

# ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 662.997:697.7

## Дослідження та застосування абсорбційних термотрансформаторів: огляд

**К. М. Пономарьов**

Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: alic.in.mine@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7771-1316>

У статті доводиться значущість розробки та впровадження абсорбційних термотрансформаторів в промисловий сектор споживання енергії. Визначається, що у промисловості технології рекуперації тепла за використання абсорбційних термотрансформаторів (АТТ) можуть бути реалізовані для низькоенергетичної відпрацьованої теплової енергії, що дозволяє повторно її використовувати в наступних процесах або на сусідніх промислових підприємствах. Розглянуті схемні рішення та принципи використання абсорбційних термотрансформаторів. Наведені результати підходу термодинамічного моделювання абсорбційних термотрансформаторів, що працюють з робочою парою  $H_2O/LiBr$ , для оцінки продуктивності. Розглянуті результати розробки абсорбційного термотрансформатора, який може працювати від побутових джерел, зокрема від газових водогрійних котлів побутового опалення, сонячного колектора, які можуть забезпечити температуру до  $115\text{ }^\circ\text{C}$ . Наведений приклад застосування системи АТТ для виробництва гарячої технічної води шляхом використання води, що виробляється когенераційною системою на текстильному підприємстві: дослідження спрямовані на виробництво гарячої води для фарбувальних машин під тиском, яким потрібна вода при температурі  $120\text{ }^\circ\text{C}$ , шляхом застосування системи АТТ, що використовує наявне відпрацьоване тепло чотирьох різних установок, кожна з яких виробляє 15 тонн/год води при температурі  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Визначені результати розробки аміачно-водного  $H_2O/NH_3$  абсорбційного термотрансформатора для утилізації низькотемпературного промислового скидного тепла потужністю 10 кВт. Досвід використання абсорбційних термотрансформаторів на підприємствах свідчить про те, що зусилля щодо вдосконалення технології використання абсорбційних термотрансформаторів оптимізують споживання енергії, зменшують вуглецевий слід численних хімічних речовин та зменшують викиди  $CO_2$ .

**Ключові слова:** Тепловий потік; Температура; Термотрансформатор; Відпрацьоване тепло; Абсорбер; Робоча пара

**doi:** <https://doi.org/10.15673/ret.v6i12.3157>

© The Author(s) 2025. 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

Через індустріалізацію, зростання населення та високий рівень життя, дефіцит енергії та забруднення навколишнього середовища стали серйозними викликами, що стоять перед суспільством сьогодні [1]. Надмірна експлуатація та використання викопного палива не лише загострили енер-

гетичну кризу, але й призвели до дедалі серйозніших екологічних проблем, таких як викиди парникових газів, погіршення якості повітря та руйнування екосистем [2, 3]. У світовому споживанні енергії промисловий сектор становить значну частку. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2022 році промисловий сектор спожив 37% світової енергії. Глобальні викиди  $CO_2$ , пов'я-

зані з енергетикою, зросли на 0,9% або 321 млн. тонн у 2022 році, досягнувши нового максимуму понад 36,8 Гт [4]. Серед технологій утилізації відпрацьованого тепла абсорбційні термотрансформатори (АТТ) мають потенціал отримання значної кількості корисної енергії, зменшуючи залежність від первинних джерел енергії. У промисловості технології рекуперації тепла за використання АТТ можуть бути реалізовані для модернізації низькоенергетичної відпрацьованої теплової енергії, що дозволяє її повторно використовувати в наступних процесах або на сусідніх промислових підприємствах. АТТ виділяються своєю здатністю оновлювати низькотемпературне відпрацьоване тепло до вищих, корисніших рівнів температури [5]. Незважаючи на багатообіцяючий потенціал абсорбційного термотрансформатора у рекуперації теплової енергії, їх застосування залишається незначним [6]. Це можна пояснити економічними та технічними проблемами рекуперації низькопотенційної теплової енергії, які є перешкодами для їх реалізації. Аналітичний огляд наукових праць має на меті довести, що подальші зусилля з удосконалення АТТ є критично важливими для підвищення енергоефективності, зниження втрат, використання відновлюваних та низькопотенційних джерел тепла, а також для досягнення цілей сталого розвитку та енергетичної безпеки.

## 2. Схемні рішення та принципи використання абсорбційних термотрансформаторів

Абсорбційний термотрансформатор, також відомий як абсорбційний тепловий насос типу II, є тепловою машиною, яка може підвищувати температуру теплового потоку, використовуючи незначну кількість електроенергії. Однак через відсутність усталених технічних знань та відсутність всебічних записів про успішне застосування термотрансформаторів, доцільність та надійність АТТ піддавалися сумніву, а поширення цієї технології залишалось обмеженим.

Процес абсорбційного теплового трансформатора працює у зворотному напрямку до процесу абсорбційного теплового насоса. Процес зумовлений тепловим потоком  $Q_1$  на проміжному температурному рівні  $T_1$ , який розділяється на тепловий потік  $Q_2$  на високому температурному рівні  $T_2$  (підвищений) та тепловий потік  $Q_0$  на низькому температурному рівні  $T_0$  (знижений) (рис. 1, [6]). Основні компоненти одноконттактного термотран-

сформатора: абсорбер, генератор, конденсатор, випарник, теплообмінник розчину, клапан розчину, насос холодоагенту та насос розчину. Також показано співвідношення рівнів температури та тиску між основними компонентами. Рівні температур  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  можна приблизно інтерпретувати як середні значення температур на вході та виході  $T_0$ , вхід/вихід,  $T_1$ , вхід/вихід,  $T_2$ , вхід/вихід у відповідних основних теплообмінниках.

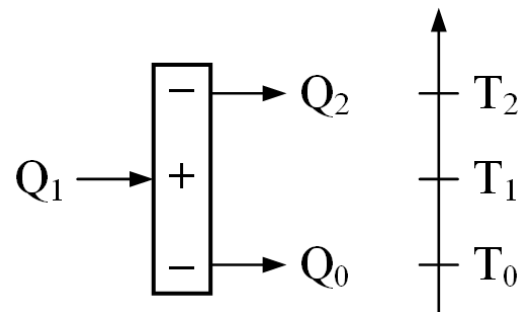


Рисунок 1 – Схема процесу абсорбційного термотрансформатора [6]

У генераторі холодоагент десорбується з розчину за рахунок вихідного тепла. Розчин з меншою масовою часткою холодоагенту перекачується насосом розчину в абсорбер під вищим тиском через теплообмінник розчину для внутрішньої рекуперації тепла. В абсорбері розчин поглинає пару холодоагенту, яка випарувалася у випарнику за рахунок вихідного тепла. Тепло поглинання виділяється як підвищене тепло. Розчин, багатий на холодоагент, протікає через теплообмінник розчину та клапан до генератора під низьким тиском. У конденсаторі пара холодоагенту, що надходить з генератора, конденсується. Тепло конденсації відводиться до радіатора при низькій температурі  $T_0$ , зазвичай температурі навколишнього середовища. Рідкий холодоагент потім перекачується до випарника під високим тиском.

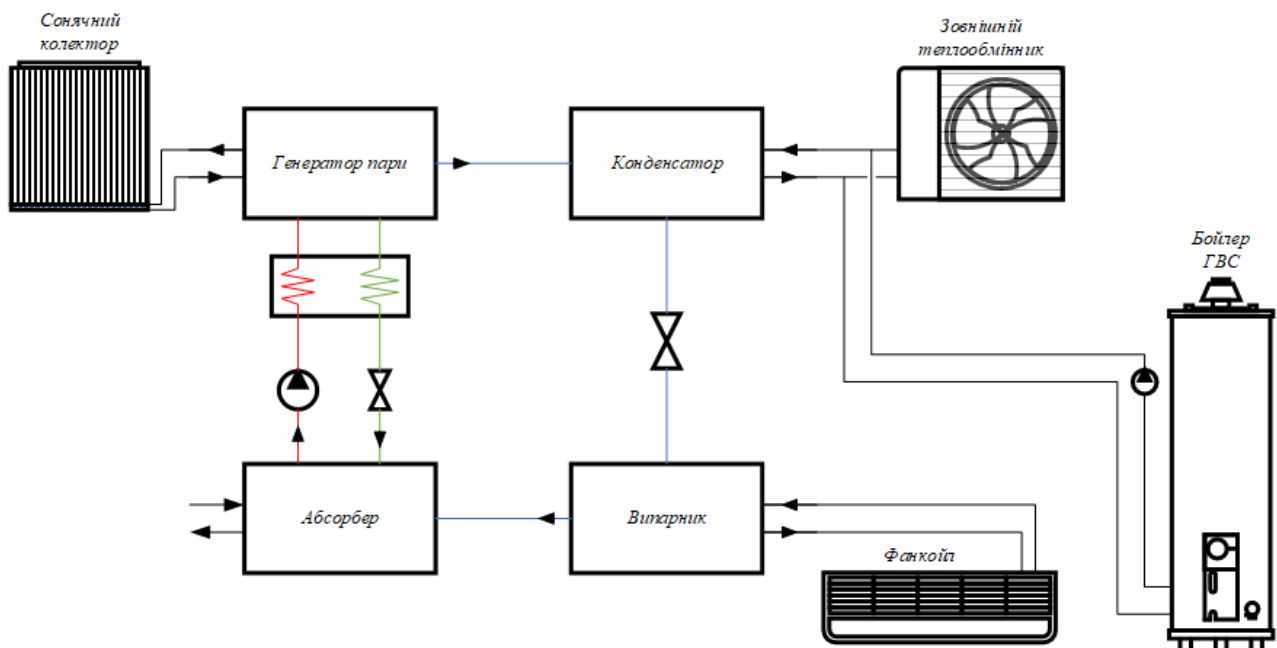
Коефіцієнт перетворення (КП) (1) визначається як відношення покращеного теплового потоку  $Q_2$  до рушійного теплового потоку  $Q_1$ . Рушійний тепловий потік  $Q_1$  дорівнює сумі теплового потоку, що подається у випарник  $Q_E$  та генератор  $Q_G$ . Високотемпературний тепловий потік  $Q_2$  відповідає тепловому потоку, що виділяється з абсорбера  $Q_A$ , а відведений тепловий потік  $Q_0$  – тепловому потоку, що виходить з конденсатора  $Q_C$ .

$$ККД = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Q_A}{Q_C + Q_E}, \quad (1)$$

Очікуваний ККД одноступеневих та двоступеневих теплових трансформаторів наближається до 50 % та 30 % [7] відповідно, навіть при частковому навантаженні. Ці цифри здаються низькими, але це тому, що як рушійне тепло використовується низькопотенційна енергія. Як представлено в посиланні [8], коефіцієнт корисної дії другого типу одноступеневих циклів термотрансформаторів, що працюють з  $H_2O/LiBr$ , зазвичай становить від 70% до 80%, а для подвійного підйому – приблизно 70% [6]. Прогресивні дослідження зосереджені на розробці абсорбційного термотрансформатора, який може працювати від побутових джерел,

наприклад, від газових водогрійних котлів побутового опалення, сонячного колектора, які можуть забезпечити температуру до 115 °С.

У роботі встановлено сонячну водонагрівальну установку. Холодоагентом є вода, а абсорбентом – водний розчин бромистого літію. Для підвищення ефективності використовується регенеративний теплообмінник між абсорбером та генератором, що забезпечує теплообмін між міцним та слабким розчином. Випарник підключений до теплообмінника системи кондиціонування (наприклад, до фанкойлу). Принципова схема установки наведена на рис. 2.



*Рисунок 2 – Принципова схема абсорбційного термотрансформатора для побутового застосування при кондиціонуванні*

Холодоагент, проходячи через випарник, забезпечує охолодження холодоносія системи кондиціонування. Пара холодоагента надходить до абсорберу, де поглинається абсорбентом і перекачується насосом у зону високого тиску – генератор пари. У генераторі пари також поводить високотемпературний теплоносій, що нагрівається сонячними колекторами або димовими газами котла. У зоні високого тиску за рахунок роботи сонячних колекторів відбувається випаровування холодоагента, який потім надходить у конденсатор, де конденсується за рахунок відведення теплоти в систему гарячого водопостачання, а абсорбент з генератора пари переміщується через регенеративний теплообмінник абсорбер, віддаючи теплоту, отриману в результаті нагрівання суміші високопотенційним теплом. Надмірна теплота додатково

утилізуватиметься за допомогою теплообмінника в навколишнє середовище.

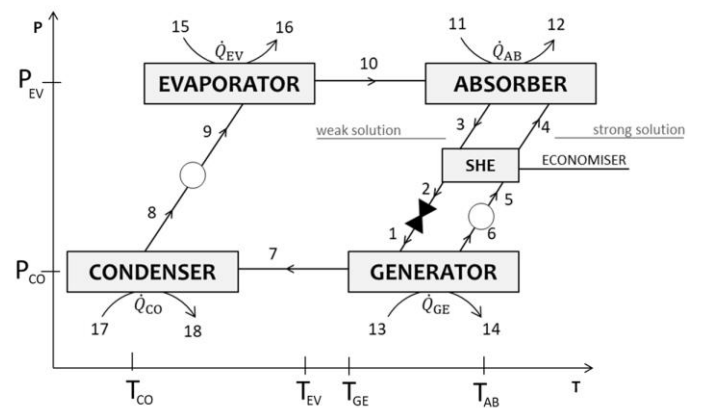
Дослідження [5] зосереджено на теоретичних характеристиках одноступеневого абсорбційного теплового трансформатора (ОАТТ) з використанням робочої пари  $H_2O/LiBr$  для рекуперації низькотемпературного відхідного тепла. Термодинамічну модель було реалізовано в програмному забезпеченні для інженерних рівнянь (EES) з урахуванням температури відхідного тепла 60 °С у маломасштабному одноступінчастому абсорбційному термотрансформаторі (ОАТТ). Було проведено аналіз чутливості, де варіювалися важливі параметри системи, включаючи температуру на вході, масову витрату та ефективність теплообмінника розчину. Отримані практичні рекомендації, які були використані для оптимізації умов експлуатації

ОАТТ. Було проведено аналіз чутливості, зосереджуючись на деяких ключових вхідних параметрах, таких як температура на вході, масова швидкість потоку та ефективність розчинного теплообмінника.

Найпростішу конфігурацію мають одноступінчасті абсорбційні теплові трансформатори [5]. Схему абсорбційних теплових трансформаторів, включаючи генератор, конденсатор, випарник, абсорбер і розчинний теплообмінник (додатково, але зазвичай використовується), два насоси та розширювальний клапан, показано на рис. 2. У цих системах два різних рівня тиску ( $P_{EV}$  і  $P_{CO}$ ), що відповідає тиску насичення холодоагенту при температурі випарника і конденсатора відповідно. Відпрацьоване тепло вводиться у випарник та генераторі, тоді як корисне тепло при вищій температурі відновлюється в абсорбері. У випарнику відпрацьоване тепло  $\dot{Q}_{EV}$  сприяє випаровуванню холодоагенту. Потім випарований холодоагент поглинається сильним розчином (характеризується високою концентрацією абсорбенту) в екзотермічному процесі, який виділяє корисне тепло  $\dot{Q}_{AB}$ . Отриманий слабкий розчин (з меншою концентрацією абсорбенту) передає своє тепло міцному розчину за допомогою розчинного теплообмінника, покращуючи загальна ефективність. У генераторі подається додаткове відпрацьоване тепло  $\dot{Q}_{GE}$  для включення десорбція холодоагенту з абсорбенту. Потім пари холодоагенту направляються до конденсатора, виділяючи низькотемпературне тепло  $\dot{Q}_{CO}$  під час конденсації. Ущільнений холодоагент повертається у випарник, завершуючи цикл. Тим часом регенований міцний розчин повертається в абсорбер для підтримки процесу. Для розрахунку найвищої температури, досягнутої в абсорбері, було використано модель адіабатичного поглинання. Це пояснюється тим, що в стаціонарному режимі температура в абсорбері вища за будь-яку з температур на вході через екзотермічне поглинання холодоагенту в абсорбенті. Тому максимальна температура в абсорбері визначається як адіабатична температура насичення, що відповідає рівноважній температурі, отриманій шляхом змішування розчину (потік 4, рис. 3) та пари (потік 10, рис. 3).

Адіабатична модель, а також повна термодинамічна модель та її реалізація в програмному комплексі розв'язування інженерних рівнянь, пояснюється в [8]. Огляд абсорбційних теплових трансформаторів [9] розглядає їх застосування, та-

ке як рекуперація відхідного тепла промислових процесів, системи когенерації, опріснення та дистиляція морської води, та ін. Розширений ексергетичний аналіз подвійного абсорбційного теплового трансформатора, що рекуперує промислове скидне тепло для виробництва чистої води, наведений в [10]. Вказується, що доцільно проведення розширеного ексергетичного аналізу, який враховує властивості руйнування ексергії в кожному компоненті системи, визначаючи його форму та джерело [11, 12]. Це робиться шляхом поділу руйнування ексергії на різні категорії, включаючи ендогенне та екзогенне руйнування ексергії (що вказує на джерело) та руйнування ексергії, якого можна уникнути або не уникнути (що вказує на потенціал покращення). Доведено, що ексергетичний аналіз є потужним інструментом проектування для визначення потенціалів покращення загальної продуктивності циклу та знань про незворотність у кожному компоненті.



**Рисунок 3** – Схематичне зображення одноступеневого абсорбційного теплового трансформатора (ОАТТ), де числа позначають потоки, що використовуються в рівняннях моделювання [5]

### 3. Досвід використання абсорбційних термотрансформаторів на підприємствах

В роботах [6, 13] суттєво розглянуто процеси у одноступеневих абсорбційних теплотрансформаторах, двоступеневих та абсорбційних теплотрансформаторах подвійного ефекту; наведені принципові схеми АТТ та проведений аналіз роботи існуючих конфігурацій абсорбційних термотрансформаторів, а також представлено та розглянуто приклади промислового застосування абсорбційного термотрансформатора, описані в літературі та звітах. Автори зазначають, що на додаток до вивчення літератури відбувся інтенсивний обмін

знаннями з трьома провідними виробниками абсорбційних термотрансформаторів, що продемонструвало точну перспективу технологічного рівня комерційних продуктів та діючих установок. Показано, що в період з 1981 до 2019 року було встановлено 48 абсорбційних теплових трансформаторів на 42 заводах загальною потужністю 134 МВт. Було визнано два основні періоди впровадження, розділені 25 роками рідких установок теплових трансформаторів. Понад 74% установок були в Азії. Приблизно 61% установок теплових трансформаторів було застосовано у хімічній промисловості. Таким чином, за допомогою аналізу технічних проблем та їх рішень, а також пов'язаних з ними економічних аспектів установок теплових трансформаторів представлено та обговорено ефективний сучасний стан цієї технології.

Стан трьох типів абсорбційних теплових насосів для промислового опалення ( $\geq 80$  °C) розглядається та обговорюється авторами [14]: абсорбційно-компресійні теплові насоси, абсорбційні теплові насоси (теплові насоси типу I) та абсорбційні теплові трансформатори (теплові насоси типу II). Технології теплових насосів вода/LiBr типу I, що існують наразі, обмежені максимальною температурою теплоподачі 100 °C та підвищенням температури до 50 °C з тепловими коефіцієнтами перетворення COP 1,65...1,80. Теплові насоси вода/LiBr типу II мають максимальну температуру подачі тепла 185 °C та підвищення температури до 50 °C з тепловими ККД 0,33...0,48. Абсорбційно-компресійні теплові насоси на основі аміаку/води мають максимальну температуру подачі тепла 160 °C та підвищення температури до 110 °C з електричними ККД 2,7...7,3. Однак, щоб повною мірою використати потенціал цих теплових насосів у переробній промисловості, дослідження та розробки повинні бути зосереджені на підвищенні температури подачі тепла та підвищення температури понад поточні обмеження. Використання цих теплових насосів для рекуперації промислового тепла зробить значний внесок у декарбонізацію переробної промисловості.

Метою роботи [15] було застосування системи АТТ для виробництва гарячої технічної води шляхом використання води, що виробляється когенераційною системою на текстильному підприємстві. Промислова система має чотири різні установки, кожна з яких виробляє 15 тонн/год води при температурі 90°C – це відпрацьоване тепло використовувалось неефективно. У цьому промис-

ловому підприємстві також є деякі фарбувальні машини під тиском, яким потрібна гаряча вода при температурі 120°C. Дослідження спрямовані на виробництво гарячої води при температурі 120°C шляхом застосування системи АТТ, використовуючи наявне відпрацьоване тепло для подолання цього попиту на енергію.

Результати розробки аміачно-водного абсорбційного теплового трансформатора для утилізації низькотемпературного промислового скидного тепла наведені в [17]. У цьому дослідженні досліджується термотрансформаторної машини  $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$  потужністю 10 кВт, призначеної для підвищення температури тепла від проміжного джерела відхідного тепла до гарячого джерела. Вибраний робочий діапазон температур становить  $-15^\circ\text{C} \leq \Sigma T_{\text{хол}} \leq 30^\circ\text{C}$  та  $60^\circ\text{C} \leq \Sigma T_{\text{скидн}} \leq 110^\circ\text{C}$ . Для оцінки максимальної температури в абсорбері було прийнято, що він складається з адіабатичної абсорбційної секції та секції теплообміну. Розчин між цими секціями вважається насиченим. Цей набір припущень і рівнянь було застосовано для обчислення максимальної температури, досягнутої розчином в абсорбері, тим самим визначаючи якість тепла, яке може бути передано до гарячого джерела. Ця модель дала уявлення як про потенціал, так і про обмеження архітектури АТТ.

Інформація про технічні деталі АТТ, встановлених в промислових застосуваннях, та повні колекції промислових впроваджень відсутні в існуючій літературі. Попередні оглядові статті про абсорбційні термотрансформатори [6, 16, 18] містять лише кілька прикладів. Головною метою цього дослідження є уточнення технічної доцільності та надійності цієї технології, а також сфера її впровадження. Комплексний звіт про промислові установки, разом з деякими технічними міркуваннями, вважається цінним джерелом, що сприяє розвитку цієї технології.

У випадку застосувань АТТ, інтегрованих в один виробничий процес, термотрансформатор працює від охолодження або відпрацьованого тепла компонента цього виробничого процесу для передачі тепла більшого потенціалу іншому компоненту того ж виробничого процесу (наприклад, застосування теплового трансформатора GODO Shusei Co. Ltd., рис. 4 [6]). Такий вид інтегрованої конфігурації часто використовувався в процесах дистиляції.

У застосуваннях теплових трансформаторів, що переміщують тепло між різними процесами,

тепловий трансформатор працює від відпрацьованого тепла одного процесу та передає тепло біль-

шого потенціалу до іншого процесу або до мережі центрального опалення, як наведено рис. 5.

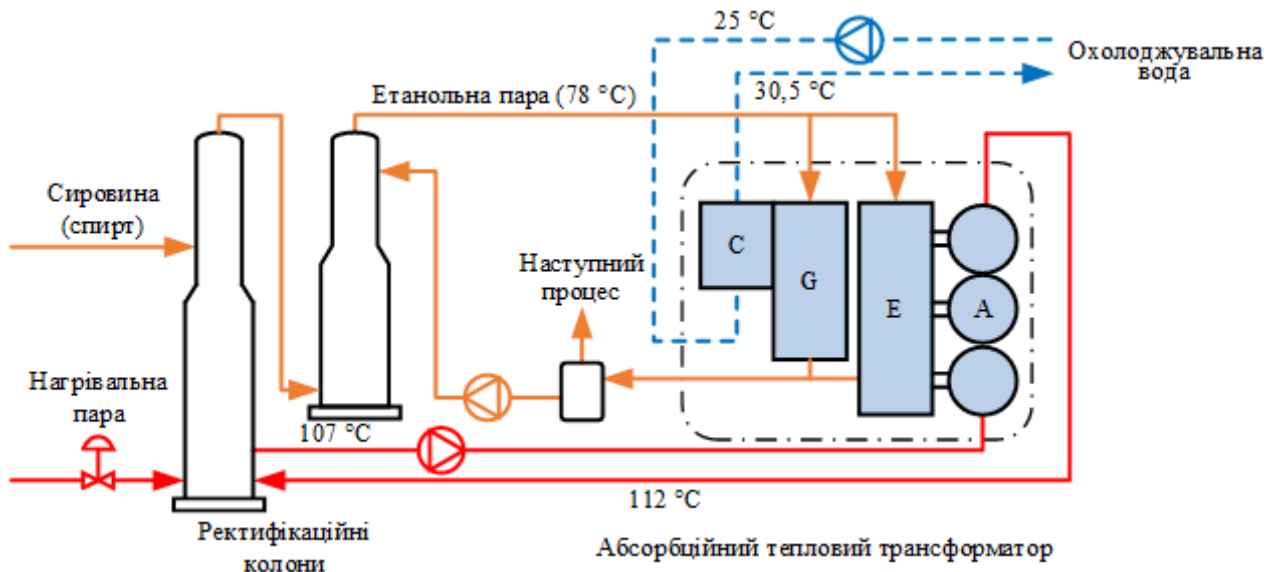


Рисунок 4 – Абсорбційний тепловий трансформатор, встановлений на спиртовій дистиляційній установці [6].

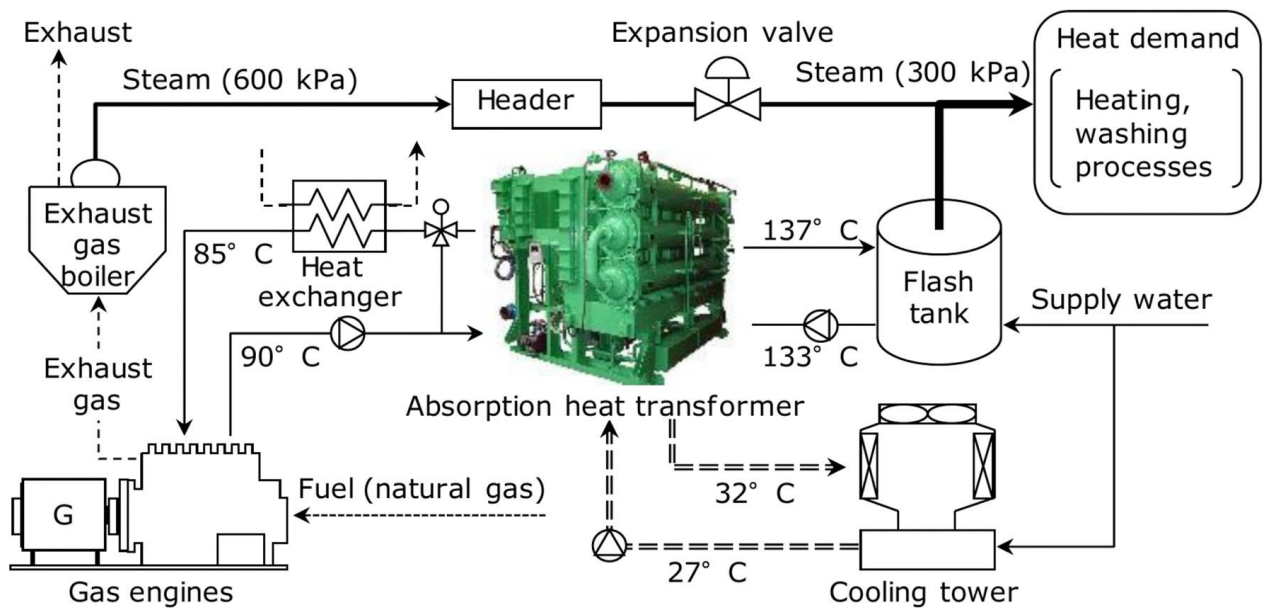


Рисунок 5 – Абсорбційний тепловий трансформатор, встановлений на промисловому підприємстві (Потужність: 150 кВт) [19]

У ранніх теплових трансформаторах використовувалися падаючі плівки на горизонтальних або вертикальних трубках. Однак наразі в теплових трансформаторах переважно використовуються горизонтальні трубки теплообмінника (рис. 6). Крім того, наразі положення теплообмінника відносно одного відрізняється залежно від уподобань виробника. Якщо виробником є Ebara, абсорбер розташовується над випарником (рис. 5); однак, коли виробником є Hitachi, абсорбер розділяється на три резервуари, розташовані один над одним і підклю-

чені до одного ж випарника, які розташовані поруч з випарником, генератором і конденсатором.

Варто зазначити, що теплові трансформатори, які віддають тепло в навколишнє повітря, демонструють свою максимальну потужність взимку; низький рівень температури  $T_0$  призводить до великого температурного сплеску.

У [20] зазначається, що вдосконалений ексергетичний метод розкриває реальні причини незворотності та прихований потенціал для покращення кожного компонента системи, а також відображає

взаємну взаємодію між компонентами. Моделювання циклу проводиться за допомогою програмного забезпечення для розв'язування інженерних рівнянь. Результати показують, що загальний потенціал покращення циклу становить лише 16%. Крім того, взаємна взаємозалежність між компонентами виявляється слабкою, оскільки 97% загального ексергетичного руйнування виявилось ендеогенним. Крім того, враховуючи ендеогенне ексергетичне руйнування, якого можна уникнути, стратегія покращення компонентів, отримана за допомогою вдосконаленого ексергетичного методу, відрізняється від традиційної. Результати дослідження вдосконаленої ексергетики пропонують такий порядок: конденсатор, абсорбер, випарник, вузол абсорбера/випарника, вузол генератора, економайзер 1 та економайзер 2. Додатково проведено параметричне дослідження для оцінки чутливості розщеплення ексергетичної деструкції до зміни температури джерела тепла з метою виявлення можливостей для покращення. Результати

показують, що конденсатор забезпечує найбільшу кількість ендеогенної ексергетичної деструкції, якої можна уникнути, у всьому досліджуваному діапазоні температур.

Одноступеневий термотрансформатор потужністю 3 МВт, що використовує геотермальне джерело тепла для постачання електроенергії до системи централізованого тепlopостачання в Данії, наведено в [21]. Систему було досліджено методом розширеного ексергетичного аналізу. Згідно з аналізом, абсорбер і генератор були двома компонентами, відповідальними як за більшу частину загального руйнування ексергії, так і за неминуче ендеогенне руйнування ексергії в системі. Оптимізація всіх компонентів до їхнього технічного максимуму призведе до зменшення ексергетичних руйнувань системи на 9%. Оскільки оптимізація показує компроміси між компонентами, аналіз також повинен враховувати економічну та екологічну перспективи, щоб визначити загалом, які компоненти було б найвигідніше покращити.



**Рисунок 6** – Абсорбційний термотрансформатор: Ebara, номінальна потужність  $\approx 7$  МВт: А – Абсорбер; G – Генератор; E – Випарник; C – Конденсатор (усі права захищено, Авторське право Ebara Refrigeration Equipment & Systems Co., Ltd. 2019) [6]

Абсорбер і генератор були відповідальні за більшу частину ексергетичного руйнування в системі та не мали великого потенціалу для оптимізації, оскільки їх ексергетичне руйнування було переважно неминучим та ендеогенним.

Як приклад, розглянуто оптимізацію конденсатора, оскільки це потенційно може зменшити ексергетичні руйнування, що виникають всередині цього компонента, на 45,67 кВт. Однак це призведе до зниження продуктивності абсорбера, генератора, випарника та розширювального клапана. Чиста вигода, безпосередньо спричинена вдоскона-

ленням конденсатора, становитиме лише 2,71 кВт. Щоб краще визначити, де в системі оптимізація буде найбільш вигідною, буде потрібна економічна та екологічна оцінка. Тому визначається, що майбутня робота над такою системою може включати ексергоекономічний або ексергоекологічний аналіз.

#### 4. Висновки

Екологічні проблеми та енергозбереження завжди були серйозною глобальною проблемою.

Абсорбційні цикли можуть відігравати важливу роль завдяки своїй здатності зменшувати скидання та повторно використовувати велику кількість промислового стічного тепла.

Використання відпрацьованого тепла або джерел тепла з низькою ексергією є стратегічною можливістю для зниження впливу на навколишнє середовище та експлуатаційних витрат промислових процесів.

Представлений оглядовий матеріал доводить, що подальші зусилля щодо вдосконалення технології абсорбційних теплових трансформаторів оптимізують використання енергії та зменшують вуглецевий слід численних хімічних речовин та зменшують викиди CO<sub>2</sub>.

Рекуперация відхідного тепла має потенціал для забезпечення значної кількості корисної енергії, зменшуючи залежність від первинних джерел енергії. У промисловості технології рекуперации тепла можуть бути впроваджені для покращення низькоексергетичної відхідної теплової енергії, що дозволяє її повторно використовувати в подальших процесах або на сусідніх промислових об'єктах.

Сучасні дослідники використовують термодинамічні аналізи для оцінки продуктивності абсорбційних термотрансформаторів, використовуючи як традиційну робочу пару H<sub>2</sub>O/LiBr, так і альтернативні розчини. Для застосувань, що використовують пару H<sub>2</sub>O/LiBr, існуючі дослідження переважно зосереджувалися на температурах відхідного тепла, що перевищують 70 °C, тоді як дослідження з використанням нижчих температур є рідкісними.

Існує необхідність проведення розширеного ексергетичного аналізу, який враховує властивості руйнування ексергії в кожному компоненті системи, визначаючи його форму та джерело.

Необхідні подальші експериментальні дослідження, щоб визначити технічну та економічну доцільність роботи в цьому діапазоні нижчих температур з робочою парою.

## Література

1. **X. Liu et al.** Dynamic performance analysis of adsorption heat transformer system driven by large pressure jump for low-grade waste heat upgrade // *Applied Energy*. – 2025. – Vol. 377. – P. 124478. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124478>.
2. **X. Liu et al.** Energetic, environmental and economic comparative analyses of modified transcritical CO<sub>2</sub> heat pump system to replace R134a system for home heating // *Energy*. – 2021. – Vol. 229. – P. 120544. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120544>
3. **Brewer J., Messina N.** New Energy Infrastructure Outlook 2022. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2022. URL: <https://doi.org/10.2172/1882422>.
4. CO<sub>2</sub> Emissions in 2022: International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>. (дата звернення 03.05.2025)
5. **Santos M., Pinho C., Campos J. B. L. M.** Thermodynamic Simulations of a Single-Stage Absorption Heat Transformer Utilizing Low-Temperature Waste Heat (60 °C) // *Processes*. – 2025. – Vol. 13. – No. 4. – P. 1001. <https://doi.org/10.3390/pr13041001>.
6. **F. Cudok et al.** Absorption heat transformer - state-of-the-art of industrial applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 141. – P. 110757. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110757>.
7. **Inoue N, Irie K, Fukusumi Y.** Analysis on characteristics of a boosted temperature type absorption heat pump // *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*. – 2005. – Vol. 22. – P.173-184.
8. **W. Wu et al.** An overview of ammonia-based absorption chillers and heat pumps // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 31. – P. 681-707. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.021>.
9. **W. Rivera et al.** A review of absorption heat transformers // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 654-670. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.021>.
10. **Mehrjouiee H., Fallah M., Mohammad S. Mahmoudi S.** Advanced exergy analysis of a double absorption heat transformer recovering industrial waste heat for pure water production // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2023. – P. 102242. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102242>.
11. **Morosuk T., Tsatsaronis G.** Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems // *Energy*. – 2019. – Vol. 169. – P. 238-246. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.123>.
12. **K. Parham et al.** Absorption heat transformers – A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 34. – P. 430-452. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.036>

13. **Ayou D. S., Wu W., Coronas A.** Absorption-based heat pumps for decarbonization of industrial process heating: performance, current status, and new developments // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2025. – P. 103679. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103679>.
14. **Horuz I., Kurt B.** Absorption heat transformers and an industrial application // *Renewable Energy*. – 2010. – Vol. 35. – No. 10. – P. 2175-2181. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.025>.
15. **R. Collignon, H. Demasles, H.T. Phan.** Development of an Ammonia/Water Absorption Heat Transformer to upgrade low-temperature industrial waste heat // *HTHP Symposium 2024 – 4th High Temperature Heat Pump Symposium*, January 2024, Copenhagen, Denmark. – 2024. – P.799.
16. **Wakim M., Rivera-Tinoco R.** Absorption heat transformers: Sensitivity study to answer existing discrepancies // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 130. – P. 881-890. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.111>.
17. **Xu Z., Wang R.** Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development // *Frontiers in Energy*. – 2017. – Vol. 11. – No. 4. – P. 414-436. <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0507-1>.
18. Development activities of low temperature waste heat recovery appliances using absorption heat pumps // *International symposium on next-generation air conditioning and refrigeration Technology*, Tokyo, Japan. – 2010. – Vol. 10. – P. 1-8.
19. **G. Alefeld.** Energy flux and energy storage in heat transformation devices // *Energy: Money, Materials and Engineering*. – 1982. – Vol. 2. – No. 1. – P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-028774-4.50008-7>.
20. **Mehrjouiee H., Fallah M., Mohammad S. Mahmoudi S.** Advanced exergy analysis of a double absorption heat transformer recovering industrial waste heat for pure water production // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2023. – P. 102242. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102242>.
21. **Pedersen, R. C., Wolf, C. M., Jensen, J. K., & Markussen, W. B.** Advanced Exergy Analysis of an Absorption Heat Transformer Using Geothermal Heat for District Heat Production: A Case Study // *Proceedings of ECOS 2022 – The 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems 2022 ECOS*.

Отримана в редакції 03.05.2025, прийнята до друку 23.06.2025

## Research and application of absorption heat transformer: a review

**Konstantin Ponomaryov**

Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: [alic.in.mine@gmail.com](mailto:alic.in.mine@gmail.com)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7771-1316>

*The article proves the importance of developing and implementing absorption thermal transformers in the industrial energy consumption sector. It is determined that in industry heat recovery technologies for the use of absorption thermal transformers (ATT) can be implemented for low-energy waste heat, allowing it to be reused in subsequent processes or at neighboring industrial plants. Considered with chemical solutions and principles of using absorption thermal transformers. The results presented thermodynamic modeling approach of absorption thermal transformers operating with H<sub>2</sub>O/LiBr working pair, for performance assessment. The results of the development of an absorption thermal transformer are considered. A former that can operate from domestic sources, in particular from gas water heating boilers for domestic heating, a solar collector that can provide temperatures up to 115 °C. An example is given Application of the ATT system for the production of hot technical water by using water produced by a cogeneration system in a textile enterprise: research is aimed at the production of hot water for pressure dyeing machines that require hot water at a temperature of 120°C by using the ATT system, which uses the available waste heat of four different plants, each of which produces 15 tons/hour of water at a temperature of 90°C. The results of the development of an ammonia-water H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub> absorption thermal transformer for the utilization of low-temperature industrial waste heat with a capacity of 10 kW are determined. Experience in the use of absorption thermal transformers in enterprises shows that efforts to improve the technology of using absorption thermal transformers will optimize energy consumption, reduce the carbon footprint of numerous chemicals, and reduce CO<sub>2</sub> emissions.*

**Keywords:** Heat flow; Temperature; Thermal transformer; Waste heat; Absorber; Working steam

## References

1. Liu, X., Saren, S., Chen, H., Li, M., Jeong, J. H., Miyazaki, T., & Thu, K. (2025). Dynamic performance analysis of adsorption heat transformer system driven by large pressure jump for low-grade waste heat upgrade. *Applied Energy*, 377, 124478.
2. Liu, X., Hu, Y., Wang, Q., Yao, L., & Li, M. (2021). Energetic, environmental and economic comparative analyses of modified transcritical CO<sub>2</sub> heat pump system to replace R134a system for home heating. *Energy*, 229, 120544.
3. Brewer, J., & Messina, N. (2022). New Energy Infrastructure Outlook 2022. *Office of Scientific and Technical Information (OSTI)*.
4. CO<sub>2</sub> Emissions in 2022: International energy agency (2022). Retrieved 03 May 2025 from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>.
5. Santos, M., Pinho, C., & Campos, J. B. L. M. (2025). Thermodynamic Simulations of a Single-Stage Absorption Heat Transformer Utilizing Low-Temperature Waste Heat (60 °C). *Processes*, 13(4), 1001.
6. Cudok, F., Giannetti, N., Ciganda, J. L. C., Aoyama, J., Babu, P., Coronas, A., Fujii, T., Inoue, N., Saito, K., Yamaguchi, S., & Ziegler, F. (2021b). Absorption heat transformer – state-of-the-art of industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110757.
7. Inoue N, Irie K, Fukusumi Y. (2025) Analysis on characteristics of a boosted temperature type absorption heat pump. *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 22, 173-184.
9. Wu, W., Wang, B., Shi, W., & Li, X. (2014). An overview of ammonia-based absorption chillers and heat pumps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 681-707.
9. Rivera, W., Best, R., Cardoso, M. J., & Romero, R. J. (2015). A review of absorption heat transformers. *Applied Thermal Engineering*, 91, 654-670.
10. Mehrjouie, H., Fallah, M., & Mohammad S. Mahmoudi, S. (2023). Advanced exergy analysis of a double absorption heat transformer recovering industrial waste heat for pure water production. *Thermal Science and Engineering Progress*, 102242.
11. Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2019). Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *Energy*, 169, 238-246.
12. Parham, K., Khamooshi, M., Tematio, D. B. K., Yari, M., & Atikol, U. (2014). Absorption heat transformers – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 430-452.
13. Ayou, D. S., Wu, W., & Coronas, A. (2025). Absorption-based heat pumps for decarbonization of industrial process heating: performance, current status, and new developments. *Thermal Science and Engineering Progress*, 103679.
14. Horuz, I., & Kurt, B. (2010). Absorption heat transformers and an industrial application. *Renewable Energy*, 35(10), 2175-2181.
15. Collignon, R., Demasles, H., Phan. H.T. (2024) Development of an Ammonia/Water Absorption Heat Transformer to upgrade low-temperature industrial waste heat. *HTHP Symposium 2024 – 4th High Temperature Heat Pump Symposium, January 2024, Copenhagen, Denmark*, 799.
16. Wakim, M., & Rivera-Tinoco, R. (2019). Absorption heat transformers: Sensitivity study to answer existing discrepancies. *Renewable Energy*, 130, 881-890.
17. Xu, Z., & Wang, R. (2017). Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development. *Frontiers in Energy*, 11(4), 414-436.
18. (2010) Development activities of low temperature waste heat recovery appliances using absorption heat pumps. *International symposium on next-generation air conditioning and refrigeration Technology, Tokyo, Japan*, 10, 1-8.
19. Alefeld, G. (1982). Energy flux and energy storage in heat transformation devices. *Energy: Money, Materials and Engineering*, 2, 1, 1-13.
20. Mehrjouie, H., Fallah, M., & Mohammad S. Mahmoudi, S. (2023). Advanced exergy analysis of a double absorption heat transformer recovering industrial waste heat for pure water production. *Thermal Science and Engineering Progress*, 102242.
21. Pedersen, R. C., Wolf, C. M., Jensen, J. K., & Markussen, W. B. (2022). Advanced Exergy Analysis of an Absorption Heat Transformer Using Geothermal Heat for District Heat Production: A Case Study. *Proceedings of ECOS 2022 – The 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems 2022 ECOS*.

---

Received 03 May 2025  
 Approved 23 June 2025  
 Available in Internet 04 July 2025