

О. О. ЛИТВИНЕНКО, Д. О. КУРДУПОВ**АЛЬТЕРНАТИВНІ РОБОЧІ ТІЛА ТА КОМБІНОВАНІ ЦИКЛИ: СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В УДОСКОНАЛЕННІ ТЕПЛОВИХ СХЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення ефективності теплових схем енергетичних установок шляхом використання альтернативних робочих тіл та комбінованих циклів. Проаналізовано обмеження традиційних циклів Ренкіна та Брайтона, які досягли межі вдосконалення, та обґрунтовано необхідність впровадження нових технологій. Особливу увагу приділено органічному циклу Ренкіна (ORC), циклу Каліни та надкритичному CO₂ (sCO₂), що забезпечують ефективне використання низько- та високотемпературних джерел теплоти. Показано, що застосування органічних рідин, водо-аміачних сумішей та надкритичних флюїдів дозволяє підвищити загальний ККД установок до 50 % – 60 %. Розглянуто комбіновані системи (газопарові, ORC+sCO₂), які мінімізують втрати тепла та забезпечують гнучкість конструкції. Окремо проаналізовано екологічні та економічні аспекти: зниження викидів CO₂, інтеграцію з відновлюваними джерелами, можливість участі у програмах «зеленого тарифу». Визначено перспективи розвитку: розширення застосування sCO₂-циклів, створення робочих тіл з низьким GWP, автоматизація комбінованих систем та удосконалення теплообмінних апаратів. У статті узагальнено сучасні розробки та тенденції, що формують основу високоефективних і екологічно безпечних енергетичних технологій майбутнього.

Ключові слова: альтернативні робочі тіла, органічний цикл Ренкіна, цикл Каліни, надкритичний CO₂, комбіновані цикли, енергоефективність, екологічна безпека.

O. LYTUVYNNENKO, D. KURDUPOV**ALTERNATIVE WORKING FLUIDS AND COMBINED CYCLES: MODERN TRENDS IN IMPROVING THERMAL SCHEMES OF ENERGY SYSTEMS**

The article reviews modern approaches to improving the efficiency of thermal schemes in power plants through the use of alternative working fluids and combined cycles. The limitations of traditional Rankine and Brayton cycles, which have reached the limits of optimization, are analyzed, highlighting the need for new technologies. Special attention is given to the Organic Rankine Cycle (ORC), the Kalina cycle, and the supercritical CO₂ (sCO₂) cycle, which enable effective utilization of low- and high-temperature heat sources. It is shown that the application of organic fluids, ammonia-water mixtures, and supercritical media can increase the overall efficiency of installations up to 50–60%. Combined systems (gas-steam, ORC+sCO₂) are examined as solutions for minimizing heat losses and improving design flexibility. Environmental and economic aspects are also discussed, including CO₂ emission reduction, integration with renewable energy sources, and participation in green tariff programs. The paper outlines development prospects such as wider adoption of sCO₂ cycles, creation of low-GWP working fluids, automation of combined systems, and enhancement of heat exchangers. The study summarizes current developments and trends shaping the foundation of high-efficiency and environmentally friendly energy technologies for the future.

Key words: alternative working fluids, Organic Rankine Cycle, Kalina cycle, supercritical CO₂, combined cycles, energy efficiency, environmental sustainability.

Вступ

У сучасних умовах розвитку енергетики основною метою є забезпечення високої енергоефективності при мінімальному негативному впливі на навколишнє середовище. Одним із ключових напрямів досягнення цієї мети є удосконалення теплових циклів енергетичних установок і їх складових, зокрема турбін, які є основними елементами теплових електростанцій та промислових теплоенергетичних систем.

Традиційні енергетичні установки, зокрема паротурбінні і газотурбінні установки, мають обмежений коефіцієнт корисної дії (ККД) через термодинамічні обмеження циклів Ренкіна або Брайтона. У зв'язку з цим пошук нових підходів до підвищення ефективності є актуальним.

Серед найбільш перспективних – це використання альтернативних або комбінованих робочих тіл у теплових циклах. Ці речовини дозволяють краще адаптувати роботу установки до різних температурних режимів, зменшити втрати енергії та підвищити загальний ККД. Особливу зацікавленість викликають органічні робочі тіла, що застосовуються в органічних циклах Ренкіна (*Organic*

Rankine Cycle (ORC)), надкритичний вуглекислий газ (supercritical (sCO₂)), а також суміші на основі аміаку й води (*Kalina cycle (KC)*). Крім того, комбінування кількох циклів в одному технологічному ланцюгу – наприклад, газотурбінного і паротурбінного – дозволяє використовувати енергію палива з максимальною ефективністю.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз досліджень в області використання альтернативних робочих тіл та комбінованих циклів енергетичних установок і оцінка їхнього потенціалу для сучасної енергетики.

Традиційні енергетичні цикли

Цикл Ренкіна – це основа роботи парових турбін. Він передбачає випаровування робочого тіла (води), його розширення в турбіні з виділенням механічної енергії, конденсацію пари в конденсаторі та подальше стиснення зворотнім насосом. ККД для класичних парових турбін знаходиться у діапазоні 35 % – 42 %, для сучасних систем, що використовують проміжний перегрів та багаторів-

© О. О. Литвиненко, Д. О. Курдупов, 2025

неву регенерацію може досягати 45 % – 47 %.

Основні недоліки традиційного циклу Ренкіна: залежність від високотемпературних джерел тепла; високі втрати при конденсації; погана ефективність при використанні низькотемпературного тепла.

Цикл Брайтона описує процес роботи газотурбінних установок. У цьому циклі повітря стискається компресором і подається в камеру згоряння, куди додатково подається рідке або газоподібне паливо і відбувається згоряння суміші. Продукти згоряння подаються на турбіну, де розширюються й обертають вал. Типовий ККД газотурбінних установок складає 25 % – 40 %.

Основні недоліки циклу Брайтона: великі втрати тепла з вихлопними газами; висока температура вихлопу (600°C – 700°C), що призводить до неефективного використання палива; низька ефективність без рекуперації або комбінування з іншими циклами.

Обидва цикли мають обмеження, які не дозволяють досягти високої термодинамічної ефективності. Це стимулює пошуки нових рішень, а саме впровадження альтернативних робочих тіл, які краще працюють при низьких або середніх температурах; перехід до надкритичних параметрів, де змінюються термодинамічні властивості робочого тіла; розробку комбінованих циклів.

Альтернативні теплові цикли та робочі тіла

З метою підвищення ефективності теплових циклів сучасна енергетика все частіше звертається до альтернативних робочих тіл – речовин, що відрізняються від традиційної водяної пари чи газу та можуть забезпечити вищу термодинамічну ефективність у різних умовах. Вибір робочого тіла є одним із ключових чинників при проектуванні нових типів енергетичних установок, особливо для нетрадиційних джерел енергії, таких як геотермальні ресурси, відхідне тепло промислових процесів чи сонячна енергія.

Залежно від складу та термодинамічних характеристик альтернативні робочі тіла можна поділити на кілька основних категорій: органічні рідини, двокомпонентні суміші, надкритичні флюїди та галогеновуглеводні.

До найперспективніших напрямів належать органічні цикли Ренкіна (ORC), що використовують низькотемпературні джерела теплоти та рідини з низькою температурою кипіння. Такі робочі тіла забезпечують стабільну роботу при температурах 80°C – 250°C , тому широко застосовуються в системах утилізації відпрацьованого тепла, геотермальних і сонячних установках [1], [2]. Іншим ефективним підходом є цикл Каліни (KC), який запропонований Олександром Калініним у 1983 р. Його особливість полягає у використанні водо-

аміачної суміші як робочого тіла. Завдяки змінному складу пари та рідини в процесі кипіння і конденсації, цикл забезпечує покращене узгодження температурного профілю робочого тіла з профілем джерела теплоти, що підвищує ККД на 10 % – 20 % порівняно з традиційними циклами Ренкіна [3], [4]. Для високотемпературних застосувань усе більшої уваги набувають системи на основі надкритичного CO_2 ($s\text{CO}_2$). Такі цикли мають компакту конструкцію, високу густину робочого середовища й здатність працювати при температурах до 700°C , що робить їх привабливими для використання в ядерній, газотурбінній та промисловій енергетиці [5], [6]. Ще однією групою перспективних речовин залишаються галогеновуглеводневі робочі тіла, які придатні для систем середніх температур – теплових насосів і охолоджувачів. Проте деякі з них мають значний потенціал глобального потепління, тому нині ведеться активна заміна таких речовин на більш екологічно безпечні аналоги [7], [8]. Комбіновані цикли, що поєднують ORC та $s\text{CO}_2$, набувають популярності для підвищення ефективності сонячних і промислових установок. Такі системи дозволяють оптимально використовувати тепло різних рівнів, зменшувати втрати та підвищувати загальний ККД енергетичних комплексів [9], [10].

Органічний цикл Ренкіна: переваги та недоліки

Органічний цикл Ренкіна (ORC) – це модифікація класичного паротурбінного циклу Ренкіна, в якому замість води як робоче тіло використовується органічна рідина з низькою температурою кипіння. Цей підхід дозволяє ефективно перетворювати низькопотенційне тепло в механічну або електричну енергію, що робить ORC особливо привабливим для геотермальних джерел, відхідного тепла промисловості та поновлюваних джерел енергії (рис. 1) [1].

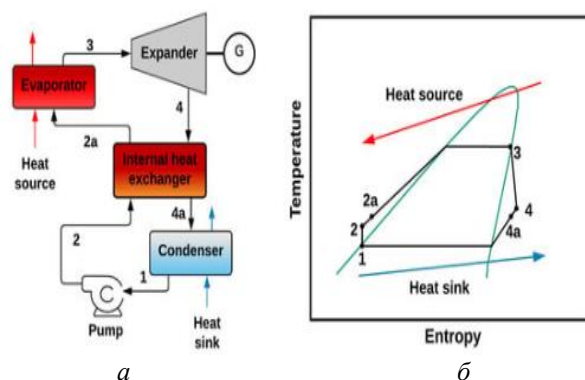


Рис. 1 – Цикл ORC [1]:
а – принципова схема; б – TS-діаграма

Речовини, що працюють в ORC-циклі називаються низькокиплячими робочими тілами (НРТ). Це, наприклад, сполуки на основі фреону, вуглеводні типу пентану, бутану тощо. Вибір оптимального НРТ ORC-модуля залежить від вихідної температури джерела тепла. При температурі джерела тепла 85 °С – 120 °С використовуються, як правило, фреонові суміші, при температурі 150 °С – 200 °С – вуглеводні типу пентану, бутану.

Органічний носій рухається у замкнутому контурі за допомогою насоса, випаровується в трубчастому випаровувачі, поглинаючи теплову енергію гарячого теплоносія першого контуру. Органічні пари розширюються в спеціальній турбіні, яка приводить у рух електричний генератор, охолоджуються в внутрішньому теплообміннику і конденсуються в конденсаторі за допомогою охолоджуючого носія, наприклад води. Після цього конденсат знову стискається циркуляційним насосом, який закриває термодинамічний цикл.

У системах ORC вибір робочого тіла визначає ефективність і екологічні характеристики установок. Серед поширених робочих тіл ізопентан, який має температуру кипіння близько 28 °С, є нетоксичним і добре підходить для геотермальних систем середньої температури; R245fa характеризується низькою температурою кипіння (приблизно 15 °С) і низьким потенціалом глобального потепління (*Global Warming Potential (GWP)*), що робить його екологічно безпечним варіантом для ORC-установок. Для високотемпературних систем ефективним є толуол, який має температуру кипіння близько 110 °С і вирізняється високою термічною стабільністю. Робоче тіло R123 із температурою кипіння близько 27 °С раніше широко використовувалося, проте через екологічні обмеження його застосування нині суттєво скорочене. Така варіативність робочих речовин дає змогу оптимізувати цикл ORC під конкретне джерело теплоти та вимоги до екологічної безпеки.

Основні сфери застосування ORC систем: геотермальна енергетика – для станцій з бінарним циклом, в яких геотермальна теплота передається вторинній рідині (наприклад фреону або ізобутану); утилізація відхідного тепла – для промислових підприємств; біоенергетика – спалювання біомаси з виробництвом тепла і електрики; сонячна енергетика – поєднання з плоскими або вакуумними колекторами.

Основні переваги ORC систем: висока ефективність при низьких температурах (80 °С – 200 °С); можливість використання нестабільних джерел тепла, зокрема сонячної енергії; низький рівень шуму та вібрації – можна використовувати в міських умовах; висока автоматизація та низькі експлуатаційні витрати; тривалий термін служби при належному обслуговуванні.

Основні обмеження та недоліки ORC систем: низька ефективність при високих температурах

(>250 °С); потреба в герметичності та хімічній стійкості обладнання; деякі речовини мають екологічні ризики (*GWP*, токсичність при витоку).

Органічний цикл Ренкіна відкриває широкі можливості для децентралізованої енергетики, зменшуючи залежність від викопного палива та дозволяючи використовувати ті джерела тепла, які раніше вважалися непридатними.

Цикл Каліни: переваги та недоліки

Цикл Каліни (КЦ) – це інноваційний термодинамічний цикл, який використовує двокомпонентну суміш аміаку і води як робоче тіло. Він є ефективнішою альтернативою традиційним циклам, особливо при роботі з низько- і середньотемпературними джерелами тепла (від 80 °С до 300 °С). Цей цикл використовується переважно в геотермальній, промисловій та когенераційній енергетиці.

На відміну від ORC або звичайного циклу Ренкіна, цикл Каліни базується на частковій дистиляції суміші аміаку та води. Завдяки різниці температур кипіння компонентів суміші (аміак приблизно –33 °С, вода приблизно 100 °С), цей цикл дозволяє краще узгодити фазові переходи з температурним профілем джерела тепла (рис. 2) [3].

Робоча рідина (рис. 2) в стані насичення (при низькому тиску системи) виходить з абсорбера з основною фракцією аміаку (*стан 1*). Далі рідина стискається до тиску сепаратора, який є високим тиском системи (*стан 2*). Потім рідина попередньо нагрівається в регенераторі за рахунок рідини з сепаратора та потрапляє в котел (*стан 3*). Робоча рідина нагрівається за рахунок вихідної рідини в котлі до температури сепаратора (*стан 4*), а потім розділяється на насичену пару, багату на аміак (*стан 5*), та розбавлену насичену рідину (*стан 10*) у сепараторі. Пара з сепаратора потрапляє в турбіну та генерує енергію, розширюючись до проміжного тиску (*стан 6*). Потім рідина залишає конденсатор як насичена рідина (*стан 7*). Після розширення рідини через дросельний розширювальний клапан (*стан 8*), вона витягує тепло з води або навколишнього середовища у випарнику (*стан 9*). Рідина з сепаратора попередньо нагріває робочу рідину (*стан 11*), дросельно розширюється (*стан 12*) та змішується з робочою рідиною з випарника, потрапляючи в абсорбер (*стан 13*). Вихідна рідина потрапляє в котел (*стан 14*) та виходить після нагрівання робочої рідини (*стан 15*). Охолоджувальна вода потрапляє (*стан 16*) та виходить (*стан 17*) з абсорбера після відведення тепла від робочої рідини. Аналогічно, охолоджувальна вода потрапляє (*стан 18*) та виходить (*стан 19*) з конденсатора після відведення тепла від робочої рідини. Вода потрапляє у випарник (*стан 20*), а охолоджена вода виходить (*стан 21*) [4].

Основні сфери застосування циклу Каліни: геотермальні електростанції (особливо низькотемпературні); утилізація промислового відхідного тепла (сталеливарна, хімічна промисловість); сонячна теплова енергетика; малі когенераційні установки.

Основні переваги циклу Каліни: вища ефективність, ніж *ORC* або традиційного Ренкіна при однакових умовах – ККД може бути на 10 % – 15 % вищим; краща адаптація до змінних температур джерела тепла; гнучкість у виборі складу робочого тіла – можна оптимізувати для конкретних умов; компактність обладнання у порівнянні з паротурбінними аналогами.

Основні обмеження та недоліки циклу Каліни: корозійна активність аміаку – вимагає спеціальних матеріалів; складна термодинаміка суміші – ускладнює проектування та моделювання; необхідність в рекуперації – без неї ефективність різко падає; потреба в точному контролі складу робочого тіла.

Цикл Каліни демонструє великий потенціал у підвищенні ефективності енергетичних систем, особливо у сфері утилізації низькоякісного тепла. Його впровадження дозволяє максимально використовувати доступну теплову енергію там, де класичні цикли безсилі.

Надкритичний цикл із CO₂

Надкритичний цикл із діоксидом вуглецю (*sCO₂*) – це передова теплова технологія, що використовує CO₂ у надкритичному стані (вище критичних параметрів: $t > 31\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p > 7,38\text{ МПа}$) в якості робочого тіла. Завдяки особливим фізичним властивостям CO₂ у надкритичному стані, цей цикл дозволяє досягати високої термодинамічної ефективності та компактності обладнання, що робить його привабливим для використання в атомній, сонячній, газотурбінній та відновлюваній енергетиці. Найпростішою конфігурацією енергетичного циклу *sCO₂* є проста регенована схема, представлена на рис. 3 [5].

Ця система складається з трьох теплообмінників, компресора та турбіни. Низькотемпературні, середньотемпературні та високотемпературні теплообмінники виконують різні функції і, в свою чергу, їх зазвичай називають газовим охолоджувачем, рекуператором та первинним нагрівачем відповідно. Відповідно до *TS*-діаграми на рис. 3, CO₂ стискається в компресорі (1–2) і нагрівається спочатку на холодній стороні рекуператора (2–3), а потім у первинному нагрівачі (3–4), де відбувається фактична рекуперація тепла з промислового процесу доведення (червона лінія). Після цього потік CO₂ з високою ентальпією розширюється в турбіні (лінія 4–5) до тиску, близького до

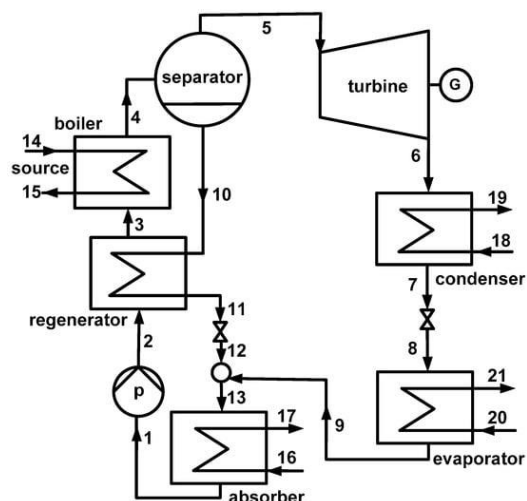


Рис. 2 – Принципова схема циклу Каліни [4]:
1 – 21 – стан рідини

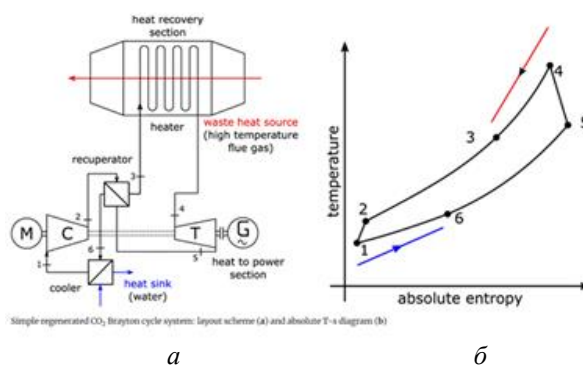


Рис. 3 – Проста система регенованого циклу *sCO₂* Брайтона [5]:
а – схема компонування;
б – діаграма абсолютних температур

критичного. Температура CO₂ на виході з турбіни додатково знижується на гарячій стороні рекуператора (5–6). Зрештою, початкові термодинамічні умови циклу відновлюються шляхом відведення залишкового тепла до джерела охолодження через газовий охолоджувач (6–1).

Основні сфери застосування *sCO₂* систем: атомна енергетика нового покоління (реактори IV покоління); концентрована сонячна енергетика (*Concentrated Solar Power (CSP)*); високотемпературні газотурбінні установки; установок утилізації тепла в металургії та нафтопереробці.

Основні переваги *sCO₂* систем: висока ефективність – ККД може перевищувати 50 % при температурах вище 550 °C; компактність – через високу густину CO₂, турбіни та інші компоненти набагато менші, ніж у парових установках; низька вартість обслуговування – CO₂ не токсичний, недорогий і стабільний; можливість інтеграції з іншими циклами – наприклад, у комбінованих установках.

Основні обмеження та недоліки sCO_2 систем: потреба в дуже точному регулюванні температур і тиску; складна конструкція рекуператорів; проблеми з матеріалами при високому тиску – потрібні термостійкі та корозійностійкі сплави; технічна новизна – технологія ще недостатньо масштабована.

sCO_2 -цикли становлять важливий напрямок у розвитку енергоефективних систем майбутнього. Поєднуючи високу термічну ефективність, екологічність та компактність, вони мають потенціал замінити класичні цикли в багатьох галузях енергетики.

Таким чином, альтернативні робочі тіла відкривають нові можливості для розвитку високоефективних і екологічно чистих енергетичних систем. Їх використання особливо доцільне в установках малої та середньої потужності, де традиційні цикли показують низьку ефективність.

Сучасні комбіновані цикли

Комбіновані цикли – це системи, в яких два або більше термодинамічні цикли працюють разом, підвищуючи загальну ефективність використання тепла. Найчастіше використовується поєднання високотемпературного основного циклу (наприклад, газотурбінного) з низькотемпературним утилізаційним циклом (парового або ORC/Калини/ sCO_2 -типу). Це дозволяє максимально використати енергію палива або відхідного тепла, зменшуючи втрати.

Найпоширенішим прикладом використання такої технології є традиційна газопарова установка, що складається з газотурбінної установки (верхній ступінь циклу, цикл Брайтона) і паротурбінної установки (нижній ступінь, цикл Ренкіна), що з'єднані між собою через котел-утилізатор. Загальний ККД такої установки складає до 60 % – 65 %. Основний цикл (газова турбіна) виробляє електроенергію й віддає викидне тепло. Це тепло передається в допоміжний цикл, який використовує його для генерації додаткової енергії.

В якості альтернативного комбінованого циклу можна навести CSP технологію, яка використовує дзеркала або лінзи для концентрації сонячного випромінювання на невелику площу, щоб нагріти робоче тіло та виробляти електроенергію через тепловий цикл (sCO_2 +ORC) (рис. 4) [10].

На рис. 4 червона лінія (гаряча) та синя лінія (холодна) представляють контур високотемпературного нагрівання (HTF), який поглинає сонячну енергію від параболічних колекторів та передає тепло до систем енергетичного циклу, тоді як лінії помаранчевого та чорного кольорів позначають цикл sCO_2 та ORC відповідно. Дві підсистеми пов'язані через спільний теплообмінник, який дозволяє системі нижнього ORC рекуперувати

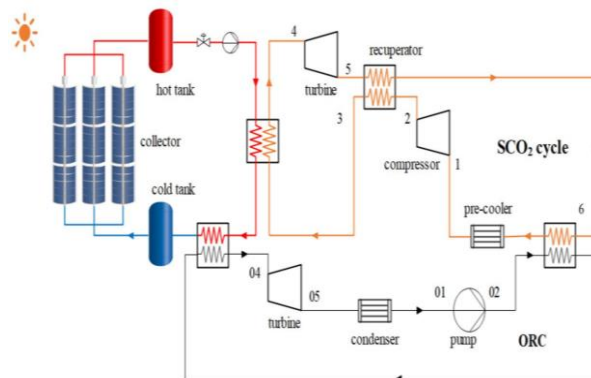


Рис. 4 – Теплова схема комбінованої системи CSP (sCO_2 /ORC) [10]

залишкове тепло від системи верхнього циклу [10].

В табл. 1 представлено порівняння комбінованих циклів з різними робочими тілами.

Таблиця 1 – Сучасні типи комбінованих циклів з прикладами застосування

Основний цикл	Допоміжний цикл	Загальний ККД, %	Приклад
Газовий (Брайтона)	Паровий (Ренкіна)	60 – 65	Комбіновані газопарові станції
Газовий (Брайтона)	ORC	50 – 55	Промислова утилізація тепла
sCO_2	Калина / ORC	55 – 60	Геотермальна/ ядерна енергетика
Сонячний (CSP)	sCO_2 / ORC	35 – 45	Гібридні сонячні електростанції

Аналіз даних (табл. 1) показує, що найвищі показники ефективності досягаються у газопарових установках, де газотурбінний цикл Брайтона поєднується з паротурбінним циклом Ренкіна. Така конфігурація забезпечує ККД на рівні 60 % – 65 %, що робить її стандартом для сучасних комбінованих газопарових електростанцій.

Для утилізації промислового тепла застосовуються системи, де газовий цикл доповнюється органічним циклом Ренкіна (ORC). Хоча загальний ККД таких установок нижчий (50 % – 55 %), вони ефективні для низько- та середньотемпературних джерел теплоти, що дозволяє зменшити втрати енергії у промислових процесах. Перспективним напрямом є використання надкритичного діоксиду вуглецю (sCO_2) як основного циклу в поєднанні з ORC або циклом Калини. Завдяки високій густині робочого середовища та компактності обладнання такі системи досягають ККД 55 % – 60 % і розглядаються для геотермальної та ядерної енергетики. Сонячні концентровані електростанції (CSP) демонструють найнижчий ККД (35 % – 45 %) через обмеження температури та втрати при концентрації сонячного випромінювання. Проте інтеграція

допоміжних циклів (sCO_2 або *ORC*) дозволяє підвищити ефективність і забезпечити конкурентоспроможність гібридних сонячних систем.

Основними перевагами комбінованих систем є: підвищення енергетичного ККД за рахунок зменшення втрат тепла; зниження витрат на паливо, що дає додатковий економічний ефект; зменшення шкідливих викидів за рахунок нижчої витрати пального на одиницю енергії; гнучкість конструкції, що дає можливість адаптації до специфіки джерела тепла.

Складності та недоліки комбінованих систем: ускладнення системи управління та автоматизації; вища початкова вартість через більшу кількість компонентів; необхідність точного балансування теплових потоків між циклами; більші габарити і маса установок, хоча при цьому підвищується ефективність.

Комбіновані цикли є ключовим напрямком розвитку сучасної енергетики, дозволяючи ефективно використовувати всі рівні теплового потенціалу. У майбутньому вони ставатимуть основою для високоефективних, гнучких та екологічних енергетичних систем, особливо в умовах переходу до відновлюваних джерел.

Екологічні та економічні аспекти впровадження

Використання альтернативних або комбінованих робочих тіл у теплових циклах має не лише технічне значення. Воно істотно впливає на екологічну безпеку енергетичних об'єктів та економічну ефективність їх експлуатації.

Екологічні переваги: зниження викидів CO_2 за рахунок підвищення ККД та зменшення викидів

парникових газів на 10 % – 30 % залежно від типу установки; зменшується навантаження на водні ресурси, особливо в посушливих регіонах оскільки у циклах з CO_2 або *ORC* не завжди потрібна конденсація на водяних охолоджувачах; можливість використання відновлюваних джерел. Альтернативні цикли добре інтегруються з біомасою, геотермальними, сонячними та відходами тепла, що в цілому сприяє декарбонізації енергетики.

До потенційних екологічних ризиків можна віднести той факт що деякі робочі речовини (особливо у *ORC*) мають високий *GWP* тому необхідно ретельно контролювати можливі витоки та правильно утилізувати відпрацьовані матеріали. Нові робочі тіла з низьким *GWP* (наприклад, R1233zd(E), R1234yf) частково розв'язують проблему [8].

До економічних аспектів які позитивно впливають можна віднести: зниження експлуатаційних витрат через менші витрати палива; можливість отримання зелених тарифів та участі в «carbon credit» програмах.

До економічних викликів можна віднести: висока капітальна вартість при будівництві (особливо для нових технологій); необхідність сертифікації нових робочих тіл і систем у багатьох країнах; потреба в навчанні персоналу для експлуатації складніших установок.

Екологічно чисті енергетичні цикли – не лише тренд, а й вимога часу. Хоча первинні інвестиції більші, в перспективі вони окупаються через економію палива, зниження викидів і податкові пільги. Найефективніші рішення – інтегровані підходи, які поєднують технічні, екологічні та фінансові переваги (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця екологічного та економічного впливу для різних систем

Критерій	Парова ТЕС	Газо-парова	<i>ORC</i>	Калина	sCO_2
Екологічність	–	+	++	+	+++
ККД, %	35	60	20–25	30	50
Інвестиції	середні	високі	низькі	середні	високі
Гнучкість джерела	–	–	+++	++	++

Висновки і перспективи розвитку

Підвищення ефективності теплових установок можливе завдяки використанню альтернативних та комбінованих робочих тіл, що забезпечує гнучку адаптацію до джерел тепла, зменшення втрат і зростання ККД. Класичні цикли досягли меж удосконалення, тому перспективним є впровадження органічних (*ORC*), Калини та sCO_2 -циклів, а також комбінованих схем із ККД до 65 %. Експериментальні установки підтвердили технічну й економічну доцільність таких рішень. Екологічні переваги – зниження викидів CO_2 ,

менше споживання води, ефективне використання відновлюваних джерел. Подальший розвиток передбачає: розширення застосування sCO_2 -циклів, інтеграцію з низькотемпературними джерелами, створення безпечних робочих тіл, автоматизацію управління та вдосконалення теплообмінників. Альтернативні та комбіновані робочі тіла є ключем до економічно вигідної й екологічно чистої енергетики майбутнього.

Список літератури

1. Jiménez-García J. C. A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles / J. C. Jiménez-García, A. Ruiz, A. Pacheco-

- Reyes, W. Rivera // *Processes*. – 2023. – Vol. 11, Is. 7. – No. paper 1982. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11071982>.
2. Chowdhury A. S. A Critical Overview of Working Fluids in Organic Rankine, Supercritical Rankine, and Supercritical Brayton Cycles Under Various Heat Grade Sources / A. S. Chowdhury, M. M. Ehsan // *International Journal of Thermofluids*. – 2023. – Vol. 20. – No. paper 100426. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100426>.
 3. Nemati A. A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system / A. Nemati, H. Nami, F. Ranjbar, M. Yari // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 9. – PP. 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.11.003>.
 4. Kim K. H. Thermodynamic Analysis of Kalina Based Power and Cooling Cogeneration Cycle Employed Once Through Configuration / K. H. Kim // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, Is. 8. – No. paper 1536. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en12081536>.
 5. Marchionni M. Review of supercritical carbon dioxide (sCO₂) technologies for high-grade waste heat to power conversion / M. Marchionni, G. Bianchi, S. A. Tassou // *SN Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 2. – No. paper 611. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2116-6>.
 6. White M. T. Review of supercritical CO₂ technologies and systems for power generation / M. T. White, G. Bianchi, L. Chai, S. A. Tassou, A. I. Sayma // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 185. – No. paper 116447. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116447>.
 7. Mansouri R. Assessing Energy Performance and Environmental Impact of Low GWP Vapor Compression Chilled Water Systems / R. Mansouri, B.-J. R. Mungyeke Bisulandu, A. Ilinca // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, Is. 12. – No. paper 4751. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124751>.
 8. Drofenik J. Comparison of the New Refrigerant R1336mzz(E) with R1234ze(E) as an Alternative to R134a for Use in Heat Pumps / J. Drofenik, D. Urbanc, D. Goričanec // *Processes*. – 2022. – Vol. 10, Is. 2. – No. paper 218. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020218>.
 9. Gonidaki A. A. Detailed Review of Organic Rankine Cycles Driven by Combined Heat Sources / A. Gonidaki, E. Bellos // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, Is. 3. – No. paper 526. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en18030526>.
 10. Song J. Thermodynamic Assessment of Combined Supercritical CO₂ (sCO₂) and Organic Rankine Cycle (ORC) Systems for Concentrated Solar Power / J. Song, M. Simpson, K. Wang, C. N. Markides // *International Conference on Applied Energy* 2019, 12–15 August 2019, Västerås, Sweden. – 2019. – Paper ID 1152. – PP. 1–6. – URL: https://energy-proceedings.org/wp-content/uploads/2020/03/1152_Paper_0828092719.pdf (дата звернення 22.11.2025).
- References (transliterated)**
1. Jiménez-García J. C., Ruiz A., Pacheco-Reyes A., Rivera W. (2023), “A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles”, *Processes*, vol. 11, is. 7, no. paper 1982, <https://doi.org/10.3390/pr11071982>.
 2. Chowdhury A. S., Ehsan M. M. (2023), “A Critical Overview of Working Fluids in Organic Rankine, Supercritical Rankine, and Supercritical Brayton Cycles Under Various Heat Grade Sources”, *International Journal of Thermofluids*, vol. 20, no. paper 100426, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100426>.
 3. Nemati A., Nami H., Ranjbar F., Yari M. (2017), “A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system”, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 9, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.11.003>.
 4. Kim K. H. (2019), “Thermodynamic Analysis of Kalina Based Power and Cooling Cogeneration Cycle Employed Once Through Configuration”, *Energies*, vol. 12, is. 8, no. paper 1536, <https://doi.org/10.3390/en12081536>.
 5. Marchionni M., Bianchi G., Tassou S. A. (2020), “Review of supercritical carbon dioxide (sCO₂) technologies for high-grade waste heat to power conversion”, *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. paper 611, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2116-6>.
 6. White M. T., Bianchi G., Chai L., Tassou S. A., Sayma A. I. (2021), “Review of supercritical CO₂ technologies and systems for power generation”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 185, no. paper 116447, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116447>.
 7. Mansouri R., Mungyeke Bisulandu B.-J. R., Ilinca A. (2023), “Assessing Energy Performance and Environmental Impact of Low GWP Vapor Compression Chilled Water Systems”, *Energies*, vol. 16, is. 12, no. paper 4751, <https://doi.org/10.3390/en16124751>.
 8. Drofenik J., Urbanc D., Goričanec D. (2022), Comparison of the New Refrigerant R1336mzz(E) with R1234ze(E) as an Alternative to R134a for Use in Heat Pumps”, *Processes*, vol. 10, is. 2, no. paper 218, <https://doi.org/10.3390/pr10020218>.
 9. Gonidaki A., Bellos E. (2025), “A Detailed Review of Organic Rankine Cycles Driven by Combined Heat Sources”, *Energies*, vol. 18, is. 3, no. paper 526, <https://doi.org/10.3390/en18030526>.
 10. Song J., Simpson M., Wang K., Markides C. N. (2019), “Thermodynamic Assessment of Combined Supercritical CO₂ (sCO₂) and Organic Rankine Cycle (ORC) Systems for Concentrated Solar Power”, *International Conference on Applied Energy* 2019, 12–15 August 2019, Västerås, Sweden, paper ID 1152, pp 1–6, Access mode: https://energy-proceedings.org/wp-content/uploads/2020/03/1152_Paper_0828092719.pdf (accessed 22 November 2025).

Надійшло (received) 18.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Литвиненко Оксана Олексіївна (Lytvynenko Oksana) – кандидат технічних наук, доцент; професор кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; тел.: 067-990-58-28; e-mail: Oksana.Lytvynenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0182-2255>.

Курдупов Дмитро Олегович (Kurdupov Dmytro) – аспірант кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: 063-459-25-78; e-mail: Dmytro.Kurdupov@ieee.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5881-1846>.