

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.56

Перспективи використання термомеханічних компресорів у системах реконденсації ЗПГ

Ю. М. Симоненко¹✉, Є. В. Костенко²^{1,2}Одеський національний технологічний університет, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна✉ e-mail: ¹ysimonenko@cryoin.comORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-7827-0591>; ²<https://orcid.org/0000-0002-8164-6203>

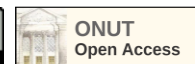
Робота спрямована на удосконалення термомеханічних компресорів, призначених для забезпечення систем реконденсації криогенних рідин. Перспективною сферою використання термокомпресорів може стати річковий танкерний флот, призначений для перевезення криогенних продуктів, наприклад, зрідженого газу. У холодильних установках реконденсації газу зазвичай використовують дросельні цикли високого тиску. Відомі схеми реконденсаторів зрідженого природного газу у цистернах середньої та малої ємності на основі одноступеневих криогенних газових машин (КГМ). У них реалізується зворотний цикл Стірлінга, а робочим тілом є гелій. Ресурс одноступеневих КГМ Стірлінга обмежений. Крім того, у них не виключено витоку гелію через ущільнення компресорного поршня. Перспективними газовими охолоджувачами є криогенератори Гіффорда з віддаленим компресором. Їх перевагою є скорочення кількості рухомих вузлів та точок потенційного витоку холодоагенту (гелію). Застосування охолоджувачів Гіффорда допускає утилізацію низькотемпературної теплоти шляхом термомеханічного компримування робочого тіла. Принцип дії термомеханічних компресорних агрегатів базується на споживанні теплової енергії для стиснення газів та механічної – для приводу самого компресора. Пропонується використовувати енергетичні ресурси холодних і нагрітих потоків на ЗПГ-танкерах або суднах-бункерувальниках ЗПГ. В якості низькотемпературного потоку виступає випарний газ, відбираємий з танка у вигляді палива головного двигуна або утворюється у процесі бункерування. Теплим джерелом може бути забортна вода чи вихлопні гази двигуна. Впровадження у практику нового типу охолоджувачів на базі сукупного використання термокомпресорів та газових криогенераторів дозволить збільшити термін бездренажного зберігання низькотемпературних рідин та знизити обсяг потенційних викидів.

Ключові слова: Газові машини; Тепловикористальні холодильні машини; Регенератор; Холодоносій; Термомеханічний компресор; Реконденсація; ЗПГ; Утилізація теплоти; Транспортування рідини; Енергозбереження; Енергоефективність

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2820>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Переваги природного газу незаперечні. При його спалюванні викиди шкідливих компонентів на порядки нижче порівняно з іншими видами палив. Викиди природного газу мають менший вплив на парниковий ефект. Ці переваги дають підстави

вважати природний газ паливом майбутнього. Обсяги його використання збільшуються в середньому до 2,5% на рік [1], а глобальний обсяг видобутку коливається на рівні $4 \cdot 10^{12}$ м³/рік [2]. Постачальники цього продукту стикаються із низкою логістичних складнощів. Родовища природного газу, як правило, розташовані на значній відстані

від споживачів. З економічних міркувань або через геологічні (кліматичні) особливості території транспортування продукту трубопроводом виявляється нерентабельним. У такому разі можливі кілька технічних рішень для «беструбної» подачі палива. Серед них – каталітичне перетворення природного газу на рідкі вуглеводні з відносно високою температурою фазової рівноваги [3]. Однак така технологія є досить складною і її реалізація пов'язана зі значними капітальними витратами. Для малотоннажних перевезень на відстань до 1000 км практикують доставку природного газу в стислому стані [4]. При температурі 20 °С та тис-

ках 200...250 бар густина стиснутого газу становить $\rho_{ст} = 162...194 \text{ кг/м}^3$. Слід враховувати, що для забезпечення названих тисків будуть потрібні товстостінні масивні балони, вага яких перевищить вагу продукту, що перевозиться. Основним варіантом велико-і середньотоннажних перевезень залишається транспортування газу як криогенної рідини. При переході в рідкий стан природний газ (ЗПГ) має густину порядку $\rho_L = 415 \text{ кг/м}^3$ (що в двое вище за густину компримованого газу при тиску 25 МПа) та температуру близьку до азотного рівня (рис. 1). При цьому для зберігання криогенної рідини використовують відносно легкі ємності.

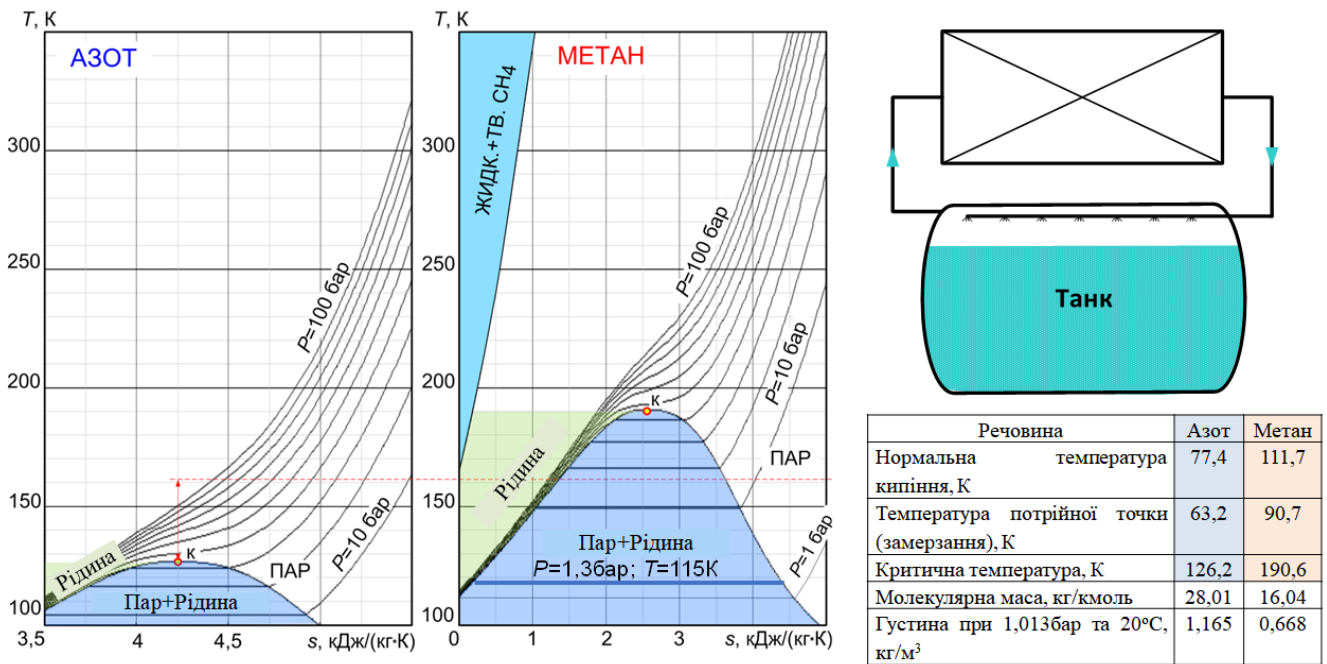


Рисунок 1 – Реконденсація ЗПГ для підвищення терміну бездренажного зберігання

Незважаючи на наглядні переваги, низькотемпературне зберігання природного газу пов'язане з необхідністю відведення тепла від ЗПГ. У транспортних умовах частково збільшити термін бездренажного зберігання можна за рахунок відбору газової фракції для живлення двигунів. Але радикальним розв'язанням проблеми є розміщення на газозаправних системах повторної конденсації. Особливо це актуально при середньотоннажних річкових перевезеннях із тривалими переходами, включаючи шлюзування. Реконденсатори ЗПГ також потрібні на самохідних судах-бункерувальниках, в яких тривалий час зберігаються значні обсяги рідкого метану. Через відносно малу кількість плавучих споживачів ЗПГ та непередбачуваної логістики газопаливних суден такий бункерувальник здатний

тривалий час чекати на потенційного споживача рідкого криогенного палива.

2. Утилізація низькопотенційного тепла у холодильній техніці

В умовах дефіциту та зростаючої вартості електроенергії перспективним є використання теплоти для енергетичного забезпечення рефрижераторів. Спектр областей використання охолоджувачів, що використовують тепло, досить широкий. Основними джерелами тепла є: сонячна енергія; тепло когенераційних установок; тепло технологічних процесів, наприклад, у харчовій промисловості; тепло двигунів внутрішнього згорання; тепловиділення електронного обладнання.

Розглянемо приклади тепловикористальних систем, що реалізують зворотні термодинамічні цикли. Загальною ознакою цих установок є наявність трьох джерел тепла: теплий (наприклад, гелієвий колектор), навколишнє середовище та об'єкт охолодження. На рис. 2 показана схема екологічної адсорбційної холодильної установки. У якості джерела тепла у ній використовується сонячна енергія, а робочим тілом є вода [5].

Установка включає два однотипні апарати, які заповнені цеолітом і мають змійовики для почергової подачі теплоносія та охолоджуючого середовища. У верхній частині встановлений конденсатор, який також підключений до системи охолодження. У нижній частині схеми показаний випарник, пов'язаний з об'єктом охолодження. У стані «а» (рис. 2) у лівий апарат 1 надходить теплоносій з боку сонячного колектора (не показаний).

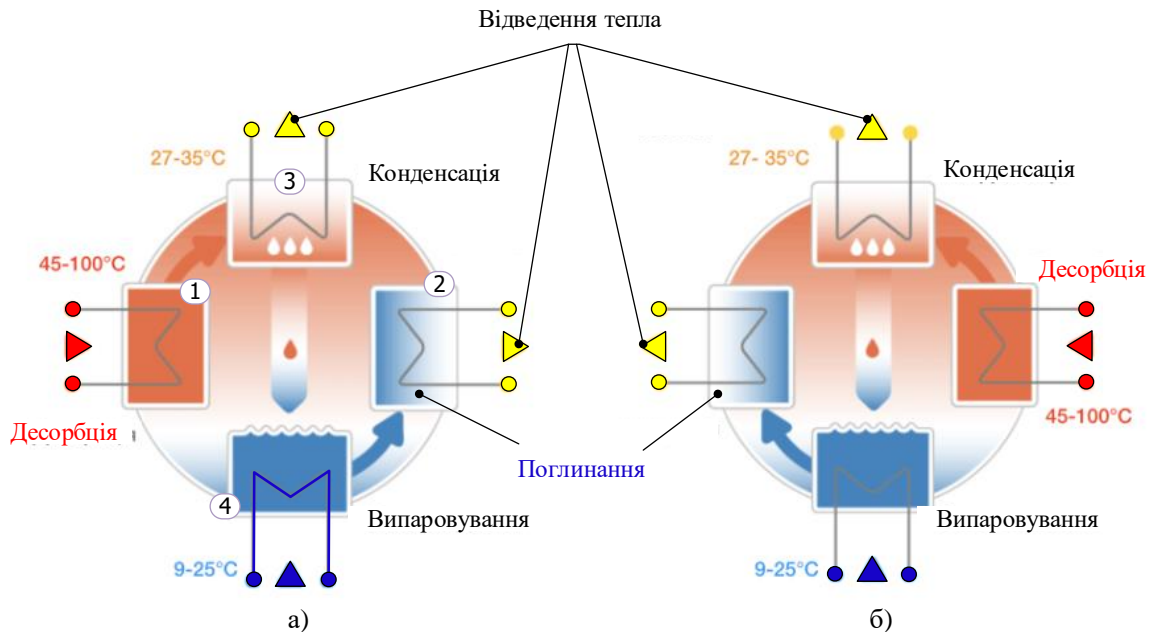


Рисунок 2 – Принцип дії адсорбційного охолоджувача. 1, 2 – адсорбери; 3 – конденсатор; 4 – випарник

При підвищенні температури в апараті 1 насиченому H_2O відбувається десорбція вологи. Пара надходить у холодний конденсатор 3 і переводиться в рідку фазу. Вода стікає в нижню секцію 4 – випарник, в якому підтримується знижений тиск за рахунок поглинання пари в правому адсорбері 2. При випаровуванні пари в правому адсорбері 2. При випаровуванні води в нижньому апараті 4 відбирається тепло від проміжного охолоджувача, пов'язаного з об'єктом охолодження. Після насичення правого адсорбера 2 і завершення процесу десорбції в 1 відбувається перемикання теплоносіїв. Правий апарат охолоджується та переводиться в режим поглинання, а в лівому (2) починається десорбція.

На процесі сорбції базуються також холодильні машини, що засновані на застосуванні екзотермічного змішування та ендотермічного поділу. При цьому поглинач, наприклад водно-аміачний розчин, виступає у вигляді рідини [6]. Тому такі термотрансформатори носять назву «абсорбційні». Подібно до установки, показаної на рис. 2, для приводу абсорбційних охолоджувачів використовується зовнішнє тепло (Q_T на рис. 3).

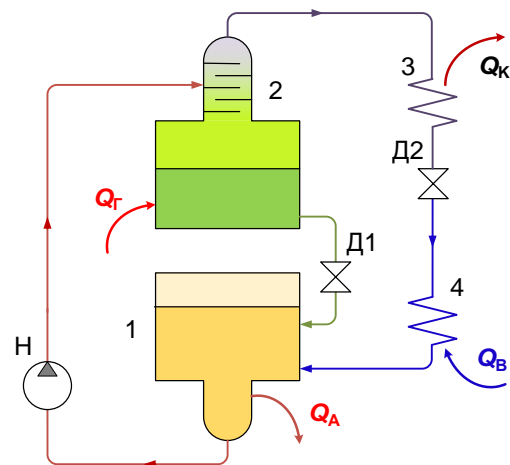


Рисунок 3 – Спрощена схема класичного абсорбційного термотрансформатора: 1 - абсорбер; 2 - генератор; 3 - конденсатор; 4 - випарник.

У абсорбері 1 відбувається поглинання парів агента, що надходить з випарника 4. Тепло абсорбції Q_A відводиться в навколишнє середовище. В результаті змішування потоків утворюється

концентрований розчин, який насосом Н подається в генератор 2. Оскільки густина рідкої суміші при підвищенні тиску практично не змінюється, витрати на насосі Н відносно незначні.

У генераторі відбувається кипіння концентрованого розчину за рахунок підведення зовнішнього тепла Q_G . При цьому утворюються два потоки. Газоподібна фракція є практично чистим аміаком зі слідами води, а рідка – слабкий розчин NH_3 у H_2O . Рідина дроселюється за допомогою Д1 у абсорбер 1, а аміак переводиться в рідку фазу в апараті 3 за рахунок відведення тепла конденсації Q_K . В результаті дроселювання Д2 до тиску в абсорбері температура аміаку знижується, і він здатний відводити тепло від об'єкта охолодження у випарнику 4.

Крім водоаміачних абсорбційних систем у холодильній техніці також знайшли застосування бромистолітієві установки [7]. За аналогією з класичними парокомпресійними машинами в розглянутій схемі (рис. 3) можна виділити компресор і

процес холодопродуктивності. З тією лише різницею, що компресія відбувається термохімічним чином у групі елементів: генератор 2 → дросель Д1 → абсорбер 1 → насос Н. Основний процес здійснюється в конденсаторі 3 → дроселі Д2 → випарнику 4.

Пароелектронні холодильні установки відносяться до екологічно безпечних систем, оскільки працюють за замкнутою схемою, а робочим тілом у них є вода. Основним апаратом таких охолоджувачів служить струменевий компресор (ежектор), в якому сукупність робочих процесів здійснюється за рахунок передачі кінетичної енергії від потоку пари до пасивного середовища та супроводжується їх змішуванням на виході з отриманням потоку з проміжним тиском [8]. У якості робочого агента в ежекторних холодильних машинах використовуються екологічно безпечні речовини: вода, пропан, *n*-і ізобутани. На рис. 4 показана спрощена схема пароелектронної холодильної установки та процеси в діаграмі *T-s*.

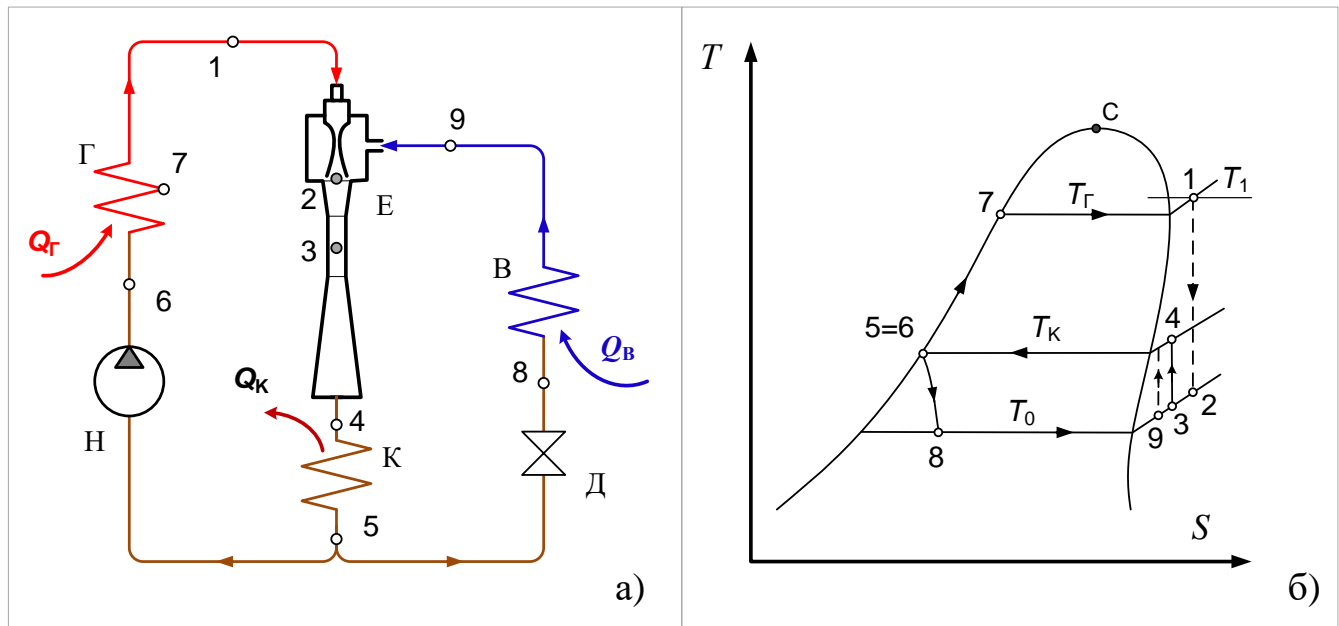


Рисунок 4 – Спрощена схема ежекторної холодильної установки (а) та теоретичний цикл у *T-s* діаграмі (б): Г – генератор; Е – ежектор; В – випарник; К – конденсатор; Н – насос; Д – дросельний вентиль

У випарнику «В» відбувається кипіння робочого агента, наприклад, води при зниженому тиску (процес 8-9). При цьому рівноважна температура фазового перетворення T_0 стає нижче навколишнього середовища і випарник відбирає тепло Q_B від об'єкта, що охолоджується. Низький тиск у контурі випарника підтримується за рахунок струменевого апарату Е. Компенсуючий процес для отримання активного потоку 1 в ежекторі

здійснюється за допомогою комплексу апаратів: конденсатора К, насоса живлення Н і парогенератора Г, до якого підводиться зовнішнє тепло з температурою $> T_G$.

Перевагою абсорбційних охолоджувачів є екологічна безпека, обмежена кількість рухомих елементів та можливість створення енергозберігаючих систем за відносно низького температурного потенціалу тепла.

3. Тепловикористальні машини в кріогеніці

Найпоширенішим типом тепловикористальних систем низькотемпературної техніки є газові машини. Їхня загальна ознака – об'єднання в єдиному пристрої холодильної машини і теплового двигуна. «Тепловий» і «холодильний» циліндри пов'язані і утворюють єдиний замкнутий об'єм, в якому газ може переміщатися в тепловому контакті з джерелами різної температури. Температура у гарячій зоні складає порядку $T_{\Gamma} = 950 \dots 1000$ К, у проміжному обсязі – на кілька десятків градусів вище за навколишнє середовище ($T_{\Pi} = 350 \dots 360$ К). За таких умов машина здатна охолоджувати об'єкти на рівні температури $T_{\chi} = 80 \dots 100$ К [9].

Як робочі тіла в газових машинах можна використовувати всього кілька робочих тіл: повітря, азот, гелій і водень. Однак перші дві речовини допустимо застосовувати тільки при помірних температурах охолодження, оскільки при $T_{\chi} < 130$ К

робоче тіло може утворювати рідку фазу. Гелій і водень не мають температурних обмежень для даної техніки і мають унікальні теплофізичні властивості – низькі значення в'язкості та високу теплопровідність. З урахуванням вибухонебезпечності водню, у промислових зразках газових машин використовують переважно гелій.

На Рис. 5-а представлений один із конструктивних варіантів тепловикористального генератора холоду. Машина містить два циліндри з витискувачами 1 і 2. Вони приводяться в дію за допомогою штоків 7 і 8, введених в об'єм через сальники 3 і можуть здійснювати незалежні зворотно-поступальні переміщення. Верхній вузол є модифікованим термокомпресором та призначений для створення періодичних коливань тиску в циклі. Пульсації тиску забезпечуються за допомогою витискувача 1, який служить для перештовхування робочого газу з гарячої порожнини 4 у проміжну порожнину 5 через теплообмінники 9-10 і регенератор 12.

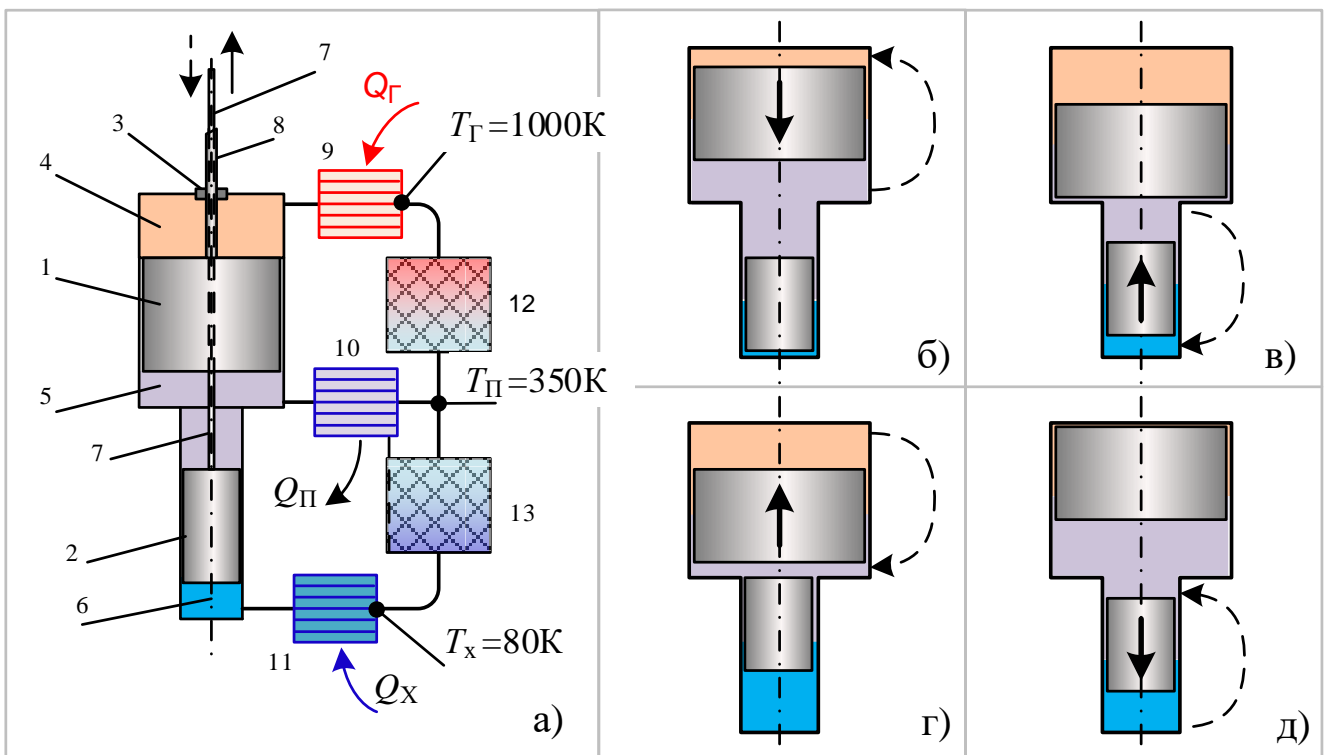


Рисунок 5 – Схема тепловикористальної газової машини (а) та послідовність процесів протягом одного періоду: 1 – теплий витискувач; 2 – холодний витискувач; 3 – сальникове ущільнення штока витискувача; 4 – гаряча порожнина; 5 – проміжна порожнина; 6 – холодна порожнина; 7 – шток холодного витискувача; 8 – шток теплового витискувача; 9 – нагрівач; 10 – холодильник; 11 – рефрижераторний теплообмінник; 12 – теплий регенератор; 13 – холодний регенератор

Нижній блок слугує для забезпечення газового холодильного циклу. Аналогічно термокомпресійної ступені витискувач 2 періодично переміщає газ

із порожнини 5 в 6 і назад через апарати 10, 11 і 13. Умовно повний цикл можна розділити на чотири фази:

б) – підвищення тиску (компресорний хід). Холодний витискувач 2 знаходиться в крайньому нижньому положенні. При русі витискувача 1 вниз газ із порожнини 5 надходить у порожнину 4. При проходженні через теплообмінні апарати 10 → 12 → 9 температура робочого тіла збільшується та тиск підвищується.

в) – перештовхування газу до холодної зони. При нерухомому витискувачі 1 витискувач 2 рухається вгору і переводить частину газу з проміжної порожнини 5 в холодну 6. Проходячи через теплообмінники 10 → 13 → 11 робоче тіло охолоджується, а тиск в порожнинах частково знижується.

г) – зниження тиску (детандерний перебіг). Витискувач 2 знаходиться у верхній мертвій точці, а верхній витискувач 1 починає рух вгору і перештовхує газ з гарячої порожнини 4 в проміжну 5. У процесі проходження через апарати 9 → 12 → 10 газ охолоджується, а тиск падає до мінімального значення. Температура у холодній порожнині знижується.

д) – перештовхування холодного газу в проміжний обсяг. При нерухомому витискувачі 1 витискувач 2 рухається вниз і переміщає газ з холодної зони 6 в проміжний об'єм 5. Проходячи через рефрижератор 11 газ відводить тепло Q_X від об'єкта охолодження і підігрівається в теплообмінниках 13 і 10. Тиск робочого тіла починає підвищуватися. Далі цикл повторюється.

Запропоновано декілька компоновальних варіантів тепловикористальних газових машин. Для схеми показаної на рис. 5-а, характерне телескопічне розташування штоків, які виводяться в одному напрямку через гарячу порожнину. Відомий варіант, при якому штоки, орієнтовані в протилежних напрямках, проходять окремо через холодну та теплу зони.

Рядне розташування циліндрів не знайшло застосування через близьке розташування гарячої та холодної порожнин. В опозитних і кутових (г- і v-образних) конструкціях кривошипно-шатунний механізм приводу зазвичай поєднаний з проміжною порожниною. Однак у разі відсутності сальників таке рішення збільшує мертвий обсяг та суттєво знижує ККД охолоджувача.

Як приклад на рис. 5а показаний набір температур, характерних для тепловикористальної машини. У ній є високопотенційне джерело ($T_H = 1000$ К), скидання тепла Q_H відбувається в навколишнє середовище, а кріостатування здійснюється

на рівні азотних температур ($T_X = 80$ К). При охолодженні об'єктів до температур $T_X = 20$ К створені машини, в яких як тепле джерело виступає навколишнє середовище ($T_T \approx 300$ К), а для відведення тепла на проміжному рівні використовується рідкий азот ($T_H = 78$ К). Подібні машини можуть забезпечувати енергозбереження шляхом використання ексергії парів кріогенних рідин, наприклад, ЗПГ.

4. Використання термокомпресорів у системах реконденсації ЗПГ в умовах середньотонажних річкових перевезень

У ряді придунайських країн розробляється концепція малотоннажних перевезень ЗПГ вздовж європейських річок. Привабливість такого проекту базується на безперечних екологічних, економічних та законодавчих перевагах зрідженого газу як моторного палива. Під цю програму розроблено спеціалізовані річкові танкери-газовози та опрацьовано проектну документацію на супутню інфраструктуру. Уздовж Дунаю визначено низку перспективних портів для зберігання та перевалки ЗПГ. Вони утворюють розвинену мережу хабів та імпортерських терміналів задля забезпечення кінцевих споживачів (Рис.6).



Рисунок 6 – План ЄС «Рейн-Майн-Дунай» перевезення ЗПГ з використанням річок і каналів, що сполучає Північне та Чорне моря.

У холодильних установках реконденсації газу зазвичай використовують дросельні цикли, у яких тиск після компресора становить порядку $P_c = 200$ бар. У якості робочого тіла в них використовується метан (Рис.7а, б). З метою підвищення термодинамічної ефективності практикують попереднє зниження температури прямого потоку за допомогою додаткового пропанового (рис.7б) або етанового циклів [10, 11]. Перспективним є вико-

ристання у якості холодоагенту багатокомпонентних сумішей (рис.7в) [10]. Сумішеві холодильні

цикли не знаходять поширення через складність забезпечення компонентного складу робочого тіла.

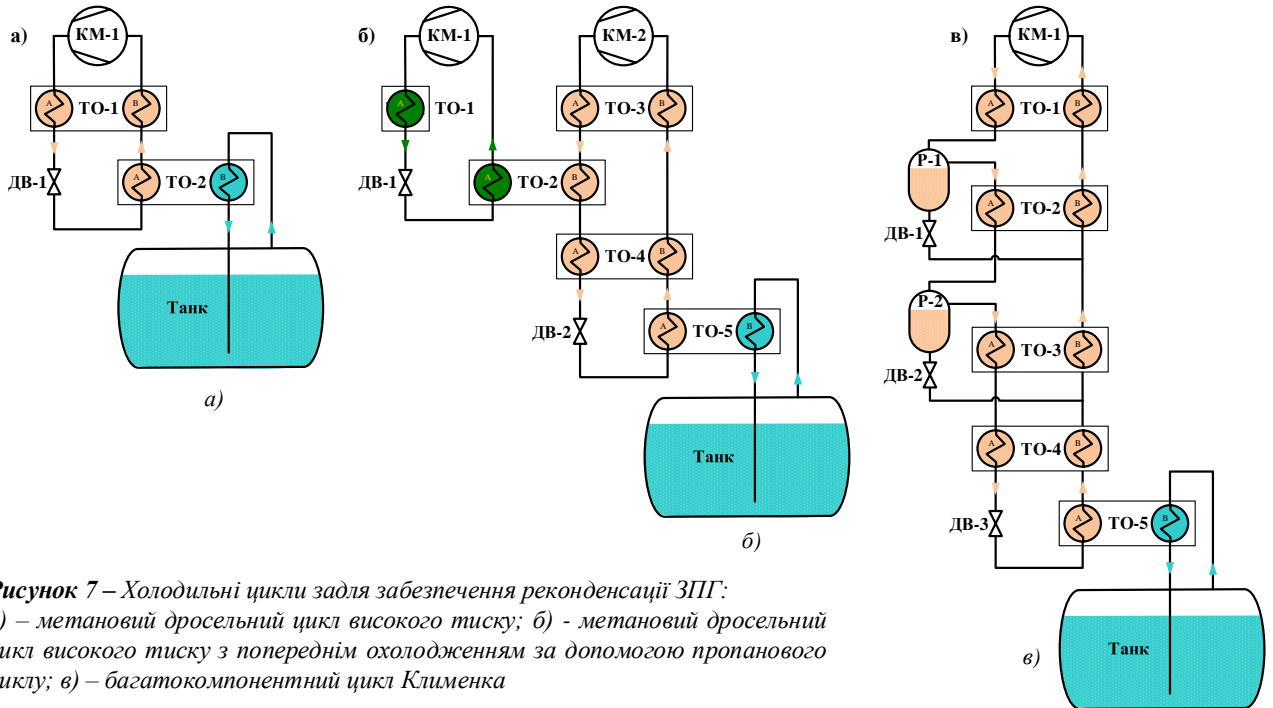


Рисунок 7 – Холодильні цикли задля забезпечення реконденсації ЗПГ:
 а) – метановий дросельний цикл високого тиску; б) - метановий дросельний цикл високого тиску з попереднім охолодженням за допомогою пропанового циклу; в) – багатокомпонентний цикл Клименка

Реконденсацію ЗПГ у цистернах середньої та малої ємності можна здійснити за допомогою одноступеневої кріогенної газової машини (КГМ). Найбільшого поширення набули КГМ, які працюють за зворотним циклом Стірлінга (рис. 8). Вони мають замкнутий контур, а їх робочим тілом є гелій [11, 12].

Ресурс одноступеневих КГМ Стірлінга обмежений. Крім того, у них не виключено виток гелію через ущільнення компресорного поршня.

Перспективними газовими охолоджувачами є кріогенератори, розроблені за участю Гіффорда (Рис. 9).

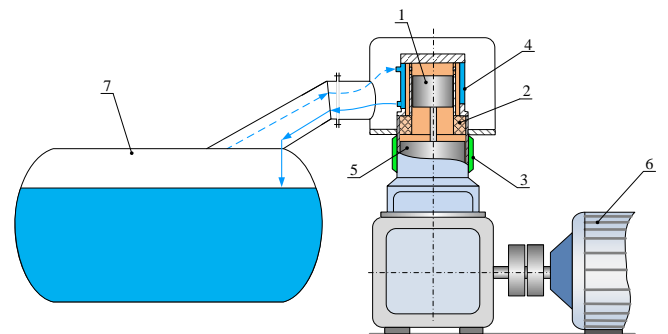


Рисунок 8 – Одноступенева КГМ Стірлінга:
 1 – витискувач; 2 – регенератор; 3 – холодильник; 4 – теплообмінник навантаження; 5 – компресорний поршень; 6 – двигун; 7 – танк

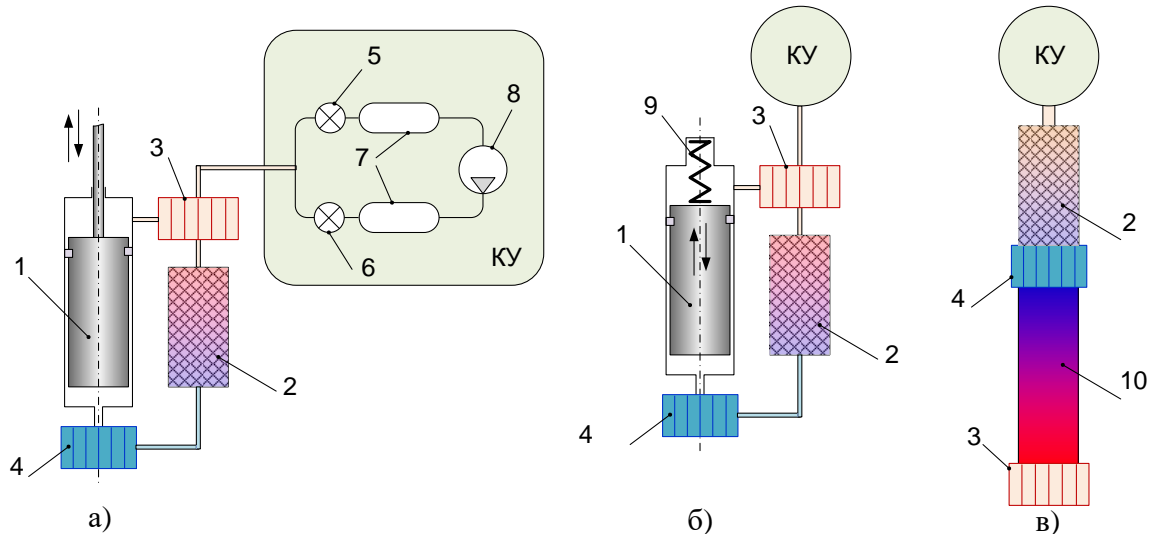


Рисунок 9 – Кріогенератори Гіффорда (а), Мак-Маг'она (б) та Лонгсворта (в) з відокремленим компресором: 1 – витискувач; 2 – регенератор; 3 – холодильник; 4 – теплообмінник навантаження; 5 та 6 – впускний та випускний клапани; 7 – ресивери; 8 – компресор; 9 – пружина; 10 – камера енергорозділу

Їх перевагами є використання відокремленого компресора та скорочення ущільнень рухомих вузлів. Деякі моделі (рис.9б, в) допускають створення герметичних контурів, які вимагають підживлення робочого тіла.

Застосування для охолодження газових циклів Гіффорда з віддаленим компресором відкриває можливість термомеханічного компримування робочого тіла. Для цього пропонується використо-

увати наявні енергетичні ресурси холодних і нагрітих потоків на ЗПГ-танкерах. В якості носіїв таких можна розглядати газову фракцію, що відбирається з танка як паливо головного двигуна, а також потік вихлопних газів. Спрощені схеми теплового забезпечення термокомпресора умовно показані на Рис.10. У першому випадку (рис.10а) як тепле джерело використовують забортну воду. У другому – вихлопні гази двигуна (рис.10 б).

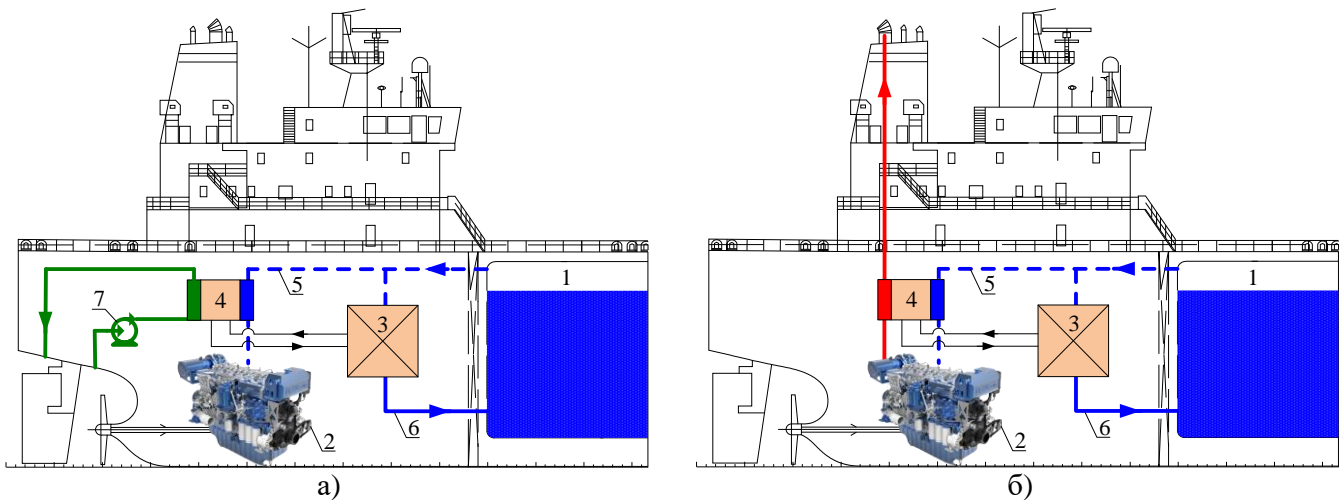


Рисунок 10 – Схеми реконденсації ЗПГ на основі термокомпресора: 1 – танк із ЗПГ; 2 – головний двигун на криогенному паливі; 3 – блок реконденсації з урахуванням газового циклу Гіффорда; 4 – термомеханічний компресор; 5 – лінія подачі парів ЗПГ у двигун; 6 – переохолоджений конденсат; 7 – водяний насос

5. Висновки

Розробка термомеханічних компресорів, призначених для забезпечення циклів Гіффорда в системах реконденсації криогенних рідин є актуальним завданням.

Впровадження у практику нового типу охолоджувачів на базі сукупного використання термокомпресорів та газових криогенераторів дозволить збільшити термін бездренажного зберігання низькотемпературних рідин та знизити обсяг потенційних викидів.

Стосовно проблеми зберігання ЗПГ, утилізація низькотемпературної теплоти за рахунок використання термокомпресії супроводжуватиме зниження втрат продукту, скоротить енергетичні витрати при його перевезеннях і, як наслідок, і сприятиме зниженню собівартості цього екологічного палива.

На підставі вищевказаного виготовлено багатофункціональний стенд для дослідження характеристик термокомпресорних ступенів в інтервалі температур від 90К (-183 °С) до 350К (77 °С) та тисках до 10 МПа. Вивчено роботу термонагнітача

на одно- та двоатомних робочих тілах. Запропоновано та випробувано суміщені з регенератором витиснувачі з тефлону або целазолу. Доведено їхню працездатність аж до тиску 10 МПа.

Для високонапірних термокомпресорів зусилля на шток витиснувача, що виходить за межі робочої камери, може становити 100...200 кг. Для зменшення навантаження та з метою виключення витоків робочого тіла через сальник запропоновано та апробовано герметичний магнітний привід із зусиллям до 120 Н.

Експлуатаційними перевагами створеного низькотемпературного термокомпресора є герметичність робочого об'єму; відсутність змащування деталей тертя; можливість роботи при тиску більше, ніж 10 МПа [13].

Особистий внесок авторів CRediT

Симоненко Ю.М.: концептуалізація, методологія, еволюція загальних цілей та завдань, адміністрування, візуалізація. **Костенко Є.В.:** дослідження, формальний аналіз, верифікація, візуалізація, програмне забезпечення.

Література

1. IHS Markit Global Energy Scenarios data set – Energy outlook to 2050. Inflections scenario. IHS Markit. July 2021. VERSION 1.0. URL: <https://connect.ihsmarkit.com/gpe/energy-climate-scenarios/dashboard/overview> (дата звернення 02.04.2024).
2. Statistical Review of World Energy. 72nd edition. – 2023. – 64 p. URL: https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_PD_F_single_3.pdf (дата звернення 02.04.2024).
3. Schlumberger authors. Turning Natural Gas to Liquid // Oilfield Review 15. – 2003. – No. 3. – P. 32-37.
4. Stenning S., Mackey T. CNG Opens New Markets // Fundamentals of the Global LNG Industry. – London: Petroleum Economist, 2007. – P. 67-68.
5. Xuannan Wu., Tianshu Ge., Yanjun Dai., Ruzhu Wang. Research on the Water Vapor Adsorption Performance of WPPF Coated with Silica Gel // 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration, April, 12-14, 2018, Shanghai, China. – 2018. – No. 282.
6. Zaitsev A., Mehrpooya M., Ghorbani B., Sanavbarov R., Naumov F., Shermatova F. Novel integrated helium extraction and natural gas liquefaction process configurations using absorption refrigeration and waste heat // International Journal of Energy Research. – 2020. – Vol. 44. – P. 6430-6451.
7. Петренко В.О., Воловик О.С., Єрін В.О. Облaстi рaціoнaльнoгo зaстoсувaння eжeктoрних хoлoдильних машин, щo використовують легкокиплячі рoбoчі рeчoвини // Хoлoдильнa тeхнiкa и тeхнoлoгiя. – 2005. – №1. – С. 17-30.
8. Морозюк Л.І. Тепловикористальні холодильні машини – шляхи розвитку і вдосконалення // Хoлoдильнa тeхнiкa и тeхнoлoгiя. – 2014. – №5 (151). – С. 23-29.
9. Bruno S. Leo. United States Patent US3892102A.. Vuilleumier Refrigerator Hot Cylinder Burner Head. July 1, 1975. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/10/4b/42/5697a08e9e7aef/US3892102.pdf> (дата звернення 02.04.2024).
10. Minigulov R.M., Rudenko S.V., Vasin O.E., Gritishin D.N., Sobolev E.I. Installation and Method for Liquefying Natural Gas. 20.09.2018. № WO 2018/169437 A1. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2018169437A1/ru> (дата звернення 02.04.2024).
11. Chang H.M., Lim H.S., Choe K.H. Effect of multi-stream heat exchanger on performance of natural gas liquefaction with mixed refrigerant // Cryogenics. – 2012. – No. 52. – P. 642-647.
12. Bahram Ghorbani, Mehdi Mehrpooya, Milad Sadeghzadeh. A novel LNG reproduction layout using ejector refrigeration, an auto-cascade refrigeration system, and an ethylene compression refrigeration cycle // Chemical Papers. – 2022. – Vol. 76. – P. 7647-7665.
13. Simonenko, Iu.M., Chygrin, A.A. Kostenko, Ye.V. Cryogenic thermomechanical compressor // Problemele Energeticii Regionale. – 2023. – No. 2 (58). – P. 150-159.

Отримана в редакції 03.04.2024, прийнята до друку 03.06.2024

Prospects for the use of thermomechanical compressors in LNG recondensation systems

Iurii Symonenko^{1✉}, Evgeny Kostenko²

^{1,2}Odesa National University of Technology, 1/3 Dvoryanska Str., Odesa, 65082, Ukraine;

✉ e-mail: 1ysimonenko@cryoin.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-7827-0591>; ²<https://orcid.org/0000-0002-8164-6203>

The work is aimed at improving thermomechanical compressors designed to provide recondensation systems of cryogenic liquids. A promising field of use of thermocompressors can be the river tanker fleet designed for the transportation of cryogenic products, for example, liquefied gas. High-pressure throttle cycles are usually used in gas recondensation refrigeration units. Known schemes of liquefied natural gas recondensers in tanks of medium and small capacity based on single-stage cryogenic gas machines (CGM). They implement the reverse Stirling cycle, and the working medium is helium. The resource of single-stage CGM Stirling is limited. In addition, they do not exclude the leakage of helium due to the sealing of the compressor piston. Promising gas coolers are Gifford cryogenerators with a remote compressor. Their advantage is the reduction of the number of moving nodes and points of potential refrigerant (helium) leakage. The use of Gifford coolers allows utilization of low-temperature heat by thermome-

chanical compression of the working fluid. The principle of operation of thermomechanical compressor units is based on the consumption of thermal energy to compress gases and mechanical energy to drive the compressor itself. It is proposed to use the energy resources of cold and heated streams on LNG tankers or LNG bunkering vessels. The low-temperature flow is vaporized gas taken from the tank in the form of main engine fuel or formed in the bunkering process. The warm source can be outboard water or engine exhaust gases. The introduction into practice of a new type of coolers based on the combined use of thermocompressors and gas cryogenerators will make it possible to increase the period of undrained storage of low-temperature liquids and reduce the volume of potential emissions.

Keywords: Gas machines; Heat-using refrigerating machines; Regenerator; Cold carrier; Thermomechanical compressor; Recondensation; LPG; Heat utilization; Liquid transportation; Energy saving; Energy efficiency

References

1. IHS Markit Global Energy Scenarios data set – Energy outlook to 2050. Inflections scenario. IHS Markit. July 2021. VERSION 1.0. Retrived 02 April 2024 from <https://connect.ihsmarkit.com/gpe/energy-climate-scenarios/dashboard/overview>.
2. Statistical Review of World Energy. 72nd edition. – 2023. – 64 p. Retrived 02 April 2024 from https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_PDF_single_3.pdf
3. Schlumberger authors. (2003) Turning Natural Gas to Liquid. *Oilfield Review* 15, 3, 32-37.
4. Stenning, S., Mackey, T. (2007) CNG Opens New Markets. *Fundamentals of the Global LNG Industry, London: Petroleum Economist*, 67-68.
5. Xuannan, Wu., Tianshu, Ge., Yanjun, Dai., Ruzhu, Wang. (2018) Research on the Water Vapor Adsorption Performance of WPPF Coated with Silica Gel. *6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration, April, 12-14, 2018, Shanghai, China*, 282.
6. Zaitsev, A., Mehrpooya, M., Ghorbani, B., Sanavbarov, R., Naumov, F., Shermatova, F. (2020) Novel integrated helium extraction and natural gas liquefaction process configurations using absorption refrigeration and waste heat. *International Journal of Energy Research*, 44, 6430-6451.
7. Petrenko, V.O., Volovyk, O.S., Ierin, V.O. (2005) Areas of rational use of ejector refrigerators of machines using low-boiling working substances. *Refrigeration engineering and technology*, 1, 17-30.
8. Morozyuk, L.I. (2014) Heat-using refrigerating machines – ways of development and improvement // Refrigeration technology and technology. *Refrigeration engineering and technology*, 5 (151), 23-29.
9. Bruno, S. Leo. United States Patent US3892102A.. Vuilleumier Refrigerator Hot Cylinder Burner Head. July 1, 1975. Retrived 02 April 2024 from <https://patentimages.storage.googleapis.com/10/4b/42/5697a08e9e7aef/US3892102.pdf>
10. Minigulov, R.M., Rudenko, S.V., Vasin, O.E., Gritsishin, D.N., Sobolev, E.I. Installation and Method for Liquefying Natural Gas. 20.09.2018. № WO 2018/169437 A1. Retrived 02 April 2024 from <https://patents.google.com/patent/WO2018169437A1/ru>.
11. Chang, H.M., Lim, H.S., Choe, K.H. (2012) Effect of multi-stream heat exchanger on performance of natural gas liquefaction with mixed refrigerant. *Cryogenics*, 52, 642-647.
12. Bahram, Ghorbani, Mehdi, Mehrpooya, Milad, Sadeghzadeh. (2022) A novel LNG reproduction layout using ejector refrigeration, an auto-cascade refrigeration system, and an ethylene compression refrigeration cycle. *Chemical Papers*, 76, 7647-7665.
13. Simonenko, Iu.M., Chygrin, A.A. Kostenko, Ye.V. (2023) Cryogenic thermomechanical compressor. *Problems of the regional energetics*, 2 (58), 150-159.

Received 03 April 2024

Approved 03 June 2024

Available in Internet 30 June 2024