

Г. С. ВОРОБІЙОВА

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## ОГЛЯД І БІБЛІОМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДКРИТИЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦИКЛІВ CO<sub>2</sub>. ПОТОЧНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК

**Предметом** вивчення в статті є надкритичні цикли, які працюють у області критичної точки двоокису вуглецю. Останні десятиліття характеризуються зростанням інтересу до досліджень підвищення ефективності роботи цих циклів. **Метою** цієї роботи є бібліометричний аналіз на базі даних Scopus (2001-2024) та огляд основних тенденцій, пов'язаних з надкритичними циклами, які працюють у області критичної точки двоокису вуглецю. **Завданням** є комплексний огляд продуктивності досліджень, впливу та тенденцій у дослідженні надкритичні цикли з двоокисом вуглецю за останні два десятиліття, надаючи корисну інформацію для стратегічного планування досліджень. У якості **методів** використовувалася база даних Scopus завдяки великій колекції документів. Огляд робіт тривав з 2001 по 2024 роки, охоплюючи значний часовий проміжок досліджень у цій галузі. Пошук літератури було проведено за певним запитом: "Supercritical", "Cycle", "Carbon dioxide", "Equation of State", "Energy Cycle". **Результати** показують зростаючий дослідницький інтерес до цієї сфери, головним чином на чолі зі Сполученими Штатами, Китаєм, Сполученим Королівством, Канадою, Італією та Німеччиною. Охоплюючи різноманітні галузі, такі як інжиніринг, енергетика, навколишнє середовище та інші, це дослідження заглиблюється в такі технічні сфери, як надкритичні цикли з двоокисом вуглецю та рівняння стану реального газу, які дозволяють моделювати потік робочого тіла у контурі стискування. **Висновки.** Бібліометричний аналіз, представлений у роботі, пропонує інформацію про еволюцію досліджень надкритичних циклів двоокису вуглецю та рівнянь стану реального газу у метастабільній області двоокису вуглецю як з академічної, так і з промислової точки зору. Досліджуючи галузевий контекст і взаємозв'язок між отриманими результатами та сферою діяльності ключових журналів, цей аналіз висвітлює важливість отриманих результатів та їх практичне значення. Нові теми, визначені за допомогою аналізу ключових слів, можуть стимулювати планування науково-дослідних робіт у науковому сегменті. Таким чином, це комплексне бібліометричне дослідження служить незалежною довідкою для прогнозування та моніторингу технологій.

**Ключові слова:** надкритичні цикли двоокису вуглецю; двоокис вуглецю; енергетичні цикли; рівняння стану реального газу; огляд літератури; бібліометричний огляд.

### Вступ

Робота висвітлює галузь надкритичних циклів CO<sub>2</sub> (S-CO<sub>2</sub>), які знайшли застосування в енергетичному машинобудуванні, завдяки яким можна отримати високу ефективність у широкому діапазоні температури та тиску. Крім того, цикли S-CO<sub>2</sub> мають можливість працювати у діапазоні критичної точки. Деякі контури можуть працювати в рідкій та двофазній фазах, максимально наближених до критичної точки. Серед переваг використання таких циклів слід відзначити компактність контурів, що дозволяє знизити вартість виробництва [1]. У діапазоні критичної точки у газовому середовищі може відбуватися конденсація, а в рідкому – кавітація. Краплі конденсату на робочому колесі можуть ще більше погіршити продуктивність компресора або спричинити ерозію. Кавітація може генерувати велику кількість бульбашок, і бульбашки займають

більшу частину каналу, що призводить до блокування. Крім того, температура та тиск рідини S-CO<sub>2</sub> можуть опуститися нижче критичної точки та пройти через лінію насичення, що спричинить зміну фази під час запуску-зупинки компресора та непроектованих налаштувань. Основною проблемою є моделювання таких процесів течії у компресорі у трьохвимірному просторі. Найбільшою складністю є опис коливань температури та густини в фазових переходах та в регіоні біля критичної точки. Як правило, комерційні програмні пакети використовують стандартні моделі, які дають незадовільні результати для розрахунків із фазовими переходами або в чистому середньому середовищі реального газу. Альтернативним варіантом є імпортування моделі реального газу з використанням кросплатформної інтеграції кількох розрахункових пакетів високого рівня. Для таких цілей, наприклад, використовуються NIST RefPROP або CoolPROP, проте в області критичної точки ре-

зультати залишаються незадовільними. Таким чином, моделювання фазових переходів, опису рідкої фази реального газу та околиці критичної точки з прийнятою точністю є актуальною задачею.

Надкритичні цикли CO<sub>2</sub> – це напрямок технологій виробництва електроенергії [2], яка пропонує численні переваги в ряді енергетичних програм, включаючи викопне паливо, тепло, сонячну, морську енергію, біомасу та ядерну енергію. Команда під керівництвом Інституту газових технологій (GTI), Південно-Західного дослідницького інституту (SwRI) та General Electric Global Research (GE) ініціювала проект з проектування, будівництва, введення в експлуатацію та експлуатації універсальної та реконфігурованої установки надкритичного двоокису вуглецю. Проект під назвою STEP Demo (Supercritical Transformational Electric Power) є одним із наймасштабніших і найкомплексніших у світі. Ключовим проектом є забезпечення сучасної продуктивності силового циклу S-CO<sub>2</sub> за високих температур від підтвердження концепції до прототипу системи, перевіреного в операційній системі.

Швидкий розвиток промисловості призвів до екстенсивного споживання викопного палива, спричинивши різке зростання рівня CO<sub>2</sub> в атмосфері [3]. Викиди CO<sub>2</sub> в Китаї досягли  $10,87 \times 109$  тон у 2021 році, що становить близько 31 % загальносвітових викидів CO<sub>2</sub>. Основні джерела викидів CO<sub>2</sub> включають вугільні електростанції, металургійну та цементну промисловість. Двоокис вуглецю є головним фактором глобального потепління та створює серйозну загрозу для Землі. Очищений CO<sub>2</sub> можна переробити для отримання комерційно цінних продуктів, або закачати в глибокі геологічні резервуари для зберігання. Зберігання CO<sub>2</sub> є важливою технологією для широкого впровадження та просування великомасштабних ініціатив [4].

S-CO<sub>2</sub> цикли також широко використовуються у технологіях видобутку корисних копалин. Ефективність вугільного циклу Брейтона (SCBC) із надкритичним CO<sub>2</sub> можна підвищити шляхом використання відпрацьованого тепла від охолодження S-CO<sub>2</sub> і димових газів, яке наразі залишається в основному невикористаним. У статті [5] пропонується два типи утилізації відпрацьованого тепла. Перший метод передбачає використання органічного циклу Ренкіна (ORC) для генерації додаткової енергії, тоді як другий метод використовує абсорбційний цикл охолодження для подальшого охолодження S-CO<sub>2</sub> на вході компресора та, таким чином, зменшує споживання електроенергії на стиснення. Енергетично-економічно-екологічні багатокритеріальні моделі сформульовані для доступу до продуктивності вищезгаданих проектів і порівняння їх з автономною системою рекомпресійного циклу S-CO<sub>2</sub> Brayton

(автономна система). Результати показують, що система досягає максимальної теплової ефективності і мінімального навантаження на навколишнє середовище, тоді як система досягає мінімальної нормованої вартості електроенергії.

Метою цієї роботи є бібліометричний аналіз на базі даних Scopus (2001-2024) та огляд основних тенденцій, пов'язаних з надкритичними циклами, які працюють у області критичної точки двоокису вуглецю.

## Матеріали та методи

Цей розділ містить детальне пояснення методології, яка використовується для проведення огляду літератури та формування бібліометричного аналізу. Базу даних Scopus було обрано як основну базу даних для цього дослідження завдяки великій колекції документів. Огляд тривав з 2001 по 2024 роки, охоплюючи значний часовий проміжок досліджень у цій галузі. Пошук літератури було проведено за певним запитом: “Supercritical”, “Cycle”, “Carbon dioxide”, “Equation of State”, “Energy Cycle”. Пошук за цими ключовими словами здійснювався в полях заголовка, анотації та ключових слів документів. Востаннє доступ до пошуку лютого 2024. Було обмежено аналіз журналів, де публікувалися документи лише англійською мовою. Отримані результати були проаналізовані для визначення тенденцій і кількості робіт, класифікованих за типом журналу, тематикою та країнами. Крім того, для візуалізації зв'язків між країнами, журналами та ключовими словами отримані результати були графічно представлені за допомогою інструментів для аналізу Scopus.

## Результати та обговорення

Розділ містить бібліометричний аналіз та детальний огляд літератури.

На рисунку 1 відображено розподіл робіт по обраним темам за значний проміжок часу. Аналіз даних показує, що тема надкритичних циклів з двоокисом вуглецю майже лінійно зростала з 2007 року до 2017 року, набирає найбільшу активність з 2020 року та продовжує розвиватися і надалі.

Найбільша зацікавленість у темі надкритичних циклів двоокису вуглецю (рисунк 2) розподілена між енергетичною сферою (21,1%) та сферою інжинірингу (23,6%). Галузь хімічної інженерії (12,5%) та наука про навколишнє середовище (10,3%) також займають важливе місце у дослідженнях надкритичних циклів з двоокисом вуглецю. Підводячи підсумок, головні предметні категорії підкреслюють між-

дисциплінарний характер досліджень надкритичних циклів з двоокисом вуглецю, причому галузі, орієнтовані на енергетику, інжинірингу, хімічна інженерія та навколишнє середовище, виділяються найбільш помітними на основі обсягів публікацій у проаналізованій літературі.

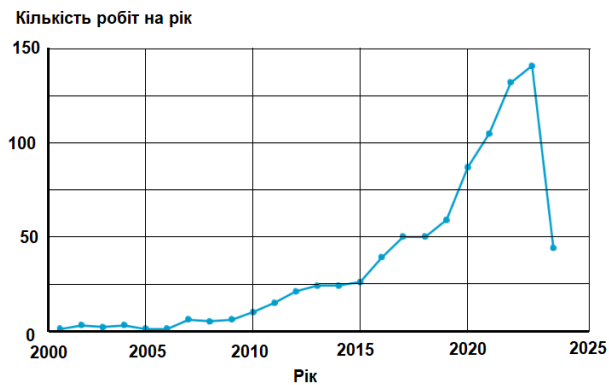


Рис. 1. Розподіл документів по темі надкритичних циклів двоокису вуглецю з 2001 до лютого 2024



Рис. 2. Аналіз документів по сфері застосовності

Було проведено аналіз п'яти найбільших джерел для публікацій, пов'язаних з дослідженнями надкритичних циклів з двоокисом вуглецю. Як показано на рисунку 3, переважна кількість документів була представлена та опублікована у джерелах the ASME Turbo Expo, Energy, Applied Thermal Engineering. Це відповідає важливості технології в енергетичній сфері.

Представлені журнали в основному висвітлювали теми перетворення енергії та термодинаміки, що відображає міждисциплінарний характер досліджень. Загалом цей розподіл джерел підтверджує, що дослідження надкритичних циклів з двоокисом вуглецю публікуються як у загальних енергетичних, так і в спеціалізованих технічних журналах.

Аналіз по країнам, де проводиться найбільша кількість досліджень надкритичних циклів з двоокисом вуглецю, зображено на рисунку 4. Три перших

місця зі значним відривом займають Китай та США, а також Великобританія.

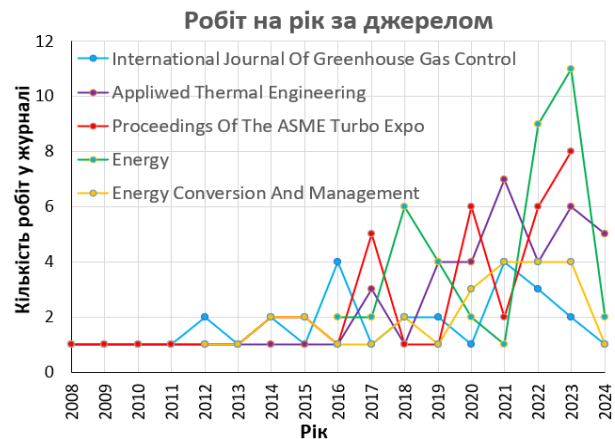


Рис. 3. Аналіз документів по джерелам



Рис. 4. Аналіз розповсюдження документів по країнам

Успішна реалізація енергетичних надкритичних циклів  $\text{CO}_2$  вимагає високої ефективності компресора як у проектній точці, так і в широкому робочому діапазоні, щоб максимізувати потужність циклу та підтримувати стабільну роботу перехідних процесів і умов роботи з частковим навантаженням. Ця вимога особливо актуальна для циклів з повітряним охолодженням, де густина на вході у компресор має значну залежність від температури на вході, яка піддається щоденним і сезонним коливанням, а також перехідним процесам [6].

Також у цьому [7] документі вперше представлено огляд технології компактних теплообмінників для застосування в енергетичному циклі надкритичного двоокису вуглецю, щоб забезпечити цілісне розуміння проектування енергетичної системи та вибору відповідних теплообмінників.

Це пов'язано з тим, що компактний теплообмінник відіграє ключову роль у системі живлення  $\text{S-CO}_2$  циклу, займаючи невелику площу та зберігаючи структурну цілісність. Цикл Брайтона з надкритич-

ним двоокисом вуглецю ( $S\text{-CO}_2$ ) обіцяє вищу ефективність і нижчі капітальні витрати, ніж традиційні парові енергетичні цикли Ренкіна. Однак для досягнення високої ефективності потрібні великі високо-ефективні рекуператори. Регенератори можуть бути недорогою альтернативою теплообмінникам із друкованими схемами та мікротрубками для рекуперації в енергетичних циклах  $S\text{-CO}_2$ . Регенератори - це періодичні теплообмінники, в яких теплова енергія витягується з гарячого потоку, зберігається в твердому середовищі, а потім передається в холодний потік [8]. Надкритичні енергетичні цикли  $S\text{-CO}_2$  вважаються більш ефективним засобом заміни парового циклу Ренкіна у виробництві електроенергії. Однак компресори  $\text{CO}_2$  для цього застосування не були добре розроблені. Було досліджено вплив температури на вході та тиску поблизу критичної точки на продуктивність компресора. Результати показують, що зміни температури на вході та тиску поблизу критичної точки мають великий вплив на продуктивність компресора [9]. Технологія циклу  $S\text{-CO}_2$  адаптована майже для всіх існуючих джерел тепла, таких як сонячна, геотермальна, викопна енергія, атомні електростанції та системи рекуперації відпрацьованого тепла. Однак відомо, що оптимальні поєднання умов роботи, обладнання, робочої рідини та схеми циклу визначають максимальну ефективність циклу. У циклі  $S\text{-CO}_2$  пристрій для стиснення має вирішальне значення, оскільки він працює поблизу критичної точки  $\text{CO}_2$ . Проте поблизу критичної точки теплофізичні властивості  $\text{CO}_2$  дуже чутливі до змін тиску та температури. Тому умови  $\text{CO}_2$  на вході компресора є критичними при проектуванні таких циклів [10]. Відцентровий компресор, умови на вході якого близькі до критичної точки  $\text{CO}_2$ , щоб отримати найвищу ефективність циклу, був розроблений з використанням спеціальних моделей рівноваги та рівняння стану, щоб належним чином враховувати області фазових змін і сильні градієнти термодинамічних властивостей. Що стосується розширювача, у документі [11] буде описано, як умови на вході (тиск і температура) становлять конкретні проблеми, зокрема для механічної конфігурації та безпечної роботи ключових компонентів, таких як сухі газові ущільнення (DGS), для яких проводився спеціальний термічний аналіз. Документ [11] завершується міркуваннями щодо вибору конструкції для турбомашин, зроблених для покращення працездатності повного циклу навіть у непроектованих умовах, таких як можливі коливання мінімальної та максимальної температур  $\text{CO}_2$  через зовнішні фактори.

У статті [12] спроектований відцентровий компресор  $S\text{-CO}_2$ . Для опису процесу контуру використовують моделі рівнянь стану реального газу, а також моделі фазових переходів. Найбільшою

складністю є опис коливань температури та густини в фазових переходах та в регіоні біля критичної точки. Як правило, комерційні програмні пакети використовують стандартні моделі, які дають незадовільні результати для розрахунків із фазовими переходами або в чистому середньому середовищі реального газу. Альтернативним варіантом є імпортування моделі реального газу з використанням кросплатформної інтеграції кількох розрахункових пакетів високого рівня. Для таких цілей, наприклад, використовуються NIST RefPROP або CoolPROP, проте в області критичної точки результати залишаються незадовільними. Таким чином, моделювання фазових переходів, опису рідкої фази реального газу та околиці критичної точки з прийнятною точністю є актуальною задачею.

Надкритичний  $\text{CO}_2$  цикл Аллама [13] має високу ефективність при проміжних температурах завдяки високій швидкості стиснення в надкритичному режимі [14]. У [15] розроблено платформу тестового контуру потужністю 1 МВт для циклів  $S\text{-CO}_2$  в рамках програми SunShot, що фінансується Міністерством енергетики США, і з 2015 року було досягнуто значних успіхів у проектуванні рівня компонентів та експериментальних випробуваннях турбомашин  $S\text{-CO}_2$ , таких як дизайн компресора Rinaldi та ін. [16], який використовував прототип Sandia Labs 250 kW як приклад перевірки [17]. Хосаганді та ін. виконали аналіз у режимі on- і off-design за допомогою спеціального розв'язувача обчислювальної гідродинаміки (CFD), щоб зафіксувати певні характеристики  $S\text{-CO}_2$  [18]. У роботі [19] представили конструкцію радіального входного та осевого вихідного колектора до осевої турбіни. Проте конструкція та випробування НРТ для циклів  $S\text{-CO}_2$  все ще мало задокументовані, за винятком дизайну середньої лінії [20] та дизайну радіальних турбін; у [21] оптимізували турбіну з радіальним входом  $S\text{-CO}_2$  на основі одновимірної конструкції, а у [22] використовували Ansys Fluent і глибоку нейронну мережу для оптимізації конструкції радіальної турбіни  $S\text{-CO}_2$  потужністю 8 МВт [23].

Введення надкритичного двоокису вуглецю як робочої рідини може підвищити виробництво електроенергії в циклах Брайтона. Однак при проектуванні та розробці стабільного відцентрового компресора  $S\text{-CO}_2$  на циклі Брайтона виникають різні проблеми. У цій статті представлено одновимірне проектування та процедуру розробки для  $S\text{-CO}_2$  відцентрових компресорів, придатних для енергоциклів Брайтона. Підхід до проектування 1-D компресора використовує моделі внутрішніх і зовнішніх втрат для оптимізації конструкції компресора. Одновимірний проектний код перевірено моделюванням CFD та експериментальними даними. Крім того,

у документі розроблено, запропоновано та обговорено новий стабільний компресор для циклу Брайтона 10 MBt S-CO<sub>2</sub>. Базуючись на коді 1-D та результатах CFD, новий компресор демонструє покращений робочий діапазон. Результати CFD показали, що конденсація неминуча при роботі відцентрового компресора S-CO<sub>2</sub>; однак конденсація не впливає істотно на продуктивність компресора поблизу проектною точки [24].

В даний час широко визнана гіпотеза Відома про те, що вільна енергія рідини в околиці її критичної точки може бути виражена як функція двох термодинамічних змінних. Параметричне виявлення термодинамічної поведінки, яке автоматично задовольняє так само названим «законом масштабування», які впливають із гіпотези однорідності [25].

Особливості термодинамічних функцій рідин в їх критичних точках не можуть бути описані аналітичними, класичними кубічними рівняннями стану. Їх можна описати рівняннями масштабування, але вони точні лише поблизу критичної точки. Показано, що параметричну версію масштабованих рівнянь Шофілда можна комбінувати з аналітичними рівняннями таким чином, щоб забезпечити точне представлення термодинамічних функцій для всіх показників густини та температури. Метод продемонстрований для діоксиду вуглецю та метану. Результати незадовільні поблизу критичної точки, де вільна енергія Гельмгольца, тиск та інші функції не будуть аналітичними функціями і це є недостатньо якісним описом реальної ситуації. Відомо, що фактична поведінка поблизу критичної точки практично однакова для всіх рідин і добре описується масштабними рівняннями, які в даний час є в декількох варіантах для різних рідин. Ці рівняння використовуються тільки поблизу критичної точки, тому що їх форма абсолютно неприйнятна для інших густин і температур; наприклад, тиск не дорівнює нулю при нульовій густині [26]. Двопараметричні кубічні моделі використовують завдяки більшій точності обчислень при моделюванні як рідкої, так і парової фази при високих тисках [27]. Ці моделі також призначені для оцінки умов експлуатації поблизу критичних значень через великий розкид густини у цій області [28].

Перша спроба прогнозування поведінки рідкої та парорідкої фаз належить Ван-дер-Ваальсу. Це рівняння стану реального газу засноване на молекулярній взаємодії. Однак розбіжності між теоретичним методом рівняння Ван-дер-Ваальса та даними експериментів були значними. Модифікації оригінального рівняння стану Ван-дер-Ваальса, такі як рівняння Редліха-Квонга, рівняння Гуттенхайма, рівняння Пенга-Робінсона, дають деякі позитивні кількісні результати, але універсальний опис термо-

динамічних властивостей для реальних газів рідкої та двофазної області не було досягнуто. Адаптація Анг'є рівняння Редліха-Квонга дозволило уточнити розрахунки газової фази в двофазній області за допомогою включення до розрахунку коефіцієнта ацентричності та додаткового емпіричного коефіцієнта, що покращило розрахунок біля критичної точки [29]. Соаве, Вілсон [30] і Барнс-Кінг [31] раніше включали аналогічні емпіричні коефіцієнти до вихідного рівняння Редліха-Квонга. Неточності у оцінці тиску відносно параметрів робочого тіла досліджувалися для всіх чотирьох можливих формулювань рівняння Редліха-Квонга, наведених вище. Найменшу неточність мала модель, запропонована Анг'є. Як оригінальне рівняння Редліха-Квонга, так і модифікація Анг'є не мають таких обмежень, але модифікація Анг'є приблизно на 50 відсотків точніша щодо відхилень оригінального рівняння [31]. Поряд із попередніми рівняннями стану модифікація Анг'є, широко відома як рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, часто використовують у провідних програмах для моделювання течії робочого тіла. Інша група рівнянь стану, заснована на енергії Гельмгольца [32], більш точна в рідкій та двофазній області. Істотними недоліками цих рівнянь є велика кількість коефіцієнтів, складна форма рівняння та великі обчислювальні витрати.

Різкі зміни теплофізичних властивостей в околицях критичної точки приносять значний прискорюючий ефект на термодинамічні переходи рідини. У цьому дослідженні виконується обмежений геометричний дизайн із рідким CO<sub>2</sub>, що проходить через критичну зону в мікроканалі. Таке формулювання задачі поєднує рівняння Нав'є-Стокса щодо стисливості з формулюваннями різних властивостей для отримання ефектів біля критичної точки. Три рівняння стану (рівняння стану Ван-дер-Ваальса, рівняння стану Редліха-Квонга і Пенга-Робінсона) і відповідні їм термодинамічні співвідношення виводяться при розв'язанні рівнянь потоку та рівнянь теплопередачі.

У [33] дослідженні представлена транскритична модель мікротрубочок, що зображує рідкий CO<sub>2</sub>, що рухається у мікрокапілярі за межі критичного тиску та стінки за критичної температури. Вплив критичної точки на рідкий CO<sub>2</sub>, виявлено шляхом включення складових рівняння Нав'є-Стокса з критичними коефіцієнтами. Степеневий закон масштабування термодинамічних властивостей підкреслюється в трьох наближених рівняннях стану, спрямованих на візуалізацію сингулярної поведінки поблизу критичної області. Основні висновки цього дослідження такі:

- тиск зменшується лінійно (від 7,34 МПа до 7,42 МПа, перетинаючи критичне значення при

$x = 6,6$  см) у мікроканал. Однак швидкість, що обумовлена тиском, демонструє різкі градієнти (збільшення від 0,82 м/с до 0,97 м/с, що становить 55,6%) навколо критичної області. Ця зворотна поведінка між тиском і швидкістю вказує на сильне розширення рідини та набагато швидшу динаміку критичного прискорення потоку в критичній області;

- у критичній області відбувається різке падіння густини (з 502 кг/м<sup>3</sup> до 425 кг/м<sup>3</sup>) через сильне розширення рідини. Каскадний ефект між ослабленою радіальною теплопровідністю і посиленням розширення рідини у критичній області призводить до тенденції різкого переходу температури;

- подібно до потоку ідеального газу в капілярній трубці, потік Пуазейля є основною динамічною структурою з домінуючим в'язким тертям. Максимальна швидкість Пуазейля в критичній області (1,05 м/с у положенні  $x = 15, 21$  см) набагато вища, ніж в інших місцях (приблизно 0,75 м/с у  $x = 3, 9, 27$  см), підкреслюючи явище прискорення розширення в критичній області та дисбаланс між тиском, в'язкістю та інерційними (прискореними) силами;

- три асимптотичні наближені рівняння стану дали якісно подібні результати. Розбіжності в початкових густинах на вході були пов'язані з урахуванням коефіцієнта молекулярного притягання;

- питома теплоємність і коефіцієнти теплового розширення демонструють сильніші розбіжності в критичній області, що призводить до більш виражених коливань в критичній області.

Стан рівноваги пар-рідини CO<sub>2</sub> зазвичай з'являється в трубопроводах для його транспортування, системах охолодження та великомасштабних системах транскритичного циклу. Однак поведінка раптових витоків у таких системах залишається незрозумілою, що створює проблему для оцінки ризику витoku. Ця робота зосереджена на поведінці декомпресії двофазного CO<sub>2</sub> з різними об'ємними частками парових фаз у витoku з трубопроводу високого тиску, зокрема з розробкою моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) з нерівноважним фазовим переходом і моделі реального газу. Результати свідчать про те, що рівняння стану Пенга-Робінсона є більш консервативним у прогнозуванні ступеня перегріву, ніж рівняння стану Спан-Вагнера. Крім того, виявлено, що початкова об'ємна частка парової фази CO<sub>2</sub> відіграє вирішальну роль у визначенні характеристик раптового витoku, таких як тиск, температура та швидкість хвилі декомпресії як всередині, так і поза трубою [34].

Цикл Брайтона надкритичного діоксиду вуглецю (S-CO<sub>2</sub>) є важливою технологією виробництва електроенергії, яка пропонує потенційні переваги з точки зору ефективності циклу [35]. Як робоча рідина CO<sub>2</sub> має добру стабільність і добре зберігається.

У надкритичному стані CO<sub>2</sub> має велику питому теплоємність, велику стисливість, велику щільність, низьку в'язкість та інші властивості, які можуть значно зменшити роботу стиснення, а потім підвищити ефективність циклу [36]. Чим ближче умови на вході до критичної точки, тим вища продуктивність системи [37]. Однак, коли стан на вході компресора наближається до критичної точки, теплофізичні властивості CO<sub>2</sub> різко зміняться, значно відхилитимуться від ідеального газу та демонструватимуть сильний ефект реального газу [38]. З іншого боку, критичною точкою є кінець лінії насичення. Коли умови на вході компресора наближаються до критичної точки, кавітація та конденсація можуть виникнути в каналі лопаті робочого колеса через локальне прискорення потоку [39]. На рисунку 5 процеси зміни фази зображено на діаграмі тиск-температура. Робоче тіло ізентропічно розширюється від надкритичної області (точка А) до газової області (див. рисунок 5), а потім досягає лінії насичення (точка В). Зміна фази проявляється як конденсація, коли краплі утворюються в газовому середовищі. Конденсація не відбувається відразу після досягнення лінії насичення, а продовжує ізентропічно розширюватися у вигляді газу. Робоча рідина переходить у метастабільний стан, поки не досягне лінії Вільсона (точка D), де буде запущений процес спонтанного зародження [40]. Нарешті, рідина повернеться до рівноваги (точка E). Якщо конденсація є рівноважною, рідина конденсуватиметься вздовж лінії насичення (від точки В до точки С). Процес кавітації починається в надкритичних умовах (А'), які ближче до рідкої фази. Рідина також розширюється ізентропічно, проходить через область рідини та досягає лінії насичення (точка В'). Рідина має низьку стисливість, що призводить до невеликого перепаду температури і великого перепаду тиску. Рідина продовжує розширюватися до точки D', а потім виникає кавітація. Зміна фази зазвичай відбувається на стороні всмоктування. Конденсація і кавітація не відбуваються одночасно.

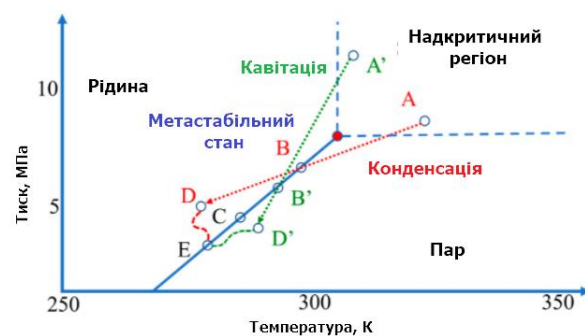


Рис. 5. Метастабільний стан та зміна фаз для двоокису вуглецю

У газовому середовищі відбувається конденсація, а в рідкому – кавітація. Краплі конденсату на лопаті робочого колеса можуть ще більше погіршити продуктивність компресора або спричинити ерозію [41].

Кавітація може генерувати велику кількість бульбашок, і бульбашки займають більшу частину каналу, що призводить до блокування [42]. Крім того, можливо, що температура та тиск рідини S-CO<sub>2</sub> опустяться нижче критичної точки та пройдуть через лінію насичення, що спричинить зміну фази під час запуску-зупинки компресора та непроектованих налаштувань. Було проведено кілька експериментів щодо потоку та зміни фази компресорів S-CO<sub>2</sub>. Дослідження національних лабораторій Sandia показали, що компресор S-CO<sub>2</sub> може стабільно працювати незалежно від того, в якій фазі перебувають умови входу [43]. У [44] вважається, що компресор може досягти довготривалої стабільної роботи за умов двофазного входу, який обмежений низькою швидкістю обертання. Попередні дослідження стосуються загальної продуктивності компресора і не дають чіткої картини специфічних характеристик внутрішнього потоку компресора S-CO<sub>2</sub>. Досі важко виміряти внутрішній потік за допомогою експериментів через малий розмір робочого колеса. Хоча деякі дослідження стверджують, що зміна фази мало впливає на продуктивність компресора, більшість досліджень розглядають потенційну двофазну роботу як високий ризик і не рекомендують її для високонадійних систем [45]. Таким чином, необхідно дослідити кількісний вплив майже критичної нерівноважної зміни фази на продуктивність відцентрового компресора S-CO<sub>2</sub> і надати теоретичні вказівки щодо розробки та стратегії експлуатації компресорів S-CO<sub>2</sub>.

## Висновки

Цей бібліометричний аналіз надав комплексний огляд тенденцій дослідження надкритичних циклів двоокису вуглецю та рівнянь стану для моделювання метастабільних процесів двоокису вуглецю у контуру стиснення, використовуючи набір даних з 2001 року по 2024 рік. Через міждисциплінарний вектор це дослідження підкреслило еволюцію дослідницьких тем, провідних співавторів і глобальне співробітництво в області надкритичних циклів двоокису вуглецю.

Бібліометричний аналіз, представлений у цьому дослідженні, пропонує інформацію про дослідження надкритичних циклів двоокису вуглецю та рівнянь стану реального газу у метастабільній області двоокису вуглецю як з академічної, так і з промислової точки зору. Досліджуючи галузевий кон-

текст і взаємозв'язок між отриманими результатами та сферою діяльності ключових журналів, цей аналіз проливає світло на важливість отриманих результатів та їх практичне значення.

Нові теми, визначені за допомогою аналізу ключових слів, можуть стимулювати планування науково-дослідних робіт у науковому сегменті. Таким чином, це комплексне бібліометричне дослідження служить незалежною довідкою для прогнозування та моніторингу технологій.

## Конфлікт інтересів

Авторка декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

## Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

## Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

## Використання засобів штучного інтелекту

Авторка підтверджує, що не використовувала технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Авторка прочитала та погодилася з опублікованою версією цього рукопису.

## Література

1. *Modeling and experimental results for condensing supercritical CO<sub>2</sub> power cycles [Text]* / S. A. Wright, T. M. Conboy, R. F. Radcliff, & G. E. Rochau // *Technical Report: No. SAND2010-8840*. – Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2011. – 46 p. DOI: 10.2172/1030354.
2. *Lock, A. Off-design operation of the dry-cooled supercritical CO<sub>2</sub> power cycle [Text]* / A. Lock, & V. Bone // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 251. – Article no. 114903. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114903.
3. *A review on carbon storage via mineral carbonation: Bibliometric analysis, research advances, challenge, and perspectives [Text]* / X. Lin, X. Li, H. Liu, G. Boczkaj, Y. Cao, & C. Wang // *Separation and Purification Technology*. – 2024. – Vol. 338. – Article no. 126558. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126558.
4. *Protonated amines mediated CO<sub>2</sub> mineralization of coal fly ash and polymorph selection*



of CaCO<sub>3</sub> [Text] / Y. Huang, X. Zheng, Y. Wei, Q. He, S. Yan, & L. Ji // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 450, Part 2. – Article no. 138121. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138121.

5. Multi-objective optimization of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles for coal-fired power generation with two waste heat recovery schemes [Text] / Y. Liang, W. Chen, X. Luo, J. Chen, Z. Yang, & Y. Chen // *Energy Conversion and Management*. – 2024. – Vol. 300. – Article no. 117962. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117962.

6. Experimental validation of a wide-range centrifugal compressor stage for supercritical CO<sub>2</sub> power cycles [Text] / T. C. Allison, N. R. Smith, R. Pelton, J. C. Wilkes, & S. Jung // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2019. – Vol. 141, iss. 6. – Article no. 061011. DOI: 10.1115/1.4041920.

7. Compact heat exchangers for supercritical CO<sub>2</sub> power cycle application [Text] / J. S. Kwon, S. Son, J. Y. Heo, & J. I. Lee // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 209. – Article no. 112666. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112666.

8. Simulation of the supercritical CO<sub>2</sub> recompression Brayton power cycle with a high-temperature regenerator [Text] / E. P. Reznicek, J. F. Hinze, G. F. Nellis, M. H. Anderson, & R. J. Braun // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Vol. 229. – Article no. 113678. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113678.

9. Design of a Supercritical CO<sub>2</sub> Compressor for Use in a 1 MWe Power Cycle [Text] / P. Jiang, B. Wang, Y. Tian, X. Xu, & L. Zhao // *ACS omega*. – 2021. – Vol. 6, iss. 49. – P. 33769-33778. DOI: 10.1021/acsomega.1c05023.

10. Effect of impurities on compressor and cooler in supercritical CO<sub>2</sub> cycles [Text] / L. Vesely, K. R. V. Manikantachari, S. Vasu, J. Kapat, V. Dostal, & S. Martin // *Journal of energy resources technology*. – 2019. – Vol. 141, iss. 1. – Article no. 012003. DOI: 10.1115/1.4040581.

11. Supercritical CO<sub>2</sub> Compressor and Expander Design for Industrial Waste-Heat Valorization [Text] / L. Toni, V. Bisio, A. Milani, D. Biliotti, E. F. Bellobuono, R. Valente, M. Dozzini, M. Bigi, & G. Generini // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. – American Society of Mechanical Engineers, 2023. – Vol. 12. – Article no. V012T28A016. DOI: 10.1115/GT2023-102558.

12. Operation and analysis of a supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle [Text] / S. A. Wright, R. F. Radel, M. E. Vernon, P. S. Pickard, & G. E. Rochau // *Technical Report: No. SAND2010-0171*. – Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010. DOI: 10.2172/984129.

13. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide [Text] / R. J. Allam, M. R. Palmer, G. W. Brown, J. Fetvedt, D. Freed, H. Nomoto, M. Itoh, N. Okita, & C. Jones

// *Energy Procedia*. – 2013. – Vol. 37. – P. 1135-1149. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.211.

14. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review [Text] / F. Crespi, G. Gavagnin, D. Sánchez, & G. S. Martínez // *Applied energy*. – 2017. – Vol. 195. – P. 152-183. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.048.

15. Development of 1 MWe supercritical CO<sub>2</sub> test loop [Text] / J. Moore, K. Brun, N. Evans, & C. Kalra // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. – American Society of Mechanical Engineers, 2015. – Vol. 9. – Article no. V009T36A015. DOI: 10.1115/GT2015-43771.

16. Computational fluid dynamic simulation of a supercritical CO<sub>2</sub> compressor performance map [Text] / E. Rinaldi, R. Pecnik, & P. Colonna // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2015. – Vol. 137, iss. 7. – Article no. 072602. DOI: 10.1115/1.4029121.

17. Operation and analysis of a supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle [Text] / S. A. Wright, R. F. Radel, M. E. Vernon, P. S. Pickard, & G. E. Rochau // *Technical Report: No. SAND2010-0171*. – National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010. DOI: 10.2172/984129.

18. Numerical Predictions of Mean Performance and Dynamic Behavior of a 10 MWe sCO<sub>2</sub> Compressor with Test Data Validation [Text] / A. Hosangadi, T. Weathers, J. Liu, R. Pelton, K. Wygant, & J. Wilkes // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2022. – Vol. 144, iss. 12. – Article no. 121019. DOI: 10.1115/1.4055532.

19. Radial inlet and exit design for a 10 MWe sCO<sub>2</sub> axial turbine [Text] / S. D. Cich, J. J. Moore, M. Marshall, K. Hoopes, J. Mortzheim, & D. Hofer // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. – American Society of Mechanical Engineers, 2019. – Vol. 9. – Article no. V009T38A005. DOI: 10.1115/GT2019-90392.

20. Uysal, S. C. Turbomachinery design of an axial turbine for a direct fired sCO<sub>2</sub> cycle [Text] / S. C. Uysal, & N. Weiland // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 267. – Article no. 115913. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115913.

21. Noall, J. S. Achievable efficiency and stability of supercritical CO<sub>2</sub> compression systems [Text] / J. S. Noall, & J. J. Pasch // *Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycle Symposium*. – Pennsylvania Pittsburgh, 2014. 12 p. – Available at: <https://sco2symposium.com/papers2014/turbomachinery/51PPT-Noall.pdf>. (accessed 12.2.2024).

22. Design and performance analysis of a supercritical CO<sub>2</sub> radial inflow turbine [Text] / K. Zhou, J. Wang, J. Xia, Y. Guo, P. Zhao, & Y. Dai // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – Vol. 167. – Article no. 114757. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114757.

23. Tuite, L. Optimization of a High Pressure Turbine Blade and Sector-Based Annular Rig Design for Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycle Representative Testing [Text] / L. Tuite, J. Braun, & G. Paniagua // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*.



– 2024. – Vol. 146, iss. 6. – Article no. 061017. DOI: 10.1115/1.4063956.

24. Hosseinpour, J. Design and development of a stable supercritical CO<sub>2</sub> Messle, centrifugal compressor [Text] / J. Hosseinpour, M. Messle, & A. Engeda // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2024. – Vol. 47. – Article no. 102273. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.102273.

25. Redlich, O. On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions [Text] / O. Redlich, & J. N. S. Kwong // *Chemical reviews*. – 1949. – Vol. 44, no. 1. – P. 233-244. DOI: 10.1021/cr60137a013.

26. Soave, G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state [Text] / G. Soave // *Chemical engineering science*. – 1972. – Vol. 27, iss. 6. – P. 1197-1203. DOI: 10.1016/0009-2509(72)80096-4.

27. Peng, D.-Y. A new two-constant equation of state [Text] / D.-Y. Peng, & D. B. Robinson // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1976. – Vol. 15, no. 1. – P. 59-64. DOI: 10.1021/i160057a011.

28. A fast, accurate real gas equation of state for fluid dynamic analysis applications [Text] / R. H. Aungier // *Journal of Fluids Engineering*. – 1995. – Vol. 117, iss. 2. – P. 277-281. DOI: 10.1115/1.2817141.

29. Haghtalab, A. A modified Peng–Robinson equation of state for phase equilibrium calculation of liquefied, synthetic natural gas, and gas condensate mixtures [Text] / A. Haghtalab, P. Mahmoodi, & S. H. Mazloumi // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 2011. – Vol. 89, iss. 6. – P. 1376-1387. DOI: 10.1002/cjce.20519.

30. Thamanavat, K. High-pressure phase equilibria in the carbon dioxide+ pyrrole system [Text] / K. Thamanavat, T. Sun, & A. S. Teja // *Fluid Phase Equilibria*. – 2009. – Vol. 275, iss. 1. – P. 60–63. DOI: 10.1016/j.fluid.2008.09.019.

31. Vapour-liquid equilibrium data for the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)+ carbon monoxide (CO) system [Text] / A. Chapoy, P. Ahmadi, O. C. de Filho, V., & P. Jadhawar // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. – 2020. – Vol. 150. – Article no. 106180. DOI: 10.1016/j.jct.2020.106180.

32. Wilson, G. M. Calculation of enthalpy data from a modified Redlich-Kwong equation of state [Text] / G. M. Wilson // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 1966. – Vol. 11. – P. 392–400. DOI: 10.1007/978-1-4757-0522-5\_43.

33. Span, R. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple- point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa [Text] / R. Span, & W. Wagner // *Journal of physical and chemical reference data*. – 1996. – Vol. 25, iss. 6. – P. 1509-1596. DOI: 10.1063/1.555991.

34. Preliminary experimental study of a supercritical CO<sub>2</sub> power cycle test loop with a high-speed turbo-generator using R134a under similarity conditions [Text] / Ju. Cho, H. Shin, Jo. Cho, Y.-S. Kang, H.-S. Ra, C. Roh, B. Lee, G. Lee, B. Kim, & Y.-J.

Baik // *Frontiers in Energy*. – 2017. – Vol. 11. – P. 452-460. DOI: 10.1007/s11708-017-0504-4.

35. Cheng, W.-L. Global parameter optimization and criterion formula of supercritical carbon dioxide Brayton cycle with recompression [Text] / W.-L. Cheng, W.-X. Huang, & Y.-L. Nian // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – Vol. 150. – P. 669-677. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.055.

36. Feher, E. G. The supercritical thermodynamic power cycle [Text] / E. G. Feher // *Energy conversion*. – 1968. – Vol. 8, iss. 2. – P. 85-90. DOI: 10.1016/0013-7480(68)90105-8.

37. Dostal, V. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors [Text] / V. Dostal, M. J. Driscoll, & P. Hejzlar // *Advanced Nuclear Power Technology Program No. MIT-ANP-TR-100*. – Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering, 2014 – 307 p. – Available at: <https://web.mit.edu/22.33/www/dostal.pdf>. (accessed 12.02.2024).

38. Research on recompression supercritical CO<sub>2</sub> power cycle system considering performance and stability of main compressor [Text] / Z. Chang, Yu Zhao, Y. Zhao, G. Liu, Q. Yang, & L. Li // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 240. – Article no. 122283. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122283.

39. Baltadjiev, N. D. An investigation of real gas effects in supercritical CO<sub>2</sub> centrifugal compressors [Text] / N. D. Baltadjiev, C. Lettieri, & Z. S. Spakovszky // *Journal of Turbomachinery*. – 2015. – Vol. 137, iss. 9. – Article no. 091003. DOI: 10.1115/1.4029616.

40. Effects of leading edge profiles on flow behavior and performance of supercritical CO<sub>2</sub> centrifugal compressor [Text] / J. Pei, Y. Zhao, M. Zhao, G. Liu, Q. Yang, & L. Li // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2022. – Vol. 229. – Article no. 107520. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107520.

41. Gyarmathy, G. Nucleation of steam in high-pressure nozzle experiments [Text] / G. Gyarmathy // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. – 2005. – Vol. 219, iss. 6. – P. 511-521. DOI: 10.1243/095765005X31388.

42. A real gas-based throughflow method for the analysis of SCO<sub>2</sub> centrifugal compressors [Text] / W. Shao, J. Yang, X. Wang, & Z. Ma // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2020. – Vol. 234, iss. 10. – P. 1943-1958. DOI: 10.1177/0954406220902188.

43. Understanding Wet Gas in a Supercritical Carbon Dioxide Cycle [Text] / P. E. Melissa Poerner, G. Beck, G. Musgrove, & C. J. Nolen // *The 5th International Symposium-Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles*, March 28-31, 2016, San Antonio, Texas. – 2016. – 20 p. – Available at: <https://sco2symposium.com/papers2016/FluidMechanics/052paper.pdf>. (accessed 12.01.2024).

44. Implications of phase change on the aerodynamics of centrifugal compressors for

supercritical carbon dioxide applications [Text] / G. Persico, P. Gaetani, A. Romei, L. Toni, E. F. Bellobuono, & R. Valente // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2021. – Vol. 143, iss. 4. – Article no. 041007. DOI: 10.1115/1.4049924.

45. Modeling multiphase effects in CO<sub>2</sub> compressors at subcritical inlet conditions [Text] / A. Hosangadi, Z. Liu, T. Weathers, V. Ahuja, & J. Busby // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2019. – Vol. 141, iss. 8. – Article no. 081005. DOI: 10.1115/1.4042975.

## References

1. Wright, S. A., Conboy, T. M., Radel, R. F., & Rochau, G. E. *Modeling and experimental results for condensing supercritical CO<sub>2</sub> power cycles*. Technical Report: No. SAND2010-8840. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2011. 46 p. DOI: 10.2172/1030354.

2. Lock, A., & Bone, V. Off-design operation of the dry-cooled supercritical CO<sub>2</sub> power cycle. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 251, article no. 114903. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114903.

3. Lin, X., Li, X., Liu, H., Boczkaj, G., Cao, Y., & Wang, C. A review on carbon storage via mineral carbonation: Bibliometric analysis, research advances, challenge, and perspectives. *Separation and Purification Technology*, 2024, vol. 338, article no. 126558. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126558.

4. Huang, Y., Zheng, X., Wei, Y., He, Q., Yan, S., & Ji, L. Protonated amines mediated CO<sub>2</sub> mineralization of coal fly ash and polymorph selection of CaCO<sub>3</sub>. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 450, part 2, article no. 138121. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138121.

5. Liang, Y., Chen, W., Luo, X., Chen, J., Yang, Z., & Chen, Y. Multi-objective optimization of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles for coal-fired power generation with two waste heat recovery schemes. *Energy Conversion and Management*, 2024, vol. 300, article no. 117962. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117962.

6. Allison, T. C., Smith, N. R., Pelton, R., Wilkes, J. C., & Jung, S. Experimental validation of a wide-range centrifugal compressor stage for supercritical CO<sub>2</sub> power cycles. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, vol. 141, iss. 6, article no. 061011. DOI: 10.1115/1.4041920.

7. Kwon, J. S., Son, S., Heo, J. Y., & Lee, J. I. Compact heat exchangers for supercritical CO<sub>2</sub> power cycle application. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 209, article no. 112666. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112666.

8. Reznicek, E. P., Hinze, J. F., Nellis, G. F., Anderson, M. H., & Braun, R. J. Simulation of the supercritical CO<sub>2</sub> recompression Brayton power cycle with a high-temperature regenerator. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 229, article no. 113678. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113678.

9. Jiang, P., Wang, B., Tian, Y., Xu, X., & Zhao, L. Design of a Supercritical CO<sub>2</sub> Compressor for Use in a 1 MWe Power Cycle. *ACS omega*, 2021, vol. 6, iss. 49, pp. 33769-33778. DOI: 10.1021/acsomega.1c05023.

10. Vesely, L., Manikantachari, K. R. V., Vasu, S., Kapat, J., Dostal, V., & Martin, S. Effect of impurities on compressor and cooler in supercritical CO<sub>2</sub> cycles. *Journal of energy resources technology*, 2019, vol. 141, iss. 1, article no. 012003. DOI: 10.1115/1.4040581.

11. Toni, L., Bisio, V., Milani, A., Biliotti, D., Bellobuono, E. F., Valente, R., Dozzini, M., Bigi, M. & Generini, G. Supercritical CO<sub>2</sub> Compressor and Expander Design for Industrial Waste-Heat Valorization. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, American Society of Mechanical Engineers, 2023, vol. 12, article no. V012T28A016. DOI: 10.1115/GT2023-102558.

12. Wright, S. A., Radel, R. F., Vernon, M. E., Pickard, P. S., & Rochau, G. E. *Operation and analysis of a supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle*. Technical Report: No. SAND2010-0171, Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010. DOI: 10.2172/984129.

13. Allam, R. J., Palmer, M. R., Brown, G. W., Fetvedt, J., Freed, D., Nomoto, H., Itoh, M., Okita, N., & Jones, C. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide. *Energy Procedia*, 2013, vol. 37, pp. 1135-1149. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.211.

14. Crespi, F., Gavagnin, G., Sánchez, D., & Martínez, G. S. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review. *Applied energy*, 2017, vol. 195, pp. 152-183. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.048.

15. Moore, J., Brun, K., Evans, N., & Kalra, C. Development of 1 MWe supercritical CO<sub>2</sub> test loop. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, American Society of Mechanical Engineers, 2015, vol. 9, article no. V009T36A015. DOI: 10.1115/GT2015-43771.

16. Rinaldi, E., Pecnik, R., & Colonna, P. Computational fluid dynamic simulation of a supercritical CO<sub>2</sub> compressor performance map. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, vol. 137, iss. 7, article no. 072602. DOI: 10.1115/1.4029121.

17. Wright, S. A., Radel, R. F., Vernon, M. E., Pickard, P. S., & Rochau, G. E. *Operation and analysis of a supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle*, Technical Report: No. SAND2010-0171, National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010. DOI: 10.2172/984129.

18. Hosangadi, A., Weathers, T., Liu, J., Pelton, R., Wygant, K., & Wilkes, J. Numerical Predictions of Mean Performance and Dynamic Behavior of a 10 MWe sCO<sub>2</sub> Compressor with Test Data Validation. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2022, vol. 144, iss. 12, article no. 121019. DOI: 10.1115/1.4055532.

19. Cich, S. D., Moore, J. J., Marshall, M., Hoopes, K., Mortzheim, J., & Hofer, D. Radial inlet and exit design for a 10 MWe SCO<sub>2</sub> axial turbine. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, American Society of Mechanical Engineers, 2019, vol. 9, article no. V009T38A005. DOI: 10.1115/GT2019-90392.
20. Uysal, S. C., & Weiland, N. Turbomachinery design of an axial turbine for a direct fired sCO<sub>2</sub> cycle. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 267, article no. 115913. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115913.
21. Noall, J. S., & Pasch, J. J. Achievable efficiency and stability of supercritical CO<sub>2</sub> compression systems. *Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycle Symposium*, Pennsylvania Pittsburgh, 2014. 12 p. Available at: <https://sco2symposium.com/papers2014/turbomachinery/51PPT-Noall.pdf>. (accessed 12.2.2024).
22. Zhou, K., Wang, J., Xia, J., Guo, Y., Zhao, P., & Dai, Y. Design and performance analysis of a supercritical CO<sub>2</sub> radial inflow turbine. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 167, article no. 114757. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114757.
23. Tuite, L., Braun, J., & Paniagua, G. Optimization of a High Pressure Turbine Blade and Sector-Based Annular Rig Design for Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycle Representative Testing. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2024, vol. 146, iss. 6, article no. 061017. DOI: 10.1115/1.4063956.
24. Hosseinpour, J., Messele, M., & Engeda, A. Design and development of a stable supercritical CO<sub>2</sub> centrifugal compressor. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, vol. 47, article no. 102273. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.102273.
25. Redlich, O., & Kwong, J. N. S. On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chemical reviews*, 1949, vol. 44, no. 1, pp. 233-244. DOI: 10.1021/cr60137a013.
26. Soave, G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state. *Chemical engineering science*, 1972, vol. 27, iss. 6, pp. 1197-1203. DOI: 10.1016/0009-2509(72)80096-4.
27. Peng, D.-Y., & Robinson, D. B. A new two-constant equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, vol. 15, no. 1, pp. 59-64. DOI: 10.1021/i160057a011.
28. Aungier, R. H. A fast, accurate real gas equation of state for fluid dynamic analysis applications. *Journal of Fluids Engineering*, 1995, vol. 117, iss. 2, pp. 277-281. DOI: 10.1115/1.2817141.
29. Haghtalab, A., Mahmoodi, P., & Mazloumi, S. H. A modified Peng–Robinson equation of state for phase equilibrium calculation of liquefied, synthetic natural gas, and gas condensate mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1995, vol. 117, iss. 2, pp. 277-281. DOI: 10.1115/1.2817141.
30. Thamanavat, K., Sun, T., & Teja, A. S. High-pressure phase equilibria in the carbon dioxide+ pyrrole system. *Fluid Phase Equilibria*, 2009, vol. 275, iss. 1, pp. 60-63. DOI: 10.1016/j.fluid.2008.09.019.
31. Chapoy, A., Ahmadi, P., de Filho, O. C. V., & Jadhawar, P. Vapour-liquid equilibrium data for the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)+ carbon monoxide (CO) system. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2020, vol. 150, article no. 106180. DOI: 10.1016/j.jct.2020.106180.
32. Wilson, G. M. Calculation of enthalpy data from a modified Redlich-Kwong equation of state. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1966, vol. 11, pp. 392-400. DOI: 10.1007/978-1-4757-0522-5\_43.
33. Span, R., & Wagner, W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple- point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *Journal of physical and chemical reference data*, 1996, vol. 25, iss. 6, pp. 1509-1596. DOI: 10.1063/1.555991.
34. Cho, Ju., Shin, H., Cho, Jo., Kang, Y.-S., Ra, H.-S., Roh, C., & Baik, Y.-J. Preliminary experimental study of a supercritical CO<sub>2</sub> power cycle test loop with a high-speed turbo-generator using R134a under similarity conditions. *Frontiers in Energy*, 2017, vol. 11, pp. 452-460. DOI: 10.1007/s11708-017-0504-4.
35. Cheng, W.-L., Huang, W.-X., & Nian, Y.-L. Global parameter optimization and criterion formula of supercritical carbon dioxide Brayton cycle with recompression. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 150, pp. 669-677. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.055.
36. Feher, E. G. The supercritical thermodynamic power cycle. *Energy conversion*, 1968, vol. 8, iss. 2, pp. 85-90. DOI: 10.1016/0013-7480(68)90105-8.
37. Dostal, V., Driscoll, M. J., & Hejzlar, P. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors. *Advanced Nuclear Power Technology Program No. MIT-ANP-TR-100*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering, 2014. 307 p. Available at: <https://web.mit.edu/22.33/www/dostal.pdf>. (accessed 12.02.2024).
38. Chang, Z., Zhao, Yu, Zhao, Y., Liu, G., Yang, Q., & Li, L. Research on recompression supercritical CO<sub>2</sub> power cycle system considering performance and stability of main compressor. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 240, article no. 122283. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122283.
39. Baltadjiev, N. D., Lettieri, C., & Spakovszky, Z. S. An investigation of real gas effects in supercritical CO<sub>2</sub> centrifugal compressors. *Journal of Turbomachinery*, 2015, vol. 137, iss. 9, article no. 091003. DOI: 10.1115/1.4029616.
40. Pei, J., Zhao, Y., Zhao, M., Liu, G., Yang, Q., & Li, L. Effects of leading edge profiles on flow behavior and performance of supercritical CO<sub>2</sub> centrifugal compressor. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, vol. 229, article no. 107520. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107520.
41. Gyarmathy, G. Nucleation of steam in high-pressure nozzle experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of*

*Power and Energy*, 2005, vol. 219, iss. 6, pp. 511-521. DOI: 10.1243/095765005X31388.

42. Shao, W., Yang, J., Wang, X., & Ma, Z. A real gas-based throughflow method for the analysis of SCO2 centrifugal compressors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, vol. 234, iss. 10, pp. 1943-1958. DOI: 10.1177/0954406220902188.

43. Melissa Poerner, M., Beck, G., Musgrove, G., & Nolen, C. J. Understanding Wet Gas in a Supercritical Carbon Dioxide Cycle. *The 5th International Symposium-Supercritical CO2 Power Cycles, March 28-31, 2016*, San Antonio, Texas, 2016. 20 p. Available at: <https://sco2symposium.com/>

*papers2016/FluidMechanics/052paper.pdf*. (accessed 12.01.2024).

44. Persico, G., Gaetani, P., Romei, A., Toni, L., Bellobuono, E. F., & Valente, R. Implications of phase change on the aerodynamics of centrifugal compressors for supercritical carbon dioxide applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, vol. 143, iss. 4, article no. 041007. DOI: 10.1115/1.4049924.

45. Hosangadi, A., Liu, Z., Weathers, T., Ahuja, V., & Busby, J. Modeling multiphase effects in CO2 compressors at subcritical inlet conditions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, vol. 141, iss. 8, article no. 081005. DOI: 10.1115/1.4042975.

Надійшла до редакції 11.05.2024, розглянута на редколегії 15.06.2024.

## REVIEW AND BIBLIOMETRIC STUDY OF CO<sub>2</sub> SUPERCRITICAL ENERGY CYCLES. CURRENT STATE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT

*Hanna Vorobiova*

Recent decades have been characterized by growing interest in research into improving the efficiency of these cycles. The purpose of this work is a bibliometric analysis based on Scopus data (2001-2024) and an overview of the main trends associated with supercritical cycles operating in the region of the carbon dioxide critical point. The objective is to provide a comprehensive overview of research productivity, impact, and trends in supercritical carbon dioxide cycling research over the past two decades, providing useful information for strategic research planning. The methods used were from the Scopus database due to its extensive collection of documents. The review of work lasted from 2001 to 2024, covering a significant time in this area. The literature search was conducted for the following specific keywords: "Supercritical", "Cycle", "Carbon dioxide", "Equation of State", "Energy Cycle". The results show growing research interest in this area, which is mainly led by the United States, China, the United Kingdom, Canada, Italy, and Germany. Covering a variety of industries such as engineering, energy, and the environment, this research delves into technical areas such as supercritical carbon dioxide cycles and the real gas equation of state, which allow modeling of the flow of a working fluid in a compression loop. Conclusions. The bibliometric analysis presented in this work offers information on the evolution of research on supercritical carbon dioxide cycles and the equations of state of real gas in the metastable region of carbon dioxide from both academic and industrial viewpoints. By exploring the industry context and the relationships between the findings and the scope of key journals, this analysis illuminates the significance of the findings and their practical implications. New topics identified through keyword analysis can stimulate research planning in the scientific sector. Thus, this comprehensive bibliometric study serves as an independent reference for technology forecasting and monitoring.

**Keywords:** supercritical cycles of carbon dioxide; carbon dioxide; energy cycles; comparison with real gas; literature review; bibliometric review.

**Воробйова Ганна Сергіївна** – асп. каф. конструкцій авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Hanna Vorobiova** – PhD Student of Engine Design Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: vorobyovaanna1610@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4181-8269.