

DOI: 10.20535/kpissn.2025.1.321969

УДК 621.175.845, 621.184.4

Є.В. Новаківський¹, А.В. Неділько^{1*}¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: andreynedilko1@gmail.com

МЕТОД ВИБОРУ РОБОЧОГО ТІЛА ДЛЯ ОРС-ЦИКЛІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Проблематика. Актуальність вибору оптимального робочого тіла для конденсаційних теплообмінників, що працюють на основі органічного циклу Ренкіна (Organic Rankine Cycle (ORC)) на газових енергетичних і водогрійних котлах з утилізацією теплоти відхідних газів, пов'язана зі зростаючою потребою в енергоефективних технологіях та необхідністю забезпечити максимальну ефективність систем генерації за мінімальних витрат. Отже, на часі дослідження властивостей різних робочих речовин та специфіки їх оптимального використання з урахуванням умов роботи конкретного обладнання.

Мета дослідження. Обґрунтування вибору робочого тіла для системи утилізації тепла з конденсаційним теплообмінником і турбіною, яка працює на ОРС на основі енергетичного котла Е-480-560-140 ГМ.

Методика реалізації. Науковий підхід у цьому дослідженні ґрунтується на порівняльному методі. Цей підхід передбачає порівняння різних варіантів органічних робочих тіл за допомогою огляду наукових джерел і моделюванні їх роботи для наявних умов. Під час огляду літератури аналізувалися підходи, що вже застосовувалися в інших дослідженнях і на практиці. Моделювання роботи робочих тіл дозволило оцінити їх ефективність і придатність для конкретної системи з урахуванням її параметрів та обмежень.

Результати дослідження. Подано перелік ефективних органічних тіл на основі огляду літератури та результатів техніко-економічного і математичного аналізу. Алгоритм вибору робочого тіла ґрунтується на отриманих результатах дослідження і враховує критерії енергетичної ефективності, сумісності з параметрами системи, стійкості до корозії і зношування, а також доступності та вартості робочих речовин. З урахуванням цих критеріїв і висновків дослідження придатними для заданої системи є такі робочі тіла: R717, R245FA, R123, R141B.

Висновки. Для умов заданого проекту аміак (R717) є найбільш оптимальним робочим тілом. Таке рішення може бути застосовано до аналогічних умов проектів з утилізації теплоти димових газів продуктів згорання природного газу за допомогою ОРС-циклів.

Ключові слова: конденсаційний економайзер; органічне робоче тіло; турбіна на органічному циклі Ренкіна; котел; температура; тиск; теплота пароутворення; витрата; ОРС.

Вступ

Робоче тіло в ОРС має важливу функцію передавання теплоти і перетворення її в роботу. Використання органічних рідин або газів як робочого тіла дозволяє збільшити ефективність системи утилізації теплоти й отримати додаткову роботу із джерел, які іншим чином були б невикористаними. Таким чином, робоче тіло є ключовим компонентом ОРС у системах утилізації теплоти, що впливає на ефективність циклу та конструктивні особливості обладнання.

Аналіз вибору робочого тіла проведено для умов роботи конденсаційного теплообмін-

ника, який утилізує теплоту димових газів від енергетичного котла на прикладі котлоагрегату Е-480-560-140 ГМ, що працює на природному газі в діапазоні навантаження від 240 до 480 т/г. Теплота, що відбирається від димових газів, передається робочому тілу, яке перетворюється на пару і надходить на турбіну. Турбіна, що працює за ОРС, виробляє додаткову електроенергію.

На відміну від традиційних циклів Ренкіна (паротурбінні енергетичні цикли), які використовують як робоче тіло воду, ОРС використовують інші неорганічні та органічні рідини.

Пропозиція для цитування цієї статті: Є.В. Новаківський, А.В. Неділько, “Метод вибору робочого тіла для ОРС циклів утилізації теплоти димових газів”, *Наукові вісті КПІ*, № 1, с. 56–62, 2025. doi: 10.20535/kpissn.2025.1.321969

Offer a citation for this article: Ye.V. Novakivskiy, A.V. Nediiko, “Method of selecting the working body for ORC cycles of flue gas heat recovery”, *KPI Science News*, no. 1, pp. 56–62, 2025. doi: 10.20535/kpissn.2025.1.321969

Постановка задачі

Вибір робочого тіла для конденсаційного економайзера у системі з ORC-турбіною залежить від низки факторів з такими характеристиками:

- параметри димових газів котла – склад і температура димових газів впливають на вибір робочого тіла та ефективність системи;

- погодні умови регіону – температура навколишнього середовища, де розміщено установку, впливає на вибір робочого тіла та ефективність всієї установки;

- доступність і вартість робочого тіла – впливають на економічні показники роботи всієї установки;

- геометричні характеристики обладнання – геометричні обмеження конденсаційного економайзера і теплообмінної площі впливають на вибір робочого тіла та ефективність теплообміну;

- екологічні обмеження – впливають на навколишнє середовище і на обслуговуючий персонал, а також на вибір робочого тіла.

Температурний діапазон робочого тіла обмежується температурою димових газів на виході з котла і температурою навколишнього середовища. Температура димових газів визначає максимальну температуру й тиск кипіння робочого тіла у випарнику, який виконує функцію утилізатора теплоти. Температура охолодження робочого тіла визначається температурою навколишнього повітря або охолоджувальної води.

Методи дослідження

Під час вибору оптимального робочого тіла застосувалося математичне моделювання ORC-циклів та їх техніко-економічний аналіз за заданих параметрів верхнього і нижнього джерел теплоти. Також застосовувався технічний аналіз теплофізичних властивостей робочих тіл на придатність використання за заданих параметрів [1].

Результати технічного аналізу

Під час вибору робочого тіла для конкретного застосування ORC треба враховувати теплофізичні параметри робочого тіла (тиск, температура, прихована теплота пароутворення, температура спалаху, питома теплоємність, теплопровідність), а також аспекти безпеки, вартості, доступності, токсичності, хімічної стабільності за високих

температур і тривалого використання, а також впливу на навколишнє середовище. Критична температура і тиск проміжного теплоносія також мають бути враховані щодо температури джерела тепла. Максимальний тиск і температура у циклі мають бути принаймні на 10 °С нижчими за критичні значення робочого тіла.

Крім того, під час вибору робочого тіла слід враховувати фактори впливу на навколишнє середовище – потенціал руйнування озонного шару (ODP) і потенціал глобального потепління (GWP) [2].

Робочі тіла, використовувані у системах ORC, можна поділити на три основні категорії: сухі, вологі та ізентропічні залежно від їх поведінки під час адіабатичного розширення. Критерій вологості (або сухості) робочого тіла вимірюють величиною, яку визначають як [2]

$$\xi = ds/dT. \quad (1)$$

Таким чином, значення $\xi > 0$ вказує на суху рідину, $\xi \approx 0$ – на ізентропічну рідину, а $\xi < 0$ – на вологу рідину [3].

Сухі рідини – це рідини, в яких всі зміни стану відбуваються без зміни фазового переходу за певних умов циклу (рис. 1). Для виконання дослідження автори використовували програмний комплекс Coolpack [4], який дозволяє відобразити потрібні діаграми для визначених робочих тіл.

Вологі рідини – це рідини, які містять пару і можуть взаємодіяти з додатковими кількостями водяної пари або інших летких компонентів під час випаровування, конденсації або нагрівання. Вологі рідини можуть мати кілька станів пароутворення або конденсації у перебігу циклу (рис. 2) [4].

Ізентропічні рідини – це рідини, для яких процеси у компресорі або турбіні вважають ізентропічними. Це означає, що ентропія залишається константною, і можна розглядати ці процеси у тепловій машині як ідеальне робоче тіло [2] (рис. 3) [4].

Ізентропічні й сухі рідини широко розглядають як найкращі для застосування у субкритичних ORC переважно з метою уникнення утворення крапель рідини. Якщо крива насиченої пари сухої рідини всередині турбіни різко відхиляється, пара може надмірно виходити з турбіни із значним ступенем перегріву, що може викликати зайве збільшення навантаження на охолодження конденсатора. Утім, можна зазначити, що перегріту пару, що виходить із турбіни, можна

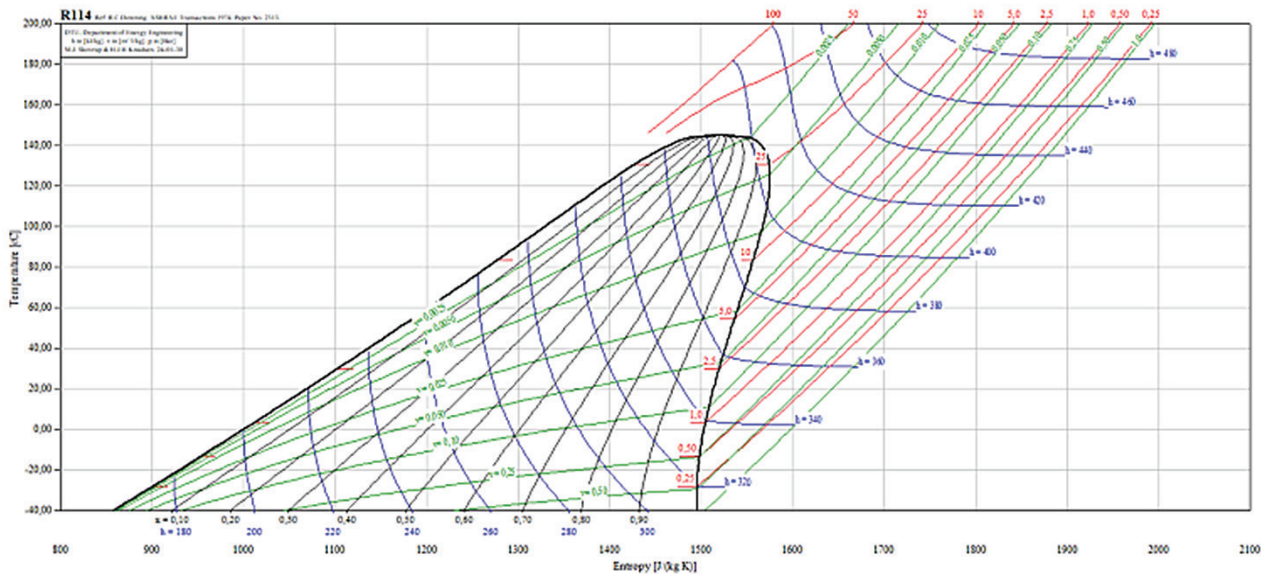


Рис. 1. TS-діаграма сухої рідини (R114)

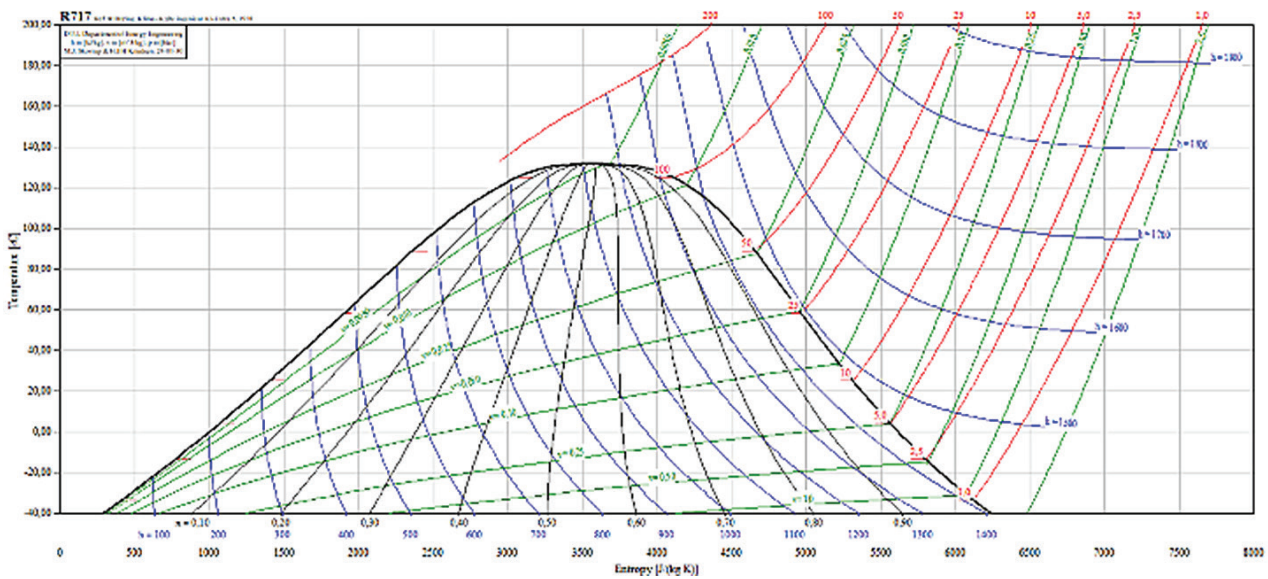


Рис. 2. TS-діаграма вологій рідині (R717)

ефективно використовувати, забезпечивши регенерацію між живильним насосом і котлом/випарником – це покращить ефективність системи за рахунок оптимального використання тепла у процесі конденсації димових газів. Оскільки описувана система [1] працює за рахунок фазового переходу рідин, для аналізу використаємо лише вологі рідини, а сухі рідини додамо для порівняння.

Вологі рідини вимагають додаткового перегріву через виникнення водневого зв'язку в молекулах деяких органічних робочих рідин, таких

як вода, аміак та етанол – це вважають потенційною причиною вологоутворення у деяких рідинах через більшу ентальпію пароутворення.

Під час дослідження продуктивності систем ORC було проведено аналіз використання робочих тіл, а саме R-134a, R-245fa, бензолу, метанолу, етанолу, ацетону, пропану (R-290) та аміаку [2]. Ці робочі тіла є найбільш поширеними з-поміж тих, що відповідають критеріям для котла E-480-560-140 ГМ (табл. 1). Дослідження було проведено для температурного діапазону димових газів 107–124 °С. Температуру випаровування

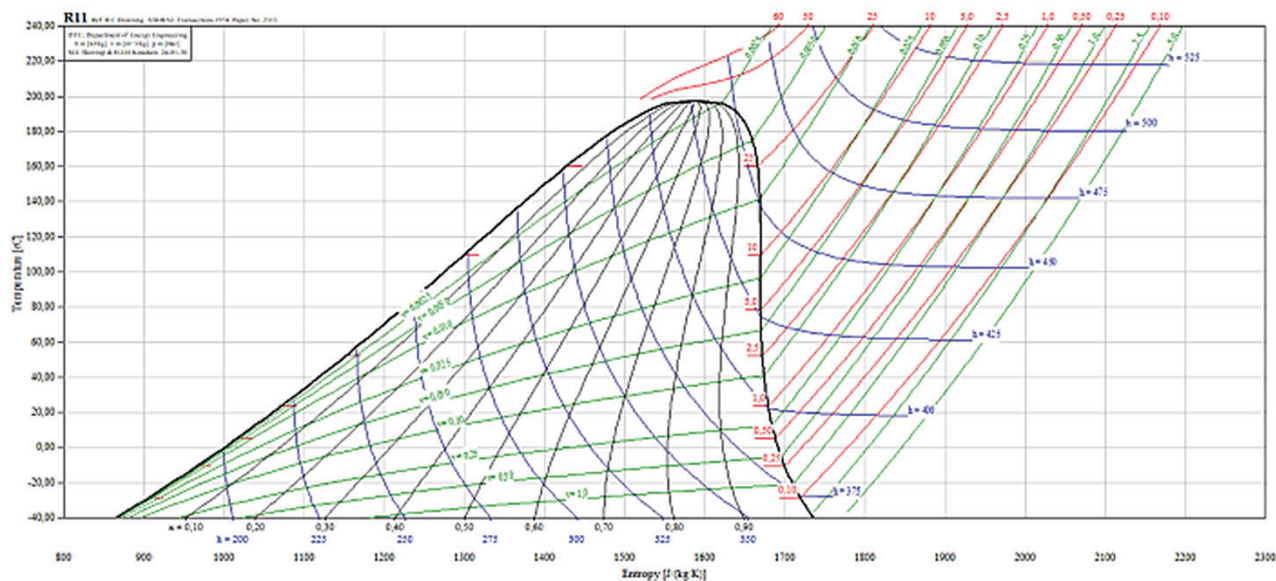


Рис. 3. TS-діаграма ізентропічної рідини (R11)

змінювали, змінюючи тиск робочого тіла. Щоб визначити фізичні властивості робочих тіл, під час моделювання використовували програмне забезпечення CoolProp [6]. Крім того, було розроблено аналітичну модель для оцінювання показників ефективності, включаючи теплову ефективність і питому масову витрату системи ORC для кожного робочого тіла.

Для обладнання, яке розглядається, температура димових газів на виході з димососа становить 107–124 °С залежно від навантаження котла (табл. 1). Така температура обумовлена потребою запобігти конденсації водяної пари з димових газів у газових трактах і в димовій трубі під час роботи котла. Максимальний тиск робочого тіла залежить від температури димових газів на виході з випарника. Залежність становить собою збільшення тиску робочого тіла у разі зменшення температури димових газів.

У процесі дослідження технічних характеристик систем ORC залежно від робочого тіла було використано чисельне моделювання. Температуру й тиск у випарнику змінено, щоб оці-

нити вплив на теплову ефективність і масову витрату на одиницю вихідної потужності ORC за різних робочих умов. У виборі робочого тіла важливими характеристиками є тип робочого тіла, теплота пароутворення, температура пароутворення, критичні температура й тиск, а також потенціал глобального потепління (GWP) з урахуванням 100 років і потенціал руйнування озонового шару (ODP). Такі характеристики наведено у табл. 2.

З огляду на властивості, наведені у табл. 2, сухі робочі тіла, такі як R236EA, R1234ZE та R11, виявляються прийнятними з огляду на їхні критичні характеристики. Зокрема, R11 вирізняється високою температурою кипіння, що дозволяє забезпечити більш низький робочий тиск порівняно з іншими рідинами. Утім, слід враховувати його високий коефіцієнт GWP, що викликає застереження щодо його застосування.

Серед вологих робочих рідин, з огляду на теплоту пароутворення, оптимальними є R123, R245fa, R141B й насамперед аміак (R717). Утім, робоче тіло R245fa має значний коефіцієнт GWP,

Таблиця 1. Параметри димових газів

Величина	Розмірність	Показник						
Потужність блока	%	50	58	66	75	83	91	100
Продуктивність котла	т/г	240	280	320	360	400	440	480
Температура продуктів згорання на виході з котла	°С	107	110	113	115	118	121	124
Ентальпія продуктів згорання на виході з котла	кДж/м ³	2454	2524	2594	2641	2711	2782	2852

Таблиця 2. Характеристики робочих тіл

Робоче тіло	Тип робочого тіла	Теплота пароутворення (1 бар), кДж/кг	Температура кипіння (1 бар), °C	Молекулярна маса, кг/моль	Критичні властивості		GWP	ODP
					температура, °C	тиск, бар		
Вода	Мокрий	2257	99,61	0,018	373,95	220,64	0	0
R717	Мокрий	1368,46	-33,58	0,017	132,41	113,63	0	0
R141B	Мокрий	236,23	31,67	0,1169	204,35	42,12	630	0,11
R123	Мокрий	227,65	27,46	0,1529	183,68	36,72	77	0,02
R245fa	Мокрий	219,56	14,72	0,134	153,86	36,51	1030	0
R134a	Мокрий	215,05	-26,36	0,102	101,06	40,59	1300	0
R236EA	Сухий	207,2	5,85	0,152	139,29	34,2	710	0
R114	Мокрий	180,45	3,25	0,1709	145,68	32,57	10 000	0
R11	Сухий	180,45	23,34	0,1374	197,91	43,94	4000	1
R1234ZE	Сухий	174,92	-19,27	0,114	109,37	36,35	6	0
R1234YF	Мокрий	163,07	-29,78	0,114	94,7	33,82	4	0

що викликає застереження до його використання. Робочі тіла R245fa, R123 та R141B мають високу температуру кипіння, що робить їх також прийнятними для розгляду. Робоче тіло R114 задовольняє прийняті вимоги, проте має невисоку теплоту пароутворення і низьку температуру кипіння, а також найвищий коефіцієнт GWP, що спонукає відмовитись від вибору такого робочого тіла. Аміак (R717) також має задовільні критичні властивості, але має низьку температуру кипіння, що вимагає значного підвищення тиску. Такі робочі тіла, як R134a та R1234YF, не можуть бути застосовані за прийнятих умов через незадовільні критичні властивості, оскільки критична температура має бути щонайменше на 10 °C вищою, ніж розрахункова температура у випарнику.

Вода, у свою чергу, вирізняється великою теплотою пароутворення і критичними параметрами, забезпечуючи ефективність у широкому температурному діапазоні, однак її використання обмежене через необхідність створювати й підтримувати від'ємний тиск у випарнику.

З огляду на вищенаведене можна зробити висновок, що задовільними робочими тілами для досліджуваної системи є аміак (R717), R123, R245fa та R141B.

Відомо, що тепловий ККД системи зростає зі збільшенням тиску у випарнику, але зменшується з підвищенням температури конденсатора [2].

Для оптимізації продуктивності циклу було використано пакет програмного забезпечення PyCharm [7], поєднаний з бібліотекою

CoolProp [6]. Цю оптимізацію проводили через ітераційний процес. У результаті отримано максимальну теоретичну теплову ефективність (ідеальний цикл) і максимальну фактичну теплову ефективність (реальний цикл). Також отримано оптимальний тиск у випарнику для системи ORC, як показано у табл. 3.

Результати математичного моделювання

Моделювання ефективності роботи ORC було проведено за допомогою пакета CoolProp [6] для виявлення оптимальних робочих тіл з огляду на ККД паротурбінного циклу, за заданих умов [1], а саме:

- температура у конденсаторі (t_0) = 20 °C ;
- тиск у конденсаторі (p_0) = $f(t_0)$;
- температура випарника (t_1) = 90 °C ;
- тиск у випарнику (p_1) = $f(t_1)$;
- температура пароперегрівника (t_2) = 120 °C ;
- тиск у пароперегрівнику (p_1) = $f(t_1)$.

Коефіцієнт корисної дії розраховували за формулою [8]

$$\eta = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_2}, \quad (2)$$

де η – ККД;

h_5 – ентальпія пари на виході з пароперегрівника перед турбіною;

h_6 – ентальпія пари на виході з турбіни;

h_2 – ентальпія пари на виході з конденсатора.

Результати моделювання наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Ефективність використання робочих тіл за заданих параметрів

Робоче тіло	Ідеальний цикл, %	Реальний цикл, %	Тиск у випарнику, МПа	Тиск у конденсаторі, МПа	Вартість, грн/кг
R245FA	34,72	34,03	1,01	0,123	1495,00
R123	31,03	30,41	0,62	0,075	4488,00
R141B	27,75	27,19	0,54	0,065	600,00
R717	18,42	18,05	5,12	0,823	22,50

Аналіз отриманих результатів

З-поміж проаналізованих робочих тіл аміак (R717) та R245FA можна вважати найкращими варіантами для багатьох умов експлуатації систем ORC. Варто зазначити, що ці робочі тіла мають свої особливості та вимоги:

1. Аміак (R717):

- вимагає високого робочого тиску (5 МПа), що забезпечується потовщенням стінки труби, а також встановлення більш потужного насосного обладнання;

- має широкий температурний діапазон від -33 до 132 °С, що дозволяє використовувати його в різних умовах;

- має високу теплоту пароутворення, що дозволяє знизити витрату робочого тіла;

- не вимагає ежекторів для забезпечення конденсації;

- дешевий і загальнодоступний.

2. Робоче тіло R245FA:

- потребує незначного збільшення робочого тиску (1 МПа);

- має великий температурний діапазон від 14 до 153 °С;

- не вимагає ежекторів для забезпечення конденсації;

- має низьку теплоту пароутворення, що збільшує витрату робочого тіла;

- має високий коефіцієнт GWP, що може бути підставою для обмеження його застосування.

3. Робоче тіло R123:

- потребує незначного збільшення робочого тиску (0,6 МПа);

- має великий температурний діапазон від 27 до 183 °С;

- вимагає створення від'ємного тиску для забезпечення конденсації;

- має низьку теплоту пароутворення, що збільшує витрату робочого тіла;

- має високий коефіцієнт GWP, через що заборонений для використання у країнах-членах Європейського Союзу [7].

4. Робоче тіло R141B:

- вимагає високого робочого тиску (0,5 МПа), що забезпечується потовщенням стінки труби, а також встановлення більш потужного насосного обладнання;

- має широкий температурний діапазон від 31 до 204 °С, що дозволяє використовувати його в різних умовах;

- має низьку теплоту пароутворення, що збільшує витрату робочого тіла;

- вимагає створення від'ємного тиску для забезпечення конденсації;

- дешеве та загальнодоступне.

Висновки

У роботі описано методику, що ґрунтується на порівняльному методі, у межах якої проведено аналіз наявних органічних робочих тіл відповідно до вимог заданого проекту [1]. З-поміж розглянутих варіантів робочих речовин аміак (R717) виявився найбільш оптимальним з огляду на його ефективність, доцільність і вартість. Обране рішення, а також розроблена методика вибору робочого тіла, можуть бути успішно використані у схожих проектах з утилізацією теплоти димових газів продуктів згорання природного газу за допомогою ORC.

References

- [1] Ye.V. Novakivskiy and A.V. Nedilko, "Zastosuvannia kondensatsiinykh ekonomazeriv na hazovykh enerhetychnykh ta vodohriynykh kotlakh", *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, № 4 (66), 2021, s. 62–70. DOI: 10.20535/1813-5420.4.2021.257271
- [2] A. Fakeye Babatunde and O. Oyedepo Sunday, "A Review of Working Fluids for Organic Rankine Cycle (ORC) Applications", *IOP conference series: materials science and engineering*. IOP Publishing, vol. 413, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/413/1/012019
- [3] Yung-Ming Li *et al.*, "Experimental investigation of 3-kW organic Rankine cycle (ORC) system subject to heat source conditions: A new appraisal for assessment", *J. Energy*, 15 February 2021, vol. 217, 119342 p. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119342
- [4] "Software complex Coolpack". [Online]. Available: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>

- [5] Ruijie Wang *et al.*, “Experimental Investigation of a 300 kW Organic Rankine Cycle Unit with Radial Turbine for Low-Grade Waste Heat Recovery”, *J. Entropy*, no. 21 (6), 2019, 619 p. DOI: 10.3390/e21060619
- [6] “Software complex CoolProp”. [Online]. Available: <https://www.coolprop.org/>
- [7] “Software complex PyCharm”. [Online]. Available: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/>
- [8] “REGULATION (EU) No 517/2014 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006”, *European Parliament, and Council. Official Journal of the European Union*, 20 May 2014, vol. 57, no. L 150, pp. 195–230. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&qid=1618313690727&from=ES>
- [9] R.A. Hinrichs and M. Kleinbach, “Heat and Work in Energy: Its Use and the Environment”, 4th ed. Toronto, Ont. Canada: Thomson Brooks/Cole, 2006, ch. 4, sec. E, pp. 115.

Ye.V. Novakivskiy, A.V. Nedilko

METHOD OF SELECTING THE WORKING BODY FOR ORC CYCLES OF FLUE GAS HEAT RECOVERY

Background. The choice of the optimal working fluid for condensing heat exchangers operating based on the organic Rankine cycle on gas-fired power and water boilers with waste gas heat recovery arises due to the growing need for energy-efficient technologies and the need to ensure maximum efficiency of generation systems at minimal costs. This requires studying the properties of various working fluids and their optimal use, taking into account specific operating conditions, and addressing the lack of research for specific equipment conditions.

Objective. The purpose of the paper is to justify the choice of the working fluid for the heat recovery system with a condensing heat exchanger and a turbine operating on the organic Rankine cycle based on the E-480-560-140 GM power boiler.

Methods. The scientific approach in this study is based on the comparative method. This approach involves comparing different options for organic working fluids through a literature review and modelling their operation for existing conditions. During the literature review, approaches that have already been used in other studies and practices were analyzed. Modelling the operation of working fluids made it possible to assess their efficiency and suitability for a specific system, considering its parameters and limitations.

Results. A list of effective organic bodies is presented based on a literature review and the results of technical, economic and mathematical analysis. The algorithm for selecting a working body is based on the obtained research results and takes into account the criteria of energy efficiency, compatibility with system parameters, resistance to corrosion and wear, as well as the availability and cost of working substances. Taking these criteria and research conclusions into account, the following working fluids are suitable for the given system: R717, R245FA, R123, R141B.

Conclusions. For the conditions of the given project, ammonia (R717) is the most optimal working medium. This decision can be applied to similar conditions of projects on heat utilization of flue gas products of natural gas combustion using ORC cycles.

Keywords: condensation economizer; organic working body; turbine on the organic Rankine cycle; boiler; temperature; pressure; heat of vaporization; consumption; ORC.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
4 листопада 2024 року

Прийнята до публікації
10 лютого 2025 року