



Прийнято 12.02.2025. Прорецензовано 24.03.2025. Опубліковано 20.06.2025.

УДК 656.13

DOI: 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-150-160

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАДКРИТИЧНОГО ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ В ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ НАФТОГАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Криштопа С. І.*

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1880-9505>
e-mail: sviatoslav.kryshtopa@nung.edu.ua

Криштопа Л. І.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5274-0217>
e-mail: liudmyla.kryshtopa@nung.edu.ua

Сем'янчук А. І.

Студент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-3664-7716>
e-mail: andrii.semianchuk-a13324@nung.edu.ua

Козак Ф. В.

Кандидат технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9147-883X>
e-mail: fedir.kozak@nung.edu.ua

Солярчук І. М.

Студент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-0639-0364>
e-mail: ivan.soliarchuk-a13324@nung.edu.ua

Запропоноване посилання: Криштопа, С. І., Криштопа, Л. І., Сем'янчук, А. І., Козак, Ф. В., Солярчук, І. М., Гріштор, Т. Т. (2025). Дослідження потенціалу використання систем надкритичного двоокису вуглецю в дизельних двигунах нафтогазового технологічного транспорту. Нафтогазова енергетика, 1(43), 150-160. doi: 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-150-160

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Гріштор Т. Т.

Студент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0009-0003-4122-9784>

e-mail: taras.grishtor-a13324@nung.edu.ua

Анотація. У статті розглянуто проблему підвищення економічної ефективності силових приводів, що використовуються в нафтогазовій галузі. Запропоновано використання надкритичних циклів двоокису вуглецю (sCO_2), як перспективний напрямок модернізації енергетичного обладнання. Проаналізовано сучасні дослідження та публікації, присвячені цій тематиці. Виявлено низку невирішених питань, пов'язаних з практичною реалізацією технології sCO_2 в умовах нафтогазової промисловості. Тому в статті було досліджено потенціал надкритичного двоокису вуглецю (sCO_2), органічного циклу Ренкіна (ORC) і систем термоелектричного генератора (TEG) для застосування в системах рекуперації тепла відпрацьованих газів (WHR) нафтогазового технологічного транспорту. Результати моделювання свідчать, що системи sCO_2 здатні відновлювати найбільшу кількість енергії з викидних газів нафтогазового технологічного транспорту, за якими йдуть системи ORC. За проведеними розрахунками система sCO_2 відновила 19,5 кВт у режимі максимальної ефективної потужності та 10,1 кВт у режимі максимального крутного моменту. За тих самих умов система ORC відновила 14,7 кВт у режимі максимальної ефективної потужності та 7,9 кВт у режимі максимального крутного моменту. Крім того, у режимі низької ефективної потужності та крутного моменту система sCO_2 відновила 4,2 кВт ефективної потужності, а система ORC – 3,3 кВт. Система TEG виробляла значно меншу потужність (533 Вт при максимальній ефективній потужності гальмування, 126 Вт при максимальному крутному моменті та 7 Вт при низькій потужності та крутному моменті) на всіх трьох режимах через низьку ефективність системи, порівняно з системами sCO_2 та ORC. З результатів можна зробити висновок, що системи sCO_2 і ORC мають найбільший потенційний вплив на викидні системи WHR. Зроблено висновки щодо перспективності використання надкритичних циклів двоокису вуглецю для підвищення економічних показників силових приводів нафтогазової галузі.

Ключові слова: нафтогазовий технологічний транспорт; утилізація відпрацьованого тепла; дизельний двигун; надкритичний вуглекислий газ; sCO_2 ; органічний цикл Ренкіна; ORC; термоелектричний генератор; економія палива; паливна економічність.

Вступ

Протягом багатьох десятиліть дизельні двигуни широко використовуються в нафтогазовому технологічному транспорті, в бурових установках та багатьох інших агрегатах нафтогазової галузі. При цьому важливим завданням для фахівців нафтогазової галузі є зниження витрат палива та токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів. Суттєвим при цьому є те, що 60-70% паливної енергії втрачається через системи викиду та охолодження [1]. Система рекуперації відпрацьованого тепла має потенціал для перетворення частини цієї втраченої енергії в електричну енергію, яку можна використовувати для зменшення навантаження на генератор транспортного засобу, паливний, оливний, водяний насоси та інші допоміжні приводи двигуна. Таким чином, витрату палива можна зменшити.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

CO_2 – це екологічно безпечна природна робоча рідина, яка є недорогою, негорючою, вибухобезпечною та поширена в природі [2]. Крім того, двоокис вуглецю має низький потенціал стосовно глобального потепління і не

має озоноруйнівного ефекту [3], що є важливими екологічними чинниками при виборі робочої рідини для термодинамічного циклу виробництва електроенергії. Коли CO_2 наближається до критичної точки, він стає менш податливим до стиснення [4]. 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 [5].

Завдяки компактній природі цих систем, їхнім екологічним характеристикам, рівням безпеки та властивостям робочої рідини, цикли sCO_2 стали перспективним методом утилізації відпрацьованого тепла двигунів [6]. Технічна можливість використання систем на основі CO_2 для рекуперації відпрацьованого тепла двигуна вже перевірена, оскільки вона вже використовується в системах кондиціонування повітря транспортних засобів [7].

Вартість систем sCO_2 значно змінюється залежно від архітектури. Автори [8] досліджу-

вали вартість різних архітектур $s\text{CO}_2$ (у діапазоні 160–175 кВт). Вони виявили, що схеми простої рекомпресії та простої рекуперації мають інвестиційні витрати 1175 дол. США/кВт і 862,5 дол. США/кВт відповідно. Більш складні системи, такі як комбонування рекомпресії та повторного нагріву, можуть мати витрати до 1675 доларів США/кВт.

Одне з перших досліджень систем рекуперації відпрацьованого тепла було проведено в роботі [9], де змодельовано систему ORC WHR на потужному дизельному двигуні Cummins ISX з номінальною гальмівною потужністю 275 кВт. Результати моделювання показують, що 55 кВт механічної роботи було відновлено системою ORC WHR в стаціонарних умовах, що еквівалентно приблизно 20 % збільшенню потужності двигуна без додаткового споживання палива. Крім того, ефективність системи ORC виявилася на рівні 29,5 % [11]. Ще одне дослідження, проведене в [10], де випробували двигун IVECO N67, що працював на 1500 об/хв. та навантаженні 25 % (гальмівна потужність 35 кВт). Система ORC змогла відновити 2 кВт електроенергії в цьому діапазоні потужностей.

Останнім часом основна увага вчених була зосереджена на дослідженні потенціалу економії палива за допомогою систем ORC WHR. Експеримент на основі дизельного двигуна Cummins ISM об'ємом 10,8 л 2016 року випуску в типових умовах експлуатації був проведений в [12]. Термодинамічний аналіз показав, що за допомогою описаної вище системи WHR було досягнуто покращення економії палива до 5 %. В [13] провели багатоцільову оптимізацію різних органічних конфігурацій циклу Ренкіна, а також встановили покращення економії палива на 5–8 %, причому останнє було отримано за допомогою ORC з внутрішнім теплообмінником.

Системи ORC також були ретельно досліджені для морських суден та подібних застосувань. В [14] провели дослідження з використанням біометанолу як робочої рідини в системі ORC. Результати показують, що система ORC змогла відновити 5 кВт потужності від морського дизельного двигуна потужністю 996 кВт, що працював на 1500 об/хв. Крім того, в [15] було виявлено, що системи ORC, які рекуперують тепло з викидних газів, що утворюються судовими дизельними двигунами, які працюють на паливі з низьким вмістом сірки, можуть заощадити до 10–15 % палива. З точки зору моделювання і експериментальних досліджень збільшення економії палива стано-

вить від 2 до 10 %. Ці значення залежать від конструкції та вибору компонентів, використовуваної робочої рідини та архітектури системи WHR [16].

В [17] було створено модель для системи термоелектричних генераторів TEG на основі прототипу General Motors Chevrolet Suburban. Вдалося отримати термоелектричну ефективність 5,5 % і ефективність передачі теплообмінника 64 %. Дослідники [18] використовували нову комбінацію TEG з ORC і без нього. Вони заявили про зниження споживання палива на 8–10,3 % при іншому циклі водіння, а TEG показав 14 % економії палива на WLTP.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Як бачимо з наведеного вище матеріалу, дослідниками було проведено низку симуляцій та експериментальних досліджень для різноманітних застосувань. Але досліджень потенціалу можливостей систем ORC, $s\text{CO}_2$ і TEG для використання у системах утилізації викидних газів потужних великокубатурних дизельних двигунів для нафтогазового технологічного транспорту та бурових установок ще не проводилось.

Мета та завдання досліджень

Метою цього дослідження є вивчення потенціалу рекуперації електроенергії за допомогою систем ORC, $s\text{CO}_2$ та TEG у системах рекуперації відпрацьованого тепла викидних газів дизельних ДВЗ нафтогазового технологічного транспорту, щоб оцінити їх придатність для систем рекуперації тепла відпрацьованих газів.

Це буде зроблено шляхом досягнення таких завдань: створити модель дизельного двигуна на GT-SUITE; створити моделі систем TEG, ORC і $s\text{CO}_2$ на GT-SUITE та симулювати ці системи за допомогою моделі дизельного двигуна; порівняти отримані результати моделювання, описаних у відповідній літературі, щоб дійти висновку, яка з технологій є найбільш прийнятною для систем рекуперації тепла відпрацьованих газів ДВЗ нафтогазового технологічного транспорту.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Загальна методологія моделювання

Ця робота була виконана з використанням програмного забезпечення GT-SUITE. Це спеціалізоване програмне забезпечення для симуляції двигунів, трансмісії та транспортних за-

собів, комплексний набір інструментів для моделювання систем двигуна та автомобіля. Використовується майже всіма основними виробниками двигунів та транспортних засобів по всьому світу. Включає вбудовані 3D CAD, інструменти для оптимізації та навчання нейронної мережі. Поєднується з програмним забезпеченням для технічних обчислень MATLAB і Simulink для аналізу системи керування.

Симуляція GT-SUITE складається з набору бібліотек імітаційного моделювання – інструментів для аналізу циклів двигуна, процесів згоряння, силових агрегатів транспортних засобів, систем упорскування палива двигуна, клапанних механізмів, колінчастих валів, систем охолодження двигуна, систем змащення та ін. Дизельний двигун нафтогазового технологічного транспорту, а також системи WHR були створені та змодельовані на GT-SUITE.

Моделювання дизельних двигунів нафтогазового технологічного транспорту

Для цього дослідження використовувався двигун CATERPILLAR C12. Це 6-циліндровий 4-тактний дизельний двигун робочим об'ємом 12,0 л зі ступенем стиснення 17:1, з безпосереднім вприскуванням дизельного палива, електронним блоком керування ADEM, турбонаддувом, системою охолодження наддувального повітря (турбокомпресор з перепускною заслінкою). Це типові двигуни, які зараз використовуються на різних моделях нафтогазового технологічного транспорту ПАТ «Укрнафта». Загальну модель двигуна показано на рис. 1. Температури циліндрів двигуна вказані у таблиці 1 та можуть бути змінені для різних режимів його роботи.

Моделювання системи ORC

У цьому дослідженні прийнятий підхід дослідження непрямої інтеграції. Тут моделюється двигун окремо від моделі WHR. Спочатку моделюється модель дизельного двигуна. Після цього відповідні дані вставляються в окрему модель WHR і моделюються, щоб отримати відновлену системою потужність. Модель системи ORC, яку було створено для цього дослідження, зображено на рис. 2. 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 його вартість).

Після того, як модель ORC була завершена, потрібно було визначити параметри запуску. Остаточні параметри, визначені в налаштуванні для цього моделювання, наведені в таблиці 2. Тут «MFR» означає «масовий потік», а «VFR» – «об'ємний потік».

Останньою системою, яка тестується в цьому дослідженні, є система TEG, яку зображено на рис. 3. У цій моделі 10 елементів TEG розміщені на випускному колекторі двигуна. Кожен TEG термічно з'єднується зі стінками колектора таким чином, що в кожному TEG існує різниця температур. Різниця температур створює напругу в TEG, а, отже, і струм через приєднане зовнішнє електричне коло. Властивості викидних газів на вході (масовий потік викидних газів і температура) визначаються у налаштуваннях разом із тиском викидних газів на виході.

Результати та їх обговорення

Після завершення моделювання дизельного двигуна та систем утилізації відпрацьованого тепла були проаналізовані відповідні результати моделювання дизельного двигуна НГТТ. На рис. 4 показано ефективну потужність моделі дизельного двигуна для режимів навантажень від 1000 до 3000 об/хв. Можна побачити, що максимальна гальмівна потужність двигуна становить близько 305 кВт при швидкості компресора 1800 об/хв. Така величина потужності характерна для сучасних важких дизельних двигунів нафтогазового технологічного транспорту. Крім того, фактична форма кривої потужності та діапазон обертів, за яких вона створюється, ще більше підвищує точність моделі.

Нижче наведене апроксимаційне рівняння потужності Ne (кВт) від частоти обертання колінчастого вала n (об./хв.), отримане шляхом поліноміальної апроксимації 3-го ступеня:

$$Ne(n) = 8.06 \times 10^{-8} \cdot n^3 - 6.20 \times 10^{-4} \cdot n^2 + 1.51 \cdot n - 889.32 \quad (1)$$

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;

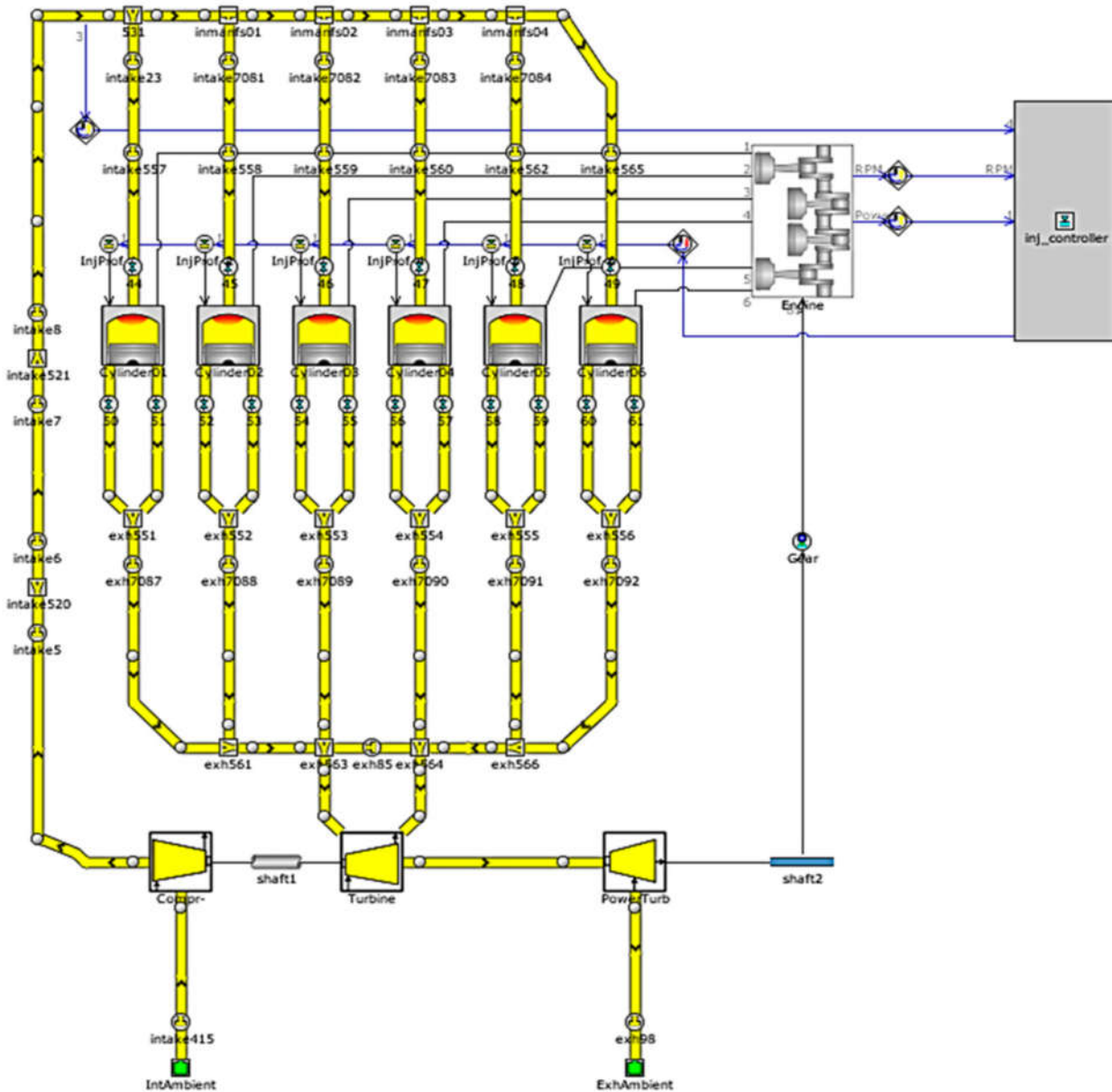


Рисунок 1 – Модель типового 4-тактного 6-циліндрового дизельного двигуна нафтогазового технологічного транспорту у GT-SUITE

Таблиця 1 – Технічні характеристики дизельного двигуна для важких навантажень, змодельовані в GT-SUITE

Параметр	Значення
Тип двигуна	6-циліндровий 4-тактний дизельний двигун робочим об'ємом 12,0 л, з турбонаддувом
Ступінь стиснення	17:1
Діаметр x хід поршня, мм	119 × 175
Максимальна потужність, кВт)	305 при 1800 об/хв.
Максимальний крутний момент, Н·м)	1540 при 1400 об/хв.
Порядок роботи циліндрів двигуна	1-5-3-6-2-4
Температура поршня, К	610
Температура головки, К	580
Температура циліндра, К	470

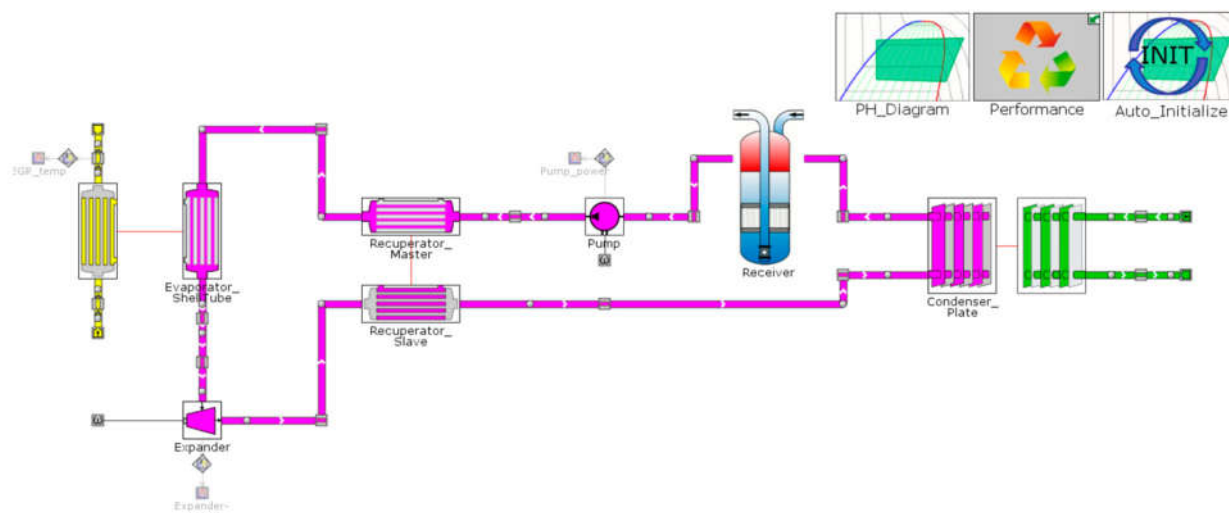


Рисунок 2 – Схема моделі системи ORC і компонування компонентів у GT-SUITE

Таблиця 2 – Остаточні обрані параметри для моделі системи ORC на GT-SUITE

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Швидкість компресора, об/хв.	2000	2200	2400
MFR викидних газів, кг/с	0,1369	0,3235	0,4770
Температура викидних газів на вході, К	655,6	711,8	783,9
Охолоджуюча рідина конденсатора VFR, л/хв	180	190	200
Температура теплоносія на вході, °C	26,85	26,85	26,85
Початкова температура холодоагенту, °C	20	20	20

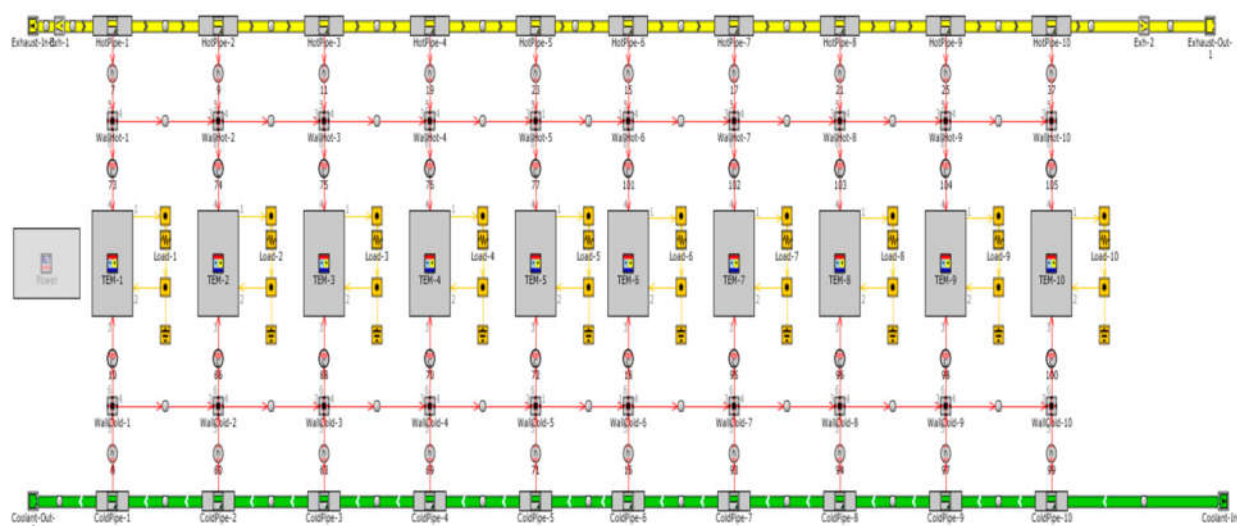


Рисунок 3 – Модель системи TEG в GT-SUITE

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

На рис. 5 показано масову швидкість потоку викидних газів для діапазону від 1000 до 3000 об/хв.

Нижче наведене апроксимаційне рівняння витрати повітря G (кг/с) залежно від частоти обертання n (об./хв.), отримане як поліном 2-го ступеня:

$$G(n) = -1.40 \times 10^{-7} \cdot n^2 + 7.97 \times 10^{-4} \cdot n - 0.521. \quad (2)$$

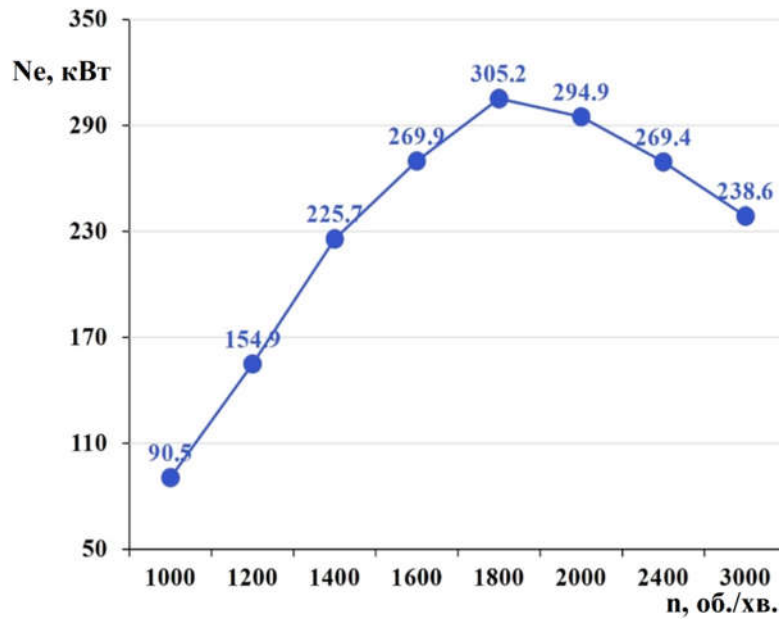


Рисунок 4 – Крива залежності потужності дизельного двигуна N_e (кВт) від частоти обертання колінчастого вала двигуна n (об/хв.)

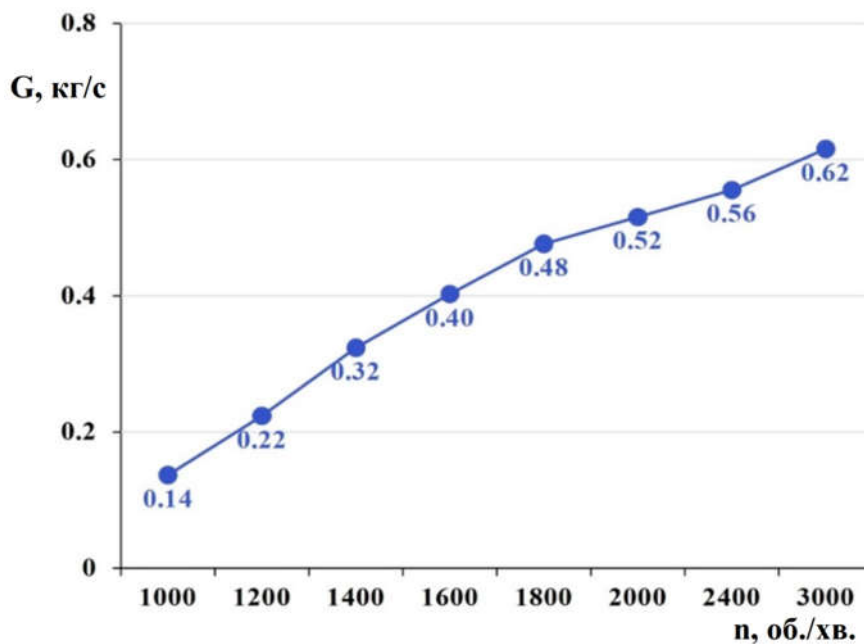


Рисунок 5 – Залежність масової витрати викидних газів G (кг/с) від частоти обертання колінчастого вала двигуна n (об/хв.)

Результати обробки

На рис. 6 показано потужність турбіни, отриману для обраних режимів досліджень. Зауважимо, що в усіх симуляціях WHR варіант № 1 представляє режим низької потужності та крутного моменту, варіант № 2 — режим максимального крутного моменту, а варіант № 3 — режим максимальної потужності. З розрахунків випливає, що при 1000 об/хв. система ORC виробляла 3,3 кВт потужності. Крім того, у точці максимального крутного моменту сис-

тема ORC могла виробляти 7,9 кВт потужності. Нарешті, у точці максимальної потужності система ORC виробляла 14,7 кВт потужності. Ці результати подібні до попередніх досліджень, проведених на подібних двигунах, таких як експеримент Тенга [12] на дизельному двигуні Cummins ISX і моделювання ORC Ціпаллоне [11] на дизельному двигуні робочим об'ємом 10,3 л та потужністю 316 кВт з турбонаддувом (як обговорювалося раніше в огляді літератури).

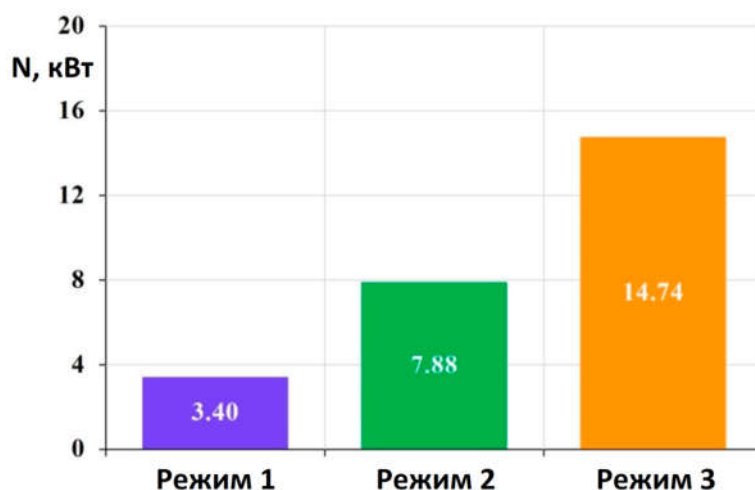
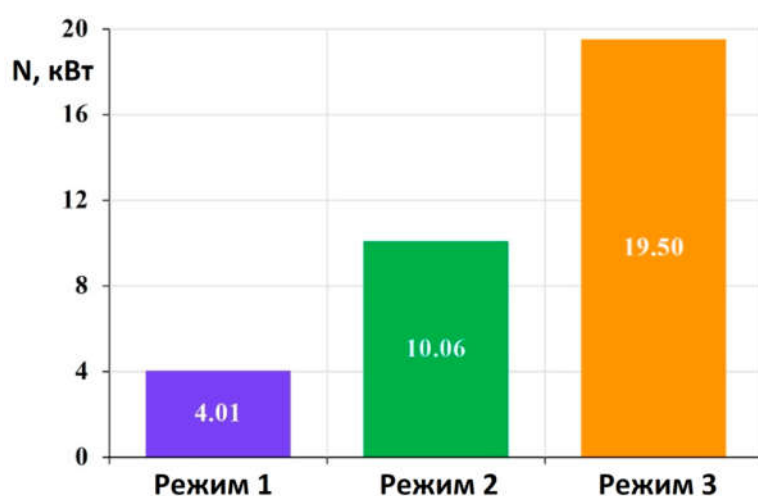


Рисунок 6 – Залежність вихідної потужності турбіни ORC (кВт) від режиму

Рисунок 7 – Вихідна потужність турбіни sCO₂ (кВт) залежно від режиму

Ці результати належать до діапазону моделювання, який згадано в [16], коли проводився широкий аналіз всіх досліджень ORC WHR. Тому можна бути досить впевненим в результатах моделі ORC, створеної на GT-SUITE, оскільки вона значною мірою підтримується попередньою літературою та є хорошою робочою моделлю. Ефективність системи ORC сильно залежить від обраної робочої рідини. У цьому дослідженні робочою рідиною було обрано фреон R245fa. Це пов'язано з тим, що він добре зарекомендував себе як робоча рідина з багатьма бажаними властивостями для застосувань ORC. Наприклад, він не має впливу на створення озону, має низький потенціал глобального потепління, він негорючий і має необхідні термодинамічні властивості.

На рис. 7 показано вихідну потужність турбіни для системи sCO₂ у вибраних режимах. У точці низької потужності та крутного моменту (1000 об/хв) система sCO₂ виробляла 4,1 кВт потужності. При 1400 об/хв (максима-

льний крутний момент) система виробляла 10,1 кВт потужності. Нарешті, у точці максимальної потужності (1800 об/хв.) система виробляла 19,5 кВт. Порівняно з результатами системи ORC ми бачимо, що в кожній точці досліджень система sCO₂ виробляла більше енергії. Це пояснюється тим, що системи sCO₂ мають вищу ефективність, ніж системи ORC, що видно з результатів цього моделювання.

На рис. 8 зображено загальну вихідну потужність усіх 10 ТЕГ. При 1000 об/хв. система виробляла 7 Вт потужності. При 1400 об/хв. система виробляла 126 Вт потужності. Нарешті, при 1800 об/хв. система виробляла 533 Вт потужності. У порівнянні з системами ORC і sCO₂, загальна потужність, вироблена системою ТЕГ, значно менша. Це тому, що ТЕГи мають дуже низький ККД. Що стосується моделі, ми можемо бути впевнені, що модель, створена на GT-SUITE, є репрезентативною для поточної технології ТЕГ, оскільки резуль-

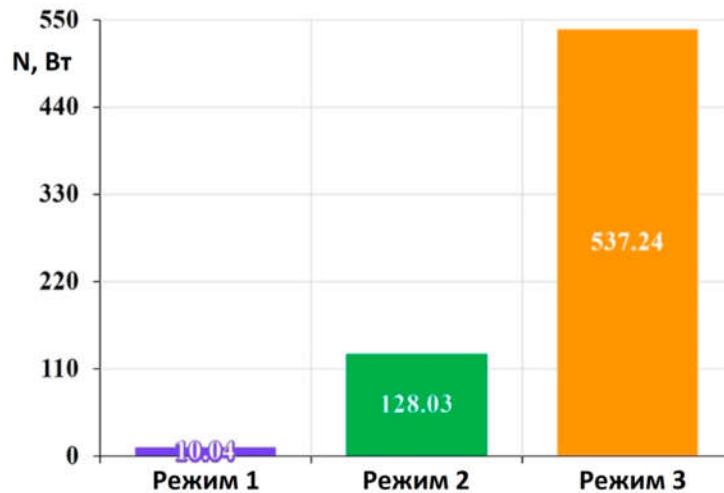


Рисунок 8 – Вихідна потужність системи TEG (Вт) залежно від режиму

тати моделювання дуже схожі на інші дані в літературі.

Загалом, з результатів дослідження всіх трьох систем можна встановити, що найкращими системами, які будуть оптимальними з точки зору застосування утилізації відпрацьованого тепла викидних газів для важких дизельних двигунів, є системи ORC і sCO_2 . Ці дві системи мають значно вищу ефективність, ніж TEG, і тому рекуперують набагато більше енергії з викидних газів. Крім того, системи sCO_2 мають додаткову перевагу, оскільки є більш компактними завдяки вищому робочому тиску системи.

Висновки

В даній статті було досліджено потенціал систем ORC, sCO_2 і TEG для використання у дизельних двигунах нафтогазового технологічного транспорту з огляду на максимальні можливості утилізації викидних газів. На цих системах було проведено низку симуляцій та досліджень для застосування на дизельних двигунах нафтогазової галузі. Результати моделювання показали, що системи sCO_2 здатні рекуперувати найбільшу кількість енергії з ви-

кидних газів. За ними слідують системи ORC.

Система sCO_2 відновила 19,5 кВт на режимі максимальної ефективної потужності та 10,1 кВт у режимі максимального крутного моменту. Так само система ORC відновила 14,7 кВт у режимі максимальної гальмівної потужності та 7,9 кВт у режимі максимального крутного моменту. Крім того, у режимі низької потужності та крутного моменту система sCO_2 відновила 4,2 кВт потужності, а система ORC відновила 3,3 кВт. Система TEG виробляла значно меншу потужність (533 Вт при максимальній потужності гальмування, 126 Вт при максимальному крутному моменті та 7 Вт при низькій потужності та крутному моменті) на всіх трьох режимах через низьку ефективність системи порівняно з системами ORC та, особливо, sCO_2 .

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Song J., Ren X.-D., Gu C.-W. Investigation of EngineWaste Heat Recovery Using Supercritical CO₂ (S-CO₂) Cycle System. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air; American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA, 2018; Vol. 51180, p. V009T38A014.
2. 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. *J. Combust.* 2012, 2012, 504590.
3. 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, 14, 1638.

4. Mehranfar S., Gharehghani A., Azizi A., Mahmoudzadeh Andwari A., Pesyridis A., Jouhara H. Comparative assessment of innovative methods to improve solar chimney power plant efficiency. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2022, 49, 101807.
5. Guo J.-Q., Li M. J., He Y. L., Jiang T., Ma T., Xu J. L., Cao F. A systematic review of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle for energy industries: Technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Convers. Manag.* 2022, 258, 115437.
6. White M. T., Bianchi G., Chai L., Tassou S. A., Sayma A. I. Review of supercritical CO₂ technologies and systems for power generation. *Appl. Therm. Eng.* 2021, 185, 116447.
7. Kim S. C., Won J. P., Kim M. S. Effects of operating parameters on the performance of a CO₂ air conditioning system for vehicles. *Appl. Therm. Eng.* 2009, 29, 2408–2416.
8. 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, 123, 305–312.
9. Mahmoudi A., Fazli M., Morad M. A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. *Appl. Therm. Eng.* 2018, 143, 660–675.
10. Teng H., Regner G., Cowland C. Achieving High Engine Efficiency for Heavy-Duty Diesel Engines by Waste Heat Recovery Using Supercritical Organic-Fluid Rankine Cycle; SAE Technical Paper, 0148-7191; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2006.
11. Cipollone R., Di Battista D., Perosino A., Bettoja F. Waste Heat Recovery by an Organic Rankine Cycle for Heavy Duty Vehicles; SAE Technical Paper, 0148-7191; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2016.
12. Teng H., Klaver J., Park T., Hunter G. L., van der Velde B. A Rankine Cycle System for Recovering Waste Heat from HD Diesel Engines—WHR System Development; SAE Technical Paper, 0148-7191; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2011.
13. Laouid Y.A.A., Kezrane C., Lasbet Y., Pesyridis A. Towards improvement of waste heat recovery systems: A multi-objective optimization of different organic Rankine cycle configurations. *SAE Int. J. Thermofluids.* 2022, 11, 100100.
14. Nawi Z. M., Kamarudin S., Abdullah S. S., Lam S. The potential of exhaust waste heat recovery (WHR) from marine diesel engines via organic rankine cycle. *Energy.* 2019, 166, 17–31.
15. Mondejar M., Andreasen J., Pierobon L., Larsen U., Thern M., Haglind F. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 91, 126–151.
16. Xu, B., Rathod D., Yebi A., Filipi Z., Onori S., Hoffman M. A comprehensive review of organic rankine cycle waste heat recovery systems in heavy-duty diesel engine applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 107, 145–170.
17. Kumar S., Heister S. D., Xu X., Salvador J. R., Meisner G. P. Thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems part II: Parametric evaluation and topological studies. *J. Electron. Mater.* 2013, 42, 944–955.
18. Lan S., Li Q., Guo X., Wang S., Chen R. Fuel saving potential analysis of bifunctional vehicular waste heat recovery system using thermoelectric generator and organic Rankine cycle. *Energy.* 2023, 263, 125717.

RESEARCH INTO THE POTENTIAL OF USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE SYSTEMS IN DIESEL ENGINES OF OIL AND GAS TECHNOLOGICAL TRANSPORT

Kryshtopa S. I.

Dr of Technical Sciences, professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-1880-9505>

e-mail: sviatoslav.kryshtopa@nuing.edu.ua

Kryshtopa L. I.

Candidate of Technical Sciences, associate professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5274-0217>
e-mail:

Semianchuk A. I.

Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-3664-7716>
e-mail: andrii.semianchuk-a13324@nung.edu.ua

Kozak F. V.

Candidate of Technical Sciences, professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9147-883X>
e-mail: fedir.kozak@nung.edu.ua

Soliarchuk I. M.

Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-0639-0364>
e-mail: ivan.soliarchuk-a13324@nung.edu.ua

Grishtor T. T.

Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-4122-9784>
e-mail: taras.grishtor-a13324@nung.edu.ua

Abstract. This article addresses the issue of enhancing the economic efficiency of power drives employed in the oil and gas industry. It proposes the use of supercritical carbon dioxide (sCO₂) cycles as a promising approach to modernising power equipment. Modern research and publications on this topic, both foreign and domestic, are analysed. Several unresolved issues related to the practical implementation of sCO₂ technology in the oil and gas industry are identified. The article therefore further investigates the potential of sCO₂ systems, organic Rankine cycle (ORC) systems and thermoelectric generator (TEG) systems for use in waste heat recovery (WHR) systems in oil and gas processing and transportation. Modelling results show that sCO₂ systems can recover the most energy from oil and gas process transport exhaust gases, followed by ORC systems. According to the calculations, the sCO₂ system recovered 19.5 kW at the maximum power point and 10.1 kW at the maximum torque point. Under the same conditions, the ORC system recovered 14.7 kW at the maximum power point and 7.9 kW at the maximum torque point. Additionally, at the low power and torque point, the sCO₂ system recovered 4.2 kW, while the ORC system recovered 3.3 kW. The TEG system produced significantly less power (533 W at maximum braking power, 126 W at maximum torque and 7 W at low power and torque) at all three points due to its low efficiency compared to the sCO₂ and ORC systems. It can therefore be concluded that the sCO₂ and ORC systems have the greatest potential impact on exhaust WHR systems. The prospects of using supercritical carbon dioxide cycles to increase the economic performance of power drives in the oil and gas industry are discussed.

Key words: oil and gas process transport; waste heat recovery; diesel engine; supercritical carbon dioxide; sCO₂; organic Rankine cycle; ORC; thermoelectric generator; fuel economy; fuel efficiency.