УДК 621.165

В. В. Мартиненко
Д. В. Степанов

СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО ЦИКЛУ РЕНКІНА В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

На основі європейського досвіду розглянуто можливості застосування органічного циклу Ренкіна (ОЦР) на підприємствах України. Зіставлено використання теплоти відхідних газів біогазових двигунів через контур термоолії, відхідних газів котлів і печей, скидного конденсату, оборотної води перед градирнями та сонячних теплових колекторів. Для кожного варіанта визначено місце відбору теплоти й обмеження, що впливають на генерації.

Ключові слова: органічний цикл Ренкіна, утилізація теплоти, біогаз, термоолія, відхідні гази, конденсат, градирня, сонячний колектор.

Abstract

This study draws on European experience to assess possible applications of the organic Rankine cycle (ORC) at Ukrainian industrial sites. It compares heat recovery from biogas engine exhaust through a thermal oil loop, boiler and furnace flue gases, discharged condensate, and warm return water upstream of cooling towers, along with heat supplied by solar thermal collectors. Heat recovery points and the factors limiting power generation are identified.

Keywords: organic Rankine cycle, heat recovery, biogas, thermal oil, flue gas, condensate, cooling tower, solar thermal collector.

Вступ. Постановка задачі

У Європі органічний цикл Ренкіна (ОЦР) застосовують для виробництва електроенергії з геотермальної теплоти, у когенераційних установках на біомасі та для утилізації скидної теплоти промислових процесів. Досвід використання ОЦР на біомасі накопичено, зокрема, у Німеччині, Австрії та Італії [1]. За даними Об'єднаного дослідницького центру Європейської комісії, станом на липень 2022 р. на цементних підприємствах в Алешді (Румунія) та Рогожніку (Словаччина) працювали установки ОЦР електричною потужністю 4 і 5 МВт відповідно [2]. У цих випадках виробництво електроенергії інтегровано в діючий технологічний процес, у якому частина теплоти підлягає відведенню.

Для України цей досвід актуальний під час модернізації біогазових комплексів, котелень і промислових підприємств. Після забезпечення основного процесу частина теплоти може залишатися у відхідних газах, конденсаті та воді систем охолодження. В ОЦР цю теплоту підводять до органічного робочого тіла, пара якого розширюється в машині, з'єднаній з електрогенератором. Якщо джерелом є теплота, яка раніше скидалася, підприємство може виробляти частину електроенергії для власних потреб без додаткового спалювання палива. За наявності споживача технологічної теплоти електрогенерацію слід порівняти з можливістю використати цей самий потік для підігрівання води чи повітря.

Мета роботи – розглянути сфери й напрями застосування ОЦР в енергетиці та промисловості України, визначити потенційні джерела теплоти й умови їх використання для виробництва електроенергії.

Результати дослідження

Теплову потужність, яку можна відібрати від потоку, визначають за його масовою витратою та зменшенням питомої ентальпії в межах допустимого охолодження. Здатність перетворити цю теплоту на роботу залежить також від температури її підведення та умов охолодження конденсатора. Тому джерела зіставлено за місцем відбору теплоти, температурою, витратою, тривалістю роботи та можливістю використати теплоту безпосередньо.

На птахівничих і тваринницьких комплексах із біогазовою когенерацією джерелом теплоти для ОЦР можуть бути вихлопні гази двигунів. Прикладом поєднання виробництва електроенергії з прямим використанням теплоти є комплекс «Біогаз Ладижин» на Вінниччині.

За даними МХП, у 2021 р. там ввели в експлуатацію тепловий пункт, який використовує теплоту контуру охолодження когенераторів для нагрівання води на потреби переробного комплексу [3]. Під час оцінювання можливості встановлення ОЦР на таких об'єктах спочатку

визначають потреби переробки та підігрівання. Потужність модуля розраховують за залишковою теплотою, для чого потрібні виміряні температури й витрати вихлопних газів на робочих навантаженнях двигуна.

За достатньої температури вихлопу його теплоту можна передати термоолії в газовому теплообміннику. Робоче тіло циркулює між цим теплообмінником і випарником ОЦР, розділяючи газовий тракт і контур органічного робочого тіла [4]. В оцінці враховують температурні перепади на обох теплообмінниках, втрати в трубопроводах та споживання насоса. Якщо після забезпечення власних теплових потреб залишається доступною теплота води з контуру охолодження двигуна, її можна використати для попереднього підігрівання робочого тіла, а випаровування забезпечити гарячішим потоком.

Відбір теплоти з газового потоку можливий також у котельнях на біомасі та на підприємствах із промисловими печами. Точку відбору визначають після штатних поверхонь нагріву за температурою, витратою та запиленістю газів. Для промислового підприємства з цілорічним виробництвом виробіток ОЦР доцільно оцінювати за фактичними режимами роботи котла чи печі. У комунальній котельні потрібно окремо врахувати скорочення годин роботи поза опалювальним сезоном.

Під час відбору теплоти від відхідних газів враховують забруднення поверхонь, витрати на очищення й додатковий опір газового тракту. За наявності сполук сірки допустиме охолодження в неконденсаційній схемі залежить від кислотної точки роси, яку оцінюють за складом газів [6]. Перевірку виконують за температурою найхолоднішої ділянки стінки з боку газу. Середня температура потоку на виході може бути вищою за кислотну точку роси, тоді як температура металу на окремих ділянках нижчою. Це обмеження визначає, яку частку залишкової теплоти котла можна передати до ОЦР.

На молокозаводах і цукрових підприємствах, де котельні подають пару на технологічні потреби, теплота залишається і в конденсаті після теплообмінників. У звіті за результатами 13 енергоаудитів українських молокозаводів повернення конденсату в котельню віднесено до типових заходів енергоефективності [7]. Для ОЦР тому насамперед розглядають гарячий потік, який не вдається повернути. Теплоту відбирають перед скиданням або змішуванням конденсату з холодною водою. Якщо при зниженні тиску утворюється вторинна пара, можливість її використання в технологічному процесі оцінюють окремо. Виробництво електроенергії з теплоти рідкого конденсату зіставляють із підігріванням води для миття обладнання та інших потреб. Для цукрових заводів у розрахунку річного виробітку враховують тривалість сезону переробки.

На тих самих виробництвах частину теплоти відводять із водою холодильних і технологічних установок. Якщо в системі є градирня, придатність джерела для ОЦР перевіряють на лінії гарячої оборотної води перед її охолодженням. Відбір теплоти має зберігати потрібну температуру й витрату води на вході в обладнання. Для конденсації робочого тіла потрібне холодніше середовище. У разі водяного охолодження конденсатора з градирнею доступна температура води залежить, зокрема, від температури зовнішнього повітря за вологим термометром [8]. Тому потрібно перевірити, чи зберігається додатна чиста потужність улітку, коли температурний напір зменшується.

За витрати оборотної води 25 кг/с та охолодження з 55 до 45 °C можна відібрати приблизно 1,05 МВт теплової потужності. Якщо умовно прийняти підведення всієї теплоти за 55 °C, а відведення за 30 °C, граничний ККД Карно становить 7,6 %. Це дає ідеалізовану верхню межу потужності близько 80 кВт. Фактична потужність буде нижчою через зниження температури води під час відбору теплоти, необхідні температурні перепади в теплообмінниках і втрати в устаткуванні. Для слабко нагрітої оборотної води тому варто перевірити також можливість прямого підігрівання технологічної води або підвищення температури теплоти тепловим.

Сезонний графік впливає і на виробіток ОЦР із сонячними тепловими колекторами. Нагрітий теплоносій можна подавати до випарника або спрямовувати в тепловий акумулятор. У межах проєкту Innova MicroSolar в Іспанії випробувано демонстраційну установку з лінійними концентраторами Френеля, акумулятором теплоти й модулем ОЦР проєктною електричною потужністю 2 кВт [10]. Для українського майданчика тривалість роботи визначають за місцевими погодинними даними опромінення, наприклад із бази PVGIS [11], з

урахуванням характеристик колекторів та акумулятора. На об’єкті зі стабільною потребою в гарячій воді ОЦР порівнюють із прямим використанням теплоти колекторів, а за пріоритету електрогенерації з фотоелектричною установкою.

Для всіх розглянутих схем річний виробіток визначають як суму добутків чистої електричної потужності на тривалість відповідних режимів. Від потужності генератора віднімають електричну потужність насосів, вентиляторів та іншого допоміжного обладнання. Заощадження розраховують за тією частиною виробітку, яка збігається в часі з власним навантаженням і заміщує електроенергію за ціною її закупівлі конкретним підприємством. Цей ефект зіставляють із витратами на встановлення й обслуговування ОЦР та з можливою економією палива за прямого використання тієї самої теплоти.

Висновки

Для українських підприємств першочерговими об’єктами обстеження є біогазові когенераційні комплекси, промислові котельні й печі зі стабільними потоками вихлопних або відхідних газів. Використання скидного конденсату й оборотної води в ОЦР доцільно оцінювати після перевірки можливості повернення конденсату або прямого відбору теплоти. Придатність сонячних колекторів як джерела теплоти для ОЦР залежить від місцевого опромінення, температури теплоносія та тривалості роботи модуля.

Встановлення ОЦР може підвищити енергоефективність підприємства й зменшити витрати на закупівлю електроенергії, якщо залишкова теплота доступна достатньо довго, а чистий виробіток можна використати на місці без порушення основного виробничого процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tartière T., Astolfi M. A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 129. P. 2–9. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.159.
2. Marmier A. *Decarbonisation Options for the Cement Industry*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. JRC131246. DOI: 10.2760/174037.
3. Сталий розвиток : ВП «Біогаз Ладижин». *МХП*. URL: https://mhp.com.ua/uk/stalyy-rozvytok (дата звернення: 01.11.2026).
4. Benato A., Macor A. Biogas Engine Waste Heat Recovery Using Organic Rankine Cycle. *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 3. Art. 327. DOI: 10.3390/en10030327.
5. Березюк О. В., Паламарчук М. О. Залежність теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. № 5 (182). С. 36–40. DOI: 10.31649/1997-9266-2025-182-5-36-40.
6. Zhang M. et al. Comparison and Analysis of Calculation Methods for Acid Dew Point of Coal-Fired Boiler Flue Gas Based on SO_3 Concentration. *Applied Mathematics, Modeling and Computer Simulation*. IOS Press, 2022. P. 979–989. DOI: 10.3233/ATDE220102.
7. *Скільки енергії споживається при виробництві молочної продукції? Висновки за результатами 13 енергоаудитів, проведених на українських підприємствах молочної галузі*. Київ : GIZ, 2020. URL: аналітичний звіт (дата звернення: 10.11.2026).
8. Korolija I., Greenough R. Modelling the Influence of Climate on the Performance of the Organic Rankine Cycle for Industrial Waste Heat Recovery. *Energies*. 2016. Vol. 9, No. 5. Art. 335. DOI: 10.3390/en9050335.
9. Dickes R. et al. Solar-Powered Organic Rankine Cycles: A Technical and Historical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 212. Art. 115319. DOI: 10.1016/j.rser.2024.115319.
10. Small-Scale Solar Systems with Large-Scale Potential. *CORDIS*. European Commission, 2022. URL: матеріали проєкту Innova MicroSolar (дата звернення: 12.11.2026).
11. Hourly Radiation. *Joint Research Centre, European Commission*. URL: погодинні дані PVGIS (дата звернення: 13.11.2026).

Мартиненко Віталій Вікторович – студент групи ТЕ-25м, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vitaliimartynenko2004@gmail.com.
Степанов Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Martynenko Vitalii V. – Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, e-mail: vitaliimartynenko2004@gmail.com.
Stepanov Dmytro V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Heat Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine.