

# ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.565.9:620.91

## Створення термодинамічних схем гібридних тепловикористальних водоаміачних термотрансформаторів

Л.І. Морозюк<sup>1✉</sup>, С.О. Псарьов<sup>2</sup><sup>1-2</sup>Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>lara.morozyuk@gmail.comORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-4133-1984>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7738-4194>

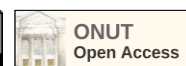
Існуючі сучасні проблеми виробництва штучного холоду пов'язані з використанням нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії та з виконанням світових екологічних вимог. Сонячна енергетика узгоджується з концепцією розподіленого виробництва енергії з отриманням трьох корисних ефектів: електрики, тепла та холоду. Абсорбційні водоаміачні термотрансформатори (АТТ) є елементом енергоперетворювальної системи. В роботі представлено синтез схем і циклів понижувальних АТТ з залученням термодинамічного аналізу «методом циклів». Здійснено поетапний перехід від оборотного циклу-зразка до теоретичного циклу водоаміачного термотрансформатора з інженерними обмеженнями шляхом зміни параметрів циклу: температур гріючого джерела та охолоджуючого середовища, зони дегазації. У аналізі температуру виробництва холоду прийнято постійною, зону дегазації прийнято чинником ефективності циклу. Розглянуто термодинамічну схему та цикл гібридного термотрансформатора – одноступенева абсорбційна машина з механічним бустером (компресором або ежектором). Запропоновано напрямки у розвитку термотрансформатора у випадку низької температури гріючого джерела або високої температури охолоджуючого середовища. Надано термодинамічні схеми гібридних систем з компресором (ежектором) на стороні високого тиску та на стороні низького тиску з механічним та тепловим приводом бустера. Розглядаючи ежектор як пароструминний компресор, встановлено, що термодинамічні цикли термохімічних компресорів з тепловим приводом бустерів збігаються. Різноманіття схемних рішень гібридних термотрансформаторів значно більше циклових, тому для абсорбційно-компресорних розглянуто лише циклові рішення. Безліч схем засновано на взаємному розміщенні основного та додаткового контурів. Будь-яке схемне рішення має як позитивні, так і негативні якості. Тільки результати термoeкономічного аналізу за конкретних умов експлуатації можуть вказати оптимальне схемне рішення.

**Ключові слова:** Гібридний абсорбційний водоаміачний термотрансформатор; Термодинамічна Схема; Цикл; Механічний бустер; Зона дегазації

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i1.2785>

© 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

Існуючі сучасні проблеми виробництва штучного холоду (охолодження та кондиціонування), що пов'язані з використанням нетрадиційних і відно-

влювальних джерел енергії та з виконанням світових екологічних вимог, спонукають пильного вивчення фахівцями, настільки специфічні умови їхньої роботи. Приблизно 18% споживання енергії в усьому світі задовольняється з відновлювальних

енергетичних джерел. Сонячна енергетика – вид нетрадиційної енергетики, який заснований на безпосередньому застосуванні сонячного випромінювання. Генерування енергії на основі сонячних електростанцій узгоджується з концепцією розподіленого виробництва енергії – розміщення автономних джерел електроенергії в безпосередній близькості від споживачів. Завдяки цьому стає можливим використання не тільки виробленої електроенергії, а й теплової енергії на потреби опалення, гарячого водопостачання та холодопостачання самого власника енергетичної установки і сторонніх споживачів. Це дозволяє домогтися високої ефективності використання сонячної радіації (майже 90% від потенційної енергії) [1]. Сьогодні «зелена» енергетика змушує по-новому подивитися на існуючі технології, що може привести до виникнення нових, і вдосконалення напрямків у використанні енергоперетворювальних систем.

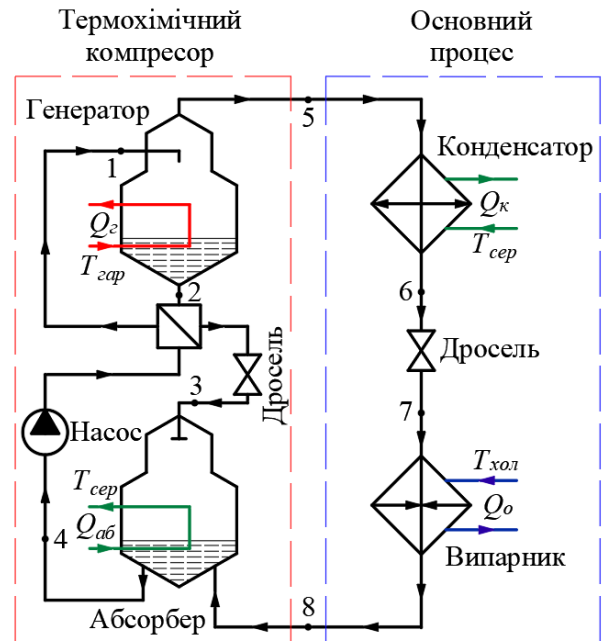
Абсорбційні термотрансформатори (АТТ) знову стали об'єктом термодинамічного вивчення. Теорію спеціальних типів абсорбційних термотрансформаторів було розглянуто ще у середині минулого століття Б.М.Блієром, Л.М.Розенфельдом і Б.А.Мінкусом [2] у додатку до низькотемпературних машин великої продуктивності промислового призначення. Особливість розглянутих машин – використання винятково водоаміачного розчину у якості робочої речовини. Водоаміачні термотрансформатори відрізняються великою складністю процесів в порівнянні з такими, що працюють на інших парах «агент-сорбент». Про це свідчить огляд сучасних досліджень, оприлюднений у роботах [3,4]. Переважна більшість робіт, що аналізовані, містять дослідження систем кондиціювання з бромідом літію. Незважаючи на велику кількість можливих схемних рішень водоаміачних термотрансформаторів, кількість відповідних їм термодинамічних схем обмежена. Водоаміачні машини мають велику металоємність, однак з появою нових типів компактних тепло- і масообмінних апаратів вони можуть виявитися набагато ефективніше нині відомих і застосовуваних машин [5,6].

## 2. Абсорбційний термотрансформатор

### Головні характеристики

Термін «абсорбційна холодильна машина» відповідає понижувальному термотрансформатору з корисним ефектом у вигляді виробництва холо-

ду. Принципова технологічна схема зображена на рис.1.



**Рисунок 1** – Принципова технологічна схема одноступеневого понижувального абсорбційного термотрансформатора

Головними характеристиками АТТ є теплові потужності теплообмінних апаратів: генератора  $Q_g$ , абсорбера  $Q_{аб}$ , конденсатора  $Q_k$ , випарника  $Q_{вип}$ , що пов'язані з зовнішніми джерелами тепла. Основна енергетична характеристика термотрансформатора – коефіцієнт перетворення  $COP = Q_{вип} / Q_g$ .

Будь-який абсорбційний термотрансформатор (рис 1) умовно може бути поділений «за пристроєм» на термохімічний компресор та основний процес.

При цьому схемно-циклове рішення основного процесу абсорбційного та компресорного термотрансформаторів збігається. Значного інтересу набуває множина схемних рішень у сукупності з процесами термохімічного компресора.

### Головні параметри – температурний режим

В абсорбційних понижувальних термотрансформаторах «за засобом» необхідно мати три джерела енергії різних температурних потенціалів:

- високопотенційне ( $T_{гар}$ ),
- середньопотенційне ( $T_{сер}$ ),
- низькопотенційне ( $T_{хол}$ ).

Три температурних рівні в одноступневих АТТ взаємопов'язані так, що тільки два можуть бути обрані довільно, третій – завжди є функцією будь-яких двох. Для холодильних машин  $T_{хол}$  і  $T_{сер}$

обирають в залежності від технічного завдання проєкту, вони є незалежними для систем. Визначення теоретичної  $T_{\text{гарт}} = f(T_{\text{сер}}, T_{\text{хол}})$  для одноступеневої машини надано роботах [2, 7]. Співвідношення реальних температур значно складніші, дійсні значення  $T_{\text{гарт}}$  значно вище теоретичних.

Сонячний, геотермальний і інші види відновлювальної і нетрадиційної енергії, як гріюче джерело для живлення тепловикористальних термотрансформаторів, мають низький температурний потенціал, що для умов України не перевищує 100 °С. У той же час режим опалення характеризується температурами теплоносія від 55 до 90 °С.

З загального досвіду створення АТТ відомо, що здійснити цикл одноступеневого АТТ при  $T_{\text{гарт}} = 100$  °С і  $T_{\text{сер}} = 80 \dots 100$  °С неможливо навіть теоретично, тому що це суперечить Другому закону термодинаміки.

Як доведено у роботі [7], температурні напори у теплообмінниках АТТ теж взаємно пов'язані при відомій різниці температур ( $T_{\text{гарт}} - T_{\text{гарт}}$ ), зі зміною одного змінюються інші, і змінюється інтервал температур кипіння розчину у генераторі ( $T_2 - T_1$ ). В одноступених абсорбційних системах загальний напір температур зменшується зі зниженням температури кипіння холодоагенту  $T_0$  і температури теплоносія  $T_{\text{гарт}}$ . Це призводить до зменшення температурних напорів в окремих апаратах, до збільшення металоємності системи. Одночасно зменшується зона дегазації, що призведе до збільшення витрат тепла, електроенергії та охолоджуючого середовища та зниження енергетичної ефективності системи.

#### Головні параметри – зона дегазації

У одноступених АТТ «за засобом» існують два рівні тиску, що визначаються умовами основного процесу: тиск конденсації  $p_k$  і тиск кипіння  $p_0$ .

У термохімічному компресорі кінцева температура кипіння розчину  $T_2$  та тиск генерації  $p_r$  визначають концентрацію слабого розчину  $x_a$ . Кінцева температура абсорбції  $T_4$  та тиск  $p_a$  визначають концентрацію міцного розчину  $x_r$  у циклі. Концентрація холодоагенту  $x_d$  в основному процесі коректно може бути прийнята рівною одиниці.

Різниця концентрацій міцного та слабого розчинів у циклі (зона дегазації  $\Delta x = x_r - x_a$ ) є другим параметром для АТТ, що впливає на ефективність роботи будь-якого АТТ. При різному поєднанні вихідних температур у циклі термотрансформатора величина зони дегазації  $\Delta x$  може

набувати значення  $\Delta x > 0$ , але не менше 0,06, що допускається для практичної реалізації найпростішого одноступеневого циклу АТТ [2]. При нульовому  $\Delta x = 0$  та від'ємному  $\Delta x < 0$  значеннях величини зони дегазації цикл одноступеневого АТТ не здійснений навіть теоретично. Однак ці випадки найчастіше зустрічаються у сучасних умовах при використанні низькопотенційних відновлювальних джерел енергії, що гріють генератор, або використанні охолоджуючого середовища з підвищеною температурою. Для практичної реалізації циклів з розглянутими сучасними температурними рівнями експлуатації, можна штучно розширити зону дегазації.

### **3. Термодинамічний аналіз у синтезі термотрансформатора**

#### Зміна температури гріючого джерела

Термодинаміка циклів є початковою стадією будь-якого дослідження енергоперетворювальних систем. Використовуючи термодинамічний аналіз, здійснено синтез схемно-циклового рішення абсорбційної машини з розширенням зони дегазації шляхом підвищення температури гріючого джерела тепла  $T_{\text{гарт}}$ . Інструментом термодинамічного аналізу використано «метод циклів» [5]. В результаті ідеальний оборотний цикл-зразок і відповідна ідеальна схема машини перетворилася на реальне схемно-циклове рішення з «перевищенням температури» і «зворотнім поданням розчинів» з оцінкою його енергетичної ефективності [5].

В усіх існуючих термохімічних компресорах АТТ використано кругообіг розчину, що складається з одного висхідного потоку міцного розчину й одного низхідного потоку слабого розчину (рис. 1).

За цією схемою може функціонувати АТТ із розширеною зоною дегазації при використанні ефектів:

- послідовної абсорбції;
- послідовної генерації;
- багатоступеневої матеріальної регенерації.

Розглянуто засіб розширення зони дегазації у двопотокових системах АТТ можливого зниження температури кінця абсорбції [2]:

- застосовувати ступеневу абсорбцію ( $P_a^n < P_a^{(n-1)}$ ) або для охолодження  $n$ -абсорбера (при  $P_a^n = P_a^{(n-1)}$ ) використовувати більш холодну воду (можливо, артезіанську). Цей засіб зменшує можливість одержання більш гарячої води як теплоносія

трансформованого тепла, що робить його зовсім нерациональним для випадку теплових насосів і теплофікаційних машин;

- використовувати для охолодження абсорбера частину корисної холодопродуктивності (наприклад, система «каскад»). Подібні системи використовують винятково для водоаміачних АТТ у режимі низькотемпературних холодильних машин з виробництвом холоду на рівні  $-70 \dots -50$  °С.

Кожний з перерахованих вище випадків відповідає будь-якому з обмежень у виборі трьох основних температурних рівнів. Необхідно відзначити, що основний процес абсорбційного термотрансформатора може бути зв'язаний на усьому своєму протязі з процесами у термохімічному компресорі, а може проходити зовсім самостійно.

В одноступеневих абсорбційних машинах зі зниженням температури отримання  $T_{\text{хол}}$  і температури теплоносія  $T_{\text{гар}}$  загальний тепловий напір зменшується. Це призводить до зниження температурних напорів в апаратах і до збільшення металоемності установки. При цьому зменшується зона дегазації, що збільшує витрату зовнішніх джерел енергії (тепла, води та електрики).

## Зміна тисків з використанням механічної компресії

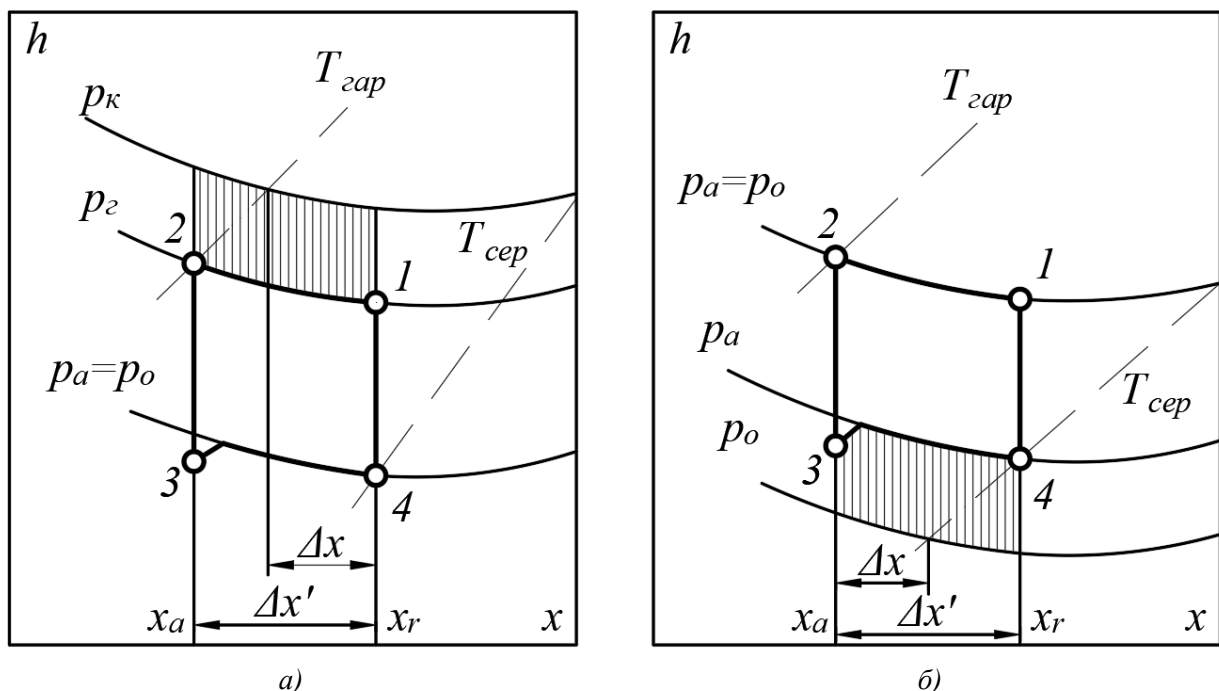
Використання пристроїв для підвищення тисків (бустерів) дозволить збільшити загальний тепловий напір і розширити зону дегазації.

Найбільш перспективним є використання одноступеневого абсорбційного термотрансформатора з механічним бустером (компресором або ежектором).

Автори пропонують розглянути два напрямки в розвитку абсорбційно-компресорного термо-трансформатора (рис.2).

Випадок низької  $T_{\text{гар.}}$ . Для забезпечення значення  $\Delta x' > \Delta x$  необхідно знизити тиск у генераторі ( $p_{\text{г}} < p_{\text{к}}$ ). Для підтримки необхідного значення  $p_{\text{к}}$  пара аміаку після генератора стискується механічним шляхом до значення  $p_{\text{к}}$ , обумовленого  $T_{\text{сер.}}$ . У цьому випадку цикл термохімічного компресора буде мати вигляд – рис. 2а.

Випадок високої  $T_{\text{сер.}}$ . Пара холодоагенту після випарника стискується механічним шляхом до деякого значення  $p_a$ , що відповідає можливості забезпечення необхідного значення  $\Delta x' > \Delta x$  при заданому  $T_{\text{сер.}}$ . У цьому випадку цикл термомічного компресора буде мати вигляд – рис. 26.



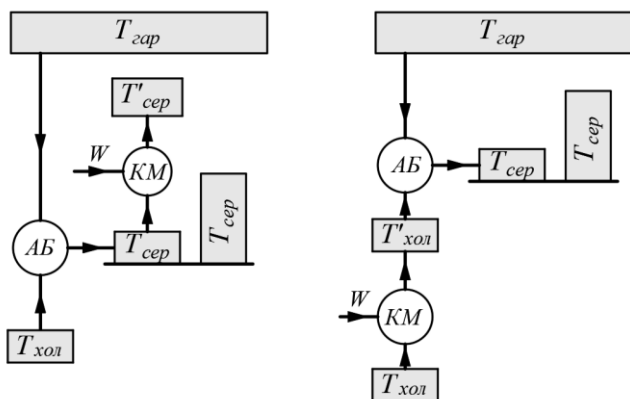
**Рисунок 2 – Цикли термохімічних компресорів гібридних АКТТ: а) – бустер на стороні високого тиску; б) – бустер на на стороні низького тиску**

Застосування компресора з механічним приводом як допоміжного пристрою між випарником і абсорбером відомо давно [2] для випадку низькотемпературних холодильних машин. Низькотем-

пературні водоаміачні абсорбційні машини широкого застосування в промисловості не знайшли у зв'язку з великими масогабаритними характеристиками, тому цей окремий випадок АКТТ актуаль-

ним не є й авторами не розглядається.

Зона компресії пари агента механічним шляхом передбачається значно менше термохімічної компресії. Якщо при створенні АКТТ температури  $T_{\text{гар}}$ ,  $T_{\text{сер}}$  і  $T_{\text{хол}}$  забезпечили величину  $\Delta x' > 6\%$ , то з'являється можливість організувати внутрішній енерговиробний контур для забезпечення механічною енергією компресор і таким способом уникнути необхідності додаткового підведення електричної енергії (крім приводу насосів) для роботи АКТТ (рис.3).



**Рисунок 3** – Термодинамічні схеми гібридних АКТТ з механічним приводом бустера: а) – на стороні високого тиску; б) – на стороні низького тиску

АКТТ складаються з трьох контурів:

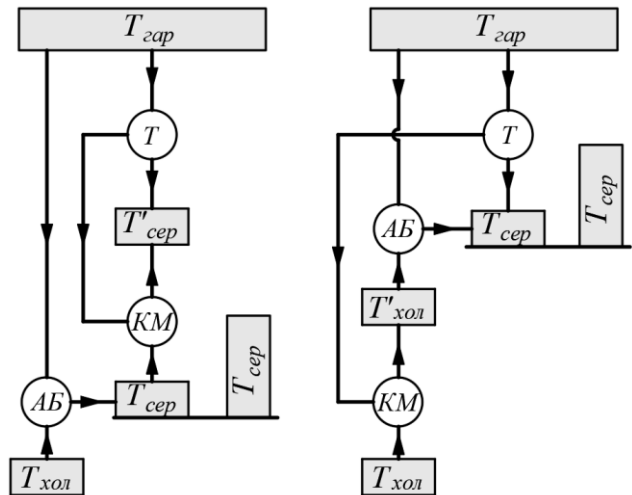
- основного, у якому відбувається термохімічна компресія;
- компресорного, у якому відбувається механічне стиснення;
- додаткового, у якому створюється робота для приводу компресора.

Кожен контур працює за своїм циклом. Об'єднання трьох циклів утворює один загальний цикл АКТТ. Граничні концентрації міцного розчину  $x_r$  і слабого розчину  $x_a$  утворюють зону дегазації АКТТ у цілому, незалежно від того, до якого внутрішнього циклу вони відносяться. Термодинамічні схеми триконтурних АКТТ надано на рис. 4.

Кожен контур працює за своїм циклом. Об'єднання трьох циклів утворює один загальний цикл АКТТ. Граничні концентрації міцного розчину  $x_r$  і слабого розчину  $x_a$  утворюють зону дегазації АКТТ у цілому, незалежно від того, до якого внутрішнього циклу вони відносяться.

Різноманіття схемних рішень АКТТ значно більше циклових, тому для АКТТ розглянемо лише циклові рішення. Їхня безліч заснована на

взаємному розміщенні основного, компресійного і додаткового контурів між собою.



**Рисунок 4** – Термодинамічні схеми гібридних АКТТ з тепловим приводом компресора: а) – на стороні високого тиску; б) – на стороні низького тиску

Класифікаційні ознаки розглянутих АКТТ:

- по взаємному розміщенню циклів:  
~ суміжні;  
~ поєднані;
- по механічній компресії:  
~ на стороні низького тиску;  
~ на стороні високого тиску;
- по розміщенню ступеневих апаратів:  
~ одноступеневий генератор і двоступеневий абсорбер;  
~ двоступеневий генератор і одноступеневий абсорбер;  
~ двоступеневі генератор і абсорбер;  
~ одноступеневі генератор і абсорбер (окремий випадок двоступеневого генератора й абсорбера, за умови, що генератори працюють при однаковому тиску й обігріваються паралельно, абсорбери працюють при однаковому тиску і охолоджуються паралельно).

У випадку використання замість компресора і турбіни ежектора, компресійний і додатковий контур поєднуються.

Циклові рішення термохімічних компресорів для термотрансформаторів з тепловим живленням бустерного пристрою надано у таблиці.

З таблиці видно, що при включенні додаткового контуру тиски у генераторах основного контуру ( $p_{r1}$ ) і додаткового контуру ( $p_{r2}$ ) відрізняються. Це ж відноситься і до тисків абсорбції  $p_{a1}$  основного контуру і  $p_{a2}$  додаткового контуру.

При взаємному розміщенні циклів враховуються як можливість одержання максимальної роботи розширення в додатковому циклі, так і зниження теплоти ректифікації (дефлегматор про-

холоджується холодним міцним розчином, тобто термохімічний компресор відноситься до трипотового теплообмінника для забезпечення заданого значення  $x_d = 0,998$  з найменшими витратами.

**Таблиця** – Цикли термохімічного компресора гібридного АТТз бустером

|                |                                                  | Один генератор<br>Два абсорбери | Два генератори<br>Один абсорбер | Два генератори<br>Два абсорбери |
|----------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ПОЄДНАНІ ЦИКЛИ | Механічна компресія<br>на стороні низького тиску |                                 |                                 |                                 |
|                | Механічна компресія<br>на стороні високого тиску |                                 |                                 |                                 |

Вихідними температурами для вибору схемного рішення АТТ будемо як і раніше вважати  $T_{сер}$  і  $T_{гар}$ . Температура  $T_{хол}$  приймається постійною (відповідно з цим  $T_0 = \text{const}$  і  $p_0 = \text{const}$ ). У цьому випадку можливі 4 варіанти, що утворять пари сполучень  $T_{сер}$  і  $T_{гар}$ , що і буде визначати «конкретні умови експлуатації»:

- постійна температура середовища, що охолоджує ( $T_{сер} = \text{const}$ );
- змінна температура середовища, що охолоджує ( $T_{сер} = \text{var}$ );
- постійна температура джерела, що гріє ( $T_{гар} = \text{const}$ );
- змінна температура джерела, що гріє ( $T_{гар} = \text{var}$ ).

Усі розглянуті випадки АКТТ можуть бути перенесені на звичайні АТТ, ускладнені блоком «турбіна-насос», що робить АТТ цілком незалежними від зовнішнього механічного приводу (електричної енергії). Застосування компресора з механічним стискуванням передбачає наявність у системі сонячної енергетичної установки фотоелектричного перетворювача ФЕП.

Будь-яке схемне рішення має як позитивні,

так і негативні якості. Тільки результати термoeкономічного аналізу за конкретних умов експлуатації (при відомому характері зміни  $T_{сер}$  і  $T_{гар}$ , а також їхньому значенні) можуть вказати на оптимальне схемне рішення.

Розглядаючи ежектор як пароструминний компресор, багато схемних рішень бустер-компресор можуть бути перетворені в бустер-ежектор, однак цикл (таблиця) залишиться без зміни. Єдиним обмеженням, що накладається на роботу усіх розглянутих схем, є те, що температура охолоджуючого середовища  $T_{сер}$  не може бути вищою за температуру джерела  $T_{гар}$ , що гріє. У протилежному випадку змінюється термодинамічна схема, тобто з понижувальних термотрансформатори перетворюються в підвищувальні.

#### 4. Висновки

Створюючи складні термодинамічні схеми та цикли автори передбачають реальне впровадження тепловикористальних водоаміачних машин у склад автономних систем тригенерації малої енергетики. У таких випадках вихідні характе-

ристкі машини: температури одного або кількох об'єктів охолодження  $-30\ldots 10$  °C, температури теплоносіїв сонячних енергетичних установок  $70\ldots 100$  °C, теплові потужності гібридних абсорбційних систем узгоджуються з вимогами споживача холоду.

Практичну реалізацію обраного схемно-циклового рішення автори пов'язують з вибором конструкцій теплообмінних апаратів машини. Наявність сучасних конструкцій пластинчастих теплообмінних апаратів для водоаміачних абсорбційних машин розширює номенклатуру тепловикористальних холодильних машин та інтервал температур отриманого холоду. Використання ежектора у гібридних машинах забезпечує зниження витрат на обслуговування системи охолодження.

Зазначимо, що розглянуті приклади не висловлюють різноманіття практичних завдань та можливості їх вирішення засобами створення складних схем тепловикористальних машин.

### Особистий внесок авторів CRediT

**Морозюк Л.І.:** концептуалізація ідеї, методологія, формальний аналіз, написання – оригінальний проект, адміністрування. **Псарьов С.О.:** дослідження, верифікація, візуалізація, програмне забезпечення

### Література

1. J.J. Cartelle Barros, M. Lara Coira, M. P. de la Cruz López, A. del Caño Gochi. Assessing the global sustainability of different electricity generation

systems // Energy. – 2015. – Vol. 89. – P. 473-489. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.110>

2. **Морозюк Т.В.** Водоаміачні термотрансформатори (теорія, аналіз, синтез, оптимізація): дис. док. тех. наук: 05.14.06. – Одеса, 2001 – 382 с.

3. **Haroun Shahad.** A Review of Solar Powered Absorption Refrigeration Systems. URL: <https://www.researchgate.net/publication/305850889>. (дата звернення 31.01.2024).

4. **I. Dincer, T.A.H. Ratlamwala.** Developments in Absorption Refrigeration Systems // Green Energy and Technology. – 2016. – P. 241-257.

5. **Dr. Claes Stenhede.** A Technical Reference Manual for Plate Heat Exchangers in Refrigeration & Air conditioning Applications. – Alfa Laval AB, Fourth edition, 2001.

6. **J. Cerezo, M. Bourouis, V. Manel, C. Alberto, B. Roberto.** Experimental study of an ammonia water bubble absorber using a plate heat exchanger for absorption refrigeration machines // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – P. 1005-1011.

7. **L. Morosuk, B. Kosoy, A. Kykoliev, S. Psarov, A. Basov.** Analysis of temperature modes and temperature differences in heat exchangers of solar-powered absorption refrigeration systems // Refrigeration Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 59(1). – P. 4-13.

8. **B. Kosoy, L. Morozyuk, S. Psarov, A. Kukolev.** Synthesis of scheme-cycle designs of absorption water-ammonia thermotransformers with extended degazation zone // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 4. – No. 8(112). – P. 23-33.

Отримана в редакції 04.02.2024, прийнята до друку 28.03.2024

## Design of thermodynamic schemes of hybrid heat using water-ammonia thermotransformers

**Larisa Morosuk<sup>1✉</sup>, Sergii Psarov<sup>2</sup>**

<sup>1-2</sup>Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>lara.morozyuk@gmail.com

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-4133-1984>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7738-4194>

*Existing modern problems of the production of artificial cold are related to the use of non-traditional and renewable energy sources and the fulfillment of global environmental requirements. Solar energy is consistent with the concept of distributed energy production with three beneficial effects: electricity, heat and cold. Absorption water-ammonia thermotransformers (ATT) are an element of the energy conversion system. The paper presents the synthesis of schemes and cycles of reducing ATT with the involvement of thermodynamic analysis "by the method of cycles". A step-by-step transition from the sample reversible*

cycle to the theoretical cycle of a water-ammonia thermotransformer with engineering limitations was made by changing the parameters of the cycle: the temperatures of the heating source and the cooling medium, the degazation zone. In the analysis, the temperature of cold production is assumed to be constant, and the degassing zone is assumed to be a factor of cycle efficiency. The thermodynamic scheme and cycle of a hybrid thermotransformer - a single-stage absorption machine with a mechanical booster (compressor or ejector) are considered. The directions in the development of the thermotransformer in the case of a low temperature of the heating source or a high temperature of the cooling medium are proposed. Thermodynamic diagrams of hybrid systems with a compressor (ejector) on the high-pressure side and on the low-pressure side with mechanical and thermal drive of the booster are provided. Considering the ejector as a steam-jet compressor, it was established that the thermodynamic cycles of thermochemical compressors coincide with the thermal drive of boosters. The variety of schematic designs of hybrid thermotracers is much greater than cyclic ones, therefore only cyclic designs are considered for absorption-compressor ones. Many schemes are based on the mutual placement of the main and additional circuits. Any schematic design has both positive and negative qualities. Only the results of thermoeconomic analysis under specific operating conditions can indicate the optimal circuit solution.

**Keywords:** Hybrid absorption water-ammonia thermotransformer; Thermodynamic scheme; Cycle; Mechanical booster; Degazation zone

## References

1. Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P., del Caño Gochi, A (2015) Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy*, 89, 473-489.
2. Morozyuk, T.V. (2001) Water-ammonia thermotransformers (theory, analysis, synthesis, optimization): thesis. dock. technical sciences: 05.14.06. Odesa, 382.
3. Haroun Shahad. A Review of Solar Powered Absorption Refrigeration Systems. Retrived 31 January 2024 from <https://www.researchgate.net/publication/305850889>.
4. Dincer, I., Ratlamwala, T.A.H. (2016) Developments in Absorption Refrigeration Systems. *Green Energy and Technology*, 241-257.
5. Dr. Claes Stenhede. (2001) A Technical Reference Manual for Plate Heat Exchangers in Refrigeration & Air conditioning Applications. Alfa Laval AB. Fourth edition, June 1st.
6. Cerezo, J., Bourouis, M., Manel, V., Alberto, C., Roberto, B. (2009) Experimental study of an ammonia water bubble absorber using a plate heat exchanger for absorption refrigeration machines. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1005-1011.
7. Morosuk, L., Kosoy, B., Kykoliev, A., Psarov, S. Basov, A. (2023) Analysis of temperature modes and temperature differences in heat exchangers of solar-powered absorption refrigeration systems. *Refrigeration Engineering and Technology*, 59(1), 4-13.
8. Kosoy, B., Morozyuk, L., Psarov, S., Kukolev, A. (2021) Synthesis of scheme-cycle designs of absorption water-ammonia thermotransformers with extended degazation zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 8(112), 23-33.

Received 04 February 2024  
Approved 28 March 2024  
Available in Internet 10 April 2024