УДК 621.67:532.5
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).27

ANALYSIS OF SIMPLE AND CASCADE ORGANIC RANKINE CYCLES FOR DECENTRALIZED THERMAL ENERGY SYSTEMS

АНАЛІЗ ПРОСТОГО І КАСКАДНОГО ОРГАНІЧНОГО ЦИКЛУ РЕНКІНА ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Andrii O. Kapustianskyi[1]
kapustyanskyy@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2771-2505

Igor R. Galyanchuk[1]
ihor.r.halianchuk@lpnu.ua
ORCID: 0000-0001-6242-1749

Oksana G. Yurasova[1]
oksana.h.yurasova@lpnu.ua
ORCID: 0000-0001-9930-9152

Mariia F. Zaiats[1]
marzayf@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8899-9036

Kateryna O. Romanova[2]
romanova_ko@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9738-3383

А. О. Капустянський[1],
канд. техн. наук, старший викладач

І. Р. Галянчук[1],
канд. техн. наук, старший викладач

О. Г. Юрасова[1],
канд. техн. наук, старший викладач

М. Ф. Заяць[1],
старший викладач

К. О. Романова[2],
канд. техн. наук, доцент

[1]Lviv Polytechnic National University, Lviv
[2]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
[1]Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. *Purpose*. The purpose of this study is to perform a techno-economic comparison of simple and cascaded Organic Rankine Cycle (ORC) systems for distributed energy applications utilizing rice husk as a renewable fuel. The study aims to evaluate the energy, exergy, and economic performance of both configurations and assess their feasibility for autonomous power supply of agricultural enterprises and adjacent communities. *Methodology*. Mathematical modeling of simple and cascaded ORC systems was carried out using the Engineering Equation Solver (EES) software package, followed by data processing in Microsoft Excel. Rice husk combustion was considered as the heat source. Toluene was selected as the working fluid for the simple ORC and the high-temperature loop of the cascaded cycle, while the low-temperature loop employed the refrigerant R245fa. The systems were compared in terms of electrical power output, energy and exergy efficiencies, electricity generation cost, and capital expenditures. *Findings*. The results demonstrate that the cascaded Organic Rankine Cycle provides more efficient utilization of biomass thermal energy than the simple ORC. For a typical rice mill, the electrical power output increases from 1,154 to 1,600 kW, the thermal efficiency rises from 15.5 % to 21.5 %, and the exergy efficiency increases from 20.4 % to 28.2 %. Although the cascaded system requires higher capital investment (USD 8.25 million versus USD 5.54 million), it delivers higher electricity generation and is more promising for distributed generation. *Originality*. A comprehensive techno-economic comparison of simple and cascaded ORC systems utilizing heat generated by rice husk combustion has been conducted for the first time. The selection of working fluids has been substantiated, and the influence of the system configuration on the energy, exergy, and economic performance has been determined. *Practical value*. The obtained results can be applied to the design of autonomous biomass-based power generation for agro-industrial enterprises and other distributed energy facilities, contributing to improved energy efficiency, reduced dependence on diesel generators, and more efficient utilization.

Key words: Organic Rankine Cycle; cascaded ORC; simple ORC; distributed energy generation; rice husk; biomass; energy efficiency; exergy efficiency; techno-economic analysis.

Анотація. *Мета*. Метою роботи є техніко-економічне порівняння простої та каскадної установок органічного циклу Ренкіна (ORC) для систем розподіленої енергетики, що використовують рисове лушпиння як відновлюване паливо. Дослідження спрямоване на визначення енергетичних, ексергетичних та економічних показників обох схем, а також оцінку доцільності їх застосування для автономного електропостачання сільськогосподарських підприємств і прилеглих територій. *Методика*. Проведено математичне моделювання простої та каскадної ORC-установок із використанням програмного комплексу Engineering Equation Solver (EES) та подальшою обробкою результатів у MS Excel. Як джерело теплоти розглядалося спалювання рисового лушпиння; робочою рідиною простого та високотемпературного контуру каскадного циклу обрано толуол, а низькотемпературного контуру – холодоагент R245fa. Порівняння виконано за показниками електричної потужності, енергетичної та ексергетичної ефективності, питомої вартості електроенергії й витрат. *Результати*. Встановлено, що каскадний органічний цикл Ренкіна забезпечує ефективніше використання теплоти біомаси порівняно з простим циклом. Для типової рисової фабрики потужність установки зростає з 1154 до 1600 кВт, енергетичний ККД – з 15,5 до 21,5 %, а ексергетичний – з 20,4 до 28,2 %. Незважаючи на більші капітальні витрати (8,25 млн дол. США проти 5,54 млн дол. США), каскадна установка забезпечує вищий виробіток електроенергії та є перспективнішою для систем розподіленої генерації. *Наукова новизна*. Вперше виконано комплексне техніко-економічне порівняння простої та каскадної ORC-установок для використання теплоти від спалювання рисового лушпиння. Обґрунтовано вибір робочих тіл і визначено вплив схеми установки на енергетичні, ексергетичні та економічні показники. *Практична значимість*. Результати можуть бути використані під час проєктування автономних біоенергетичних установок для підприємств агропромислового комплексу та інших об'єктів розподіленої енергетики, сприяючи підвищенню енергоефективності, зменшенню використання дизельної генерації та раціональному використанню відходів.

Ключові слова: органічний цикл Ренкіна; каскадний ORC; простий ORC; розподілена енергетика; рисове лушпиння; біомаса; енергетична ефективність; ексергетична ефективність; техніко-економічний аналіз.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для слабо електрифікованих країн характерна невідповідність між зростаючим попитом на електроенергію та можливостями централізованих енергосистем. Незважаючи на встановлену потужність електростанцій близько 13 ГВт, енергосистема Нігерії забезпечує лише близько 4 ГВт електричної потужності, що недостатньо для понад 200 млн населення [1]. Рівень електрифікації країни становить лише 55,4 % [2], тому зростання енергоспоживання, виснаження запасів викопного палива та необхідність скорочення викидів парникових газів обумовлюють розвиток децентралізованої генерації на основі альтернативних джерел енергії [3].

Перспективним джерелом енергії є біомаса, зокрема рисове лушпиння, що у великих обсягах утворюється в Нігерії як побічний продукт переробки рису [4]. Його відкрите спалювання або накопичення призводить до забруднення довкілля та втрати енергетичного ресурсу. Раціональне використання рисового лушпиння дозволяє одночасно утилізувати відходи, забезпечувати підприємства електроенергією та передавати її надлишки до локальних мереж [5]. Рисове лушпиння використовується у технологіях газифікації, спалювання та піролізу. Зокрема, у роботі [6] показано, що його використання у паротурбінній когенераційній установці на рисовому млині в Південній Індії забезпечило зростання виробничих потужностей і додатковий прибуток від продажу надлишкової електроенергії.

Однією з найефективніших технологій перетворення теплоти біомаси є органічний цикл Ренкіна (Organic Rankine Cycle, ORC), який ефективно використовує джерела теплоти середнього та низького потенціалу. Подальше підвищення ефективності забезпечують каскадні ORC, у яких теплота відпрацьованого робочого тіла повторно використовується.

Попри значну кількість досліджень ORC-технологій для біомаси, питання вибору між простою та каскадною схемами для автономного енергозабезпечення сільськогосподарських підприємств залишається недостатньо дослідженим. Особливо актуальним є комплексне оцінювання їх енергетичних, ексергетичних та економічних показників.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Використання біомаси як відновлюваного джерела енергії є одним із найперспективніших напрямів розвитку розподіленої генерації. Особливу увагу привертає рисове лушпиння, яке розглядається не лише як відхід агровиробництва, а й як цінний енергетичний ресурс. Сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення технологій його енергетичного використання та оцінку їх техніко-економічної й екологічної ефективності.

У роботі [7] досліджено газифікацію рисового лушпиння та гранул із нього. За продуктивності установки 1,5 т/добу генераторний газ із теплотою згоряння 4542–5506 кДж/м^3 забезпечував роботу газопоршневої установки потужністю 8–10 кВт, що підтверджує ефективність використання рисових відходів для автономних енергосистем.

Економічну доцільність використання рисового лушпиння показано у роботі [8], де встановлено, що

вартість електроенергії становить 0,47 дол./(кВт·год), що нижче порівняно зі спалюванням кам'яного вугілля. Крім того, утилізація близько 70 % рисового лушпиння забезпечує виробництво до 1328 ГВт·год електроенергії на рік, скорочення викидів парникових газів і створення додаткових робочих місць [8].

Перспективною технологією перетворення теплоти біомаси є органічний цикл Ренкіна (ORC), який ефективно використовує джерела теплоти середнього та низького температурного рівня [9]. Його перевагою є широкий вибір органічних робочих тіл, хоча проблема вибору оптимальної робочої рідини за критеріями ефективності, безпеки та екологічності залишається актуальною [9].

Порівняно з традиційними паросиловими установками ORC характеризується компактністю, високою надійністю та ефективною роботою при змінному навантаженні [10]. Водночас прості ORC-цикли мають відносно невисокий ККД, що стимулює розвиток каскадних схем [11]. За даними [12], двоступінчастий ORC збільшує передачу теплоти приблизно на 15 %, а триступінчастий – більш ніж на 30 % порівняно з одноконтурними.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значну кількість досліджень використання біомаси та ORC, комплексне застосування рисового лушпиння і органічного циклу Ренкіна для автономного енергозабезпечення сільськогосподарських підприємств вивчене недостатньо. Більшість робіт присвячена або використанню біомаси як палива, або дослідженню ORC-установок.

Крім того, порівняльний аналіз простої та каскадної ORC-схем за енергетичними, ексергетичними й економічними показниками практично відсутній. Недостатньо дослідженим залишається і вплив каскадних ORC на економічну ефективність автономних енергоустановок.

У зв'язку з цим актуальним є комплексне техніко-економічне порівняння простої та каскадної ORC-установок, що використовують теплоту від спалювання рисового лушпиння, для визначення найбільш ефективної схеми децентралізованого електропостачання.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є техніко-економічне порівняння простої та каскадної ORC-установок, що використовують теплоту від спалювання рисового лушпиння для виробництва електроенергії, з оцінкою їх енергетичних, ексергетичних та економічних показників.

Завдання дослідження:

1. Провести математичне моделювання простої та каскадної ORC-установок і визначити їх основні енергетичні характеристики, зокрема електричну потужність, ККД та ефективність використання теплоти біомаси.

2. Виконати техніко-економічне порівняння схем за показниками енергетичної й ексергетичної ефективності, питомої вартості електроенергії та витрат для обґрунтування вибору оптимальної ORC-установки.

Таким чином, дослідження спрямоване на обґрунтування доцільності використання каскадних органічних циклів Ренкіна та розроблення рекомендацій щодо впровадження ефективних біоенергетичних установок у системах децентралізованого електропостачання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є енергетичні установки, що працюють за простим і каскадним органічним циклом Ренкіна (ORC) з використанням теплоти спалювання лушпиння рису.

Предметом дослідження є їх енергетичні, ексергетичні та економічні характеристики: електрична потужність, енергетична й ексергетична ефективність, ступінь використання теплового потенціалу біомаси та питома вартість виробленої електроенергії.

Дослідження виконано методом математичного моделювання термодинамічних процесів у простому та каскадному ORC. Для обох схем визначено електричну потужність, енергетичний і ексергетичний ККД, а також економічні показники. Розрахунки проводилися у програмному комплексі Engineering Equation Solver (EES), а обробка та порівняльний аналіз результатів – у Microsoft Excel.

Як робочу рідину простого циклу та високотемпературного контуру використано толуол, а низькотемпературного контуру – пентафторпропан R245fa, що має термічну стабільність, негорючість, відсутність потенціалу руйнування озонового шару та низький вплив на довкілля [13].

Оцінювання виконано за однакових вихідних умов із використанням сучасних термодинамічних моделей і довідкових властивостей робочих тіл. Отримані результати проаналізовано за показниками енергетичної, ексергетичної та економічної ефективності, що забезпечує їх використання для обґрунтування вибору ORC-установок у системах децентралізованого електропостачання.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Опис енергоустановок. На рис. 1 представлена принципова теплова схема енергоустановки для спалювання рисового лушпиння, в якій реалізується простий ORC.

На рисунку показано, що робоча рідина (толуол) перекачується зі стану 3 у стан 4 насосом для органічної рідини до досягнення певного тиску в парогенераторі (при температурі випаровування толуолу).

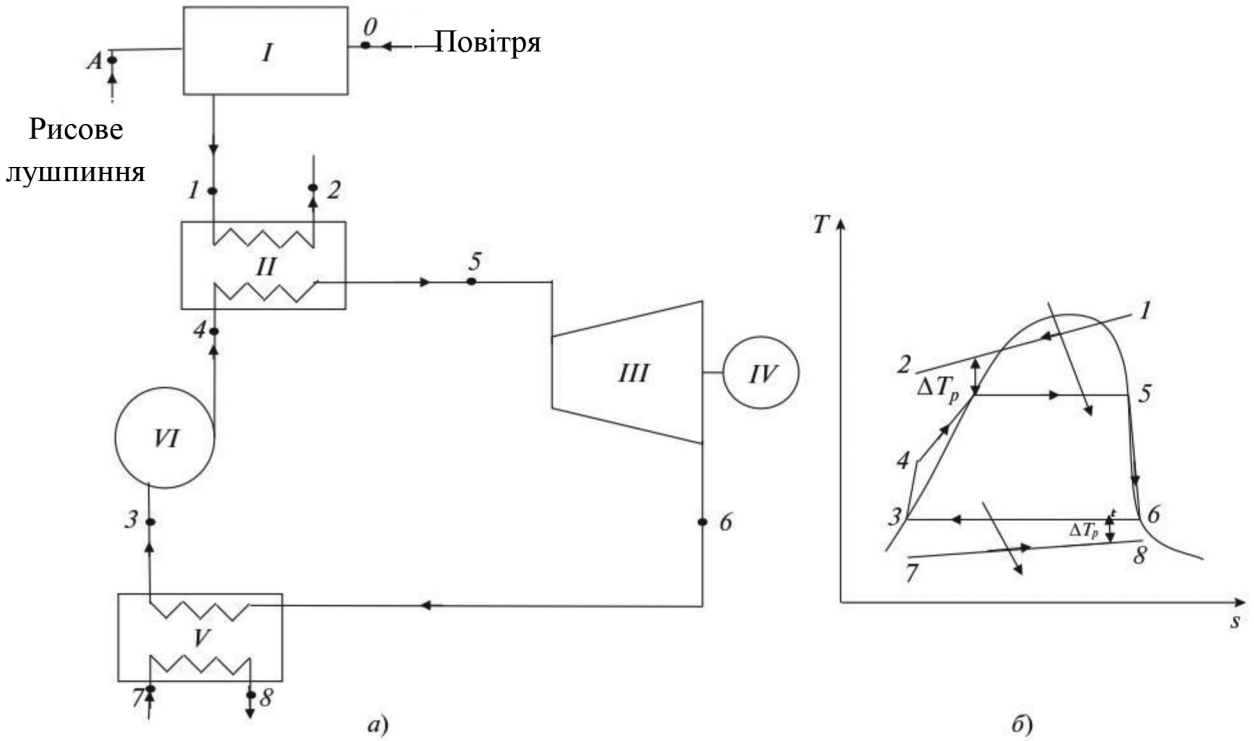


Рис. 1. Технологічна схема енергоустановки для спалювання рисового лушпиння (а) і простий ORC, що реалізується в ній, в T-s – діаграмі (б): I – камера згоряння; II – парогенератор із рекуперацією тепла; III – розширювач (турбіна); IV – електрогенератор; V – конденсатор; VI – насос; ΔT_p – мінімальний температурний напір у парогенераторі та конденсаторі

Рідина високого тиску в стані 4 випаровується до стану 5 в парогенераторі з рекуперацією тепла від димових газів, що утворюються при згорянні рисового лушпиння і охолоджуються від стану 1 до стану 2. Пара з високою ентальпією, що виходить з парогенератора в стані 5, розширюється в турбіні до тиску в конденсаторі у стані 6. Пара, що виходить з турбіни, конденсується в конденсаторі пари до насиченої рідини в стані 3, нагріваючи циркуляційну воду від стану 7 до стану 8. Далі процеси повторюються.

Принципова теплова схема і каскадний ORC, що реалізується в ній, при спалюванні рисового лушпиння представлені на рис. 2.

Цикл установки складається з високо- та низькотемпературних контурів. Робочою речовиною високотемпературного контуру є толуол. У рідкому стані він перекачується з точки 3 в точку 4 насосом, а потім випаровується до стану 5, забираючи тепло від димових газів, що охолоджуються в парогенераторі від стану 1 до стану 2. Далі він розширюється до стану 6 у високотемпературній турбіні, а потім конденсується до стану 3 теплообміннику конденсатор – випарник. У процесі конденсації толуолу тепло відходить робочій речовині низькотемпературного контуру (R245fa), яке, у свою чергу, переходить зі стану 7 у стан 8. Потім випар, що утворився з рідини, розширюється в низькотемпературній турбіні до стану 9 при найнижчому тиску в установці. На виході з турбіни рідина конденсується до стану 10, перш ніж перекачують її назад в точку 7, і цикл завершується. Конденсація R245fa відбувається внаслідок нагрівання циркводи у конденсаторі від стану 11 до стану 12.

Технічне моделювання енергоустановок. Для спрощення аналізу енергоустановок, в яких реалізується як простий, так і каскадний ORC, при розробці їх моделей було зроблено такі основні припущення:

- режим роботи установок стаціонарний;
- для повного згоряння достатньо наявності надлишку повітря 20 %;
- кінетична та потенційна енергії та ексергії потоків зневажливо малі.

Термодинамічний аналіз підпорядковується законам збереження маси та енергії та втрат ексергії. Моделі розроблені відповідно до [4, 14]. Вміст у рисовому лушпинні вуглецю, водню і кисню наводиться в молярних частках [15]. Зважаючи на те, що утворення CO та NO_x у димових газах незначне, схему реакції процесу горіння можна представити у вигляді [16]:

$$C_xH_yO_z + \alpha_a\left[x+\frac{y}{4}-\frac{z}{2}\right]\left(O_2+\frac{79}{21}N_2\right)\rightarrow$$

$$\rightarrow xCO_2+\frac{y}{2}H_2O+$$

$$+\left[x+\frac{y}{4}-\frac{z}{2}\right]\frac{79}{21}\alpha_aN_2+(\alpha_a-1)\left[x+\frac{y}{4}-\frac{z}{2}\right]O_2$$

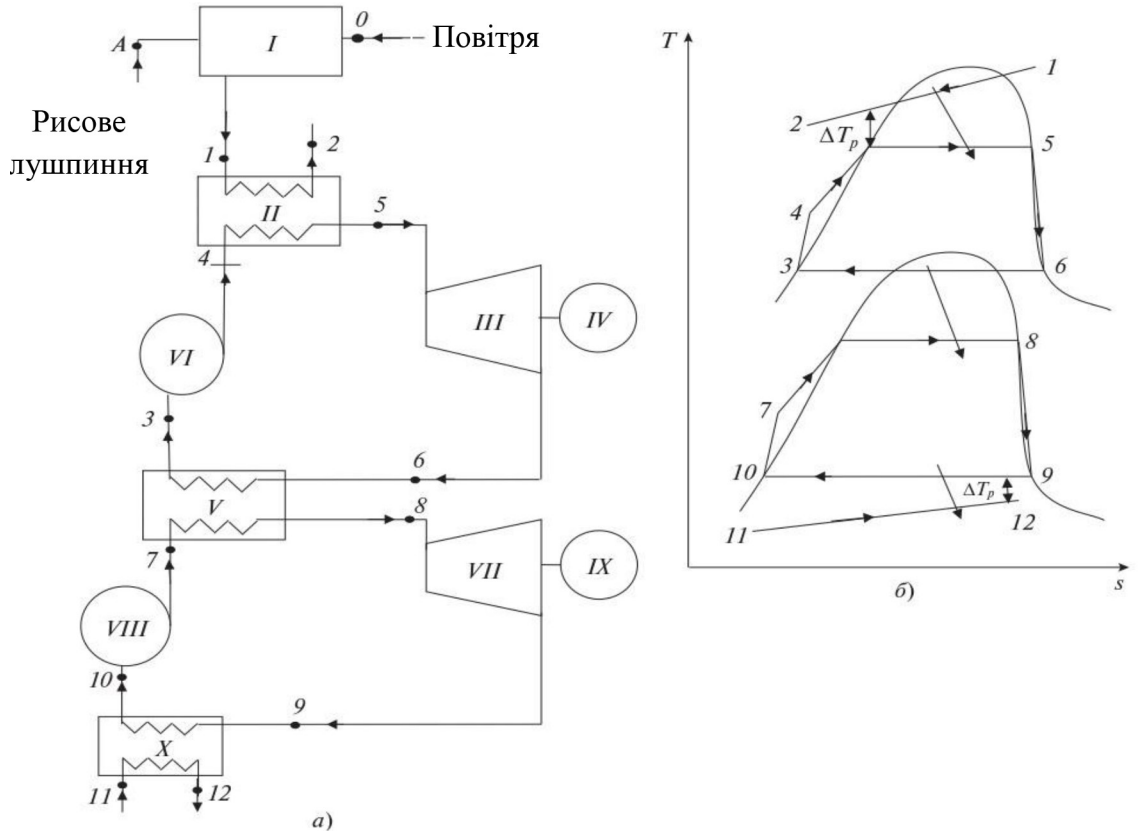


Рис. 2. Технологічна схема енергоустановки для спалювання рисового лушпиння (а) і каскадний ORC, що реалізується в ній, в T-s – діаграмі (б): I – камера згоряння; II – парогенератор із рекуперацією тепла; III, IV та VI – турбіна, електрогенератор та насос високотемпературного контуру; V – конденсатор-випарник; VII, VIII та IX – розширювач (турбіна), насос та електрогенератор низькотемпературного контуру; X – конденсатор; ΔT_p – мінімальний температурний напір у парогенераторі та конденсаторі

де $C_xH_yO_z$ – хімічна формула рисового лушпиння;

x, y та z – числа атомів вуглецю, водню та кисню відповідно, отримані методом [17] та остаточного аналізу, наведеного у [18];

α_a – надлишок повітря.

Температура продуктів згоряння визначається як:

$$T_{ad} = (1-\varphi)\left[T_R + \frac{r'_{f/a} LHV}{(1+r'_{f/a})\overline{c}_{p,g}}\right],$$

де T_R – температура реагенту, К;

$r'_{f/a}$ – коефіцієнт еквівалентності фактичного та стехіометричного співвідношення палива та повітря;

LHV (lower heating value) – нижча теплота згоряння рисового лушпиння, кДж/кг;

$\overline{c}_{p,g}$ – питома теплоємність димових газів, кДж/(кг · К);

φ – коефіцієнт, що враховує дисоціацію продуктів при підвищеній температурі ($\phi \approx 0.15$).

Масова витрата димових газів задається як:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_f \left[(1-\beta) + \frac{1}{r'_{f/a}}\right],$$

де β – частка золи в рисовому лушпинні;

$\dot{m}_f$ – масова витрата рисового лушпиння, кг/с.

Енергетичний аналіз електростанції. Енергетичний аналіз дозволяє оцінити роботу та теплові взаємодії в кожній частині силової установки і, отже, визначити чисте вироблення електроенергії. У той час як у насосі для органічної рідини та в турбіні, робочим тілом у якій є органічна пара, здійснюються робочі взаємодії (здійснення роботи), парогенератор та конденсатор – це пристрої теплової взаємодії. При робочих взаємодіях насосом ORC-установки споживається потужність:

$$\dot{W}_p = \frac{\dot{m}_r (h_e - h_i)}{\eta_p}$$

турбіною виробляється потужність:

$$\dot{W}_{exp} = \dot{m}_r (h_e - h_i)\eta_{exp},$$

тоді як теплова взаємодія характеризується навантаженнями парогенератора з рекуперацією тепла та конденсатора:

$$\dot{Q}_{HRVG} = \dot{m}_r (h_e - h_i); \quad \dot{Q}_{cond} = \dot{m}_r (h_i - h_e),$$

де $\dot{m}_r$ – витрата холодоагенту, кг/с;

h_i, h_e – питома ентальпія холодоагенту на вході та виході частини силової установки відповідно, кДж/кг;

η_p і η_{exp} – ізоентропійний ККД насоса та турбіни відповідно, %.

Ексергетичний аналіз електростанції. Ексергетичний аналіз проводиться для того, щоб визначити напрями підвищення ефективності роботи електростанції на лушпиння рису, оцінивши ступінь незворотності процесів в її елементах. На підставі другого закону термодинаміки для процесу з контрольним об'ємом можна записати рівняння балансу ексергії:

$$\sum\left(1-\frac{T_0}{T_k}\right)\dot{Q}_k-\dot{W}+\sum_i\dot{m}ex_i-\sum_j\dot{m}ex_j-\dot{E}x_d=0,$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, К;

$\dot{Q}_k$ – швидкість передачі тепла на k-й межі контрольного об'єму при температурі T_k, кВт;

$\dot{W}$ – потужність, кВт;

$\dot{m}$ – масова витрата робочого тіла, кг/с;

ex_i, ex_j – питома ексергія потоку на вході та виході, кДж/кг;

$\dot{E}x_d$ – втрати ексергії в межах контрольного об'єму, кВт.

У загальному випадку повна ексергія потоку в контрольному об'ємі:

$$\dot{E}x=\dot{E}x_{kin}+\dot{E}x_p+\dot{E}x_{ph}+\dot{E}x_{ch},$$

де $\dot{E}x_{kin}$, $\dot{E}x_p$, $\dot{E}x_{ph}$, $\dot{E}x_{ch}$ – кінетична, потенційна, фізична та хімічна ексергія, кВт, відповідно. Але кінетична та потенційна ексергії прийняті зневажливо малими. Тоді:

$$\dot{E}x_{ph}=\dot{m}_l\left[\left(h_l-h_0\right)-T_0\left(s_l-s_0\right)\right],$$

$$\dot{E}x_{ch,f}=\dot{m}_f ex_{ch,f},$$

де $\dot{m}_l$ – масова витрата робочої рідини, кг/с;

h_l, s_l, – питомі ентальпія, кДж/кг, та ентропія, кДж/(кг · К), у стані l;

$\dot{m}_f$, $ex_{ch,f}$ – масова витрата, кг/с, та питома хімічна ексергія палива (рисового лушпиння), кДж/кг, відповідно.

Формула визначення питомої хімічної ексергії біомаси,з роботи [19]:

$$ex_{ch,f}=1812.5+295.606\text{C}+587.354\text{H}+$$

$$+17.506\text{O}+17.735\text{N}+96.615\text{S}-31.8\text{A}$$

де C, H, O, N, S та A – масовий вміст у паливі вуглецю, водню, кисню, азоту, сірки та золи відповідно, %.

Економічна модель. Аналіз проводиться з метою визначити параметри установки, необхідні її економічної життєздатності. До таких параметрів належать: вартість життєвого циклу (life cycle cost – LCC), дол. США; річна вартість життєвого циклу (annualized life cycle cost – ALCC), дол/рік; питома вартість енергії (unit cost of energy – UCOE), дол/(кВт · год), і точка беззбитковості (break-even point – BEP), роки [20]:

$$LCC=Z_{EC}+\sum Z_{eq},$$

де Z_{EC} – витрати на проектування та непередбачені витрати, дол.;

Z_{eq} – вартість обладнання, дол.;

eq = *comb*, *eva*, *exp*, *cond*, *p* для камери згоряння, випарника, турбіни, конденсатора та насоса ORC-контуру відповідно.

Детальні рівняння для визначення витрат на компоненти установки наведені в [11]. Тим не менш, загальні питомі витрати на спалювання біомаси, дол/(кВт · год), на ORC-електростанції оцінюються за формулою:

$$Z_{ORC}=\sum_{y=1}^{2}36\,390\left(1+\omega\right)\left(W_{\exp,y}\right)^{-0.244},$$

де y – порядковий номер контуру установки (1 – високотемпературний, 2 – низькотемпературний);

$W_{exp,y}$ – потужність турбіни, кВт;

ω – коефіцієнт, що враховує тариф на імпорт,конкретного населеного пункту.

Річна вартість життєвого циклу розраховується як

$$ALCC=F(i,n)LCC,$$

де $F\left(i,n\right)=\dfrac{i\left(1+i\right)^n}{\left(1+i\right)^n-1}$ – коефіцієнт відшкодування капіталу;

i – відсоткова ставка, %;

n – кількість років.

Питома вартість енергії визначається за виразом

$$UCOE=\frac{ALCC}{365\times24\dot{W}_{net}},$$

а точка беззбитковості

$$BEP=\frac{LCC}{\tau_{op}\dot{W}_{net}UCOE_{MC}},$$

де τ_{op} – кількість годин роботи установки;

$\dot{W}_{net}$ – корисна потужність електростанції, кВт;

$UCOE_{MC}$ – питома вартість електроенергії в муніципальній мережі, дол/(кВт · год).

Моделювання ключових параметрів. Було проведено дослідження впливу на продуктивність простого і каскадного ORC таких важливих факторів, як маса рисового лушпиння, що утворюється за рік, температура відхідних газів на гирлі димової труби, співвідношення температур навколишнього середовища і димових газів і тарифи на імпорт.

На рис. 3 показано вплив маси щорічно отриманого рисового лушпиння на потужність нетто $\dot{W}_{net}$ уста-

новок, що працюють по простому і каскадному ORC. Як і очікувалося, сумарна потужність і тих, і інших підвищується зі збільшенням маси лушпиння рису. Це означає, що при збільшенні врожайності рису, що є наслідком зацікавленості уряду у прирості виробництва сільськогосподарської продукції, буде отримано більше рисового лушпиння для вироблення електроенергії.

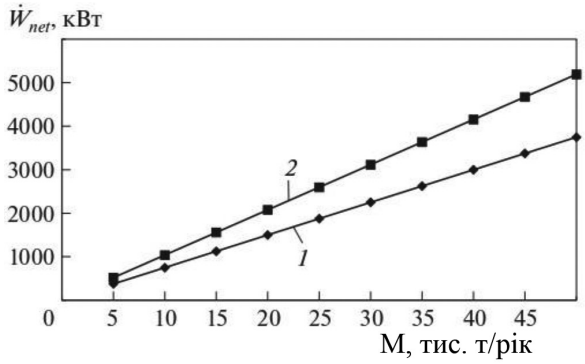


Рис. 3. Залежність корисної потужності $\dot{W}_{net}$ електростанцій, що працюють за простим (1) і каскадним (2) ORC, від маси рисового лушпиння M, яке виробляється щорічно

Вплив температури на гирлі димової труби (у точці 2 на рис. 1, 2) на корисну потужність $\dot{W}_{net}$, енергоефективність η_t та ексергетичний ККД η_{ex} простих та каскадних ORC-установок показано на рис. 4. Нижня межа діапазону температури газів на виході з димової труби для простого ORC встановлена на рівні 310 °C, оскільки температура кипіння робочої рідини в парогенераторі задана 307 °C. З результатів, поданих на рис. 4, випливає, що висока температура димових газів негативно позначається на сумарній енергетичній та ексергетичній ефективності установки. Отже, її робота повинна здійснюватися таким чином, щоб

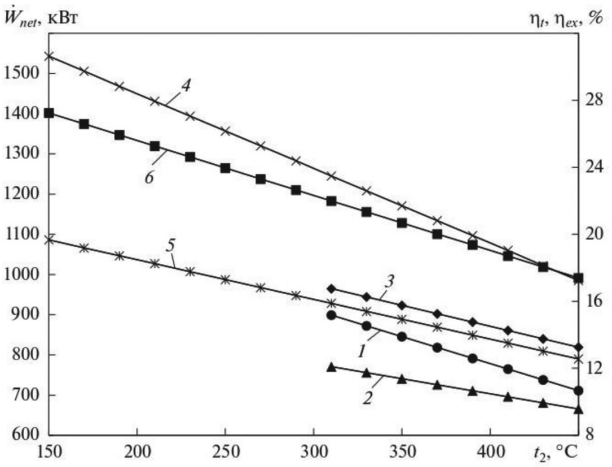


Рис. 4. Вплив температури газів на виході з димової труби t_2 на енергетичні характеристики електростанції: корисну потужність (1), термодинамічний (2) та ексергетичний (3) ККД простого ORC; корисну потужність (4), термодинамічний (5) та ексергетичний (6) ККД каскадного ORC

було забезпечено мінімальну температуру димових газів. У [21] було висловлено припущення, що такий підхід може дати додаткові переваги в захисту навколишнього середовища.

Рисунок 5 ілюструє, як змінюються ексергетичний ККД η_{ex} та UCOE залежно від співвідношення температур навколишнього середовища T_0 та димових газів на виході з димової труби T_2. Можна відзначити, що корисна ексергія зростає зі збільшенням відношення температури навколишнього середовища до температури димових газів.

Цей ефект можна пояснити найкращим використанням енергії при наближенні температури відпрацьованих газів до температури навколишнього середовища. У той же час, спостерігається зворотний ефект для UCOE. Бажано мати якомога нижчий UCOE,

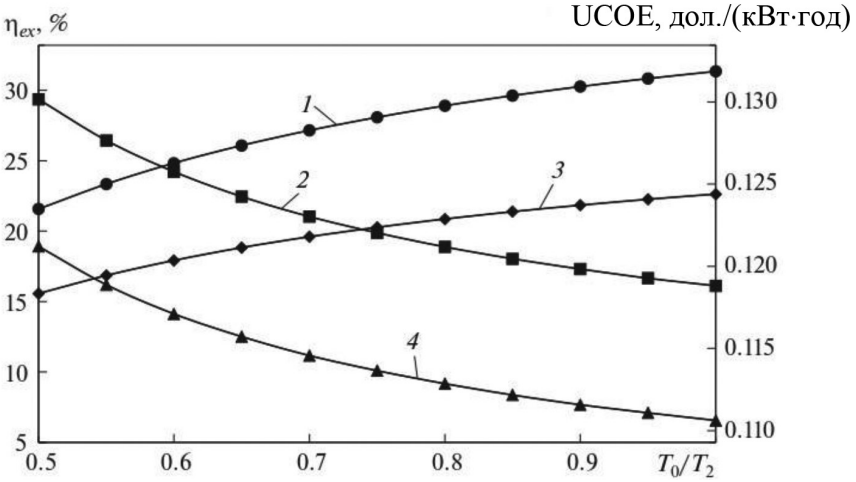


Рис. 5. Вплив співвідношення температур навколишнього середовища та димових газів T_0/T_2 на ексергетичну ефективність (1, 3) та питому вартість енергії (2, 4) для каскадної (1, 2) та простої (3, 4) ORC-установки

проте наближення температури газів до температури навколишнього середовища небажано, оскільки це сприяє утворенню вуглекислоти [22].

На рис. 6 показано вплив тарифів імпорту на питому вартість енергії.

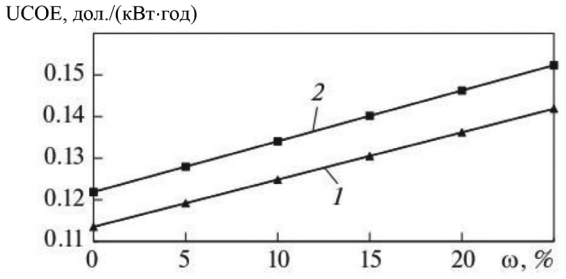


Рис. 6. Зміна питомої вартості енергії UCOE в залежності від тарифу на імпорт для простої (1) та каскадної (2) ORC-установки

При високих митних тарифах збільшується питома вартість енергії обох варіантів циклу, при цьому очікуються більш вищі значення UCOE для каскадного ORC. Таким чином, щоб зробити таку електростанцію привабливою та конкурентоспроможною, дуже важливо правильно оцінити прийнятні митні збори.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз запропонованих моделей був виконаний під час використання наступних вихідних даних:

Температура робочої речовини, К:
- у випарнику високотемпературного контуру T_5 — 580
- проміжна T_3 — 363
- в конденсаторі низькотемпературного контуру T_{10} — 308

Масова витрата палива (рисового лушпиння) $\dot{m}_f$, кг/с — 0.57
Надлишок повітря α_a, % — 20
ККД турбіни η_{exp}, % — 90
ККД насоса η_p, % — 90
Коефіцієнт, що враховує тариф на імпорт ω — 0.05
Коефіцієнт дисоціації димових газів φ — 0.15
Частка золи в паливі β — 0.14
Річна кількість годин роботи установки τ_{op}, год — 7500
Процентна ставка i — 0.12
Життєвий цикл установки n_{yrs}, років — 20
Температура довкілля T_0, К — 298
Атмосферний тиск p_0, кПа — 101.325
Робоче тіло контуру:
- Високотемпературного — Толуол
- Низькотемпературного — R245fa

Крім того, встановлено, що для роботи каскадної ORC-установки необхідно, щоб співвідношення витрати толуолу у високотемпературному контурі і R245fa низькотемпературному становило приблизно 0.25.

У табл. 1 наведені термодинамічні характеристики енергоустановки, що працює за простим і каскадним ORC. Ефективність простого ORC аналогічна отриманій у [23]. Результати розрахунку показують, що технічні характеристики каскадної ORC-установки краще ніж простої. Встановлено, що при енергогенерації 1.15–1.60 МВт та роботі 7500 год на рік такі електростанції здатні задовольнити добову потребу в електроенергії рисового млина та селища, що знаходиться по сусідству, у розмірі 27–38 МВт · год.

Таблиця 1. Технічні характеристики простого та каскадного ORC

Показник	Органічний цикл Ренкіна	
	простий	каскадний
Корисна потужність $\dot{W}_{net}$, МВт	1.154	1.599
ККД термодинамічний η_t, %	15.53	21.51
ККД ексергетичний η_{ex}, %	20.38	28.23

В результаті економічного аналізу (табл. 2) було отримано, що вартість життєвого циклу простого та каскадного ORC становитиме 5.54 та 8.24 млн дол. США відповідно, а їх точка беззбитковості – 7.11 та 7.47 року відповідно. На відміну від технічних характеристик, згідно з якими каскадний ORC є кращим, економічні показники свідчать про зворотне. Питома вартість електроенергії простого ORC становить 0.115 дол/(кВт · год), що нижче, ніж у каскадного ORC, на 0.009 дол/(кВт · год). При цьому, що важливо, питома вартість електроенергії, виробленої установками на основі як простого, так і каскадного ORC, нижча, ніж середній тариф на електроенергію в муніципальній мережі [0.13 дол/(кВт · год)], не кажучи вже про вартість експлуатації бензинових та дизельних генераторів складає 0.3–0.6 дол/(кВт · год) [24].

Таблиця 2. Економічні характеристики простих та каскадних електроустановок на основі ORC

Показник	Органічний цикл Ренкіна	
	простий	каскадний
Вартість життєвого циклу LCC, млн. дол. США	5.54	8.24
Річна вартість життєвого циклу ALCC, млн дол/рік	0.743	1.104
Питома вартість енергії UCOE, дол/(кВт · год)	0.115	0.124
Точка беззбитковості BEP, років	7.11	7.47

До того ж, якщо виходити з поточної тенденції та майбутнього розвитку енергетичного сектора, економічні показники можуть бути не найкращим засобом для оцінки систем вироблення електроенергії. Найбільш результативним, найімовірніше, є комплексне дослідження технічних, економічних, соціальних та екологічних показників [20]. Якщо вірно останнє, то,

розглядаючи екологічні та соціальні витрати в перспективі, можна відзначити, що загальні економічні показники каскадного ORC, швидше за все, будуть кращими, ніж простого, за винятком єдиної переваги останнього – технічних характеристик, розглянутих раніше. Однак це може стати темою майбутніх досліджень.

ВИСНОВКИ

На підставі аналізу отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1. Слабо електрифіковані країни не здатні повністю забезпечувати потреби промислових підприємств в електроенергії, що зумовлює використання дизель-генераторних установок із високими експлуатаційними витратами та значним негативним впливом на довкілля. Одним із прикладів є рисопереробні підприємства Нігерії.

2. Рисове лушпиння, яке утворюється у значних обсягах під час переробки рису, є перспективним відновлюваним паливом для виробництва електроенергії, що дає змогу вирішити проблему утилізації відходів і забезпечити енергопостачання підприємств та прилеглих територій.

3. На типовій рисовій фабриці Нігерії щорічно утворюється 15,39 тис. т рисового лушпиння. Використання простого ORC з толуолом забезпечує виробництво 1154 кВт електроенергії за енергетичного та ексергетичного ККД 15,5 % і 20,4 % відповідно. Застосування каскадного ORC підвищує електричну потужність до 1600 кВт, а ККД – до 21,5 % і 28,2 % відповідно, що дозволяє покривати добові потреби рисової фабрики та прилеглого району на рівні 27 і 38 МВт · год відповідно.

4. Хоча вартість каскадної ORC-установки (8,25 млн дол. США) перевищує вартість простої (5,54 млн дол. США), вона забезпечує вищу корисну потужність і за сукупністю технічних, економічних, соціальних та екологічних показників є більш перспективною для розподіленої енергетики.

5. Отримані результати можуть бути використані при розробленні стратегій розвитку об'єктів розподіленої енергетики на основі відновлюваних джерел енергії в Нігерії та інших країнах із низьким рівнем електрифікації.

REFERENCES

[1] Owebor, K., Diemuodeke, E. O., Briggs, T. A., & Imran, M. (2021). Power situation and renewable energy potentials in Nigeria: A case for integrated multi-generation technology. *Renewable Energy*, 177, 773–796. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.017

[2] World Bank. (2022). Access to electricity (% of population). World Bank Open Data. https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=NG

[3] Ajieh, M. U., Owebor, K., Edomwonyi-Otu, L. C., & Okafor, I. F. (2021). Integration of perennial grass into energy mix as alternative to fuelwood in selected Niger Delta communities, Nigeria. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 4149–4160. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01570-2

[4] Diemuodeke, O. E., Mulugetta, Y., & Imran, M. (2021). Technoeconomic and environmental feasibility analysis of rice husks fired energy system for application in a cluster of rice mills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111365. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111365

[5] Memon, T. A., Harijan, K., Soomro, M. I., Meghwar, S., Valasai, G. D., & Khoharo, H. (2017). Potentials of electricity generation from rice husk – a case study of rice mill. *Sindh University Research Journal*, 49(3), 495–498. https://doi.org/10.26692/surj/2017.09.05

[6] Mujeebu, M. A., Abdullah, M. Z., & Sas, A. (2011). Husk-fueled steam turbine cogeneration for a rice mill with power export – A case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(8), 724–734. https://doi.org/10.1080/15567030903226298

[7] Kapustianskyi, A., Romanova, K., Galyanchuk, I., & Yurasova, O. (2026). Revealing the influence of age and fractional composition of woody biomass on the kinetic characteristics of thermal decomposition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8(139)), 67–78. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352509

[8] Mohiuddin, O., Mohiuddin, A., Obaidullah, M., Ahmed, H., & Sarkodie, S. A. (2016). Electricity production potential and social benefits from rice husk, a case study in Pakistan. *Cogent Engineering*, 15(1), 1177156. https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1177156

[9] Tomarov, G. V., & Shipkov, A. A. (2017). Modern geothermal power: Binary cycle geothermal power plants. *Thermal Engineering*, 64(4), 243–250. https://doi.org/10.1134/S0040601517040097

[10] Tomarov, G. V., Shipkov, A. A., Sorokina, E. V., & Ban, M. (2015). Improving geothermal power plants with a binary cycle. *Thermal Engineering*, 62(12), 878–885. https://doi.org/10.1134/S0040601515120101

[11] Owebor, K., Oko, C. O. C., Diemuodeke, E. O., & Ogorure, O. J. (2019). Thermo-environmental and economic analysis of an integrated municipal waste-to-energy solid oxide fuel cell, gas-, steam-, organic fluid- and absorption refrigeration cycle thermal power plants. *Applied Energy*, 239, 1385–1401. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.032

[12] Tomarov, G. V., & Shipkov, A. A. (2022). Multistage geothermal ORC power units: Utilization of high temperature (180 °C) geothermal fluid. *Thermal Engineering*, 69(4), 259–266. https://doi.org/10.1134/S0040601522030107

[13] Kong, R., Deethayat, T., Asanakhan, A., Vorayos, N., & Kiatsiriroat, T. (2019). Thermodynamic performance of a R245fa organic Rankine cycle (ORC) with different kinds of heat sources at evaporator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100385. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100385

[14] Kravets, T., Galyanchuk, I., Yurasova, O., Kapustianskyi, A., & Romanova, K. (2022). The heat-transfer system modelling of the convective heating surfaces of a TP-92 steam boiler. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 25(3), 5–20. https://doi.org/10.33223/epj/152899

[15] Kravets, T., Galyanchuk, I., Yurasova, O., Kapustianskyi, A., & Romanova, K. (2025). Technological and engineering aspects of the development of biogas and biomethane plants in Ukraine: Prospects for integration into the country's energy system. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 8(1), 801–827. https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080134

[16] Roman, M., Bobasu, E., & Selisteanu, D. (2011). Modelling of biomass combustion process. *Energy Procedia*, 6, 432–440. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.050

[17] Chandrappa, R., & Das, D. B. (2012). Waste quantities and characteristics waste. In *Solid waste management* (pp. 47–63). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-2868-0_2

[18] Andrew, N. E., & Gbabo, A. (2015). The physical, proximate and ultimate analysis of rice husk briquettes produced from a vibratoryblock mold briquetting machine. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(5), 818–820.

[19] Jack, T. A., & Oko, C. O. C. (2017). Exergy and exergoeconomic analysis of a municipal waste-to-energy steam reheat power plant for Port Harcourt city. *International Journal of Ambient Energy*, 39(4), 352–359. https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1305447

[20] Owebor, K., Diemuodeke, E. O., & Briggs, T. A. (2022). Thermoeconomic and environmental analysis of integrated power plant with carbon capture and storage technology. *Energy*, 240, 122748. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122748

[21] Owebor, K., Diemuodeke, O. E., Briggs, T. A., Eyenubo, O. J., Ogorure, O. J., & Ukoba, M. O. (2022). Multi-criteria optimisation of integrated power systems for low-environmental impact. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 3459–3476. https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2064565

[22] Mamaghani, A. H., Najafi, B., Shirazi, A., & Rinaldi, F. (2015). 4E analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) and ORC (organic Rankine cycle) system. *Energy*, 82, 650–663. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.074

[23] Ogorure, O. J., Oko, C. O. C., Diemuodeke, E. O., & Owebor, K. (2018). Energy, exergy, environmental and economic analysis of an agricultural waste-to-energy integrated multigeneration thermal power plant. *Energy Conversion and Management*, 171(6), 222–240. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.093

[24] Roche, M. Y., Ude, N., & Donald-Ofoegbu, I. (2017). *Comparison of costs of electricity generation in Nigeria*. The Nigerian Economic Summit Group and Heinrich Boll-Stiftung Nigeria, pp. 20–34.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Owebor, K., Diemuodeke, E. O., Briggs, T. A., & Imran, M. (2021). Power situation and renewable energy potentials in Nigeria: A case for integrated multi-generation technology. *Renewable Energy*, 177, 773–796. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.017

[2] World Bank. (2022). Access to electricity (% of population). World Bank Open Data. https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=NG

[3] Ajieh, M. U., Owebor, K., Edomwonyi-Otu, L. C., & Okafor, I. F. (2021). Integration of perennial grass into energy mix as alternative to fuelwood in selected Niger Delta communities, Nigeria. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 4149–4160. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01570-2

[4] Diemuodeke, O. E., Mulugetta, Y., & Imran, M. (2021). Technoeconomic and environmental feasibility analysis of rice husks fired energy system for application in a cluster of rice mills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111365. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111365

[5] Memon, T. A., Harijan, K., Soomro, M. I., Meghwar, S., Valasai, G. D., & Khoharo, H. (2017). Potentials of electricity generation from rice husk – a case study of rice mill. *Sindh University Research Journal*, 49(3), 495–498. https://doi.org/10.26692/surj/2017.09.05

[6] Mujeebu, M. A., Abdullah, M. Z., & Sas, A. (2011). Husk-fueled steam turbine cogeneration for a rice mill with power export – A case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(8), 724–734. https://doi.org/10.1080/15567030903226298

[7] Kapustianskyi, A., Romanova, K., Galyanchuk, I., & Yurasova, O. (2026). Revealing the influence of age and fractional composition of woody biomass on the kinetic characteristics of thermal decomposition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8(139)), 67–78. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352509

[8] Mohiuddin, O., Mohiuddin, A., Obaidullah, M., Ahmed, H., & Sarkodie, S. A. (2016). Electricity production potential and social benefits from rice husk, a case study in Pakistan. *Cogent Engineering*, 15(1), 1177156. https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1177156

[9] Tomarov, G. V., & Shipkov, A. A. (2017). Modern geothermal power: Binary cycle geothermal power plants. *Thermal Engineering*, 64(4), 243–250. https://doi.org/10.1134/S0040601517040097

[10] Tomarov, G. V., Shipkov, A. A., Sorokina, E. V., & Ban, M. (2015). Improving geothermal power plants with a binary cycle. *Thermal Engineering*, 62(12), 878–885. https://doi.org/10.1134/S0040601515120101

[11] Owebor, K., Oko, C. O. C., Diemuodeke, E. O., & Ogorure, O. J. (2019). Thermo-environmental and economic analysis of an integrated municipal waste-to-energy solid oxide fuel cell, gas-, steam-, organic fluid- and absorption refrigeration cycle thermal power plants. *Applied Energy*, 239, 1385–1401. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.032

[12] Tomarov, G. V., & Shipkov, A. A. (2022). Multistage geothermal ORC power units: Utilization of high temperature (180 °C) geothermal fluid. *Thermal Engineering*, 69(4), 259–266. https://doi.org/10.1134/S0040601522030107

[13] Kong, R., Deethayat, T., Asanakhan, A., Vorayos, N., & Kiatsiriroat, T. (2019). Thermodynamic performance of a R245fa organic Rankine cycle (ORC) with different kinds of heat sources at evaporator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100385. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100385

[14] Kravets, T., Galyanchuk, I., Yurasova, O., Kapustianskyi, A., & Romanova, K. (2022). The heat-transfer system modelling of the convective heating surfaces of a TP-92 steam boiler. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 25(3), 5–20. https://doi.org/10.33223/epj/152899

[15] Kravets, T., Galyanchuk, I., Yurasova, O., Kapustianskyi, A., & Romanova, K. (2025). Technological and engineering aspects of the development of biogas and biomethane plants in Ukraine: Prospects for integration into the country's energy system. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 8(1), 801–827. https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080134

[16] Roman, M., Bobasu, E., & Selisteanu, D. (2011). Modelling of biomass combustion process. *Energy Procedia*, 6, 432–440. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.050

[17] Chandrappa, R., & Das, D. B. (2012). Waste quantities and characteristics waste. In *Solid waste management* (pp. 47–63). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-2868-0_2

[18] Andrew, N. E., & Gbabo, A. (2015). The physical, proximate and ultimate analysis of rice husk briquettes produced from a vibratoryblock mold briquetting machine. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(5), 818–820.

[19] Jack, T. A., & Oko, C. O. C. (2017). Exergy and exergoeconomic analysis of a municipal waste-to-energy steam reheat power plant for Port Harcourt city. *International Journal of Ambient Energy*, 39(4), 352–359. https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1305447

[20] Owebor, K., Diemuodeke, E. O., & Briggs, T. A. (2022). Thermoeconomic and environmental analysis of integrated power plant with carbon capture and storage technology. *Energy*, 240, 122748. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122748

[21] Owebor, K., Diemuodeke, O. E., Briggs, T. A., Eyenubo, O. J., Ogorure, O. J., & Ukoba, M. O. (2022). Multi-criteria optimisation of integrated power systems for low-environmental impact. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 3459–3476. https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2064565

[22] Mamaghani, A. H., Najafi, B., Shirazi, A., & Rinaldi, F. (2015). 4E analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) and ORC (organic Rankine cycle) system. *Energy*, 82, 650–663. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.074

[23] Ogorure, O. J., Oko, C. O. C., Diemuodeke, E. O., & Owebor, K. (2018). Energy, exergy, environmental and economic analysis of an agricultural waste-to-energy integrated multigeneration thermal power plant. *Energy Conversion and Management*, 171(6), 222–240. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.093

[24] Roche, M. Y., Ude, N., & Donald-Ofoegbu, I. (2017). *Comparison of costs of electricity generation in Nigeria*. The Nigerian Economic Summit Group and Heinrich Boll-Stiftung Nigeria, pp. 20–34.

© Капустянський А. О., Галянчук І. Р., Юрасова О. Г., Заяць М. Ф., Романова К. О.
Дата першого надходження статті до видання: 12.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)