

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ORC-УСТАНОВКИ З НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМ ДЖЕРЕЛОМ ТЕПЛОТИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Обґрунтована актуальність підвищення енергоефективності автономних джерел теплопостачання комунальних об'єктів та впровадження когенераційних технологій енерговиробництва. Виконано аналіз властивостей низькокиплячого робочого тіла змодельовано термодинамічний цикл ORC для утилізації теплоти відхідних газів котельні. Отримані результати можуть бути використані для проектування енергоефективного екологічно чистого обладнання для автономного енергозабезпечення.

Ключові слова: органічний цикл Ренкіна, низькокипляче робоче тіло, термодинамічний цикл, автономне енергозабезпечення

Abstract

The relevance of increasing the energy efficiency of autonomous sources of heat supply of municipal facilities and the introduction of cogeneration technologies for energy production is substantiated. The properties of a low-boiling working fluid are analyzed and the ORC thermodynamic cycle is modeled for the utilization of heat from boiler exhaust gases.

The results obtained can be used to design energy-efficient, environmentally friendly equipment for autonomous energy supply.

Keywords: organic Rankine cycle, low-boiling working fluid, thermodynamic cycle, autonomous energy supply

Вступ. Постановка задачі

Важка ситуація в країні з енергоносіями викликана геополітичними подіями, ведення військових дій та терористичних актів на території держави створює нові проблеми для енергосистеми країни. З огляду на залежність держави від експорту енергоносіїв, нестабільність мережі та дефіцит виробленої енергії змушує шукати вирішення та альтернативних можливостей забезпечити населення та підприємства енергією як електричною, так і тепловою. Вирішенням цієї проблеми може стати автономна когенерація, що дає можливість стати менш залежним від централізованого енергопостачання. Розміщення дизель генераторів різної потужності, використання відновлювальних джерел енергії дає більш гнучко реагувати на складну ситуацію в енергетиці [1, 2].

З іншого боку, автономні системи опалення невеликої потужності для шкіл, лікарень та інших громадських об'єктів, що працюють на природному газі та на біомасі подекуди мають недостатньо високу ефективність через, в першу чергу, низький ККД котлів, що пояснюється значними втратами теплоти з відхідними газами.

Останнім часом актуальності набувають енерготехнології органічного циклу Ренкіна (ORC), що дозволяють максимально ефективно перетворювати низькотемпературну теплоту в діапазоні 70–300 °C у корисну електричну енергію. Такі системи здатні працювати на теплоті димових газів, технологічних викидів у промисловості, тепла геотермальних вод, водогрійних і парових біомасових і біогазових котелень, газових турбін, а також теплової енергії сонячних колекторів, забезпечуючи енергетичну незалежність та підвищення надійності живлення об'єктів [3, 4].

Важливою перевагою ORC-циклів є їхня екологічність. Процес утилізації теплоти відбувається без додаткового спалювання палива, що дає змогу зменшити загальні викиди CO₂. Сучасні органічні робочі тіла мають низький потенціал руйнування озонового шару та мінімальний вплив на кліматичні зміни. Крім того, ORC-установки працюють при порівняно низьких тисках, що підвищує їхню безпечність та знижує потребу в складному високотисковому обладнанні.

ORC-технології дозволяють максимально ефективно використовувати місцеві енергоресурси та забезпечувати додаткові джерела генерації електроенергії. Особливо це стосується біомасових котелень, оскільки комплексне використання теплової енергії таких установок здатне суттєво підвищити їхню економічну ефективність. Модульність, компактність та простота експлуатації ORC-систем роблять їх оптимальним рішенням для умов децентралізованої енергетики, невеликих промислових підприємств, комунальних котелень.

Метою роботи є оцінка можливості впровадження системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC) для забезпечення автономного електропостачання Ярмолинецької районної лікарні.

Результат дослідження

В даній роботі розглядається варіант вироблення власної електроенергії для закладу охорони здоров'я – Ярмолинецької районної лікарні, оскільки стабільне електропостачання є критично важливим для даного медичного закладу. Джерелом низькотемпературної теплоти для ORC-циклу обрано відхідні гази автономної котельні, що обслуговує цей медичний заклад.

На основі залежностей, наведених в [5 - 9], створено математичну модель термодинамічного циклу ORC процесу. За основу взято низькокипляче робоче тіло (НРТ) гідрофторалекан (R1233zd (E)) з такими параметрами:

- ✓ тиск після насоса 9,335 бар;
- ✓ тиск перед насосом 2,156 бар;
- ✓ питомий об'єм в насосі 1225,6 кг/м³;
- ✓ перегрів 5 К;
- ✓ температура конденсації 313 К;
- ✓ температура випаровування 368 К;
- ✓ масова витрата газів 0,5 кг/с;
- ✓ ККД турбіни 92 %;
- ✓ ККД насоса 89%.

На основі термодинамічного циклу отримано та побудовано Т – S діаграму, що відображає процес, що відбувається в ORC модулі (рис. 1).

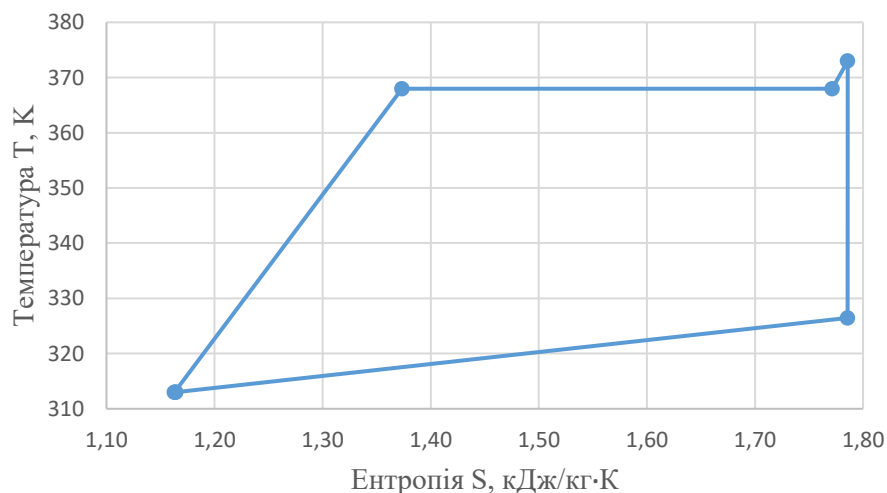


Рисунок 1 – Діаграма циклу ORC

Провівши математичне моделювання отримано ККД процесу, що становить 13,3%. Це є базовим значенням для ORC контурів малої потужності, потужність на валу становить 12,9 кВт, робота турбіни 13,3 кВт, відповідно, тепловідведення процесу 93,2 кВт.

Висновки

Проведений аналіз сучасного стану енергетичної системи країни свідчить про нагальну потребу в підвищенні енергетичної незалежності та надійності електропостачання, особливо для критично важливих об'єктів, таких як заклади охорони здоров'я. В таких умовах особливої актуальності набувають автономних джерел енергії та когенераційні технології.

Одним із перспективних рішень є використання органічного циклу Ренкіна (ORC), що дозволяє

ефективно перетворювати низькотемпературну теплоту відхідних газів у корисну електричну енергію. З огляду на значні теплові втрати традиційних котелень, інтеграція ORC-модулів є доцільним способом підвищення загального ККД систем теплопостачання та одночасного отримання додаткової генерації електроенергії без спалювання додаткового палива. ORC-технології також вирізняються екологічністю, безпечністю та можливістю роботи на органічних робочих тілах з низьким впливом на довкілля.

У роботі виконано моделювання термодинамічного ORC-процесу на основі теплоти димових газів автономної котельні Ярмолинецької районної лікарні. Для моделювання обрано низькокипляче робоче тіло R1233zd(E).

За результатами моделювання отримано ККД циклу на рівні 13,3 %, потужність на валу становить 12,9 кВт, а теплова потужність, що відводиться, 93,2 кВт.

Отримані значення підтверджують енергетичну, економічну та екологічну доцільність застосування ORC-технології для забезпечення автономного електропостачання досліджуваного об'єкта та демонструють перспективність подальшої розробки та впровадження таких модулів у системах теплопостачання невеликих котелень комунальних установ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Семененко О., Куравський В., Нестеренко Д. *Енергетична безпека як ключовий фактор економічної стійкості України під час війни* // *Економіка і суспільство*. – 2025. – Т. 12, № 1. – URL: <https://economics-msu.com.ua/en/journals/tom-12-1-2025/yenergetichna-bezpeka-yak-klyuchovy-faktor-ekonomichnoyi-stiykosti-ukrayini-pid-chas-viyni>
2. Орехова А., Клименко М., Хоралець Б. Проблеми та особливості управління альтернативною енергетикою в Україні під час повномасштабної війни // *Економіка та суспільство*. – 2024. – № 60. – URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/4087>
3. A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles [Електронний ресурс] // *Processes*. – 2023. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/7/1982>
4. Method of Selecting the Working Body for ORC Cycles of Flue Gas Heat Recovery [Електронний ресурс] // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2023. – URL: <https://scinews.kpi.ua/article/view/321969>
5. Шубенко О.Л. та ін. Утилізація теплоти димових газів котельні шляхом використання органічного циклу Ренкіна // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, № 11(1287) 2018. – С.4-11.
6. Бахтін В. І. Технічна термодинаміка: конспект лекцій по курсу «Технічна термодинаміка» для студентів ЗДІА спеціальності 7.090510 «Теплоенергетика» / уклад. В. І. Бахтін. – Запоріжжя: ЗДІА, 2005. – 128 с.
7. Aungier R. H. *Turbine Aerodynamics: Axial-Flow and Radial-Inflow Turbine Design and Analysis*. – New York: ASME Press, 2005. – 389 p.
8. Paseka A. D., Prasetyo P., Bonar A., Arifin M. *A Geometric Design Method of Radial Inflow Turbine from 0D to 3D for Organic Rankine Cycle Micro Power Generation* // *ASEAN Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 131–139. – URL: <https://doi.org/10.11113/aej.v12.17244>
9. Степанов Д. В., Степанова Н. Д. Математичні методи і моделі: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / уклад. Д. В. Степанов, Н. Д. Степанова. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 44 с.

Степанов Дмитро Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Stepanovdv@ukr.net

Мартиненко Віталій Вікторович, студент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет

Stepanov Dmitry, candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of heat power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Stepanovdv@ukr.net

Martynenko Vitalii, student on Department of heat power engineering, Vinnytsia National Technical University