

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; О. М. Слободянюк

ЕНЕРГЕТИЧНА, ЕКОЛОГІЧНА ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОАСОСНИХ УСТАНОВОК У ПОРІВНЯННІ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Проаналізовано енергетичну, екологічну та економічну ефективність парокompресійних теплоасосних установок (ТНУ) з різними джерелами низькотемпературної теплоти для систем теплопостачання у порівнянні з альтернативними джерелами теплопостачання. Визначено значення річної економії умовного палива, оцінено зменшення викидів CO₂ та економію коштів на паливно-енергетичних ресурсах і викидах для ТНУ потужністю 1 МВт з різними видами приводу із використанням теплоти різних низькотемпературних джерел.

Ключові слова: енергетична ефективність, економія умовного палива, екологічна ефективність, економічна ефективність, теплоасосна установка.

Вступ

Протягом останніх десятиріч питанням підвищення рівня енергоефективності енерговиробництва у світі та в Україні було присвячено чимало публікацій у галузевих виданнях [1 – 2]. Для України на сьогодні важливо врахувати основні сучасні проблеми, що стосуються розвитку паливно-енергетичного комплексу: критичний стан енергоресурсної бази; застарілі обладнання та технології видобутку, переробки та спалювання органічного палива; низький рівень енергоефективності та екологічної безпеки енерговиробництва; дефіцит вітчизняних паливно-енергетичних ресурсів; високу вартість імпортованих енергоресурсів; зростання екологічних вимог. Погоджуючись із об'єктивністю цих проблем, необхідно розробити низку термінових заходів, реалізація яких дозволить розв'язати проблему забезпечення високого рівня енергетичної ефективності та екологічної безпеки енерговиробництва та енерговикористання.

Подальше суттєве підвищення вартості природного газу в Україні та зростання тарифів на теплову енергію спонукають до пошуку нових високоєфективних джерел теплозабезпечення. Використання теплоасосних установок (ТНУ) у системах теплопостачання сприятиме економії палива та захисту навколишнього середовища за рахунок зниження теплового забруднення та кількості шкідливих викидів продуктів згорання.

Для визначення енергетичної ефективності використання початкової енергії палива та впливу певного виду опалення на екологію Комісією з теплових насосів Європейської Економічної Спільноти (ЄЕС) в 1991 р. був проведений аналіз систем опалення, поширених у Європі. Результати цього аналізу показані в табл. 1 [3]. Як видно з табл. 1, теплові насоси забезпечують високу енергетичну ефективність початкової енергії та значно меншу кількість викидів вуглекислого газу порівняно з альтернативними джерелами теплопостачання.

За останні роки проведено низку досліджень з ефективності застосування теплоасосних установок у теплових схемах джерел енергопостачання. У роботі [4] авторами виконано дослідження з підвищення енергоефективності джерел теплопостачання шляхом використання ТНУ з урахуванням впливу схемних рішень та режимів роботи. Оцінку ефективності ТНУ здійснювали за такими критеріями: економія палива у порівнянні з наявною схемою, річні витрати на паливо та електроенергію, капіталовкладення, собівартість одиниці теплоти, термін окупності, річні приведені затрати та прибуток. У [5] розглядають схеми використання

ТНУ на промислових електростанціях. У дослідженні [6] проаналізовано ефективність ТНУ з електроприводом та з приводом від газотурбінної установки й котлом-утилізатором.

Таблиця 1

Показники систем опалення (за даними ЄЕС) [3]

Система опалення	Енергетична ефективність початкової енергії, %	Викиди CO ₂ , кг/кВт
Електричне опалення	35	0,55
Котел на рідкому паливі, опалення гарячою водою	80	0,29
Газовий котел, опалення гарячою водою	90	0,21
Тепловий насос з електричним приводом	110	0,22...0,14
Абсорбційний тепловий насос	130	0,17
Тепловий насос із приводом від газового двигуна	150	0,12

Авторами [7] проведено порівняльні дослідження трьох систем енергопостачання за собівартістю теплоти (на основі газового котла, теплового насоса та когенераційної установки з тепловим насосом) за умови зміни вартості електроенергії та газу для різних груп споживачів. У роботі [8] проведено оцінку ефективності чотирьох джерел теплопостачання потужністю 3 МВт на основі електричного котла, паливного котла (газ, рідке паливо) та теплонасосної установки. Авторами [9] проведено оцінку енергоефективності теплонасосної установки малої потужності в порівнянні з традиційними джерелами теплопостачання на основі електричного та газового котлів. У роботі [10] оцінено енергетичну та екологічну ефективності теплонасосних установок з різними джерелами низькотемпературної теплоти для підприємств харчової промисловості, визначено та обґрунтовано раціональні температурні режими роботи ТНУ.

У роботах [3 – 10] авторами не здійснено оцінку енергетичної, екологічної та економічної ефективності парокompресійних ТНУ з різними видами приводу в системах теплопостачання порівняно з альтернативними джерелами теплопостачання.

Метою дослідження є визначення енергетичних та екологічних переваг, а також економічних передумов застосування парокompресійних теплових насосів з різними джерелами теплоти для роботи в системах теплопостачання; оцінка енергетичної, екологічної та економічної ефективності ТНУ порівняно з альтернативними джерелами теплопостачання.

Основна частина

У роботі [10] визначено раціональні температурні режими роботи парокompресійних ТНУ, за яких досягається економія умовного палива для різних джерел низькотемпературної теплоти.

На основі цих результатів проводили дослідження ефективності застосування ТНУ тепловою потужністю 1 МВт з різними видами приводу компресора на різних джерелах низькотемпературної теплоти за умови цілорічної роботи ТНУ та змінних температурних режимів роботи протягом року.

Дослідження проводили методом математичного моделювання роботи ТНУ із використанням програми в Excel. Енергетичну, екологічну та економічну ефективність парокompресійних ТНУ порівнювали з ефективністю альтернативних джерел теплопостачання (газової котельні та котельні на рідкому паливі). Досліджували ефективність ТНУ з електроприводом, приводом компресора від газопоршневого двигуна (ГПД) та від дизельного двигуна.

Схеми зазначених ТНУ наведено в роботі [4].

Джерелами низькотемпературної теплоти для ТНУ були: поверхневі та ґрунтові води, вода системи оборотного водопостачання, геотермальні води, повітря, промислові теплові викиди, каналізаційні стічні води та теплота ґрунту. Характеристику джерел низькотемпературної теплоти наведено в роботі [11].

Енергетичну ефективність ТНУ оцінювали показником економії умовного палива. Оцінювали витрату умовного палива котельними (для альтернативних джерел тепlopостачання), ТНУ з приводом від ГПД та від дизельного двигуна. Для ТНУ з електроприводом оцінювали витрату умовного палива під час виробництва електроенергії на електростанціях.

Економія умовного та робочого палива від упровадження ТНУ значною мірою визначається оптимально підібраними режимами роботи ТНУ. Результати досліджень енергетичної ефективності ТНУ за умови змінних режимів роботи наведено в роботі [12].

Дослідження економічної ефективності ТНУ проводили для чинних значень вартості енергоресурсів в Україні. Значення вартості паливно-енергетичних ресурсів, для яких проводили дослідження, показано в табл. 2.

Таблиця 2

Вартість паливно-енергетичних ресурсів

Значення вартості паливно-енергетичних ресурсів	Сфера впровадження ТНУ
	Установи та організації, що фінансуються з державного і місцевих бюджетів, промислові споживачі та інші суб'єкти господарювання (ціни станом на 01.05.14) [13]
Ціна на електроенергію, грн./кВт·год	1,239
Ціна на природний газ, грн./тис. м ³	6266,98

Як уже зазначалось, крім енергетичних переваг, застосування теплових насосів зумовлює зменшення забруднення навколишнього середовища та скорочення шкідливих викидів у атмосферу. Для оцінки екологічної ефективності ТНУ переважно використовують показник зниження кількості викидів CO₂ (див. табл. 1), оскільки він пов'язаний з економічною ефективністю ТНУ. Залучення коштів від продажу квот на викиди CO₂, згідно з Кіотським протоколом, дозволяє підвищити економічну ефективність упровадження ТНУ та скоротити їхній термін окупності. У дослідженні враховано, що додаткові кошти від продажу квот на викиди CO₂ становлять 20 \$/т викидів.

Оцінено зменшення викидів CO₂ під час використання ТНУ потужністю 1 МВт у порівнянні з роботою водогрійної котельні такої ж потужності на природному газі. Ураховували викиди CO₂ під час спалювання газу в котлах (для альтернативних джерел тепlopостачання), під час спалювання робочого палива в ГПД та дизельному двигуні (для привода компресора ТНУ), а також викиди CO₂ під час виробництва електроенергії на електростанціях (для ТНУ з електроприводом). Для оцінювання кількості викидів CO₂ використовували статистичні дані з дослідження [3] (див. табл. 1).

Економічну ефективність від упровадження ТНУ визначають як різницю експлуатаційних витрат заміщеної водогрійної котельні та ТНУ. До експлуатаційних витрат під час роботи водогрійної котельні або ТНУ належать: витрати на паливо, електроенергію, воду, амортизацію обладнання та поточний ремонт, заробітну плату та інші витрати. Найбільш вагомим складником у структурі експлуатаційних витрат та собівартості теплової енергії є витрати на

паливо (для котельних та ТНУ з приводом від ГПД або від дизельного двигуна) та електричну енергію (для ТНУ з електроприводом). Значний вплив на енергетичну і, як наслідок, економічну ефективність ТНУ мають режими роботи ТНУ та температурний рівень обраного джерела низькотемпературної теплоти.

Дослідження економічної ефективності проводили за укрупненими показниками. Для різних варіантів ТНУ оцінювали економію коштів на паливно-енергетичних ресурсах та викидах CO_2 . Для різних джерел теплоти в ТНУ не враховували витрати на спорудження систем відбору теплоти від низькотемпературного джерела.

Запропоновані критерії дозволяють оцінити енергетичну, екологічну та економічну ефективність роботи ТНУ протягом року.

На рис. 1 показані значення річної економії умовного палива (у відсотках) для ТНУ потужністю 1 МВт з різними видами приводу компресора з використанням теплоти різних низькотемпературних джерел. Як видно з рис. 1, для ТНУ з електроприводом економія умовного палива становить 18,51...54,53%; для ТНУ з приводом від ГПД – 48,11...74,07%; для ТНУ з приводом від дизельного двигуна – 42,63...70,71%. Найбільші значення економії умовного палива відповідають таким джерелам теплоти для ТНУ, як: оборотна вода, геотермальні води та промислові теплові викиди, що зумовлено їхнім високим температурним рівнем.

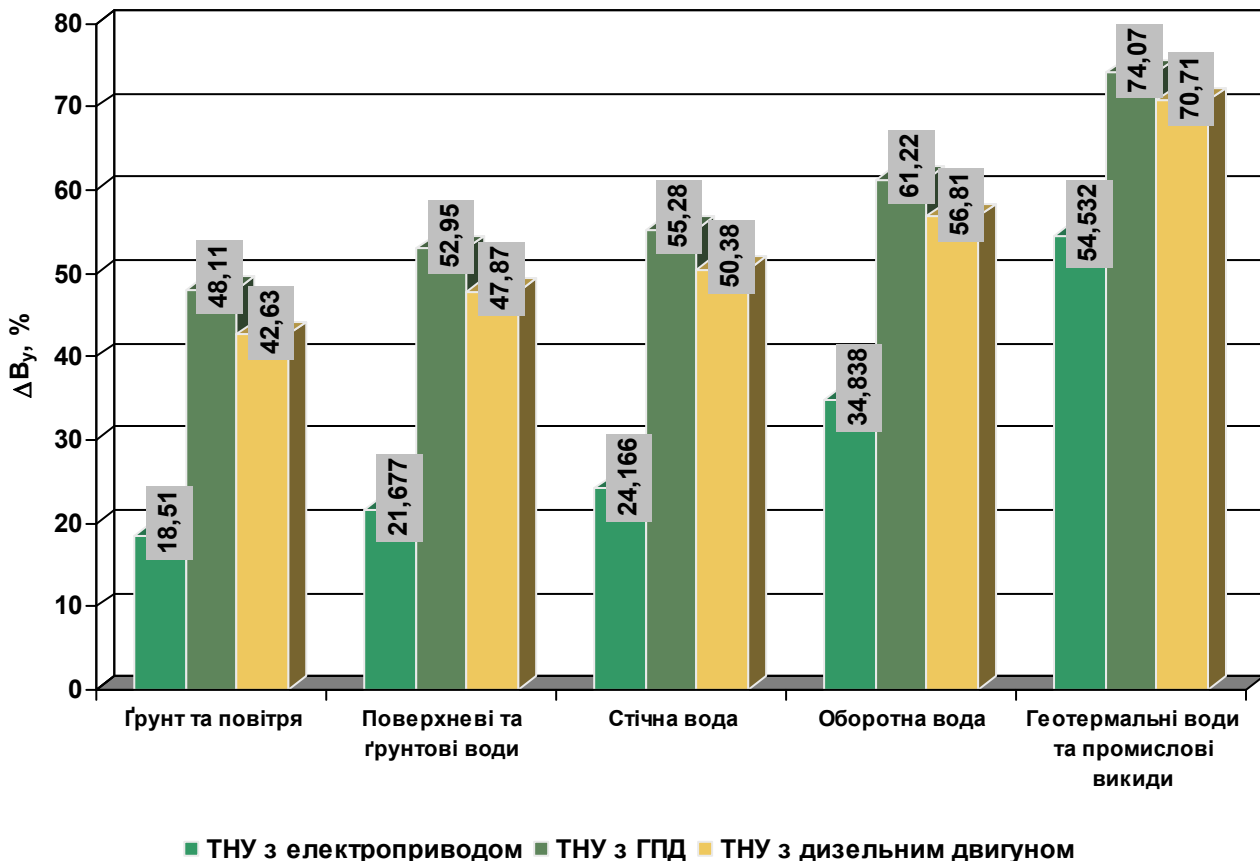


Рис. 1. Значення річної економії умовного палива (у відсотках) для ТНУ з різними видами приводу з використанням теплоти різних низькотемпературних джерел

На рис. 2 наведено значення річної кількості викидів CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт з електроприводом на різних джерелах низькотемпературної теплоти. Тут також для порівняння показано значення річної кількості викидів CO_2 котельною такої ж потужності на газоподібному паливі (ГК) та рідкому паливі (РК). Ураховували викиди CO_2 під час спалювання палива в котлах, а також викиди CO_2 під час виробництва електроенергії на електростанціях. Як видно з рис. 2, під час використання ТНУ з електроприводом фіксують суттєве зниження кількості викидів CO_2 в порівнянні з котельними.

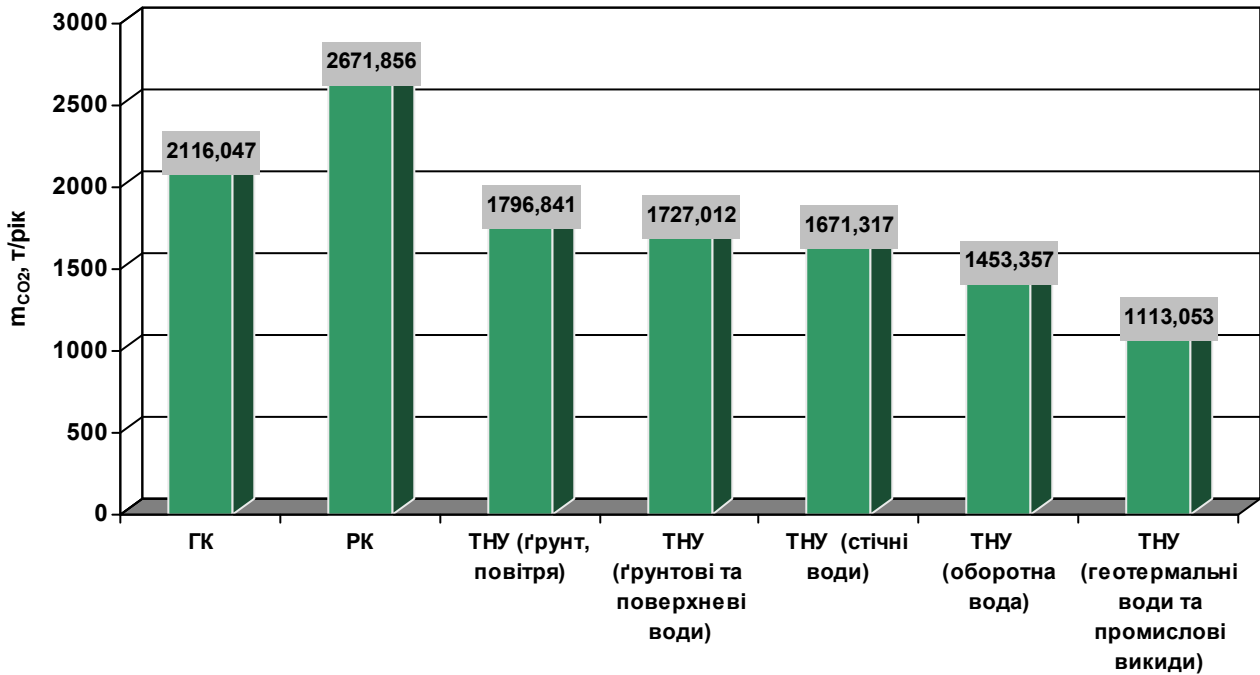


Рис. 2. Значення річної кількості викидів CO_2 котельними на газоподібному і рідкому паливі та ТНУ потужністю 1 МВт з електроприводом на різних джерелах низькотемпературної теплоти

На рис. 3 показано значення річної кількості викидів CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт з приводом від ГПД на різних джерелах низькотемпературної теплоти. Тут для порівняння також показано значення річної кількості викидів CO_2 котельною такої ж потужності на газоподібному паливі (ГК) та рідкому паливі (РК). Як видно з рис. 3, під час використання ТНУ з приводом від ГПД фіксують більш істотне зниження річної кількості викидів CO_2 , ніж для ТНУ з електроприводом (див. рис. 2).

На рис. 4 наведено значення річної кількості викидів CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт із приводом від дизельного двигуна на різних джерелах низькотемпературної теплоти. Як і в попередніх випадках, тут для порівняння показано значення річної кількості викидів CO_2 котельною такої ж потужності на газоподібному паливі та рідкому паливі. Як видно з рис. 4, у випадку використання ТНУ із дизельним двигуном річна кількість викидів CO_2 є більшою, ніж для ТНУ із приводом від ГПД, але меншою, ніж для ТНУ з електроприводом. Як видно з рис. 2 – 4, ТНУ чинять на навколишнє середовище значно менший вплив, ніж котельні.

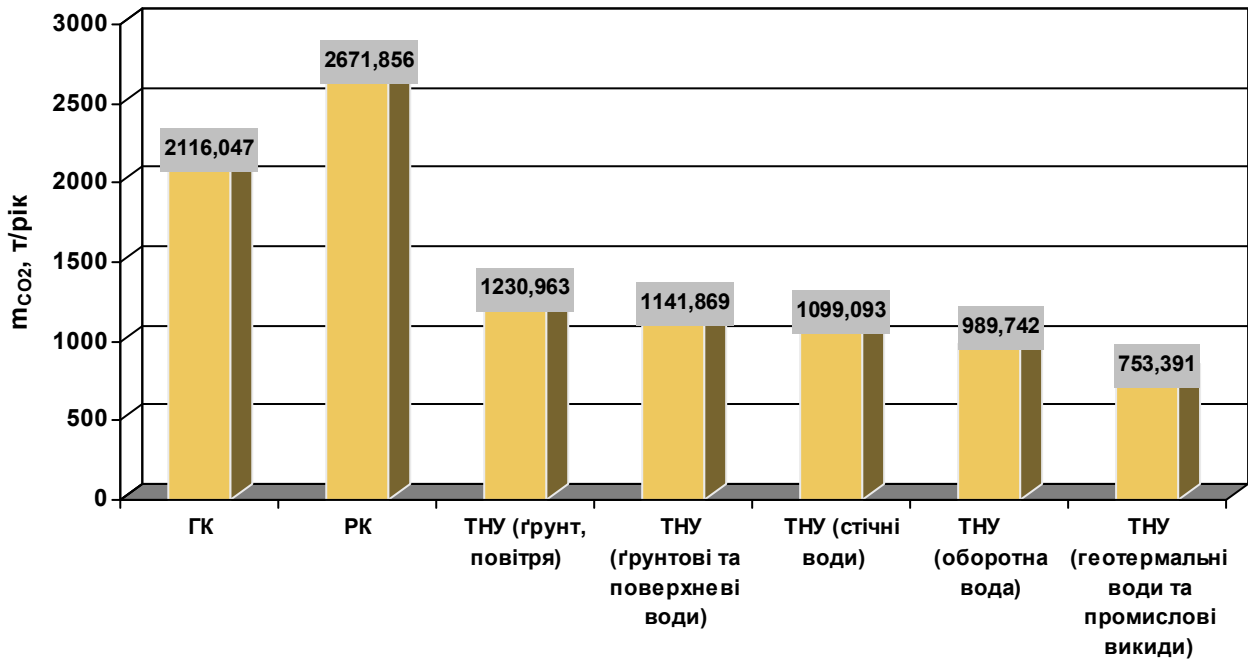


Рис. 3. Значення річної кількості викидів CO₂ котельними на газоподібному і рідкому паливі та ТНУ потужністю 1 МВт із приводом від ГПД на різних джерелах низькотемпературної теплоти

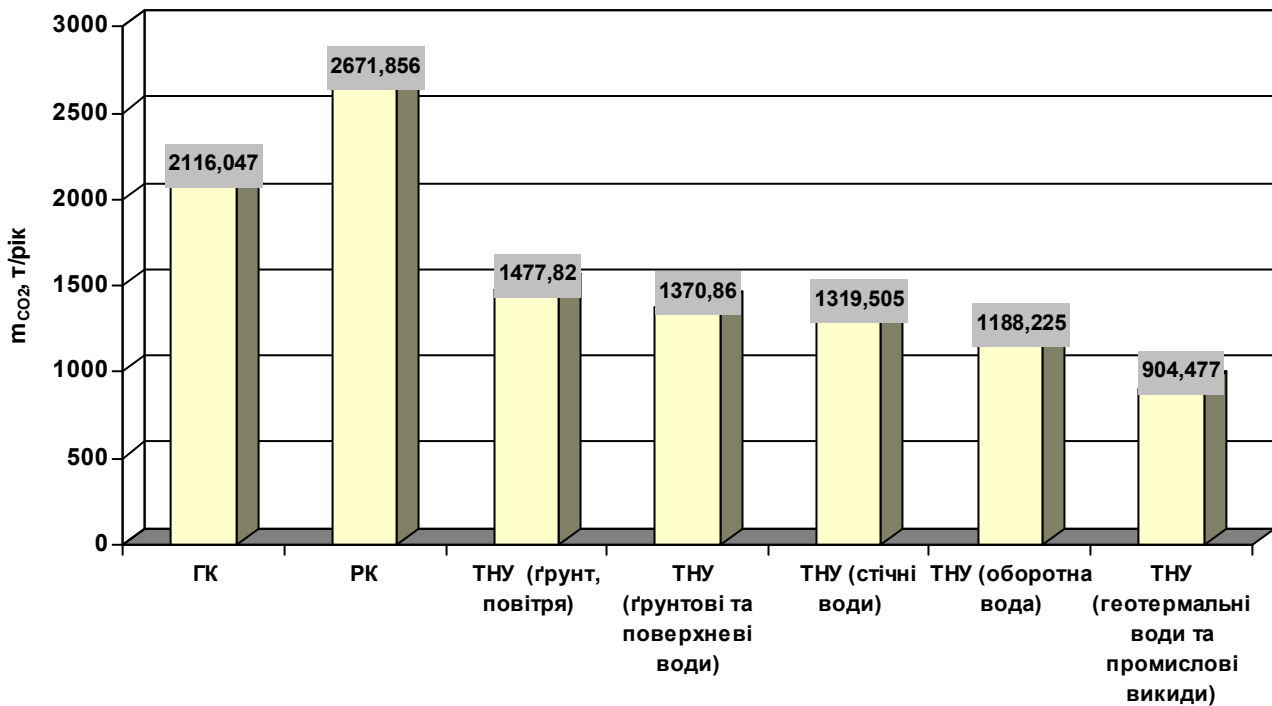


Рис. 4. Значення річної кількості викидів CO₂ котельними на газоподібному і рідкому паливі та ТНУ потужністю 1 МВт із дизельним приводом на різних джерелах низькотемпературної теплоти

На рис. 5 показано значення річного зменшення кількості викидів CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу компресора на різних джерелах низькотемпературної теплоти. Найбільші значення річного зменшення кількості викидів CO_2 відповідають таким джерелам теплоти для ТНУ, як: оборотна вода, геотермальні води та промислові теплові викиди. Це зумовлено високим температурним рівнем вказаних джерел низькотемпературної теплоти та, як наслідок, високою енергетичною ефективністю ТНУ у випадку використання цих джерел низькотемпературної теплоти.

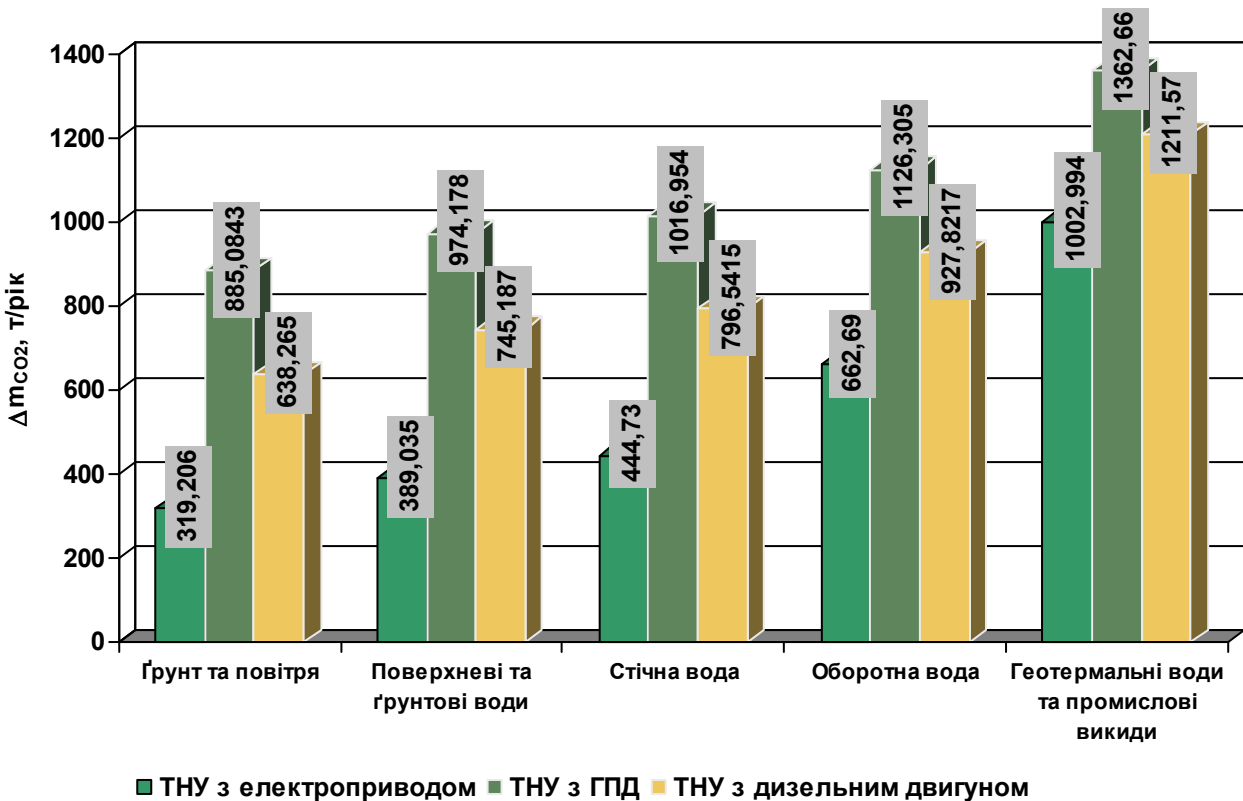


Рис. 5. Значення річного зменшення кількості викидів CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу компресора на різних джерелах низькотемпературної теплоти

На рис. 6 наведено значення річного зниження кількості викидів CO_2 (у відсотках) для випадків використання ТНУ з різними видами приводу на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні. Із рис. 6 видно, що для ТНУ з різними видами приводу для всіх досліджених джерел низькотемпературної теплоти забезпечується зменшення кількості викидів CO_2 .

На рис. 7 показано значення річної економії коштів ΔE_B на викидах CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу на різних джерелах низькотемпературної теплоти порівнянні з роботою газової котельні. Залежно від обраного варіанта застосування ТНУ річна економія коштів на викидах CO_2 становитиме від 76,609 до 327,037 тис. грн./рік.

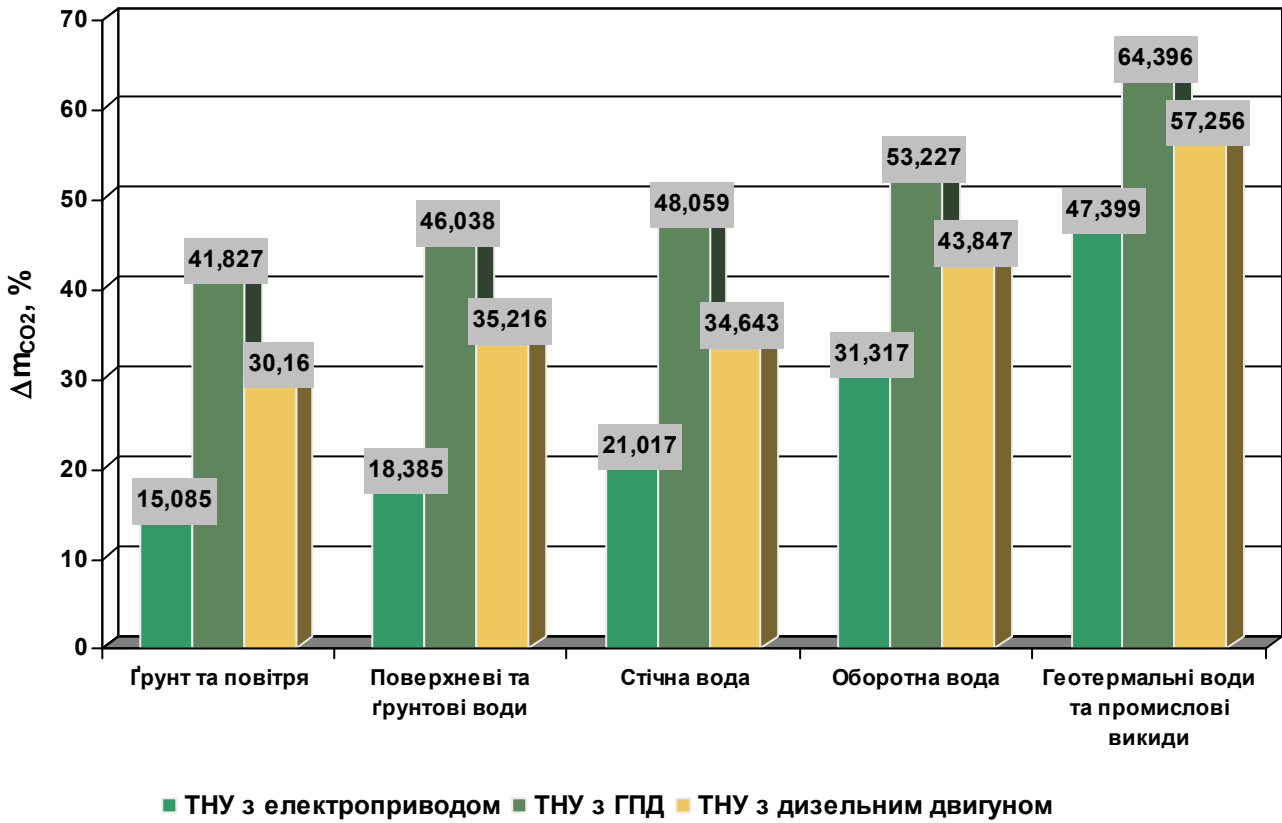


Рис. 6. Значення річного зниження кількості викидів CO₂ (у відсотках) для випадків використання ТНУ з різними видами приводу на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

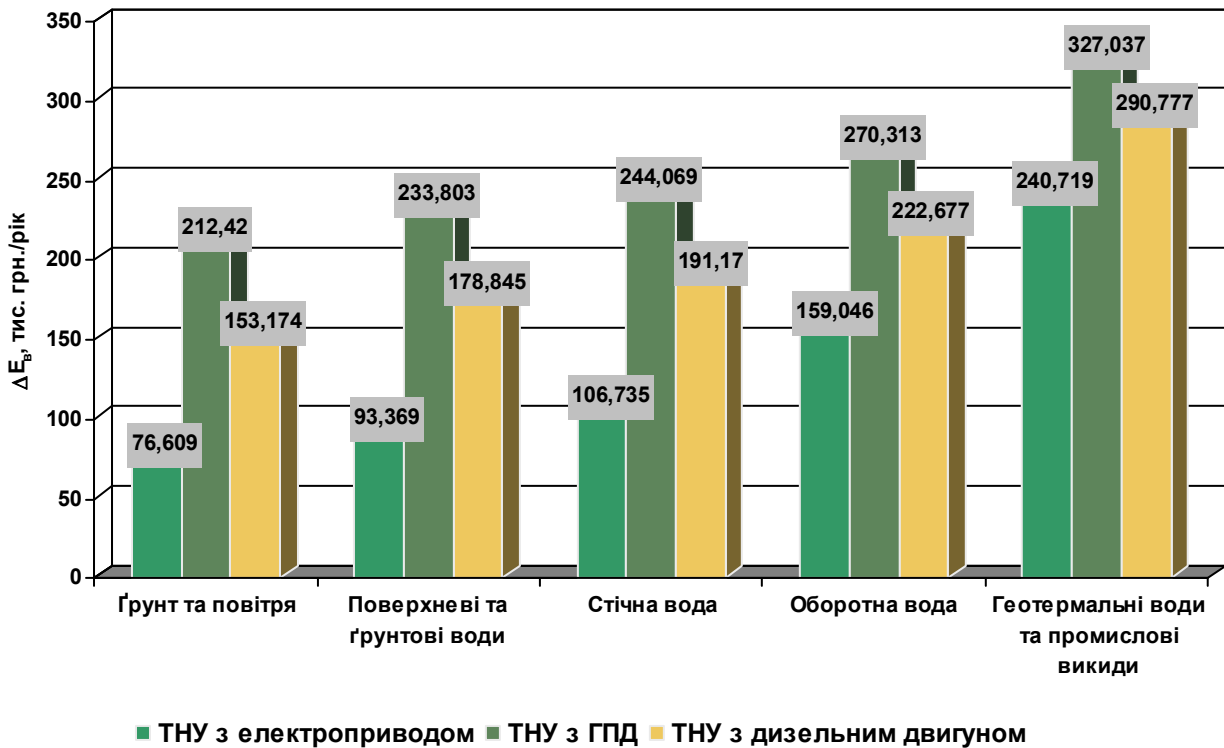


Рис. 7. Значення річної економії коштів на викидах CO₂ під час використання ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

На рис. 8 показано розподіл річної економії коштів на паливі $\Delta E_{\text{п}}$ та викидах $\Delta E_{\text{в}}$ для випадків використання ТНУ з приводом від ГПД на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні. Як видно з рис. 8, найбільші значення річної економії коштів на паливі та викидах відповідають таким джерелам теплоти для ТНУ, як: оборотна вода, геотермальні води та промислові теплові викиди. Це зумовлено високим температурним рівнем указаних джерел низькотемпературної теплоти, високою енергетичною ефективністю ТНУ та значною економією палива у випадку використання цих джерел низькотемпературної теплоти.

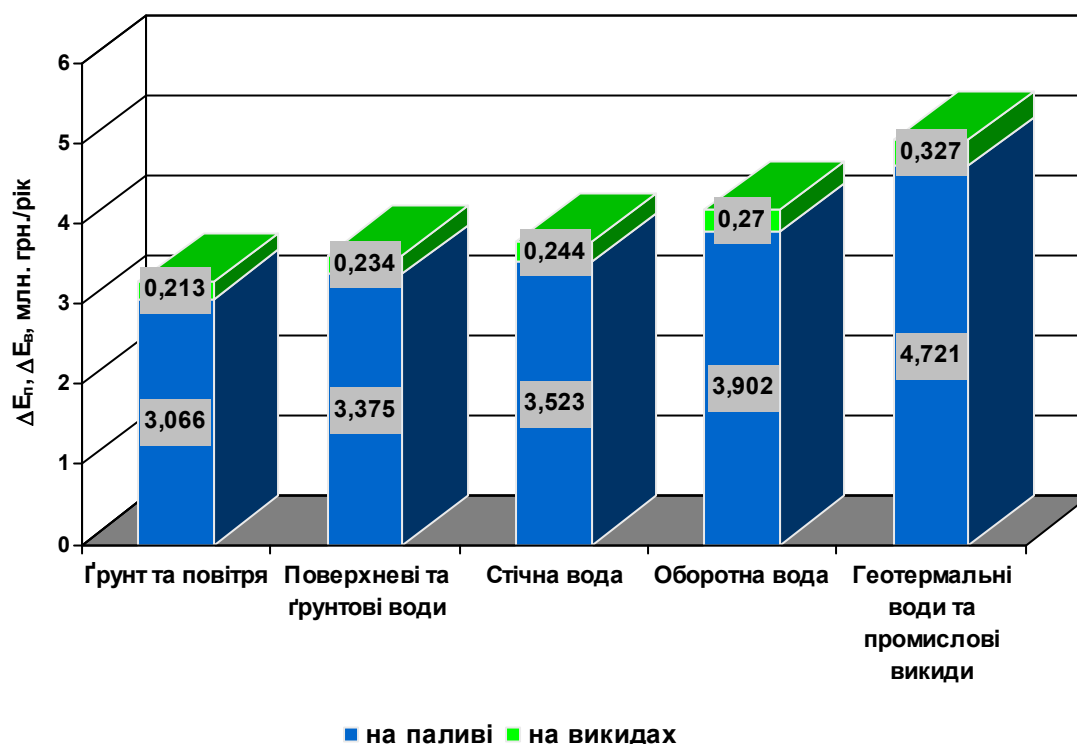


Рис. 8. Розподіл річної економії коштів на паливі та викидах для випадків використання ТНУ з приводом від ГПД на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

На рис. 9 показано розподіл річної економії коштів на паливно-енергетичних ресурсах $\Delta E_{\text{п}}$ та викидах $\Delta E_{\text{в}}$ від використання ТНУ з електроприводом для різних джерел низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні.

Із рис. 8 та 9 видно, що за умови застосування ТНУ з електроприводом досягають більшої економії коштів (на паливі та загальній), ніж для ТНУ з приводом від ГПД. Це зумовлено, насамперед, значними обсягами економії високовартісного робочого палива (природного газу) від застосування ТНУ з електроприводом.

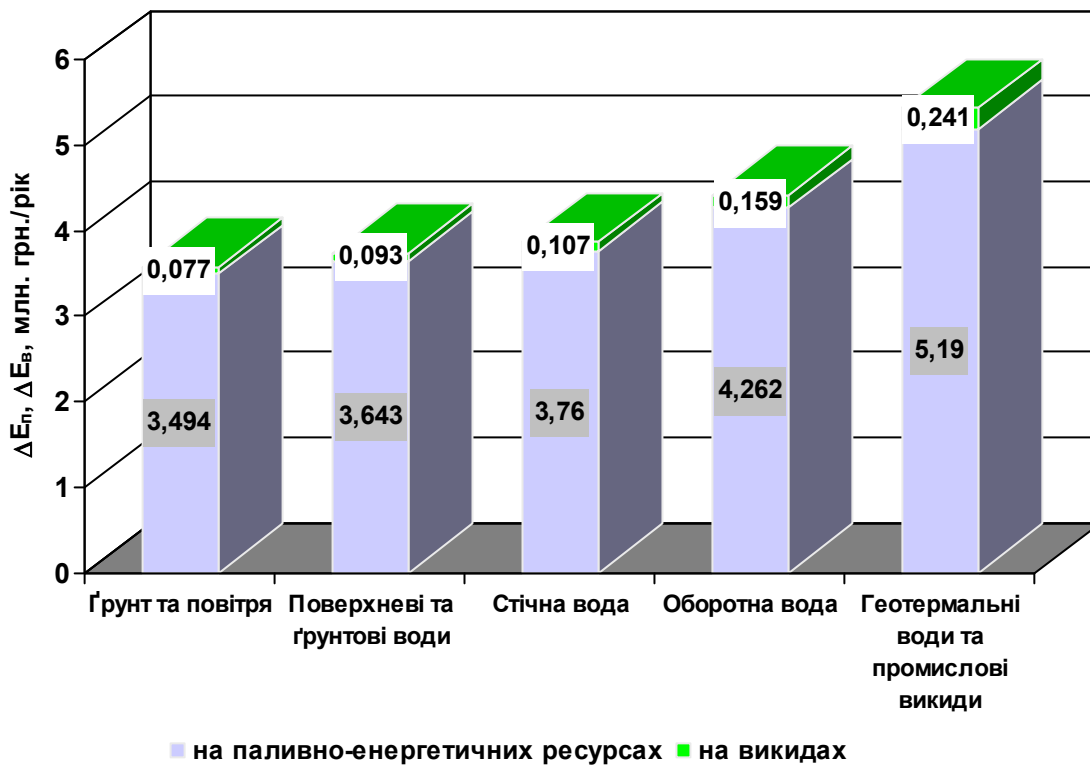


Рис. 9. Розподіл річної економії коштів на паливно-енергетичних ресурсах та викидах від використання ТНУ з електроприводом для різних джерел низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

Висновки

Здійснено оцінку енергетичної, екологічної та економічної ефективності парокompресійних ТНУ з різними видами приводу в системах теплопостачання в порівнянні з альтернативними джерелами теплопостачання.

Визначено значення річної економії умовного палива для ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу з використанням теплоти різних низькотемпературних джерел. Залежно від обраного джерела низькотемпературної теплоти економія умовного палива становить: для ТНУ з електроприводом – 18,51...54,53%; для ТНУ з приводом від ГПД – 48,11...74,07%; для ТНУ з приводом від дизельного двигуна – 42,63...70,71%.

Оцінено зменшення викидів CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт в порівнянні з роботою водогрійної котельні такої ж потужності на природному газі. Визначено, що:

- для ТНУ з різними видами приводу для всіх досліджених джерел низькотемпературної теплоти забезпечується зменшення кількості викидів CO_2 ;
- для ТНУ з приводом від ГПД фіксують більш істотне зниження річної кількості викидів CO_2 , ніж для ТНУ з електроприводом;
- у випадку використання ТНУ з дизельним двигуном річна кількість викидів CO_2 є більшою, ніж для ТНУ з приводом від ГПД, але меншою, ніж для ТНУ з електроприводом;
- ТНУ чинять на навколишнє середовище значно менший негативний вплив, ніж котельні.

Оцінено економію коштів на паливно-енергетичних ресурсах та викидах для ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу з використанням теплоти різних низькотемпературних джерел. За умови застосування ТНУ з електроприводом досягають більшої економії коштів (на паливі та загальної), ніж для ТНУ з приводом від ГПД. Це обумовлено, насамперед, значними обсягами економії високовартісного робочого палива (природного газу) від засто-

сування ТНУ з електроприводом.

Найбільші значення економії умовного палива, річного зменшення кількості викидів CO₂, річної економії коштів на паливі та викидах відповідають таким джерелам теплоти для ТНУ, як: оборотна вода, геотермальні води та промислові теплові викиди. Це зумовлено високим температурним рівнем вказаних джерел низькотемпературної теплоти, високою енергетичною ефективністю ТНУ та значною економією палива у випадку використання цих джерел низькотемпературної теплоти.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бертокс Я. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений / Я. Бертокс, Д. Радд. – М. : Мир, 1980. – 606 с.
2. Любчик Г. Н. Ресурсные и экологические проблемы глобального и регионального энергопотребления / Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов // Энергетика и электрификация. – 2002. – № 9. – С. 35 – 47.
3. Драганов Б. Х. К вопросу о тепловых насосах / Б. Х. Драганов, А. В. Мищенко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 94 – 98.
4. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
5. Осипов А. Л. Исследование и разработка схем теплоснабжения для использования низкопотенциального тепла на основе применения теплонасосных установок: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Осипов Айрат Линарович. – Казань, 2005. – 117 с.
6. Маринченко А. Ю. Оптимизация исследований комбинированных теплопроизводящих установок с тепловыми насосами: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Маринченко Андрей Юрьевич. – Иркутск, 2004. – 120 с.
7. Оценка экономической целесообразности использования тепловых насосов в коммунальной теплоэнергетике Украины / Беляева Т. Г., Рутенко А. А., Ткаченко М. В. [та ін.] // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 5. – С. 81 – 87.
8. Долинский А. А. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий / А. А. Долинский, Б. Х. Драганов // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 71 – 83.
9. Анализ экономической эффективности при реализации теплонасосных систем для теплоснабжения / Басок Б. И., Беляева Т. Г., Рутенко А. А. [та ін.] // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 4. – С. 56 – 63.
10. Остапенко О. П. Енергетична та екологічна ефективність теплонасосних установок на підприємствах харчової промисловості / О. П. Остапенко, І. С. Колос // Вісник ВПІ. – 2010. – № 3. – С. 67 – 71.
11. Енергетичний, екологічний та економічний аспекти ефективності теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти [Електронний ресурс] / Остапенко О. П., Бакум О. В., Ющишина А. В. // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 3. Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/viewFile/3040/4626>.
12. Енергетична ефективність теплонасосних станцій з різними джерелами теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / Остапенко О. П., Шевченко О. В., Бакум О. В. // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 4. Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3448/5066>.
13. Національна комісія регулювання електроенергетики України [Електронний ресурс] // Режим доступу: www.nerc.gov.ua.

Остапенко Ольга Павлівна – к. т. н., доцент, доцент кафедри теплоенергетики.

Слободянюк Олександр Михайлович – студент інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет.