до дисертаційної роботи.

2. Рисунки 1.1 та 2.1 практично ідентичні. Рис 2.1 можна було не приводити. В другому розділі достатньо було послатися на рис.1.1.

3. Є деякі розбіжності в термінах: в перших розділах теплообмінні апарати були названі «холодильник» та «рефрижератор». В четвертому розділі (стор.107) – «холодильник» і «теплообмінник навантаження».

4. В розділі 4 наведені результати розрахунків моделі, результати розробки якої викладені в розділі 3. Автор не вказав, в якому редакторі була реалізована модель та проводились розрахунки.

5. На стор.84 є посилання на табл.1, якої немає в тексті дисертаційної роботи.

6. На стор.85 у останньому абзаці не зовсім ясно, яке «ускладнення пов'язане з необхідністю переходу до двоступінчастим стиску в ПХМ...».

7. На рис.4.4 максимум коефіцієнта термодинамічної ефективності спостерігається при температурі охолодження 233 К. Діаграми на рис 4.5-4.8 мають лінійний характер. При досліджених параметрах максимумів функцій, приведених на рис 4.5-4.8, мабуть, не було досягнуто.

8. Невдала назва підрозділу 4.8. Для уточнення змісту її добре було б розширити кількома уточнюючими фразами.

9. Неясно, чи були враховані технологічні втрати при розрахунках параметрів холодильних машин, які показані у табл.4.3.

10. У розділі 4.9 п.4 на стор.106 наведені оптимальні параметри для мінімального значення температурних напорів. Неясно, чи перевіряв автор, які тиски витримує при цьому пластинчато-ребристий теплообмінний апарат і чи входять ці значення в інтервал робочих параметрів РЛГХМ.

11. Як в дисертаційній роботі, так і в авторефераті після деяких підписів під рисунками недостатньо поля. Тому не всюди ясно, де закінчується підпис, а де починається подальший текст.

12. В тексті роботи та автореферату можна відмітити деякі стилістичні і редакторські похибки.

ВИСНОВКИ

1. Дисертація Трандафілова Володимира Володимировича «Удосконалення газової холодильної машини Стірлінга для одержання

помірного холоду», відповідає вимогам спеціальності 05.05.14 — «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування».

2. Тема дисертації актуальна і пов'язана з пріоритетними напрямками наукових досліджень і сучасними запитами холодильної промисловості.

3. Дисертація містить нові наукові результати та положення, достовірність і цінність яких не викликає сумнівів. Вона має внутрішню єдність. Зміст роботи свідчить про суттєвий особистий внесок автора в науку і техніку. Запропонована здобувачем методика розрахункових досліджень має теоретичне обґрунтування і підтверджена порівнянням з результатами досліджень інших авторів.

4. Результати дисертаційної роботи достатньо повно викладені в наукових фахових виданнях. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації, а перелічені в ньому публікації відповідають вимогам ДАК МОН України. В дисертації і авторефераті чітко вказаний особистий внесок автора в результати досліджень.

5. Наведені вище зауваження не змінюють загальної позитивної оцінки роботи.

7. Дисертація В.В. Трандафілова – завершена науково-дослідницька робота, яка містить рішення важливої науково-прикладної проблеми – розробку, дослідження характеристик та рекомендації щодо впровадження роторно-лопатевої газової холодильної машини, створеної на базі газової холодильної машини Стірлінга, для її використання в діапазоні температур 0...-100°C.

На підставі наведеного вище вважаю, що дисертація В.В. Трандафілова «УДОСКОНАЛЕННЯ ГАЗОВОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ СТРІЛІНГА ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ПОМІРНОГО ХОЛОДУ» повністю відповідає вимогам п.9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» МОН України, а її автор – Трандафілов Володимир Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 — «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування».

Офіційний опонент – провідний інженер
Технічного відділу ТОВ «Кріоін Інжинірінг»
кандидат технічних наук, Ph.D.,
старший науковий співробітник

Олександр О.В. Дьяченко

Підпис к.т.н., Дьяченко О.В. засвідчую
Директор по управлінню персоналом
ТОВ «Кріоін Інжинірінг»



Т.М. Бідюк

Підтверджено 3.06.2018
Вчений секретар

Влас МІЛОВАНОВ В.І.