

## **Критеріальна оцінка екологічної ефективності теплонасосного теплопостачання об'єктів**

**Іван Калініченко**

Кафедра теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна  
ORCID 0000-0001-6765-6168

**Євгенія Корнєєва**

Кафедра теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

### **Для цитування цієї статті:**

Калініченко Іван, Корнєєва Євгенія. Критеріальна оцінка екологічної ефективності теплонасосного теплопостачання об'єктів. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 4, No. 2, 2025, pp. 226-236. doi: 10.46299/j.isjea.20250402.15.

**Надійшла до редакції:** 13 березня 2025 р.; **Схвалено:** 31 березня 2025 р.;

**Опубліковано:** 01 квітня 2025 р.

---

**Анотація:** Сьогодні екологічна катастрофа планети, пов'язана з глобальним потеплінням, забрудненням водних ресурсів, землі та атмосфери, підвищенням рівня води у Світовому океані та нераціональним використанням невідновлюваних джерел енергії, вимагає негайного вирішення. Одним із джерел забруднення шкідливими речовинами є використання теплових електростанцій як систем теплопостачання, тому для зменшення шкідливих викидів у роботі розглянуто спосіб альтернативного теплопостачання на основі теплового насосу з урахуванням сумарного критерію забруднення навколишнього середовища. Проведено аналіз масштабів забруднення атмосферного повітря вихлопними газами при експлуатації теплових електростанцій, а також наведено шкідливі наслідки, які можуть призвести до погіршення екологічних показників при подальшому використанні вуглеводневого палива для опалення житлових приміщень. Також спостерігається теплове забруднення атмосфери, що в сукупності негативно впливає на клімат нашої планети. Для зниження екологічних показників забруднення атмосфери пропонується використовувати альтернативні джерела генерації теплової енергії, але для вибору найбільш ефективного способу теплопостачання необхідно провести критеріальне порівняння, яке б включало основні фактори зниження забруднення навколишнього середовища. Оригінальністю ідеї визначення екологічно безпечної технології систем теплопостачання житлових та адміністративних будівель було використання сумарного критерію забруднення навколишнього середовища, який включає забруднення парниковими газами та теплове забруднення при експлуатації системи теплопостачання. Проведено розрахунки можливості використання теплового насоса для опалення громадської будівлі з урахуванням сумарного критерію забруднення навколишнього середовища. Результати розрахунків показали екологічну доцільність обраного способу теплопостачання обраного об'єкта.

**Ключові слова:** вуглекислий газ, вуглеводневе паливо, низькопотенціальна теплота, парниковий ефект, система теплопостачання, теплове забруднення, тепловий насос.

---

## 1. Вступ

Енергетична проблема є досить актуальною у світі, і в Україні також. Наша країна змушена купувати газ у Європі, а саме у Словаччині, Угорщині та Польщі. Ми всі розуміємо, що для нашої країни це недешево, оскільки споживання природного газу в Україні для опалення становить близько 20 мільярдів кубометрів газу на рік. Але чи варто нам витратити стільки грошей на використання енергії?

Ми використовуємо теплові електростанції як постачальника енергії, але це недостатньо ефективний спосіб отримання тепла в наших домівках. Стара техніка, постійні поломки, ось на що ми витрачаємо гроші. Але масштаб усієї проблеми не лише в економічних витратах. В результаті використання вуглеводневого палива в атмосферу викидаються вихлопні гази з високою температурою понад 140°C і понад 150 різних шкідливих і токсичних речовин. Таким чином ми руйнуємо нашу екологію.

Коли атмосфера нагріється, температура на планеті підвищується, тобто планету спочатку вразить посуха, почнуться масові пожежі, буде нестача води, багато організмів загинуть, а потім почнуть танути льодовики і почнеться повінь. Пожежі різко погіршують умови для природного лісовідновлення, призводять до утворення пустирів, заміни хвойних порід малоцінними листяними насадженнями. Особливу небезпеку становлять пожежі для молодих лісів, розташованих на відкритих територіях серед луків і полів, оскільки підвищується небезпека виникнення пожеж внаслідок підпалів сухостою. Накопичення важких металів у верхніх шарах ґрунту призводить до збіднення видового складу рослин і мікроорганізмів, погіршення умов росту і розвитку культурних рослин. Зменшення кормової бази внаслідок лісових пожеж викликає масові міграції та скорочення чисельності диких тварин. Найстрашніше в проблемі танення льодовиків не підвищення рівня води, а те, що в цих льодах замерзли дуже страшні віруси, які почнуть прокидатися і незабаром почнуть біологічну мутацію, яка може зашкодити розвитку всього живого на планеті. Прямі викиди CO<sub>2</sub> також становлять загрозу для здоров'я людини. Надлишок вуглекислого газу в організмі людини призводить до порушення розумової діяльності, загальної нервозності і підвищеного рівня стресу. Також загострюються хронічні захворювання серця, кровообігу та нирок, слабшає імунітет. Цього можна уникнути, якщо зменшити використання вуглеводневого палива.

Як вихід із цієї проблеми в Європі набули широкого поширення теплові насоси, які використовують електроенергію замість газу та працюють надзвичайно ефективно. Вони не виробляють тепло, а просто перетворюють тепло з низьким температурним потенціалом до температури необхідних параметрів для опалення будівель. Тепловий насос працює за тими ж принципами, що й холодильник або кондиціонер, але працює у зворотному порядку, коли холодний рідкий холодоагент кипить, забираючи таким чином теплову енергію від зовнішнього джерела (тепло землі, водойм і повітря взимку), перетворюється на газ, потім вивільняє цю енергію та конденсується назад у рідину. Тепловий насос також використовує приблизно половину енергії, ніж газовий котел.

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процеси підвищення екологічної ефективності систем теплопостачання.

Предмет дослідження – визначення параметрів процесу підвищення екологічної ефективності систем теплопостачання на базі теплового насосу.

### 3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – підвищення екологічної ефективності та ресурсозбереження систем теплопостачання житлових та адміністративних будівель з використанням альтернативних джерел тепла з мінімальними викидами шкідливих речовин.

Завданням дослідження та оригінальністю ідеї є використання критеріїв оцінки шкідливого та теплового забруднення навколишнього середовища для вибору екологічно чистих систем теплопостачання громадських та житлових будівель.

Практичне значення роботи: для визначення екологічно безпечної технології систем теплопостачання житлових та адміністративних будівель запропоновано використовувати сумарний критерій забруднення навколишнього середовища, який для теплового насоса має значення  $\Sigma k = 2$  і може вважатися екологічно безпечною технологією. Виявлено резерви підвищення екологічності та зменшення шкідливих викидів для теплопостачання житлових та адміністративних будівель за рахунок використання теплового насоса.

Таким чином, використовуючи альтернативні джерела енергії сонця, повітря, води та ґрунту, можна отримати електричну та теплову енергію, достатню для забезпечення автономного теплопостачання житлового будинку, не використовуючи для цього вуглеводневе паливо. Ця альтернатива може допомогти нам зменшити парниковий ефект і зменшити викиди шкідливих газів.

Ми можемо уникнути масштабної екологічної катастрофи, але для цього ми повинні повністю зрозуміти проблему та почати змінюватися. Тоді наша планета матиме ще один шанс.

### 4. Аналіз літератури

Забруднення повітря діоксином вуглецю. Рівень вуглекислого газу в повітрі на 50 % перевищує часи доіндустріальної епохи, а середній темп приросту CO<sub>2</sub> швидший, ніж будь-коли. Про це повідомляє APnews з посиланням на Національне управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA). Згідно проведених досліджень NOAA середній рівень вуглекислого газу в травні 2021 році становив 419,13 ppm (частин CO<sub>2</sub> в повітрі на мільйон). Це майже на 50 % вище, ніж стабільний доіндустріальний рівень у 280 ppm (рис. 1), а середні темпи зростання за 10 років встановили рекорд [1].

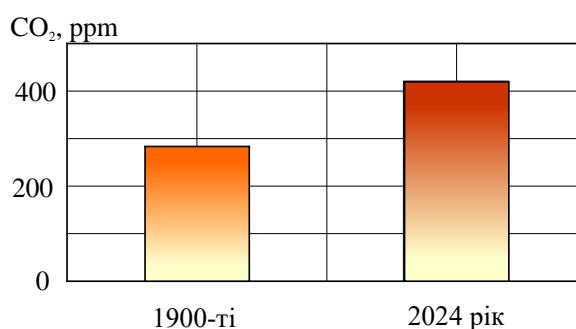


Рисунок 1. Концентрація CO<sub>2</sub> у повітрі в доіндустріальній (XIX сторіччя) і наш час.

Вуглекислий газ утворюється від спалювання природного газу, нафти й вугілля (вуглеводневих джерел енергії) і одержання теплової енергії з подальшим перетворенням в механічну для використання її на транспорті, одержання тепло- та електроенергії тощо. Нажаль такі об'єми викидів CO<sub>2</sub> набагато перевищують те, що можуть споживати рослини, тому ця обставина призводить до щорічного підвищення рівня викидів CO<sub>2</sub>, так званих парникових газів до нових рекордів. Як відомо діоксид вуглецю залишається у повітрі протягом 1000 років і більше.

Європейський союз на законодавчому рівні згідно директиви про промислові викиди 2010/75/ЄС внесли принципи зміни щодо допустимих граничних значень викидів діоксиду вуглецю, діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу від великих спалювальних установок. Ці вимоги набрали чинності в країнах ЄС з 1 січня 2016 року. В Україні в 2017 році, в рамках виконання Договору про заснування Енергетичного Співтовариства в частині обмеження викидів забруднюючих речовин, був затверджений Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Однак, станом на сьогодні жодна з вугільних ТЕС України не приведена до вимог Директиви ЄС щодо викидів.

Україна відповідно до Оновленого (другого) національного визначеного внеску до Паризької хартії з клімату (НОВ2) затвердила умови щодо скорочення до 2030 року викидів парникових газів на 65% від рівня 1990 року. "Кабмін затвердив Оновлений національно визначений внесок України в Паризьку хартію. Шляхом декарбонізації і розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) ми маємо намір зменшити викиди парникових газів до 35% від рівня 1990 року [2].

Показник скорочення викидів CO<sub>2</sub> на 65% до 2030 року був отриманий виходячи з розрахунку, що в 1990 році викиди України з урахуванням землекористування та лісівництва склали 884 млн тонн. При цьому в 2019 році, згідно кадастру, викиди CO<sub>2</sub> склали 332 млн тонн - 37,6% від рівня 1990 року. В табл. 1 представлені основні джерела викидів CO<sub>2</sub> в Україні у 2022 році. Як видно з табл. 1 основними джерелами викиду (більше 55 %) становить промисловість та виробництво тепло- і електроенергії де використовуються великі котельні та промислові печі, що використовують вуглеводневе (не відновлюване) паливо. І якщо на промисловості відмовитися від використання вуглеводневого палива майже не можливо з огляду на науковий прогрес і розвиток промисловості, то виробництво тепло- і електроенергії на сьогоднішній час можливо за допомогою різних альтернативних технологій.

**Таблиця 1.** Основні джерела викидів CO<sub>2</sub> в Україні у 2022 році

Джерела викидів CO <sub>2</sub>	Викиди CO <sub>2</sub> ,	
	млн. тонн/рік	%
Промисловість	101,3	30,4
Виробництво тепло- і електроенергії	86,6	26,2
Транспорт	38,4	11,6
Видобування палива	36,3	10,9
Сільське господарство	31,5	9,5
Житловий сектор	27,7	8,3
Переробка відходів	8,2	2,5
Інше	2,1	0,6
Разом	332,1	100

Як основне джерело теплопостачання для населення в Україні використовують теплоелектроцентраль (ТЕЦ), в якій виробляється тепло і електроенергія. В тепловій електростанції (ТЕС) виробляє для споживача тільки електрику.

Накопичення діоксиду вуглецю в повітрі призводить не тільки до парникового ефекту на планеті, а також у великій концентрації є шкідливим газом для людини. Склад повітря (суміш газів), яким дихає людина складається з азоту N<sub>2</sub> – 78 %, кисню O<sub>2</sub> – 21 %, інертних газів – 0,94 % (з яких аргон – 0,9 %), водяної пари – від 0,1 %, діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub> – 0,042 % та різних домішок водню, озону, аміаку тощо. Звісно, концентрація кожного з елементів у повітрі може змінюватися, що позначається на якості та екологічних показників повітря [3].

**Забруднення повітря іншими шкідливими речовинами.** Викиди CO<sub>2</sub> при спалюванні не відновлюваних джерел енергії для одержання тепло- і електроенергії в ТЕЦ і ТЕС не єдині

джерела забруднення навколишнього середовища. На сьогоднішній день вугільні ТЕС України забруднюють повітря більше ніж вся енергетика Європейських країн разом. Серед топ-10 електростанцій з найбільшими викидами зольного пилу (PM10), Україні належать 8 електростанцій. Сюди входять Курахівська, Бурштинська, Трипільська, Луганська, Зміївська, Вуглегірська, Слов'янська, Ладизинська ТЕС. Всі вони були введені в експлуатацію у 60-70-х роках минулого століття. В топ-30 по цим викидам входить 18 українських ТЕС. Водночас зазначається, що мікрочастки пилу PM10 у забрудненому повітрі є причиною близько 80% передчасних смертей, пов'язаних з викидами вугільних електростанцій у Європі [4].

Згідно з їх розрахунками, Україна продукує 72% всіх викидів зольного пилу в Європі, 27% двоокису сірки та 16% оксидів азоту.

**Теплове забруднення.** При спалюванні вуглеводневого палива в котлах на виході з димової труби температура димових газів сягає 110...130 °С, й зазвичай ця тепла енергія просто розсіюється. Звісно можна використовувати економайзери (або утилізатори тепла димових газів) –пристрої, що дозволяють повернути частину тепла з димових газів теплових генераторів (котлоагрегаторів) назад до системи. що ж до екологічного ефекту, то після встановлення економайзерів звісно викиди вуглекислого газу та оксидів азоту в атмосферу скоротяться на декілька відсотків, але це збільшує вартість теплоносія, а теплове забруднення (температура димових газів) на жаль залишиться.

**Недоліки використання ТЕЦ і ТЕС на вуглеводневому паливі.** Щоб провести опалювальний сезон з жовтня до березня, Україні потрібно спалити 15,3 млн тонн вугілля, з яких 9 млн тонн — власного видобутку, все решта — імпорт. Також для опалення на рік необхідно до 19 мільярдів кубів природного газу.

Основними споживачами теплової енергії є житлово-комунальний сектор (44%) та промисловість (35%), інші галузі економіки разом споживають близько 21% тепла. Приблизно четверта частина всього органічного палива витрачається на теплопостачання житлових будинків. Потреби споживачів у тепловій енергії в Україні забезпечується за допомогою 250 ТЕЦ, 100 тис. опалювальних котелень, що працюють на органічному паливі з середнім коефіцієнтом корисної дії 80...84 %, великої кількості електричних теплогенераторів, а також установок, які використовують вторинні теплові енергоресурси (ВЕР) та відновлювані джерела енергії. Близько 80 % всього палива, яке використовують ТЕЦ, складає природний газ. Основним паливом для котелень є природний газ (близько 55%), вугілля та мазут. До систем централізованого теплопостачання підключено до 11 млн. квартир в містах. Близько 7 млн. домогосподарств мають індивідуальне опалення.

При виробництві електроенергії на газових ТЕЦ максимально можливо використати до 40% енергії палива (при використанні сучасних турбін ККД сягає 50%). Твердопаливні ТЕС мають значно нижчий ККД.

Зрозуміло, що теплопостачання є однією з найбільш енерговитратних галузей економіки. Протяжність магістральних і розподільчих теплових мереж в Україні (за винятком власних тепломереж промислових підприємств) становить 24,3 тис. км у двотрубному обчисленні. Втрати тепла в теплових мережах коливаються в межах (15...32) %. інколи, навіть, перевищують 40 % [5].

Сьогодні, для опалення будівель використовується теплогенератори різних типів. Широкого застосування набули газові та електричні котли, обладнання для спалювання вугілля чи біомаси. І звичайно, з кожним роком все більше зростає частка обладнання, що використовує відновлювальні джерела енергії. Одним з самих перспективних напрямків розвитку теплогенеруючого обладнання є застосування теплових насосів.

Принцип роботи теплового насоса для енергопостачання об'єктів описано в [6, 7]. Як приклад, в 2015 році Антонівська школа № 21 Херсонської міської ради виграла грант в розмірі 2,5 млн. євро на будівництво "зеленої школи", який надав фінський Фонд "Північна ініціатива гуманітарної підтримки і енергоефективність (НЕФКО України) - Збірні переносні

будинки для соціальної інфраструктури в Україні". А Херсон став першим містом в Україні, який виграв грант на реалізацію такого проекту, а у 2016 школу відкрили [8].

На даному об'єкті був встановлений досить великий парк енергозберігаючого обладнання, у тому числі і тепловий насос компанії ВДЕ "повітря-вода", потужністю 35 кВт з компресором фірми "Emerson" (Copeland) EVI - з уприскуванням пари. Температурний режим роботи – до мінус 15°C.

У літню пору тепловий насос працює як холодильна машина з повітряним охолодженням конденсатора, а неавтономні кондиціонери забезпечують всі приміщення повітрям, що кондиціонується.

На сьогоднішній день теплові насоси знайшли широке застосування як в стаціонарній так і судновій енергетиці. В літературних джерелах [9 - 15] розглядалися варіанти одержання водяної пари на судах з використанням теплонасосних парогенеруючих установок (ТНПУ) в холодній зоні рейсу, коли температура зовнішнього повітря стає нижче 20 °С для виробки водяної пари, джерелом споживаної теплоти низького потенціалу (у випарнику) у яких були б вторинні теплові ресурси судових головних двигунів. Це дозволяє, по-перше, зменшити теплове забруднення навколишнього середовища, по-друге, відмовитися від роботи допоміжного котла на ходовому режимі судна в холодній зоні, а відповідно знизити забруднення навколишнього середовища токсичними димовими газами і, по-третє, зекономити не відновлювальні джерела енергії (котельне паливо).

## 5. Методи досліджень

В даній роботі застосовані прикладні методи наукового дослідження, які складаються з поетапних процесів ознайомлення та вивчення проблеми, експерименту, та перевірки теорії та отриманих даних для подальшого одержання наукових знань.

Методика розрахунку викидів CO<sub>2</sub>. У науковій та нормативній літературі існує велика кількість методів розрахунку викидів CO<sub>2</sub>. Детальний облік викидів CO<sub>2</sub> потребує чіткого визначення меж технологічних агрегатів та підприємств і складання матеріальних та теплових балансів кожного з технологічних процесів. Як один з прикладів можна навести найбільш спрощену методику World Steel Association, що базується на обліку матеріальних потоків підприємства і має статус міжнародного стандарту ISO 14404:2013 – Метод розрахунку викидів диоксида вуглецю у важкій промисловості [16].

Метод застосовує підхід, заснований на даних про питомі викиди CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> emissions intensity), якими супроводжується виробництво або використання певних матеріалів. Цей метод дуже узагальнений і застосовується лише для підприємства в цілому. Він не є достатньо глибоким для використання в дослідницьких цілях, а також для визначення викидів окремими агрегатами. Втім, його суттєвою перевагою є простота, а отже, саме з нього можна розпочати ознайомлення з основами обліку викидів CO<sub>2</sub>.

Стандарти коефіцієнту викидів CO<sub>2</sub> та питома теплота згоряння для найпоширеніших видів палива представлені в табл. 2 [16].

**Таблиця 2.** Стандарти коефіцієнту викидів CO<sub>2</sub> та питома теплота згоряння для найпоширеніших видів палива

Вид палива	Стандарти коефіцієнту викидів CO <sub>2</sub> , (т/МВт*год)	Питома теплота згоряння	
		(ккал/кг)	(кДж/кг)
Мазут	0,279	9 700	40 600
Кам'яне вугілля	0,354	6 700	28 000
Природний газ	0,202	8 000	33 500
Деревина	0,0 – 0,403	2 960	12 400
Сонячна енергія	0	н/д	н/д
Геотермальна енергія	0	н/д	н/д

Стандарт визначає наступні три складові викидів CO<sub>2</sub>:

- попередні викиди CO<sub>2</sub> (upstream CO<sub>2</sub> emission) – викиди, спричинені внаслідок діяльності, що відбулася поза межами підприємства, зокрема, при виробництві сировинних матеріалів та енергоносіїв. Прикладами такої діяльності можуть бути видобуток не відновлювальних джерел енергії та транспортування до підприємства (ТЕЦ).

- прямі викиди CO<sub>2</sub> (direct CO<sub>2</sub> emission) – викиди, спричинені усіма видами діяльності, що відбуваються безпосередньо в межах ТЕЦ на вироблення теплової та електричної енергії.

- кредитовані викиди CO<sub>2</sub> (credit CO<sub>2</sub> emission) – це викиди CO<sub>2</sub>, що відбуваються при використанні вироблених або побічних продуктів, а також генерованої електрики чи тепла поза межами ТЕЦ.

В розрахунках ми не враховували суму попередніх викидів CO<sub>2</sub> до систем теплопостачання та кредитовані викиди з причини складності врахування всіх факторів (видобуток, транспортування, зберігання вуглеводневого палива, а також викиди CO<sub>2</sub> при виготовленні та монтажу котелень), що впливають на значення цих складових приблизно в рівній мірі.

## 6. Результати досліджень

Існує багато літературних джерел, в яких порівнюється вартість опалення різних типів котелень за допомогою невідновлюваних джерел енергії та теплових насосів. Наприклад, в [17, 18] наведено розрахунки, які показують економічні переваги використання теплового насоса порівняно з твердопаливним котлом.

Проте метою даного дослідження є визначення найбільш екологічно ефективної технології теплопостачання. Тому розрахунки вартості отриманої Ккал на опалення 1 м<sup>2</sup> з урахуванням тепловтрат у зовнішнє середовище, а також вартості обладнання та інших факторів, що впливають на собівартість, в даній роботі не проводилися. Однак ці розрахунки планується виконати в наступній роботі, де врахують вартість обладнання (з урахуванням технічних показників і якості виконуваних елементів), монтажу (способи монтажу та вартість робіт спеціалізованих бригад – будівельників), експлуатації (кількість одночасно працюючих робітників – кочегарів), технічного обслуговування (періодичність технічного обслуговування) та ремонту (частота можливих поломок і зупинок енергопостачання приміщень в опалювальний період) і підберуть найбільш ефективне опалення. метод з урахуванням еколого-економічних критеріїв оцінки.

З причини неможливості критеріально об'єднати значення емісії CO<sub>2</sub> (вимірюється в т/МВт\*год) та теплового забруднення (вимірюється в температурі °C) розрахунки проводилися не в абсолютних, а відносних значеннях. Сумарний критерій екологічного забруднення дорівнює:

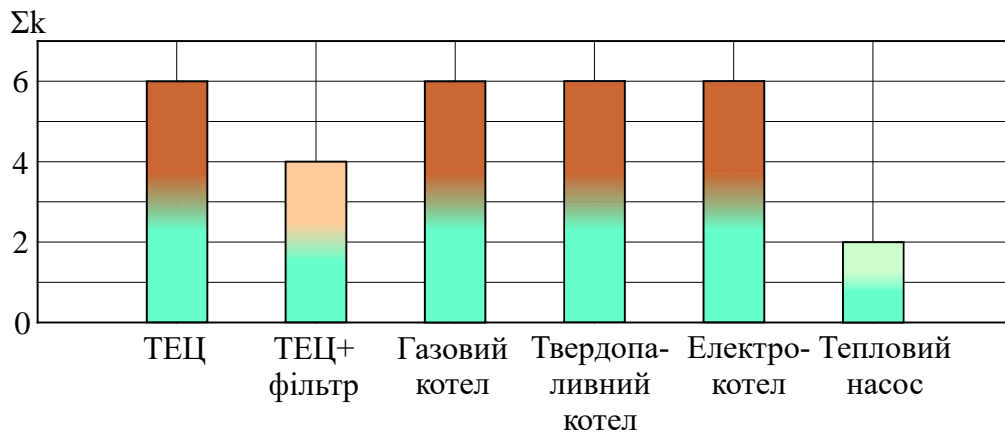
$$\Sigma k = k_{CO_2} + k_{heat}, \quad (1)$$

де  $k_{CO_2}$  – критерій прямих викидів CO<sub>2</sub> при теплопостачанні;

$k_{heat}$ , – критерій теплового забруднення при теплопостачанні.

Так критерій емісії CO<sub>2</sub> із максимальним забрудненням до – 0,4 т/МВт\*год дорівнює відносному значенню –  $k_{CO_2} = 4$ , середні значення 0,2...0,3 т/МВт\*год відповідає значенню  $k_{CO_2} = 3$ , в діапазоні 0,1...0,2 т/МВт\*год відповідає значенню  $k_{CO_2} = 2$ , а у випадку часткового використання (тепловий насос використовує електроенергію від ТЕЦ і для одержання 1 кВт теплової енергії в ньому витрачається в 4...6 разів менше електроенергії ніж в електричному котлі) значення критерія емісії CO<sub>2</sub> дорівнює –  $k_{CO_2} = 1$ , при використанні «зеленої енергетики» з 0-вим викидом CO<sub>2</sub> –  $k_{CO_2} = 0$ .

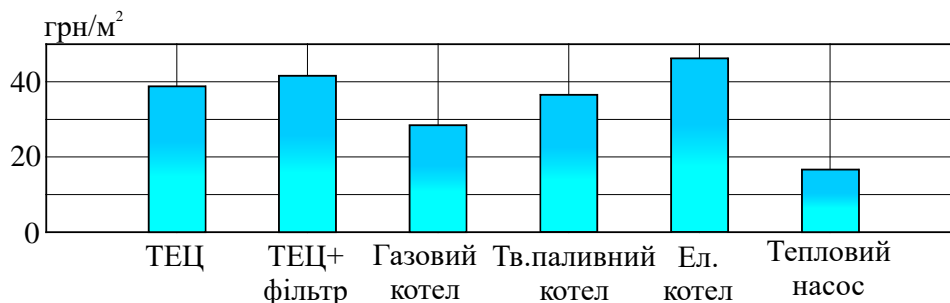
Також, значення відносного критерію теплового забруднення відповідає значенню  $k_{\text{heat}} = 3$  при температурах експлуатації системи теплопостачання, або викидах відхідних газів вище  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при діапазоні теплового забруднення з температурою  $60\dots 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $k_{\text{heat}} = 2$ , і з температурою менше  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $k_{\text{heat}} = 1$ . Всі системи теплопостачання виділяють тепло в навколишнє середовище при температурі до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  і являються у якійсь мірі тепловими забруднювачами. Тому, навіть ті системи теплопостачання, які не використовують вуглеводневого палива мають мінімальний критерій теплового забруднення  $k_{\text{heat}} = 1$ . Результати розрахунків приведені на рис. 2.



**Рисунок 2.** Результати розрахунку сумарного критерію екологічного забруднення при теплопостачанні будівлі.

Також в розрахунках було включено можливість встановлення фільтрів для очищення теплового та шкідливого забруднень. Враховуючи те, що електрична енергія може вироблятися як на ТЕЦ так і за допомогою зеленої енергетики, то до розрахунків було включено можливість одержання «зеленої» електричної енергії з нульовими викидами  $\text{CO}_2$ .

Проведені розрахунки (див. рис. 2) показують, що найвищі показники сумарного критерію екологічного забруднення  $\Sigma k = 6$  мають ТЕЦ, газовий, твердопаливний та електричний котли без додаткових очисних технологій (фільтри тощо). Також, навіть при використанні додаткових очисних технологій в ТЕЦ сумарний критерій екологічного забруднення має значення  $\Sigma k = 4$ , що залишається екологічно небезпечною технологією. Лише використання теплового насоса для теплопостачання будівлі має сумарний критерій екологічного забруднення  $\Sigma k = 2$ , що може вважатися екологічно безпечною технологією тому може використовуватися для опалення у школі в майбутньому.



**Рисунок 3.** Вартість опалення  $1\text{ м}^2$  для побутового споживача.

Економічний розрахунок вартості опалення  $1\text{ м}^2$  для побутових споживачів протягом опалювального періоду (див. рис. 3) також показує доцільність використання теплового насоса у якості системи опалення, адже затрати на опалення в порівнянні з ТЕЦ менші майже в 2,5 рази.



## 7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

У подальшому планується виконати розрахунки економічної ефективності, в яких буде враховано вартість обладнання (з урахуванням технічних показників та якості виконуваних елементів), монтажу (способи монтажу та вартість робіт спеціалізованих бригад – будівельників), експлуатації (кількість одночасно працюючих робітників, кочегарів тощо), технічного обслуговування (періодичність технічного обслуговування) та ремонту (частота можливих поломок і зупинок енергопостачання приміщень в опалювальний період) та вибрати найбільше ефективний спосіб опалення з урахуванням екологічних та економічних критеріїв оцінки.

## 8. Висновки

Метою дослідження в роботі є підвищення екологічної ефективності та ресурсозбереження систем теплопостачання житлових та адміністративних будівель з використанням альтернативних джерел тепла з мінімальними викидами шкідливих речовин.

Завданням дослідження та оригінальністю ідеї є використання критеріїв оцінки шкідливого та теплового забруднення навколишнього середовища для підвищення екологічної ефективності систем теплопостачання громадських та житлових будівель.

Проведено аналіз та виявлено резерви підвищення екологічних показників та зменшення шкідливих викидів для забезпечення теплопостачання житлових та адміністративних будівель за рахунок використання теплового насоса.

Значення критерію сумарного забруднення навколишнього середовища  $\Sigma k = 2$  визначено при використанні теплового насоса для теплопостачання будівлі, який можна вважати екологічно безпечною технологією, тому в майбутньому його можна використовувати для опалення шкіл.

---

### Список літератури:

- 1) Koncentraciya CO<sub>2</sub> v polovynu perevyschila pokaznyky doindustrialnoii epokhy. – Retrived from: <https://ua-energy.org/uk/posts/kontsentratsiia-co2-vpolovynu-perevyschyla-pokaznyky-doindustrialnoi-epokhy> [in Ukrainian].
- 2) Ukraina zatverdyla umovy schodo skorochennia do 2030 roku vykydiv CO<sub>2</sub>na 65 %. – Retrived from: <https://ua.interfax.com.ua/news/greendeal/758997.html> [in Ukrainian].
- 3) Zhou, J., Liu, F., Gong, Y., Sui, J. (2024). Performance investigation of a high-temperature absorption-compression heat transformer with liquid refrigerant injection. *Energy Conversion and Management* 3211, 119110.
- 4) Radchenko, N., Trushliakov, E., Radchenko, A., Tsoy, A., Shchesiuk, O. (2020). Methods to determine a design cooling capacity of ambient air conditioning systems in climatic conditions of Ukraine and Kazakhstan. In: *AIP Conference Proceedings* 2285, 030074.
- 5) Sukhodolia O.M., Kharazishvili U.M., Bobro D.H. Smenkovskiyi A.U., Riabcev H.L., Zavhorodnia S.P. (2020). Energetychna bezpeka Ukrainy: metodolohiia systemnogo analisu ta stratehichnogo planuvannia: analit. dop. Kyiv: NISD. 178 [in Ukrainian].
- 6) Liu, W., Huang, Y. Zhang, X.J. Wang, T., Fang, M.X., Jiang, L. (2024). Heat pump assisted sorption carbon capture with steam condenser heat recovery in a decarbonised coal-fired power plant. *Energy Conversion and Management* 3191, 118919.
- 7) Klute, S., Budt, M., Van Beek, M., Doetsch, C. (2024). Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles. *Energy Conversion and Management* 299, 117882.
- 8) Sokolov V. (2017). Rekonstrukciia budivel z radykalnym pidvyschenniam enerhoefektyvnosti // *Teplovi nasosy. – Zaporigga. Informacijne enerhetychne ahenstvo «ESKO»*. №2. 42 – 43 [in Ukrainian].

- 9) Radchenko R., Kornienko V., Radchenko M., Mikielwicz D., Andreev. A. Kalinichenko I. (2021). Cooling intake air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by ejector chiller. *Modern Power Systems and Units. V International Scientific and Technical Conference. Kraków, Poland*, Edited by Rerak, M.; Majdak, M.; E3S Web of Conferences. 323. id.00031. 5 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300031>.
- 10) Kobalava, H., Konovalov, D., Kalinichenko, I., Pyrysunko, M. (2024). Study of thermophysical processes in the thermopressor for contact cooling systems. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Edl, M., Machado, J., Xu, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 241–252. Springer, Cham [https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_21).
- 11) Samokhvalov V.S., Konovalov D.V., Bagnenko M.U. (2016). Vtorynni enerhetychni resursy ta energosberezhenia na sudnakh: navchalnyj posibnyk. Mykolaiiv: Ilion. 430. [in Ukrainian].
- 12) Radchenko R.N., Bogdalov N.S., Kalinichenko I.V. (2015). Osnovy racyonalnoho proektirovaniia systemy okhlazhdeniia nadduvochnoho vosdukha sudovoho malooborotnoho dizelia ejektornym teplotransformatorom. *Aviacyonno-kosmicheskaia tekhnika I tehnolohiia. Kharkiv: KhAI. 5 (122). 65-68.* [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit\\_2015\\_5\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2015_5_13) [in Russian].
- 13) Konur, O., Saatcioglu, O.Y., Korkmaz, S.A., Erdogan, A., Colpan, C.O. (2020). Heat exchanger network design of an organic Rankine cycle integrated waste heat recovery system of a marine vessel using pinch point analysis. *International Journal of Energy Research* 44(15), 12312-12328.
- 14) Radchenko, M., Radchenko, A., Mikielwicz, D., Kosowski, K., Kantor, S., Kalinichenko, I. (2021). Gas turbine intake air hybrid cooling systems and their rational designing. *V International Scientific and Technical Conference Modern Power Systems and Units (MPSU 2021), Kraków, Poland*, Edited by Rerak, M.; Majdak, M.; E3S Web of Conferences, Volume 323, id.00030. 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300030>
- 15) Savenkov, O., Radchenko, A., Bileka, B., Scurtu, I.C., Kalinichenko, I. (2022). Improving the Efficiency of Operation of Gas Turbine Plants Based on Turbo-Gear Units. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367.* Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_46).
- 16) Posibnyk. (2020). Iak rozrobyty plan dij dlia staloho enerhetychnogo rosvytku. *Chastyna II. Basovyj kadastr vykydiv. Kyiv. 42* [in Ukrainian].
- 17) Porivniannia vartosti opalennia tverdopalynnym kotlom I teplovym nasosom //NIBE. – Retrived from: <http://www.nibe.ua> [in Ukrainian].
- 18) Derii, V. O., Nechaieva, T. P., and Leshchenko, I.C. (2023). Assessment of the Effect of Structural Changes in Ukraine’s District Heating on the Greenhouse Gas Emissions. *Sci. innov.*, 19(4), 57—65. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.057>.

---

## Criteria-based assessment of the environmental efficiency of heat pump heat supply of objects

### Ivan Kalinichenko

Department of Heat Engineering, Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University, Kherson, Ukraine  
ORCID 0000-0001-6765-6168

### Evgenia Korneeva

Department of Heat Engineering, Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding University, Kherson, Ukraine

---

**Abstract:** Today, the ecological catastrophe of the planet, associated with global warming, pollution of water resources, land and atmosphere, rising water levels in the World Ocean and irrational use of non-renewable energy sources, requires an immediate solution. One of the sources of pollution with harmful substances is the use of thermal power plants as heat supply systems, therefore, to reduce harmful emissions, the work considers a method of alternative heat supply based on a heat pump, taking into account the total criterion of environmental pollution. An analysis of the scale of air pollution by exhaust gases during the operation of thermal power plants was conducted, and harmful consequences that can lead to a deterioration in environmental indicators with the further use of hydrocarbon fuels for heating residential premises were also presented. Thermal pollution of the atmosphere is also observed, which in aggregate negatively affects the climate of our planet. The use of alternative sources of thermal energy generation is proposed to reduce the environmental indicators of atmospheric pollution, but to choose the most effective method of heat supply, it is necessary to perform a criterion comparison that would include the main factors of reducing environmental pollution. The originality of the idea for determining environmentally safe technology of heat supply systems for residential and administrative buildings was the use of a total criterion of environmental pollution, which includes greenhouse gas pollution and thermal pollution during the operation of the heat supply system. Calculations were made of the possibility of using a heat pump for heating a public building, taking into account the total criterion of environmental pollution. The results of the calculations showed the environmental feasibility of the selected method of heat supply to the selected object.

**Keywords:** carbon dioxide, hydrocarbon fuel, low-potential heat, greenhouse effect, heat supply system, thermal pollution, heat pump.

---