

УДК 656.13

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.217-226](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.217-226)

С. І. Криштопа, проф., д-р техн. наук, А. І. Сем'янчук, А. І. Добуш,
Д. В. Копильців, Р. М. Матвієнко, І. М. Солярчук
*Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: auto.ifntung@ukr.net*

Дослідження потенціалу рекуперації енергії відпрацьованих газів двигунів технологічного транспорту

У статті досліджується питання моделювання та підвищення паливної ефективності силових приводів, що застосовуються на великокубатурних дизельних двигунах в нафтогазовій галузі. Як перспективний напрям модернізації зазначених дизельних двигунів запропоновано використання надкритичних циклів двоокису вуглецю (sCO_2). Проведено аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій, присвячених тематиці моделювання силових приводів, а також виявлено ряд невирішених проблем, що стосуються практичного впровадження технології sCO_2 у нафтогазовій промисловості. З цієї причини у статті розглянуто потенціал застосування надкритичного двоокису вуглецю (sCO_2), органічного циклу Ренкіна (ORC) і термоелектричних генераторних систем (TEG) для рекуперації тепла відпрацьованих газів (WHR) технологічного транспорту нафтогазової галузі. Результати моделювання свідчать, що системи sCO_2 мають найвищий рівень енергетичного відновлення з вихлопних газів, перевершуючи ORC. Зокрема, система sCO_2 змогла відновити 19,5 кВт у режимі максимальної ефективної потужності та 10,1 кВт у режимі максимального крутного моменту, тоді як система ORC - 14,7 кВт і 7,9 кВт відповідно. У режимі низької ефективної потужності sCO_2 забезпечила 4,2 кВт, тоді як ORC - 3,3 кВт. При цьому система TEG продемонструвала значно нижчі показники: 533 Вт при максимальній ефективній потужності гальмування, 126 Вт при максимальному крутному моменті та лише 7 Вт у режимі низьких потужності й моменту, що пояснюється її меншою ефективністю порівняно з sCO_2 і ORC. На основі отриманих результатів зроблено висновок, що технології sCO_2 та ORC мають найбільший потенціал для підвищення ефективності вихлопних систем WHR. Окремо відзначено перспективність застосування надкритичних циклів двоокису вуглецю для покращення економічних характеристик силових приводів у нафтогазовій промисловості.

транспорт; двигун; моделювання силових приводів; утилізація відпрацьованого тепла; надкритичний вуглекислий газ.

Постановка проблеми. На протязі багатьох десятиліть дизельні двигуни активно застосовуються в нафтогазовому технологічному транспорті, бурових установках та різноманітних агрегатах нафтогазової галузі. Одним із ключових завдань для фахівців цієї сфери є зниження витрат палива та зменшення токсичності відпрацьованих газів. Важливо зазначити, що 60-70% паливної енергії втрачається через вихлопну систему та систему охолодження [1]. Системи рекуперації відпрацьованого тепла здатні частково компенсувати ці втрати, перетворюючи частину втраченого тепла в електроенергію. Ця енергія може використовуватися для зниження навантаження на генератор транспортного засобу, а також для живлення паливного, оливного, водяного насосів та інших допоміжних приводів двигуна, що сприяє зменшенню витрати палива.

Існує три багатообіцяючі системи, які зараз досліджуються в промисловості для використання в системах рекуперації відпрацьованого тепла двигунів внутрішнього згорання [2]. Це термоелектричні генератори (TEG), системи на основі органічного циклу Ренкіна (ORC) і системи на основі надкритичного діоксиду вуглецю (sCO_2) [3]. Ці системи можна використовувати не лише для рекуперації тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання, але й у багатьох інших галузях, таких як виробництво електроенергії на вкопному паливі або суднова енергетика [4]. Зазначені системи були

спеціально обрані, оскільки вони перебувають у найвищому стані технологічної готовності, порівняно з іншими новітніми доступними варіантами (наприклад, термоакустичними системами), які знаходяться на початковій та середній стадії дослідження [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. *Надкритичні цикли двоокису вуглецю (sCO_2).* Двоокис вуглецю - це екологічно безпечна природна робоча речовина, яка є недорогою, негорючою, вибухобезпечною та поширена в природі [6]. Крім того, двоокис вуглецю має низький потенціал глобального потепління і не має озоноруйнівного ефекту [7], що є важливими екологічними характеристиками при виборі робочої рідини для термодинамічного циклу виробництва електроенергії. Коли CO_2 наближається до критичної точки, він стає менш податливим до стиснення [8]. Отже, робота компресора може бути суттєво зменшена, що призведе до підвищення ефективності термодинамічного циклу. Ще одна перевага використання циклів sCO_2 полягає в тому, що вони працюють під набагато вищим тиском протягом усього циклу, що призводить до більш високої щільності робочої рідини, що сприяє меншим розмірам обладнання та фізичним слідам, а отже, меншим капітальним витратам [9].

Автори [10] провели дослідження циклів утилізації відпрацьованого тепла sCO_2 для суднових енергетичних систем. Дослідження порівнювало запропоновану систему, яка використовує sCO_2 циклу Брейтона, зі звичайним циклом Брейтона, який уже використовується для цього застосування. Вони виявили, що можна досягти збільшення вихідної потужності приблизно на 18 %, а також збільшення загальної ефективності бортової енергетичної системи, більш ніж на 11 % [11]. Було проведено моделювальне дослідження, щоб перевірити покращення продуктивності системи попереднього нагріву на основі циклу sCO_2 для рекуперації відпрацьованого тепла двигуна. Двигун, який розглядався, був шестирядним дизельним двигуном з турбонаддувом, який є типовим для шасі сучасного вантажного магістрального транспорту і може використовуватись в такій якості для досліджень утилізації відпрацьованого тепла ORC. Результати моделювання показують, що вдосконалена система може краще використовувати теплове навантаження регенерації і, отже, покращити продуктивність системи. Крім того, максимальний чистий вихід енергії двигуна з системою рекуперації на 7,4 % вище, ніж у вихідного двигуна. Завдяки застосуванню вдосконаленої системи попереднього підігріву, потужність двигуна була додатково збільшена на 6,9 % [12]. Варто додати, що подібне дослідження, проведене на тому ж двигуні з подібними системами, але на основі sCO_2 показало, що вихідна потужність двигуна зросла ще на 8,5 %, що вказує на величезний потенціал для практичного застосування [13].

Органічний цикл Ренкіна (ORC). Системи рекуперації відпрацьованого тепла ORC протягом кількох десятиліть ретельно досліджувалися для застосування у великокубатурних дизельних двигунах. У [14] проведено широкий огляд літератури щодо таких досліджень ORC. Автори виявили, що дизельні двигуни та газові турбіни є найбільш використовуваними джерелами тепла для досліджень WHR.

В [15] провели дослідження дизельного двигуна з турбонаддувом об'ємом 10,3 л і потужністю 316 кВт з використанням системи ORC WHR. Система могла відновити від 2 до 4 кВт на низьких оборотах і від 8 до 16 кВт на високих оборотах [16]. В [17] моделювалась система ORC WHR на двигуні Volvo D-13 об'ємом 13 л і потужністю 367 кВт, використовуючи суміш 80 % води та 20 % етанолу, як робочу рідину. Виявилось, що ККД системи WHR коливається від 9 до 23 % залежно від джерела відпрацьованого тепла. В роботі [18] розглянули продуктивність ORC для дизельних двигунів різних конфігурацій і виявили, що існує потенціал покращення економії

палива до 5 %, шляхом ефективного впровадження систем ORC для рекуперації тепла відпрацьованих газів двигуна.

У [19] було проведено широкий огляд досліджень дизельних двигунів ORC WHR. Він виявив, що реально можна досягти економії палива до 20 %, а також одержати 10–25 % теплової ефективності для одноконтурних систем ORC. Ці висновки були підтверджені авторами роботи [20], які провели аналогічний технічний огляд двигунів із запалюванням від стиснення, використовуючи системи ORC WHR. Вони виявили, що фреон R245fa є найкращою робочою рідиною для цих систем, завдяки хорошим характеристикам як холодоагенту, доступності та низькому економічному та екологічному впливу.

Термоелектричні генератори (ТЕГ). Термоелектричні процеси - це процеси, в результаті яких відбувається безпосереднє перетворення теплової енергії в електричну. Термоелектричні генератори мають великий потенціал для використання в системах рекуперації відпрацьованого тепла на автомобілях, спецтехніці, бурових установках, електростанціях та ін. Вони мають багато переваг, включаючи низькі витрати на обслуговування, нульовий вплив на навколишнє середовище, тиху роботу, компактність і стабільність. Однак залишаються значні технічні проблеми, які досі обмежували прогрес цих систем. До них належать низька ефективність і низька максимальна робоча температура, які продиктовані вибором термоелектричних матеріалів, а також ефекти інтеграції, які виникають через збільшення маси, складності та підвищеного протитиску вихлопу.

В [21] провели експеримент, щоб перевірити продуктивність та WHR ТEG продемонстрував, що потужність, вироблена ТEG, зростає з навантаженням двигуна та підвищення обертів колінчастого валу. Крім того, в [22] була досягнута максимальна вихідна потужність 119 Вт при 2000 об/хв., а також максимальна ефективність перетворення приблизно 8 %. В роботі [23] провели дослідження, щоб побачити, як розташування ТEG впливає на потенціал економії палива в автомобілях. Дослідження показало, що якщо розмістити ТEG ближче до випускного колектора, потенціал економії палива може збільшитися на 20 %.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є оцінка потенціалу рекуперації електроенергії за допомогою систем ORC, sCO₂ та TEG у системах утилізації тепла вихлопних газів дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) нафтогазового технологічного транспорту. Це дозволить визначити їхню ефективність і придатність для використання в системах рекуперації відпрацьованого тепла.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- створення моделі дизельного двигуна у програмному середовищі GT-SUITE;
- розробка моделей систем TEG, ORC і sCO₂ у GT-SUITE та їх симуляція у взаємодії з моделлю дизельного двигуна;
- аналіз отриманих результатів шляхом порівняння з даними наукової літератури для визначення найбільш ефективної технології рекуперації тепла вихлопних газів ДВЗ нафтогазового технологічного транспорту.

Виклад основного матеріалу. *Методологія моделювання.* Дослідження виконано за допомогою програмного комплексу GT-SUITE — спеціалізованого програмного забезпечення для симуляції двигунів, трансмісій та транспортних засобів. Цей комплекс є потужним інструментом для моделювання різних систем двигунів і широко використовується провідними виробниками у сфері автомобілебудування. GT-SUITE включає вбудовані 3D CAD-інструменти, засоби оптимізації та можливості навчання нейронних мереж. Крім того, воно інтегрується з MATLAB і Simulink, що

дозволяє проводити глибший аналіз систем керування.

Важливою частиною моделювання в GT-SUITE є калібрування різних компонентів системи. У цьому проекті першим кроком було створення автономних калібрувальних моделей для теплообмінників, компресорів, насосів і турбін, які використовуються в моделях дизельного двигуна НГТТ та WHR. Ці моделі порівнювалися з довідковими даними випробувань, наданими виробниками дизельних двигунів, а також іншими даними калібрування, знайденими в літературі. Коли компоненти були відкалібровані, а якість результатів порівняно з даними тестування стала прийнятною, було розпочато моделювання для цього проекту.

Моделювання дизельних двигунів нафтогазової галузі. Для цього проекту використовувався 6-циліндровий 4-тактний дизельний двигун робочим об'ємом 12,0 л зі ступенем стиснення 17:1. Це типові двигуни, які зараз використовуються на різних моделях нафтогазового технологічного транспорту ПАТ «Укрнафта».

Модель теплообміну в циліндрі, яка використовується в цьому дослідженні, є моделлю WoschniGT. У цій моделі використовується формула, яка точно імітує класичну кореляцію Вошні без завихрення. Однак різниця полягає в обробці коефіцієнтів тепловіддачі при відкритих клапанах. Модель WoschniGT враховує передачу тепла, збільшену швидкістю припливу через впускні клапани, а також зворотний потік через випускні клапани. Крім того, використовується модель згоряння – це безпосереднє вприскування (DI), коли паливо впорскується безпосередньо в циліндр. У цій моделі ефективна потужність двигуна регулюється кількістю палива, що впорскується в циліндри. Подача палива обмежена в контролері співвідношенням повітря та палива. Турбонагнітачу встановлювався час 1 секунда, щоб досягти постійної швидкості турбіни після зміни частоти обертів колінчастого вала двигуна. Після визначення необхідних параметрів користувач може ввести відповідні вхідні дані, необхідні для моделювання. У цьому проекті вибрані значення наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Обрані параметри для дизельного двигуна НГТТ в GT-SUITE

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6	Режим 7	Режим 8
Потужність двигуна (кВт)	240	270	295	305	270	225	155	90
Маса палива, що впорскується в циліндри (мг)	255	240	225	210	195	180	165	150
Частота обертання колінчастого вала двигуна (об/хв)	3000	2400	2000	1800	1600	1400	1200	1000
Обороти турбокомпресора (об/хв)	90 000	86 000	80 000	82 000	77 000	69 000	60 000	52 000

Джерело: розроблено авторами

Моделювання системи ORC. У цьому дослідженні буде прийнято підхід дослідження непрямої інтеграції. Тут моделюється двигун окремо від моделі WHR. По-перше моделюється модель дизельного двигуна. Після цього відповідні дані вставляються в окрему модель WHR і моделюються, щоб отримати відновлену системою потужність. Ця модель містить типові компоненти системи ORC, але має додаткову перевагу використання рекуператора, який допомагає ще більше підвищити ефективність системи. Для цієї системи робочою рідиною було обрано фреон R245fa. Вибір робочої рідини ґрунтувався на практичності (наявність фреону R245fa та вартість).

Моделювання системи sCO₂. На рис. 1 показана модель системи sCO₂, створена в

GT-SUITE. Конструкція системи базувалася на рекуперованому замкнутому циклі Брайтона. Ця система має додаткову перевагу підвищення загальної ефективності завдяки використанню рекуператора. Робочим тілом для цієї системи є вуглекислий газ (CO_2) у надкритичному стані. У цьому стані температура і тиск CO_2 вищі за критичну точку, тому рідку та парову фази неможливо розрізнити. Це відбувається, коли температура перевищує 31°C і тиск перевищує 83,8 бар.

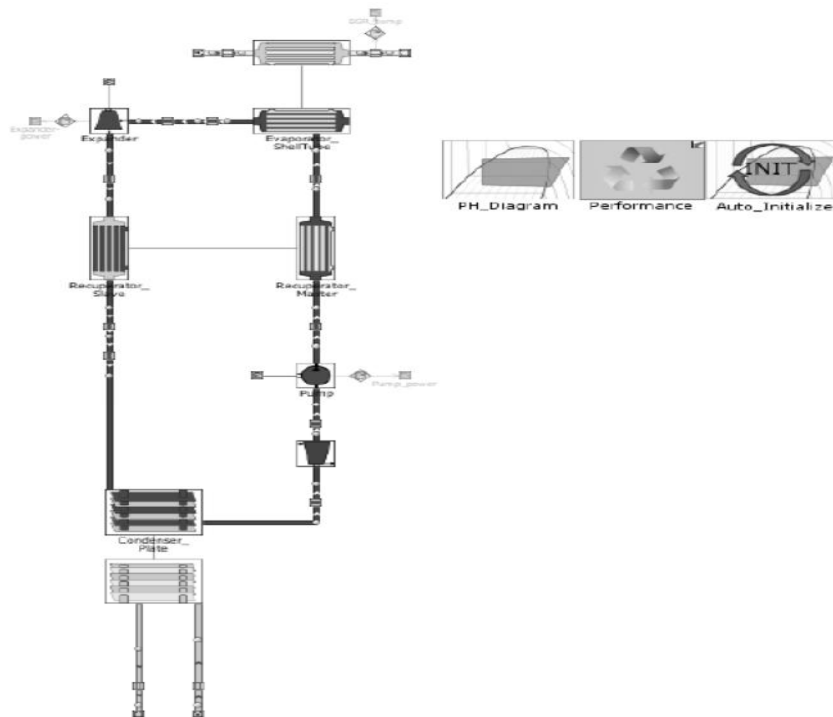


Рисунок 1 – Схема моделі системи sCO_2 у GT-SUITE

Джерело: розроблено авторами

Після моделювання системи можна визначити розділ налаштування корпусу. Остаточні параметри налаштування корпусу можна побачити в табл. 2 нижче. Важливим параметром є початкова температура холодоагенту. Її встановлено на 31°C , щоб забезпечити надкритичний стан CO_2 у всій системі.

Моделювання системи TEG. Останньою системою, яка тестується в цьому дослідженні, є система TEG. Термоелектричні модулі (ТЕМ), які входять в систему TEG, зображені на рис. 2.

Кожна труба моделюється як «плоска пластина», яку можна знайти в типовому пластинчастому теплообміннику. Труби моделюються за допомогою теплових трубок, з'єднаних із масами, які представляють стінки труб і ребра для внутрішньої труби. Крім того, шаблон ТЕМ, який використовується в моделі, враховує всі три термоелектричні ефекти (Зеебека, Пельтьє і Томсона), щоб генерувати електричний потенціал у відповідності з різницею температур на ньому. Той самий процес повторюється для всіх 10 ТЕМ, щоб отримати повну модель. Для аналізу потужності, виробленої всією системою TEG, була створена підмодель, яка підсумовує всі вихідні потужності від кожного ТЕМ. Параметри налаштування TEG наведені в табл. 2.

Результати та їх обговорення. Після моделювання дизельного двигуна та систем утилізації відпрацьованого тепла були проаналізовані відповідні результати моделювання дизельного двигуна.

На рис. 3 можна побачити гальмівний момент, створюваний двигуном у тому ж діапазоні обертів. Ми бачимо, що максимальний гальмівний момент становить

приблизно 1540 Н·м при 1400 об/хв. Знову ж таки, цей показник у цьому діапазоні потужності є репрезентативним для поточних серійних потужних дизельних двигунів, що ще більше підвищує довіру до моделі.

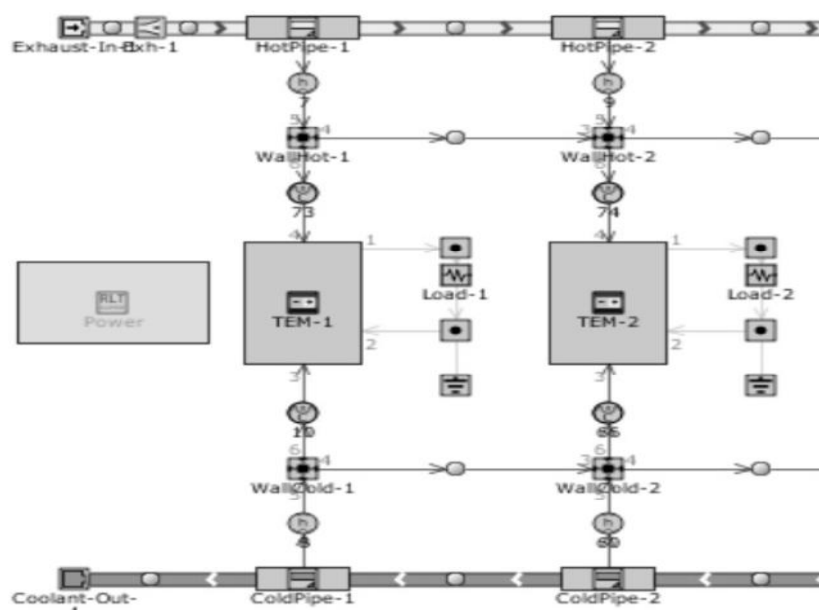


Рисунок 2 – Схема системи ТЕГ

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Остаточні обрані параметри для моделі ТЕГ у GT-SUITE

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Масова витрата теплоносія (кг/с)	0,1	0,4	0,8
Масова витрата відпрацьованих газів (кг/с)	0,13693	0,32345	0,47707
Тиск охолоджуючої рідини на виході (МПа)	0,1	0,1	0,1
Тиск вихлопу на виході (МПа)	0,1009656	0,10482228	0,10881422
Температура теплоносія на вході (°C)	25	25	25
Температура вихлопу на вході (K)	655,5935	711,7872	783,91376

Джерело: розроблено авторами

Після отримання кривих потужності та крутного моменту від двигуна важливо вибрати кілька робочих режимів, щоб вивчити, яку потужність системи WHR можна відновити під час типових сценаріїв експлуатації двигуна НГТТ. У цьому проекті було обрано три режими роботи:

Режим 1. Точка низької потужності та крутного моменту (потужність 90 кВт) — як іншу точку інтересу було обрано 1000 об/хв;

Режим 2. Точка максимального крутного моменту (потужність 225 кВт) — вироблено 1540 Н·м при 1400 об/хв;

Режим 3. Точка максимальної потужності (потужність 305 кВт) — модель виробляє 305 кВт при 1800 об/хв.

На рис. 4 зображено масову швидкість потоку вихлопних газів у вибраних точках, що представляють інтерес (1000 об/хв, 1400 об/хв та 1800 об/хв). Це разом зі значеннями температури вихлопу в дослідних точках на рис. 5 було введено в моделі WHR, як вхідні значення вихлопу. Отримавши ці значення вихлопів, було використано непрямий підхід, як обговорювалося в розділі «Методологія» звіту.

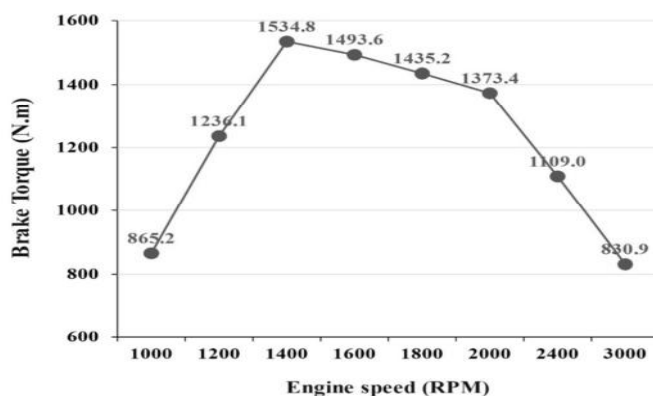


Рисунок 3 – Крива залежності крутного моменту двигуна (Н·м) від частоти обертання колінчастого вала (об/хв)

Джерело: розроблено авторами

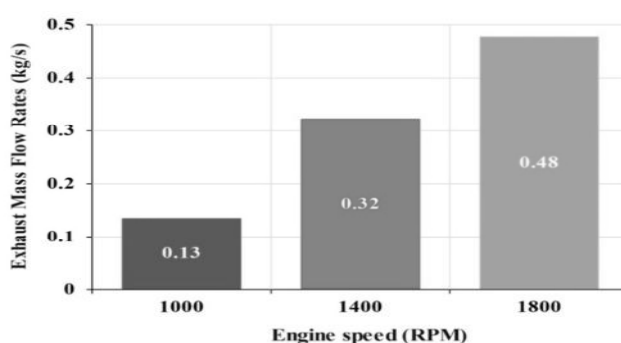


Рисунок 4 – Масові витрати вихлопних газів для вибраних точок інтересу

Джерело: розроблено авторами

Загалом, з результатів усіх трьох систем WHR, на рис. 6 можна побачити, що найімовірнішими системами, які будуть успішними для застосування утилізації відпрацьованого тепла вихлопних газів для важких дизельних двигунів, є системи ORC і sCO_2 . Ці дві системи мають значно вищу ефективність, ніж ТЕГ, і тому рекуперують набагато більше енергії з вихлопних газів. Крім того, системи sCO_2 мають додаткову перевагу, оскільки є більш компактними завдяки вищому робочому тиску системи. Однак головними проблемами, з якими стикаються як системи ORC, так і sCO_2 , є розробка вискоелективних турбін, які будуть надійними при підвищених тисках і температурах. Якщо ці проблеми вдасться подолати, існує значна можливість для масового застосування цих систем для додатків WHR.

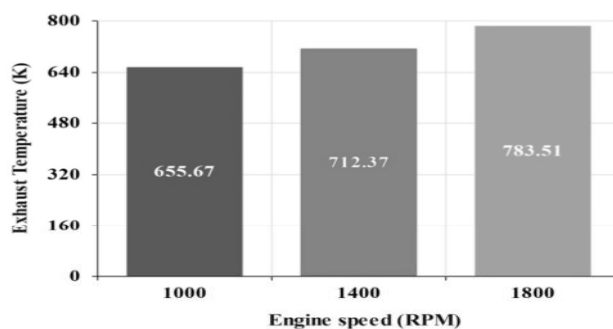


Рисунок 5 – Температура вихлопу для вибраних точок

Джерело: розроблено авторами

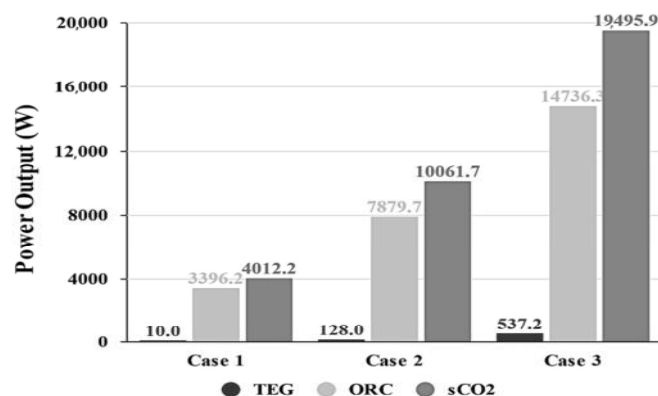


Рисунок 6 – Порівняння трьох систем WHR

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Загалом, це єдине дослідження, яке розглядає всі три основні системи рекуперації тепла для мобільного застосування. Попередні дослідження, які обговорювалися в літературі, не стосуються впровадження sCO₂. Таким чином, цінність цього дослідження полягає в одночасній оцінці цих трьох основних варіантів утилізації відпрацьованого тепла в одному дослідженні та проведенні на основі загальної порівняльної бази. Було проведено дослідження потенціалу систем ORC, sCO₂ і TEG для використання у дизельних двигунах технологічного транспорту можливостей утилізації вихлопних газів. На цих системах було виконано низку симуляцій та експериментальних досліджень для різноманітних застосувань; однак вони ще не були прийняті в масовому масштабі на транспорті.

Грунтуючись на одержаних результатах, можна з упевненістю підтвердити життєздатність систем sCO₂ і ORC як найбільш ймовірних систем, які будуть прийняті для застосування в дизельних двигунах WHR. Системи sCO₂ мають найвищу ефективність з трьох систем WHR, а також мають перевагу компактності завдяки вищому робочому тиску. Крім того, вартість кВт електроенергії, виробленої системами sCO₂, також значно нижча, ніж у системах ORC і TEG. Звичайно, застосовність таких систем все ще є предметом дебатов у контексті електрифікації транспорту, але дедалі більше впровадження альтернативних видів палива та водневих варіантів означає, що такі системи можна розглядати з новою силою. Очевидно, що ще потрібно подолати деякі проблеми щодо дизайну компонентів і доступності систем для масового виробництва. Однак, якщо це буде досягнуто, у найближчій перспективі потенціал цих систем можна використовувати. Енергія, відновлена цими системами, може бути використана для живлення допоміжних компонентів, таких як кондиціонер або освітлення, таким чином зменшуючи споживання палива автомобіля. Зважаючи на зростаючий тиск на виробників автомобілів щодо зменшення викидів від своїх транспортних засобів, ці системи WHR можуть виявитися привабливою перспективою. Під час промислового використання системи sCO₂ та ORC вимагатимуть підвищених вимог до обслуговування порівняно з системами TEG; у контексті транспортування ці вимоги, ймовірно, будуть мінімальними за задумом, але їх оцінка фактично виходить за межі цього дослідження.

Список літератури

1. Mahmoudzadeh Andwari A., Pesyridis A., Esfahanian V., Salavati-Zadeh A., Hajjalimohammadi A. Modelling and evaluation of waste heat recovery systems in the case of a heavy-duty diesel engine. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 1397.
2. Moradi J., Ghareghani A., Mirsalim M. Numerical investigation on the effect of oxygen in combustion characteristics and to extend low load operating range of a natural-gas HCCI engine. *Applied Energy*. 2020. Vol. 276. P. 115516.
3. Song J., Ren X.-D., Gu C.-W. Investigation of engine waste heat recovery using supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle system. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. New York : American Society of Mechanical Engineers, 2018. Vol. 51180. P. V009T38A014.
4. Mehranfar S., Ghareghani A., Azizi A., Mahmoudzadeh A., Pesyridis A., Jouhara H. Comparative assessment

- of innovative methods to improve solar chimney power plant efficiency. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 49. P. 101807.
5. Moradi J., Gharehghani A., Mirsalim M. Numerical comparison of combustion characteristics and cost between hydrogen, oxygen and their combinations addition on natural gas fueled HCCI engine. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 222. P. 113254.
 6. Gharehghani A., Kakoei A., Andwari A. M., Megaritis T., Pesyridis A. Numerical investigation of an RCCI engine fueled with natural gas/dimethyl-ether in various injection strategies. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1638.
 7. Gharehghani A., Mirsalim S. M., Jazayeri S. A. Numerical and experimental investigation of combustion and knock in a dual fuel gas/diesel compression ignition engine. *Journal of Combustion*. 2012. Vol. 12. P. 504590.
 8. Eichler K., Jeihouni Y., Ritterskamp C. Fuel economy benefits for commercial diesel engines with waste heat recovery. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. 2015. Vol. 8. P. 491–505.
 9. Siddiqui M. E. Thermodynamic performance improvement of recompression Brayton cycle utilizing CO₂–C₇H₈ binary mixture. *Mechanics*. 2021. Vol. 27. P. 259–264.
 10. Wieland C., Schiffelechner C., Dawo F., Astolfi M. The organic Rankine cycle power systems market: recent developments and future perspectives. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 224. P. 119980.
 11. Marchionni M., Bianchi G., Tsamos K. M., Tassou S. A. Techno-economic comparison of different cycle architectures for high temperature waste heat to power conversion systems using CO₂ in supercritical phase. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 123. P. 305–312.
 12. Mahmoudzadeh A., Pesiridis A., Karvountzis-Kontakiotis A., Esfahanian V. Hybrid electric vehicle performance with organic Rankine cycle waste heat recovery system. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. P. 437.
 13. Siddiqui M., Almatrafi E., Bamasag A., Saeed U. Adoption of CO₂-based binary mixture to operate transcritical Rankine cycle in warm regions. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 199. P. 1372–1380.
 14. Varshil P., Deshmuk D. A comprehensive review of waste heat recovery from a diesel engine using organic Rankine cycle. *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 3951–3970.
 15. Hoang A. Waste heat recovery from diesel engines based on organic Rankine cycle. *Applied Energy*. 2018. Vol. 231. P. 138–166.
 16. Mahmoudzadeh A., Pesiridis A., Esfahanian V., Salavati-Zadeh A., Karvountzis-Kontakiotis A., Muralidharan V. A comparative study of the effect of turbocompounding and ORC waste heat recovery systems on the performance of a turbocharged heavy-duty diesel engine. *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 1087.
 17. Kim T., Negash A., Cho G. Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 124. P. 280–286.
 18. Chintala V., Kumar S., Pandey J. A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 493–509.
 19. Lan S., Yang Z., Stobart R., Chen R. Prediction of the fuel economy potential for a skutterudite thermoelectric generator in light-duty vehicle applications. *Applied Energy*. 2018. Vol. 231. P. 68–79.
 20. Guo J., Li M., He Y., Jiang T., Ma T., Xu J., Cao F. A systematic review of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle for energy industries: technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 258. P. 115437.
 21. Manjunath K., Sharma O., Tyagi S., Kaushik S. Thermodynamic analysis of a supercritical/transcritical CO₂ based waste heat recovery cycle for shipboard power and cooling applications. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 155. P. 262–275.
 22. Arunachalam P., Shen M., Tuner M., Tunesta P., Thern M. Waste heat recovery from multiple heat sources in a HD truck diesel engine using a Rankine cycle. A theoretical evaluation. *SAE Technical Paper*. Warrendale, PA : SAE International, 2012. 0148-7191.
 23. Andwari A., Pesyridis A., Esfahanian V., Muhamad Said M. Combustion and emission enhancement of a spark ignition two-stroke cycle engine utilizing internal and external exhaust gas recirculation approach at low-load operation. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 609.

References

1. Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesyridis, A., Esfahanian, V., Salavati-Zadeh, A., & Hajialimohammadi, A. (2019). Modelling and evaluation of waste heat recovery systems in the case of a heavy-duty diesel engine. *Energies*, 12, 1397.
2. Moradi, J., Gharehghani, A., & Mirsalim, M. (2020). Numerical investigation on the effect of oxygen in combustion characteristics and to extend low load operating range of a natural-gas HCCI engine. *Applied Energy*, 276, 115516.
3. Song, J., Ren, X.-D., & Gu, C.-W. (2018). Investigation of engine waste heat recovery using supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle system. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 51180, p. V009T38A014). New York: American Society of Mechanical Engineers.
4. Mehranfar, S., Gharehghani, A., Azizi, A., Mahmoudzadeh, A., Pesyridis, A., & Jouhara, H. (2022). Comparative assessment of innovative methods to improve solar chimney power plant efficiency. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101807.
5. Moradi, J., Gharehghani, A., & Mirsalim, M. (2020). Numerical comparison of combustion characteristics and cost between hydrogen, oxygen and their combinations addition on natural gas fueled HCCI engine. *Energy Conversion and Management*, 222, 113254.
6. Gharehghani, A., Kakoei, A., Andwari, A. M., Megaritis, T., & Pesyridis, A. (2021). Numerical investigation of an RCCI engine fueled with natural gas/dimethyl-ether in various injection strategies. *Energies*, 14, 1638.
7. Gharehghani, A., Mirsalim, S. M., & Jazayeri, S. A. (2012). Numerical and experimental investigation of combustion and knock in a dual fuel gas/diesel compression ignition engine. *Journal of Combustion*, 2012, 504590.
8. Eichler, K., Jeihouni, Y., & Ritterskamp, C. (2015). Fuel economy benefits for commercial diesel engines with

- waste heat recovery. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 8, 491–505.
9. Siddiqui, M. E. (2021). Thermodynamic performance improvement of recompression Brayton cycle utilizing CO₂-C₇H₈ binary mixture. *Mechanics*, 27, 259–264.
 10. Wieland, C., Schiffelechner, C., Dawo, F., & Astolfi, M. (2023). The organic Rankine cycle power systems market: Recent developments and future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 224, 119980.
 11. Marchionni, M., Bianchi, G., Tsamos, K. M., & Tassou, S. A. (2017). Techno-economic comparison of different cycle architectures for high temperature waste heat to power conversion systems using CO₂ in supercritical phase. *Energy Procedia*, 123, 305–312.
 12. Mahmoudzadeh, A., Pesiridis, A., Karvountzis-Kontakiotis, A., & Esfahanian, V. (2017). Hybrid electric vehicle performance with organic Rankine cycle waste heat recovery system. *Applied Sciences*, 7, 437.
 13. Siddiqui, M., Almatrafi, E., Bamasag, A., & Saeed, U. (2022). Adoption of CO₂-based binary mixture to operate transcritical Rankine cycle in warm regions. *Renewable Energy*, 199, 1372–1380.
 14. Varshil, P., & Deshmuk, D. (2021). A comprehensive review of waste heat recovery from a diesel engine using organic Rankine cycle. *Energy Reports*, 7, 3951–3970.
 15. Hoang, A. (2018). Waste heat recovery from diesel engines based on organic Rankine cycle. *Applied Energy*, 231, 138–166.
 16. Mahmoudzadeh, A., Pesiridis, A., Esfahanian, V., Salavati-Zadeh, A., Karvountzis-Kontakiotis, A., & Muralidharan, V. (2017). A comparative study of the effect of turbocompounding and ORC waste heat recovery systems on the performance of a turbocharged heavy-duty diesel engine. *Energies*, 10, 1087.
 17. Kim, T., Negash, A., & Cho, G. (2016). Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 124, 280–286.
 18. Chintala, V., Kumar, S., & Pandey, J. (2018). A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 493–509.
 19. Lan, S., Yang, Z., Stobart, R., & Chen, R. (2018). Prediction of the fuel economy potential for a skutterudite thermoelectric generator in light-duty vehicle applications. *Applied Energy*, 231, 68–79.
 20. Guo, J., Li, M., He, Y., Jiang, T., Ma, T., Xu, J., & Cao, F. (2022). A systematic review of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle for energy industries: Technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Conversion and Management*, 258, 115437.
 21. Manjunath, K., Sharma, O., Tyagi, S., & Kaushik, S. (2018). Thermodynamic analysis of a supercritical/transcritical CO₂ based waste heat recovery cycle for shipboard power and cooling applications. *Energy Conversion and Management*, 155, 262–275.
 22. Arunachalam, P., Shen, M., Tuner, M., Tunesta, P., & Thern, M. (2012). Waste heat recovery from multiple heat sources in a HD truck diesel engine using a Rankine cycle. A theoretical evaluation. *SAE Technical Paper*. Warrendale, PA: SAE International.
 23. Andwari, A., Pesiridis, A., Esfahanian, V., & Muhamad Said, M. (2019). Combustion and emission enhancement of a spark ignition two-stroke cycle engine utilizing internal and external exhaust gas recirculation approach at low-load operation. *Energies*, 12, 609.

Sviatoslav Kryshchtopa, Prof., DSc., **Andriy Semianchuk**, **Andriy Dobush**, **Dmytro Kopyltsiv**,
Roman Matviienko, **Ivan Solyarchuk**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Research into the Potential for Energy Recovery from Exhaust Gases from Technological Transport Engines

The article investigates the issue of modeling and increasing the fuel efficiency of power drives used on large-capacity diesel engines in the oil and gas industry. The use of supercritical carbon dioxide (sCO₂) cycles is proposed as a promising direction for the modernization of these diesel engines. An analysis of modern scientific research and publications on the topic of power drive modeling is carried out, and a number of unresolved problems related to the practical implementation of sCO₂ technology in the oil and gas industry are also identified. For this reason, the article considers the potential of using supercritical carbon dioxide (sCO₂), the organic Rankine cycle (ORC) and thermoelectric generator systems (TEG) for waste heat recovery (WHR) of technological transport in the oil and gas industry.

The modeling results show that sCO₂ systems have the highest level of energy recovery from exhaust gases, surpassing ORC. In particular, the sCO₂ system was able to recover 19.5 kW in the maximum effective power mode and 10.1 kW in the maximum torque mode, while the ORC system - 14.7 kW and 7.9 kW, respectively. In the low effective power mode, the sCO₂ provided 4.2 kW, while the ORC - 3.3 kW. At the same time, the TEG system demonstrated significantly lower performance: 533 W at maximum effective braking power, 126 W at maximum torque and only 7 W in the low power and torque mode, which is explained by its lower efficiency compared to sCO₂ and ORC.

Based on the results obtained, it was concluded that the sCO₂ and ORC technologies have the greatest potential for increasing the efficiency of WHR exhaust systems. The prospects of using supercritical carbon dioxide cycles to improve the economic characteristics of power drives in the oil and gas industry were separately noted.

transport, engine, powertrain modeling, waste heat recovery, supercritical carbon dioxide

Одержано (Received) 09.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025