

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.

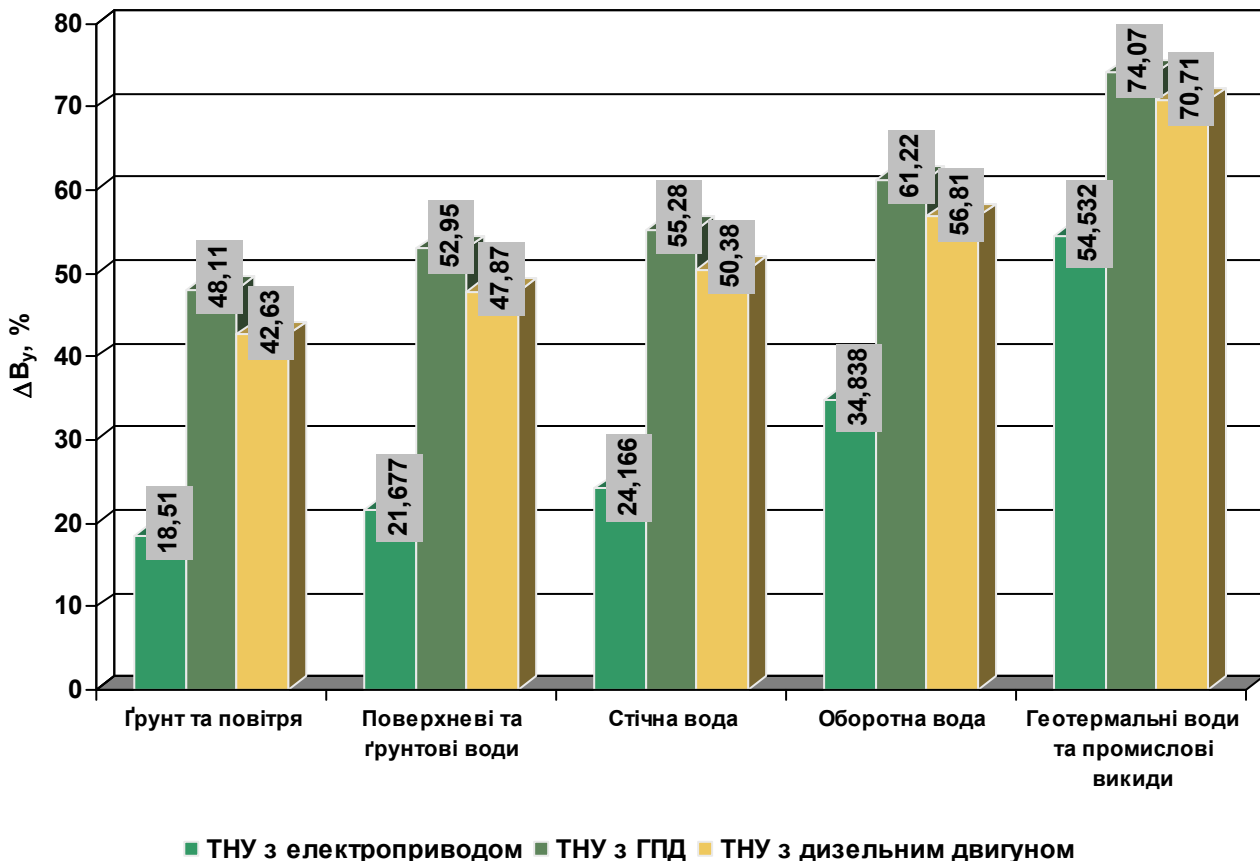


Рис. 1. Значення річної економії умовного палива (у відсотках) для ТНУ з різними видами приводу з використанням теплоти різних низькотемпературних джерел

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.

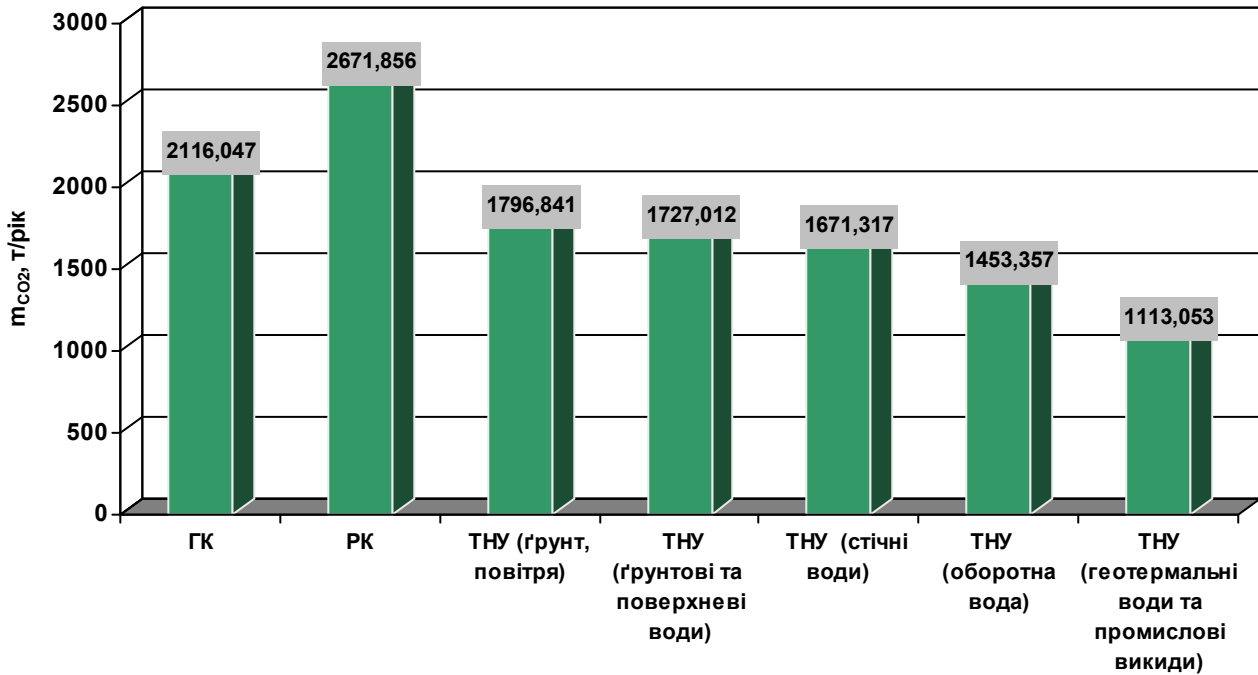


Рис. 2. Значення річної кількості викидів CO_2 котельними на газоподібному і рідкому паливі та ТНУ потужністю 1 МВт з електроприводом на різних джерелах низькотемпературної теплоти

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.

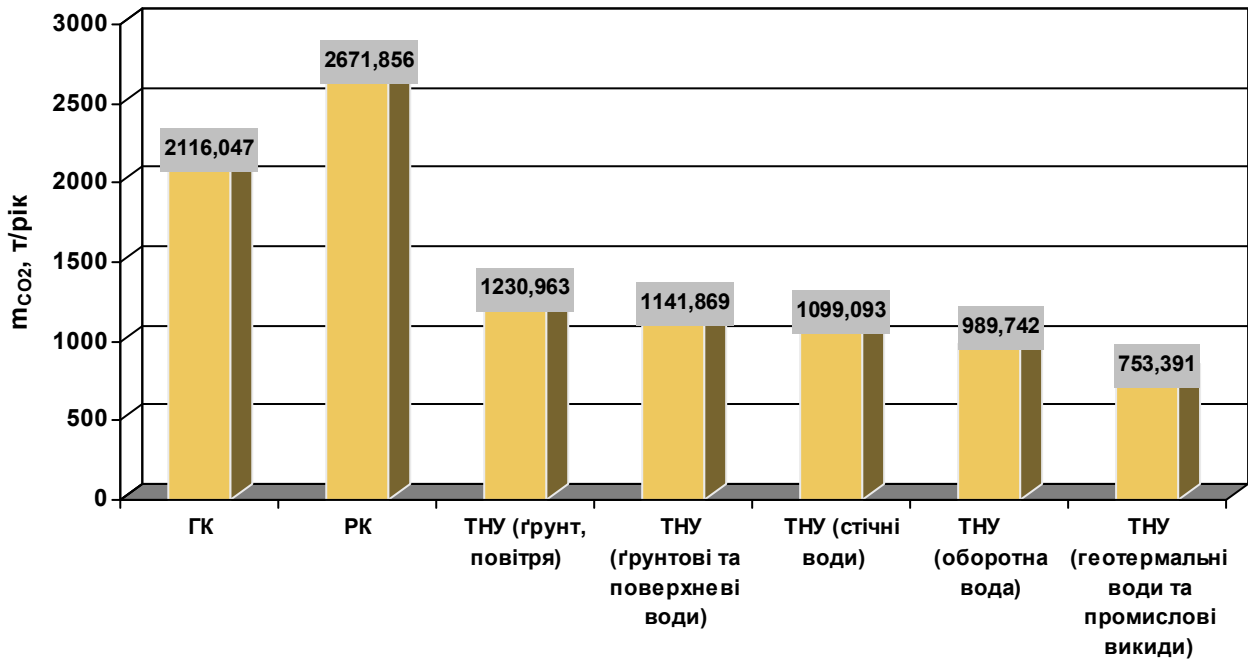


Рис. 3. Значення річної кількості викидів CO₂ котельними на газоподібному і рідкому паливі та ТНУ потужністю 1 МВт із приводом від ГПД на різних джерелах низькотемпературної теплоти

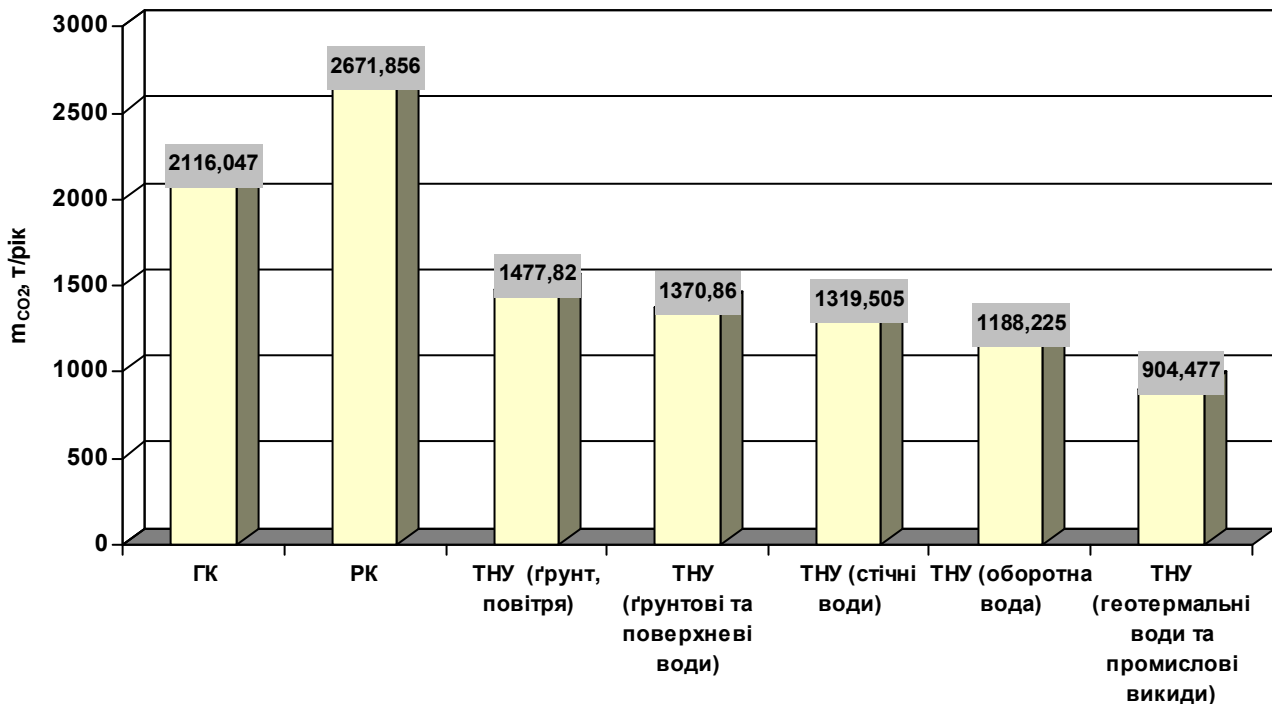


Рис. 4. Значення річної кількості викидів CO₂ котельними на газоподібному і рідкому паливі та ТНУ потужністю 1 МВт із дизельним приводом на різних джерелах низькотемпературної теплоти

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.

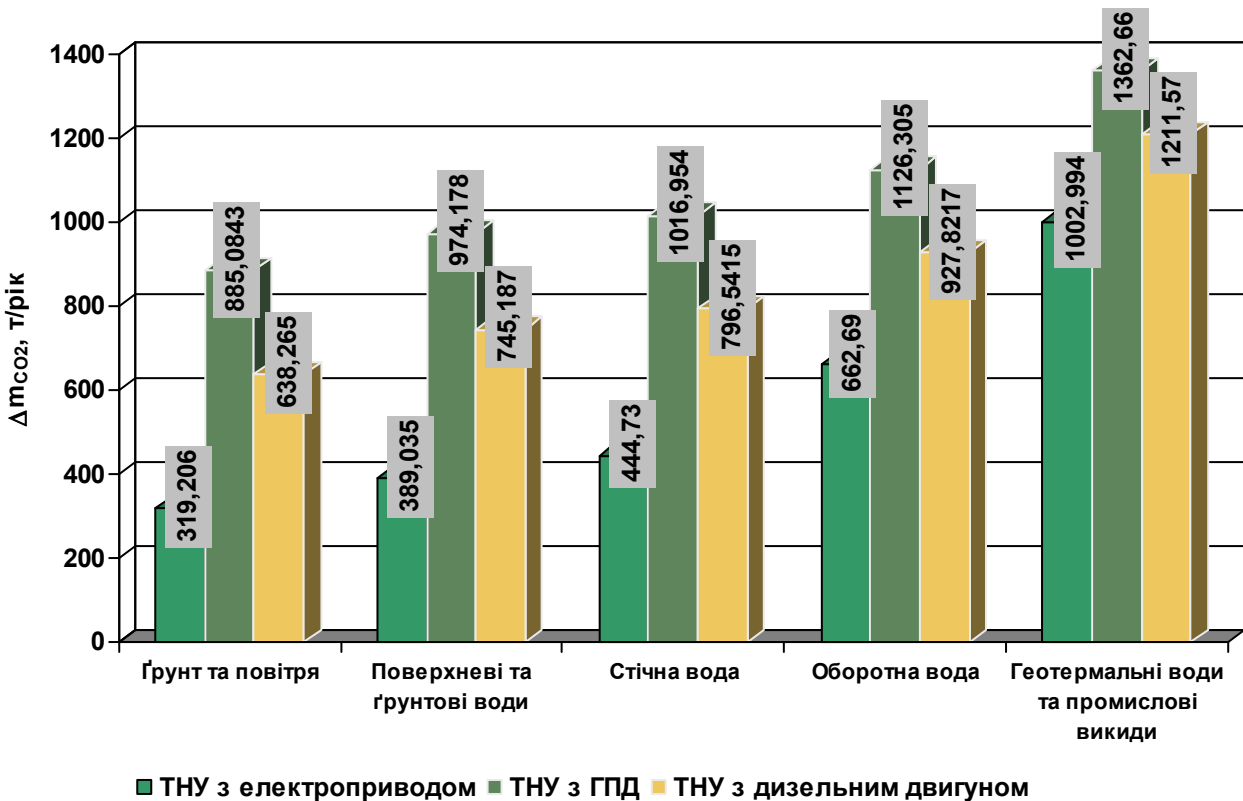


Рис. 5. Значення річного зменшення кількості викидів CO_2 під час використання ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу компресора на різних джерелах низькотемпературної теплоти

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.

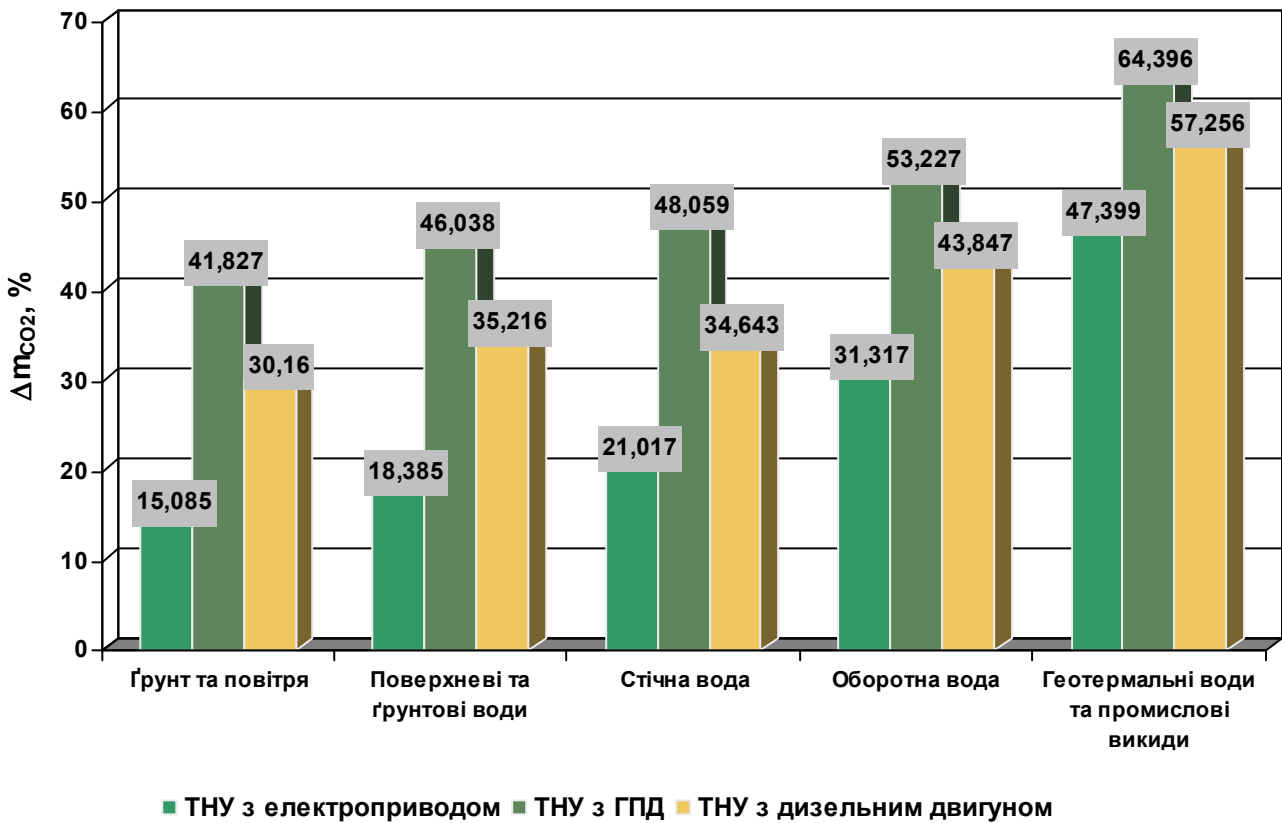


Рис. 6. Значення річного зниження кількості викидів CO₂ (у відсотках) для випадків використання ТНУ з різними видами приводу на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

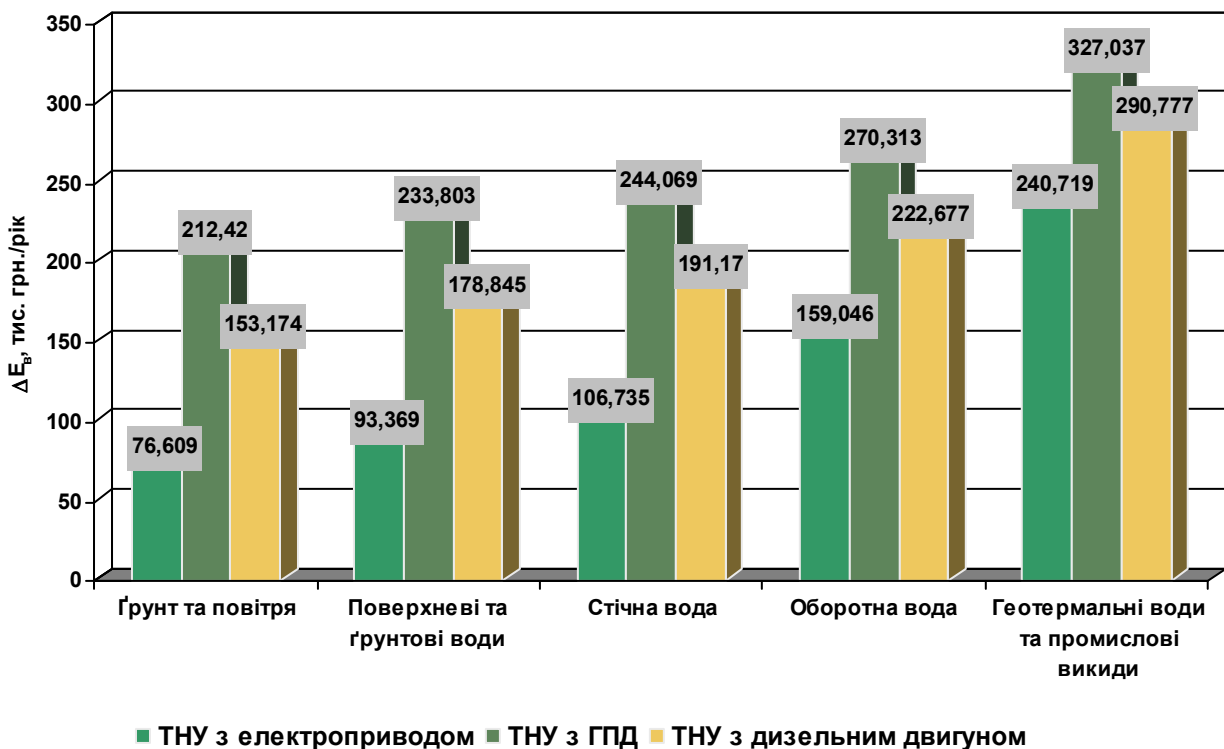


Рис. 7. Значення річної економії коштів на викидах CO₂ під час використання ТНУ потужністю 1 МВт із різними видами приводу на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

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.

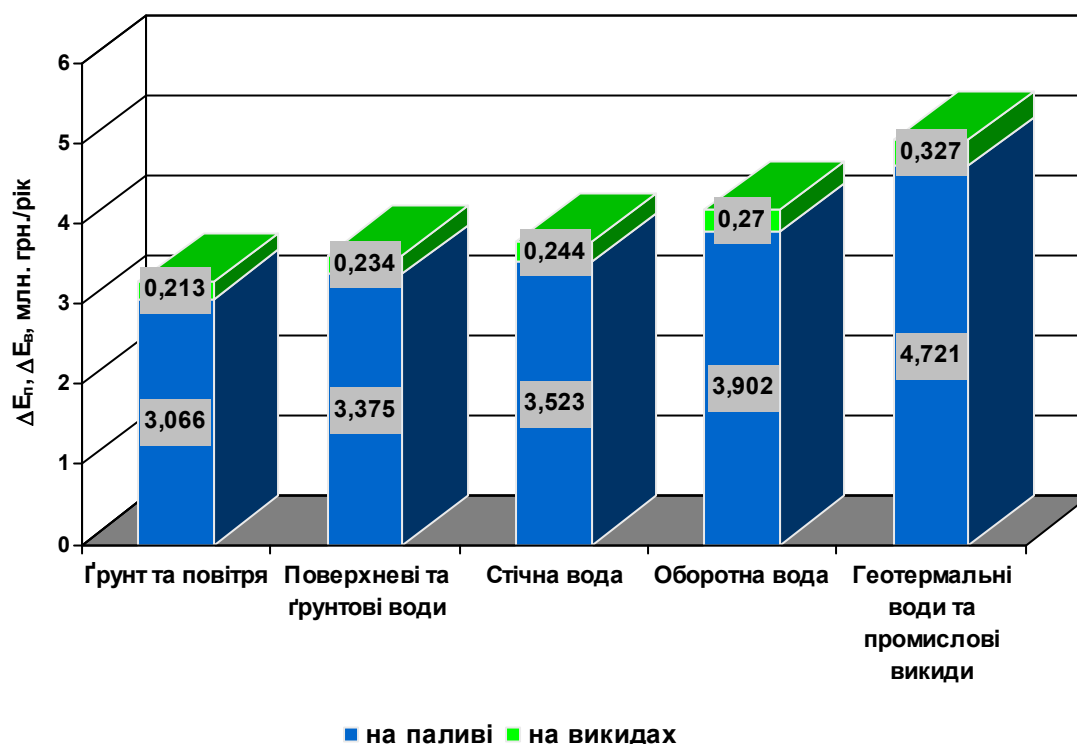


Рис. 8. Розподіл річної економії коштів на паливі та викидах для випадків використання ТНУ з приводом від ГПД на різних джерелах низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

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.

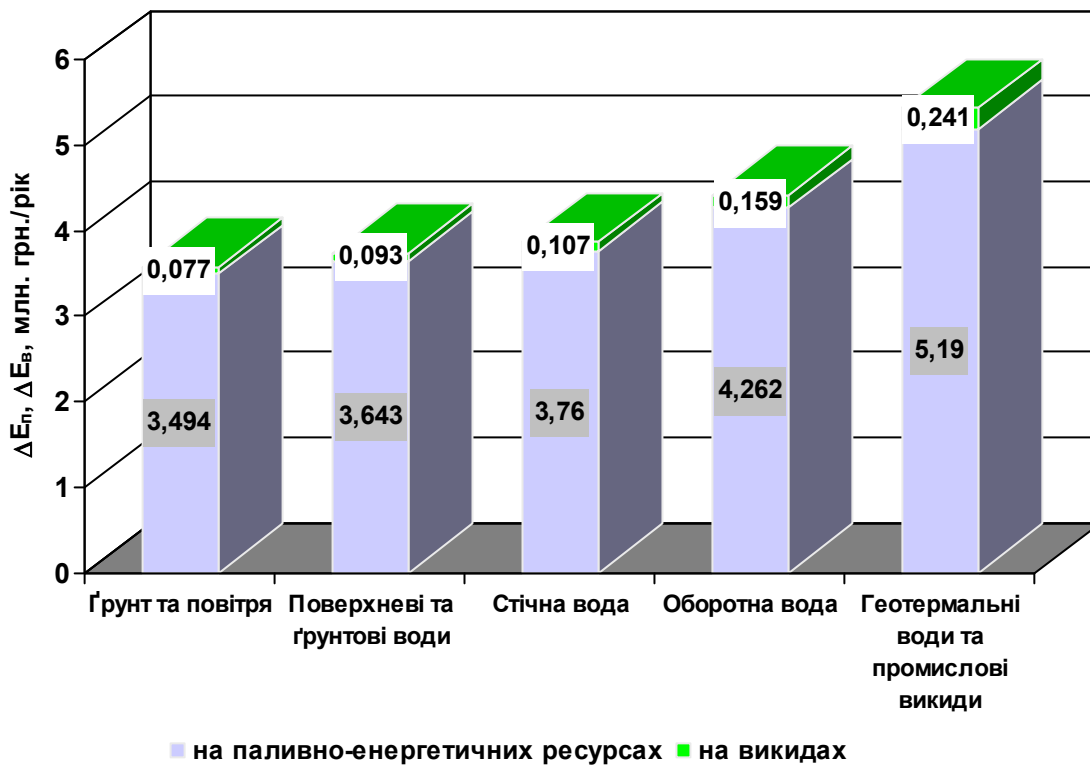


Рис. 9. Розподіл річної економії коштів на паливно-енергетичних ресурсах та викидах від використання ТНУ з електроприводом для різних джерел низькотемпературної теплоти в порівнянні з роботою газової котельні

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 привода 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.

O. P. Ostapenko, Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof.; A. M. Slobodianiuk

ENERGY, ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF STEAM COMPRESSOR HEAT PUMP PLANTS AS COMPARED WITH ALTERNATIVE SOURCES OF HEAT SUPPLY

Energy, ecological and economic efficiency of steam compressor heat pump plants (HPP) with various sources of low temperature heat for heat supply systems in comparison with alternative sources of heat supply has been analyzed. Values of annual saving of equivalent fuel are determined, reduction of CO₂ emissions, cost saving on fuel-energy resources and on emissions for 1 MW HPP with various types of drive, using the heat of different low temperature sources are evaluated.

Key words: *energy efficiency, saving of equivalent fuel, ecological efficiency, economic efficiency, heat pump plant.*

Introduction

During last decades problems of energy efficiency increase of energy generation numerous studies in branch editions in the world and in Ukraine were published [1-2]. Nowadays it is very important for Ukraine to take into consideration main problems, concerning the development of fuel and energy complex: critical state of energy resources base, outdated equipment and technologies of organic fuel mining, processing and burning, low level of energy efficiency and ecological safety of energy production, shortage of domestic fuel and energy resources, high cost of imported energy resources, grows of ecological requirements. Realizing their objective character, a number of urgent measures, realization of which enables to solve the problem of provision of high level of energy efficiency and ecological safety of energy production and energy usage are to be developed.

Further considerable increase of natural gas price in Ukraine and growth of tariffs for heat energy stipulate the search of new highly efficient sources of heat supply. Usage of heat pump plants (HPP) in the systems of heat supply will provide the economy of fuel and protection of the environment as a result of reduction thermal pollution and amount of harmful emissions of combustion products.

For determination of energy efficiency of usage of initial energy of the fuel and impact of certain type of heating on the environment, the Commission on heat pumps of European Economic Community (EEC) in 1991 performed the analysis of heating systems, widely used in Europe. The results of the analysis are shown in table 1 [3]. As it is seen from the table 1, heat pumps provide high energy efficiency of initial energy and produce far less CO₂ emissions, as compared with alternative sources of energy supply.

In recent years a number of research, aimed at study the efficiency of heat pump plants usage in thermal circuits of energy supply sources were performed. In [4] the authors carried out the research, aimed at the increase of energy efficiency of heat supply sources by means of usage of HPP, taking into account the impact of circuit solutions and operation modes. Evaluation of HPP efficiency was performed in accordance with such criteria: fuel saving as compared with existing scheme, fuel and electric energy annual expenses, capital investment, thermal unit cost, term of recoupment, annual matching of expenses and profit. In [5] schemes of HPP usage at industrial electric power plants are considered. In research [6] the efficiency of HPP with electric drive and drive from gas-fired unit and waste-heat boiler is analyzed.

Table 1

Indices of heating systems (according to EEC data) [3]

Heating system	Energy efficiency of initial energy, %	CO ₂ emission, kg/kW
Electrical heating	35	0.55
Liquid fuel boiler, hot water heating	80	0.29
Gas-fired boiler, hot water heating	90	0.21
Heat pump with electric drive	110	0.22...0.14
Absorption heat pump	130	0.17
Heat pump with gas-engine drive	150	0.12

Authors [7] performed comparative studies of three energy supply systems regarding the cost of heat (on the base of gas-fired boiler, heat pump and cogeneration unit with heat pump) on condition of electric energy and gas prices change for different groups of consumers. In [8] evaluation of the efficiency of four 3 MW heat supply sources, based on electric boiler, fuel-fired boiler (gas, liquid fuel) and heat pump plant was carried out. Authors [9] performed evaluation of energy efficiency of heat pump plant of small power as compared with conventional sources of heat supply, based on electric or gas-fired boilers. In [10] energy and ecological efficiency of heat pump plants with various sources of low temperature heat for enterprises of food-processing industry was evaluated, rational temperature operation modes of HPP were determined and substantiated.

In [3–10] authors **did not** perform evaluation of energy, ecological and economic efficiency of steam compressor HPP with various types of drive in heat supply systems, as compared with alternative sources of heat supply.

The aim of research is determination of energy and ecological advantages and economic preconditions of usage of steam compressor heat pumps with different sources of heat for operation in heat supply systems; evaluation of energy, ecological and economic efficiency of HPP as compared with alternative sources of heat supply.

Main part Основна частина

In [10] rational temperature operation modes of steam compressor HPP, at which the economy of equivalent fuel for various sources of low temperature heat is obtained, are determined.

On the basis of these results, the study of the efficiency of HPP with thermal capacity 1 MW with various types of compressor drive, at various sources of low temperature heat on condition of annual operation of HPP and variable temperature modes operation during the year was performed

Study was performed, applying the method of mathematical modeling of HPP operation using program in Excel environment. Energy, ecological and economic efficiency of steam compressor HPP was compared with the efficiency of alternative sources of heat supply (gas-fired boiler house and boiler house, operating in liquid fuel). The efficiency of HPP with electric drive, compressor drive from gas-piston engine (GPE) and drive from diesel engine was investigated. The schemes of the above-mentioned HPP are presented in [4].

The sources of low temperature heat for HPP were: surface and ground waters, water of circulating water supply system, geothermal waters, air, industrial heat emissions, sewage waters and heat of the soil. Characteristic of the sources of low temperature heat is given in [11].

Energy efficiency of HPP was evaluated by the index of equivalent fuel saving. Consumption of equivalent fuel by boiler house (for alternative sources of heat supply), HPP with GPE drive and diesel engine drive was evaluated. For HPP with electric drive, the consumption of equivalent fuel

while electric energy generation at electric power stations was evaluated.

Saving of equivalent and working fuel as a result of HPP introduction is considerably determined by optimally chosen HPP operation modes. The results of investigation of HPP energy efficiency, on condition of variable operation modes, are presented in [12]. Studies of HPP economic efficiency was performed for existing values of energy resources cost in Ukraine. Values of fuel and energy resources cost, for which the study was performed, are showed in table 2.

Table 2

Cost of fuel and energy resources

Value of fuel and energy resources cost	Sphere of HPP introduction
	Institution and organizations, financed from state and local budgets, industrial consumers and other transactor units (management subjects) (price at 01.05.14) [13]
Price of electrical energy, Hrs./($\text{kW}\cdot\text{h}$)	1.239
Price of natural gas, Hrs./thous. m^3	6266.98

As it was already mentioned, besides energy advantages, application of heat pumps leads to decrease of environmental contamination and reduction of harmful emissions in the atmosphere. For evaluation of ecological efficiency of HPP, the index of the amount of CO_2 emissions reduction is used (see table 1), because it is connected with economic efficiency of HPP. Attraction of financial resources, obtained at a result of selling quotas for CO_2 emissions, in accordance with the Kyoto Protocol, allows to increase economic efficiency of HPP introduction and reduce the term of their recoupment. In investigation takes into account that additional financial resources, obtained from selling quotas for CO_2 emissions represent 20 \$/t of emissions.

Reduction of CO_2 emissions while using 1 MW HPP as compared with the operation of hot-water boiler of the same capacity, operating on natural gas is evaluated. Emissions of CO_2 while gas combustion in boilers (for alternative sources of heat supply), while combustion of working fuel in GPE and diesel engine (for compressor drive of HPP) and CO_2 emissions during electric energy generation at electric power plants (for HPP with electric drive) were taken into account. For evaluation of the amount of CO_2 emissions statistical data from the research [3] (see table 1) were used.

Economic efficiency, obtained due to HPP introduction, is determined as the different of operation expenses of substituted hot-water boiler house and HPP. Operation expenses while hot-water boiler house or HPP functioning includes: expenses for fuel, electric energy, water, depreciation of equipment and current maintenance, earnings and other expenses. The most important component in the structure of operation expenses and heat energy cost are fuel expenses (for boiler houses and HPP with GPE drive or diesel engine drive) and electric energy (for HPP with electric drive). Considerable impact on energy and, as a result, economic efficiency of HPP produce HPP operation modes and temperature level of the chosen source of low temperature heat.

Investigations, regarding economic efficiency were carried out according to consolidated indices. For different variants of HPP financial resources saving on fuel-energy resources and CO_2 emissions was evaluated. For different sources of heat in HPP, expenses for construction of heat extraction systems from low temperature source were not taken into account.

The suggested criteria allow to evaluate energy, ecological and economic efficiency of HPP operation during a year.

Fig. 1 shows values of annual saving of equivalent fuel (in %) for 1 MW HPP with different types of compressor drives, using the heat of various low temperature sources. As it is seen from Fig. 1, for HPP with electric drive the saving of equivalent fuel is 18.51...54.53%; for HPP with GPE drive

– 48.11...74.07%; for HPP with the drive from diesel engine – 42.63...70.71%. The greatest values of equivalent fuel saving correspond to such sources of heat for HPP as: circulating water, geothermal waters and industrial heat emissions, that is stipulated by their high temperature level.

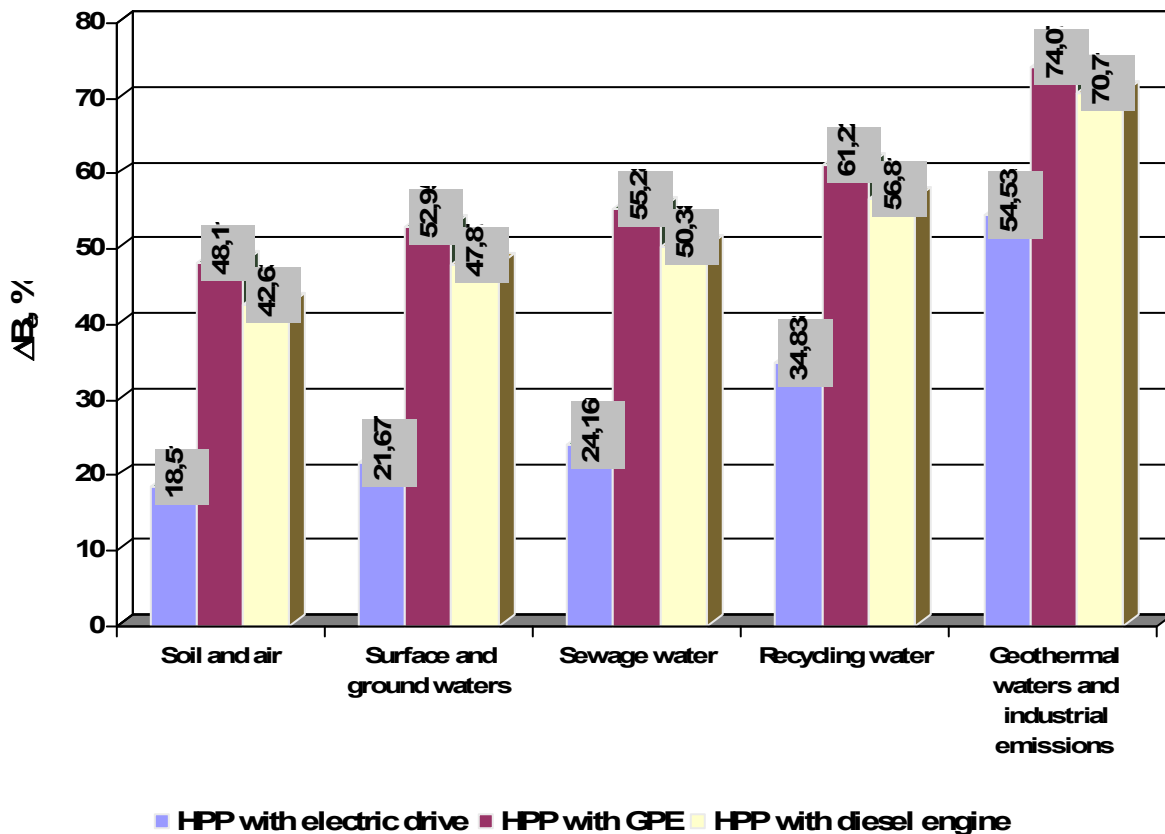


Fig. 1. Values of annual economy of equivalent fuel (in %) for HPP with various types of drive, using heat from different low temperature sources

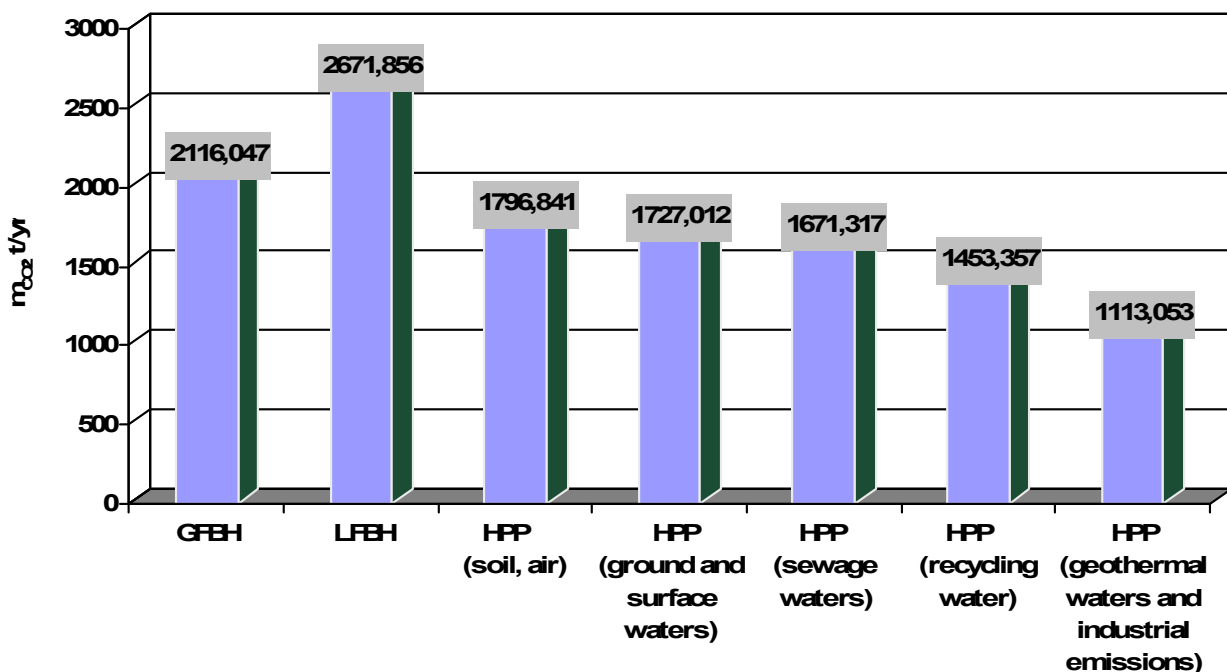


Fig. 2. Values of annual amount of CO₂ emissions produced by boiler houses, operating on gaseous and liquid fuel and 1 MW HPP with electric drive, operating on various sources of low temperature heat

Fig. 2 contains the values of annual amount of CO₂ emissions, while usage of 1 MW HPP with electric drive at different sources of low temperature heat. For comparison the values of annual amount of CO₂ emissions of boiler house of the same power, operating on gaseous fuel (GFBH) and liquid fuel (LFBH) are showed here. Emissions of CO₂ while fuel combustion in boilers and CO₂ emissions in the process of electric energy generation at electric power stations were taken into account. As it is seen from Fig. 2, while usage of HPP with electric drive considerable reduction of the amount of CO₂ emissions as compared with boiler houses is recorded.

Fig. 3 shows the values of annual amount of CO₂ emissions, using 1 MW HPP with GPE drive at different sources of low temperature heat. For comparison, the values of annual amount of CO₂ emissions of boiler house of the same power, operating on gaseous fuel (GFBH) and liquid fuel (LFBH) are shown here. As it is seen from Fig. 3, while using of HPP with GPE drive considerable reduction of the annual CO₂ emissions is recorded, than for HPP with electric drive (see Fig. 2).

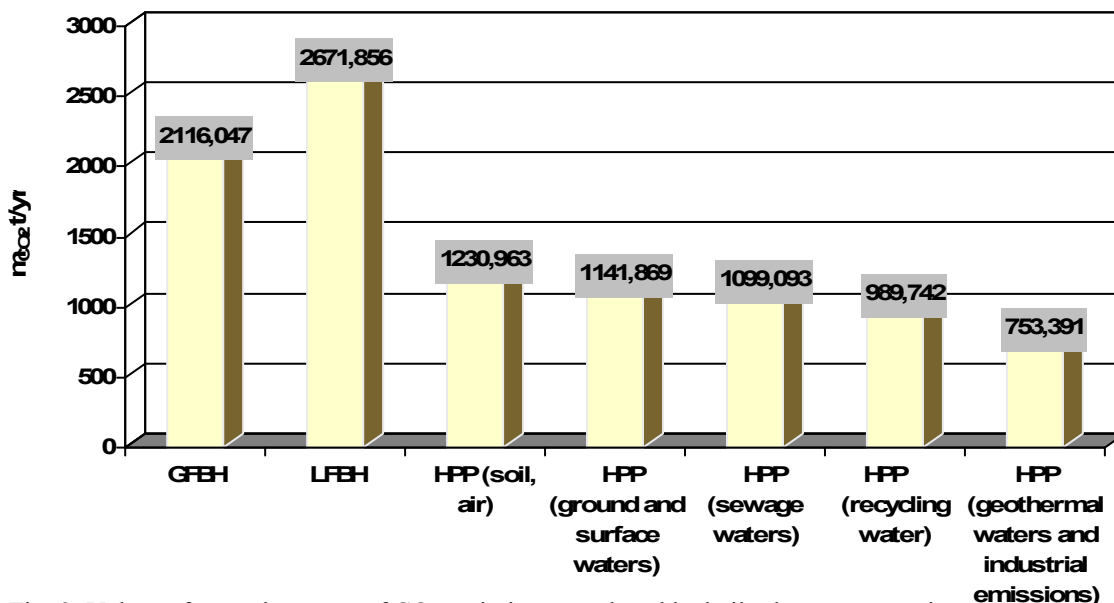


Fig. 3. Values of annual amount of CO₂ emissions, produced by boiler houses, operating on gaseous and liquid fuel and 1 MW HPP, with the drive from GPE, operating on various sources of low temperature heat

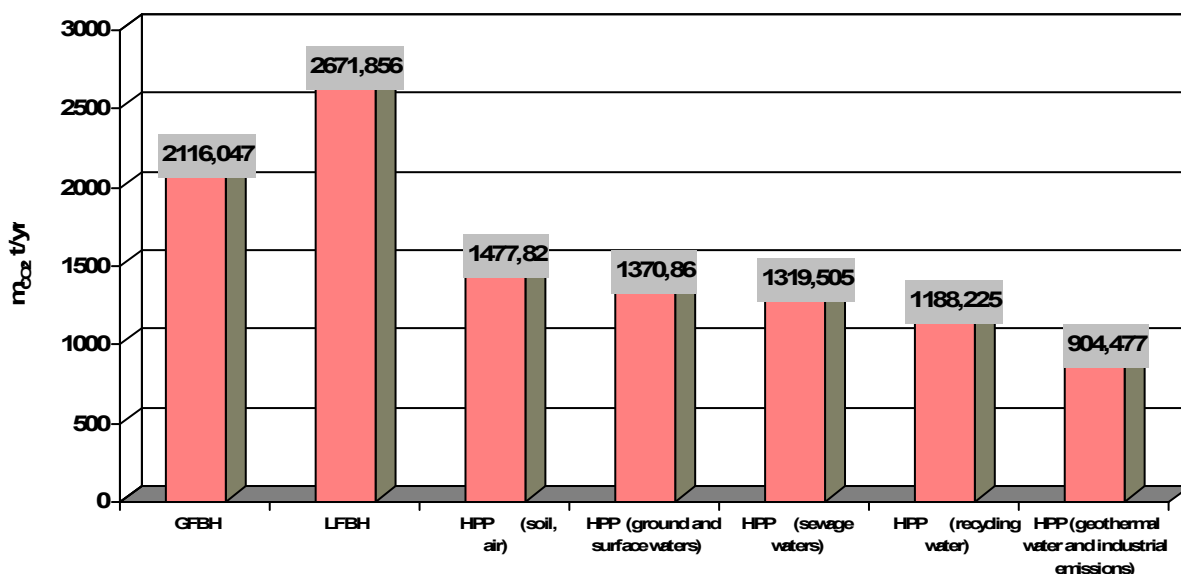


Fig. 4. Values of annual amount of CO₂ emissions, produced by boiler houses, operating on gaseous and liquid fuel and 1 MW HPP, with the diesel drive, operating on various sources of low temperature heat

Fig. 4 contains the values of annual amount of CO₂ emissions while using 1 MW HPP with diesel engine drive at various sources of low temperature heat. As in previous cases, values of annual amount of CO₂ emissions of the boiler house of the same power, operating on gaseous and liquid fuel are shown for comparison. As it is seen in Fig. 4, in case of HPP with diesel engine drive usage, annual amount of CO₂ emissions is greater than for HPP with GPE drive, but less than for HPP with electric drive. As it is seen from Fig. 2 – 4 HPP produces less impact on the environment than boiler houses.

Fig. 5 shows values of annual reduction of CO₂ emissions amount, using 1 MW HPP with different types of compressor drive, at various sources of low temperature heat. The greatest values of annual reduction of CO₂ emissions amount correspond to the following sources of heat for HPP: circulating water, geothermal waters and industrial heat emissions. It is stipulated by high temperature level of the above-mentioned sources of low temperature heat and, as a result, high energy efficiency of HPP in these sources of low temperature heat are used.

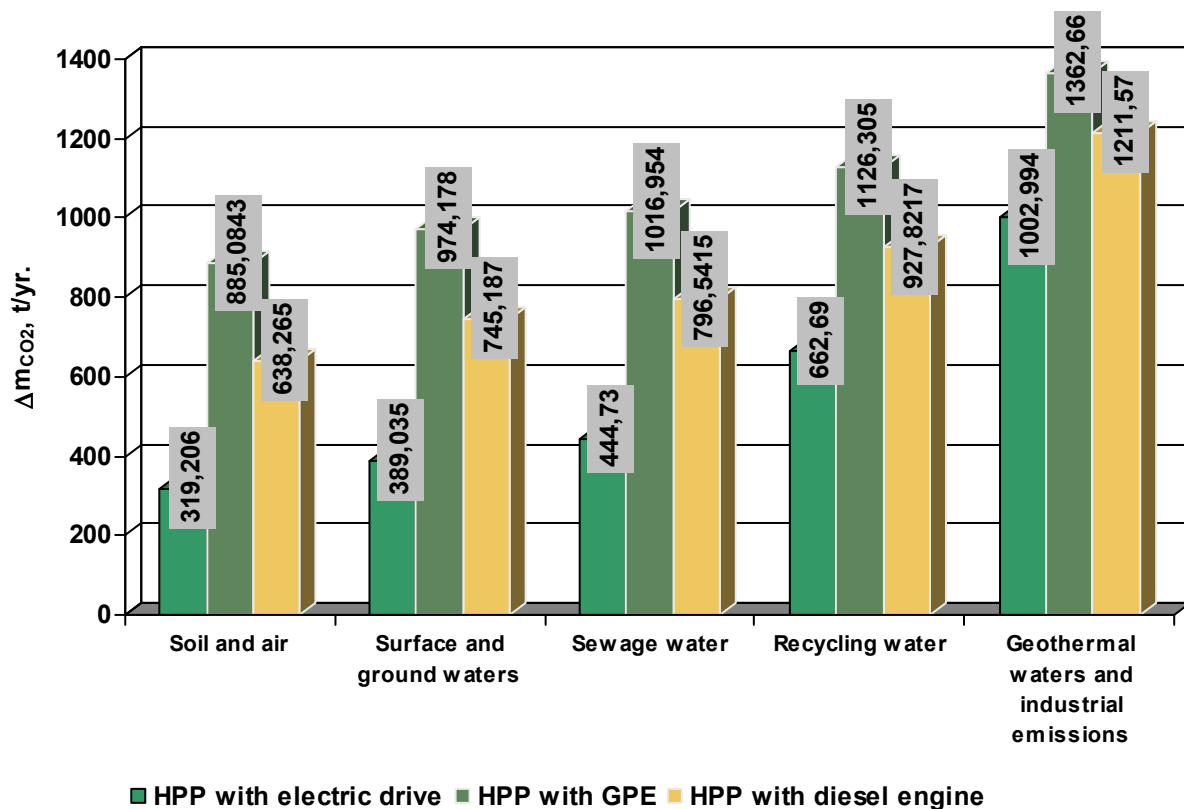


Fig. 5. Values of annual reduction of CO₂ emissions, using 1 MW HPP with various types of compressor drive, at different sources of low temperature heat

Fig. 6 contains the values of annual reduction of CO₂ emissions amount (in %) for the cases when HPP with different types of drive, at various sources of low temperature heat, as compared with the operation of gas-fired boiler house. It is seen from Fig. 6, that for HPP with different types of drive, for all investigated sources of low temperature heat the reduction of CO₂ emissions amount is provided.

Fig. 7 shows the values of annual saving of ΔE_c funds on CO₂ emissions, using 1 MW HPP with different types of drive, at various sources of low temperature heat, as compared with gas-fired boiler house. Depending on the chosen variant of HPP application, annual saving of financial resources on CO₂ emissions will be from 76.609 to 327.037 thous. hrs./yr.

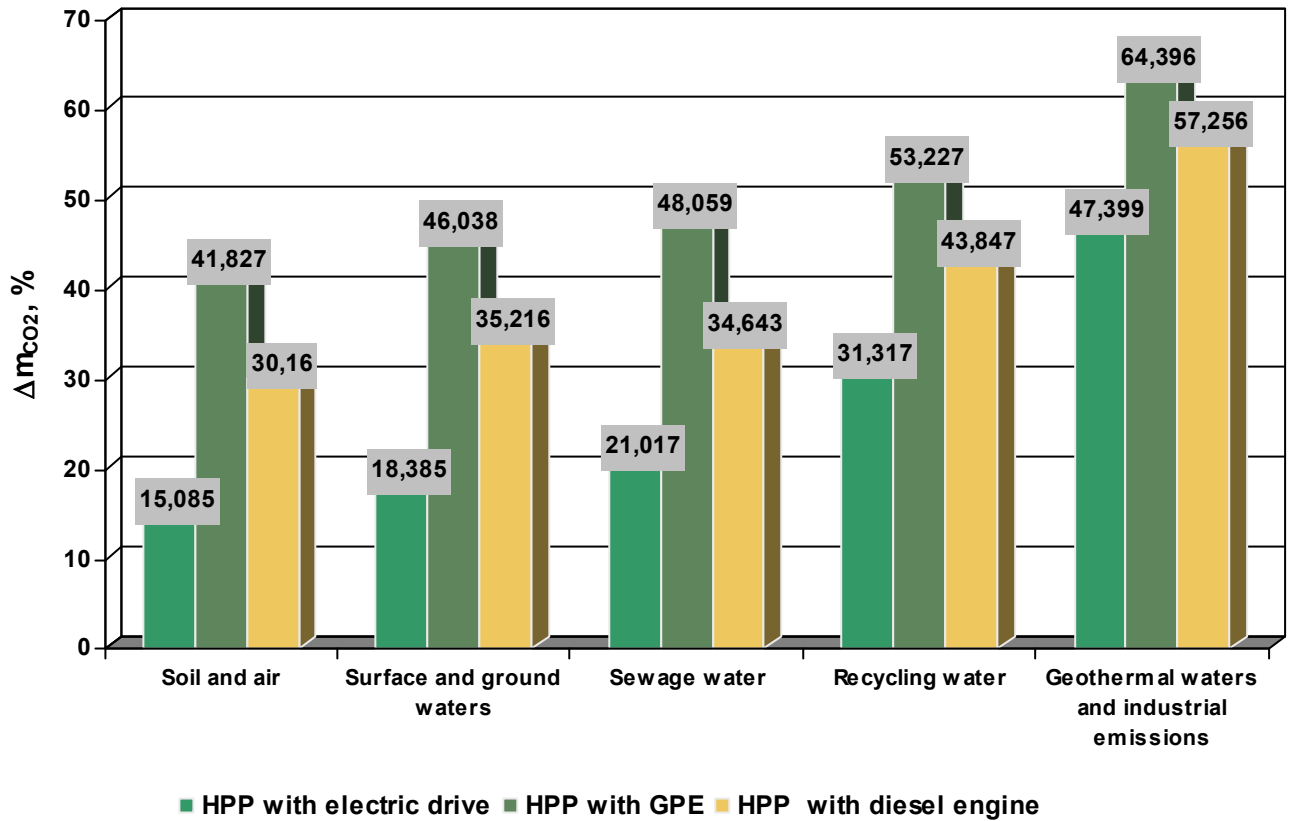


Fig. 6. Values of annual reduction of CO₂ emissions (in %) for the cases of HPP usage with various types of drive at different sources of low temperature heat, as compared with gas-fired boiler house

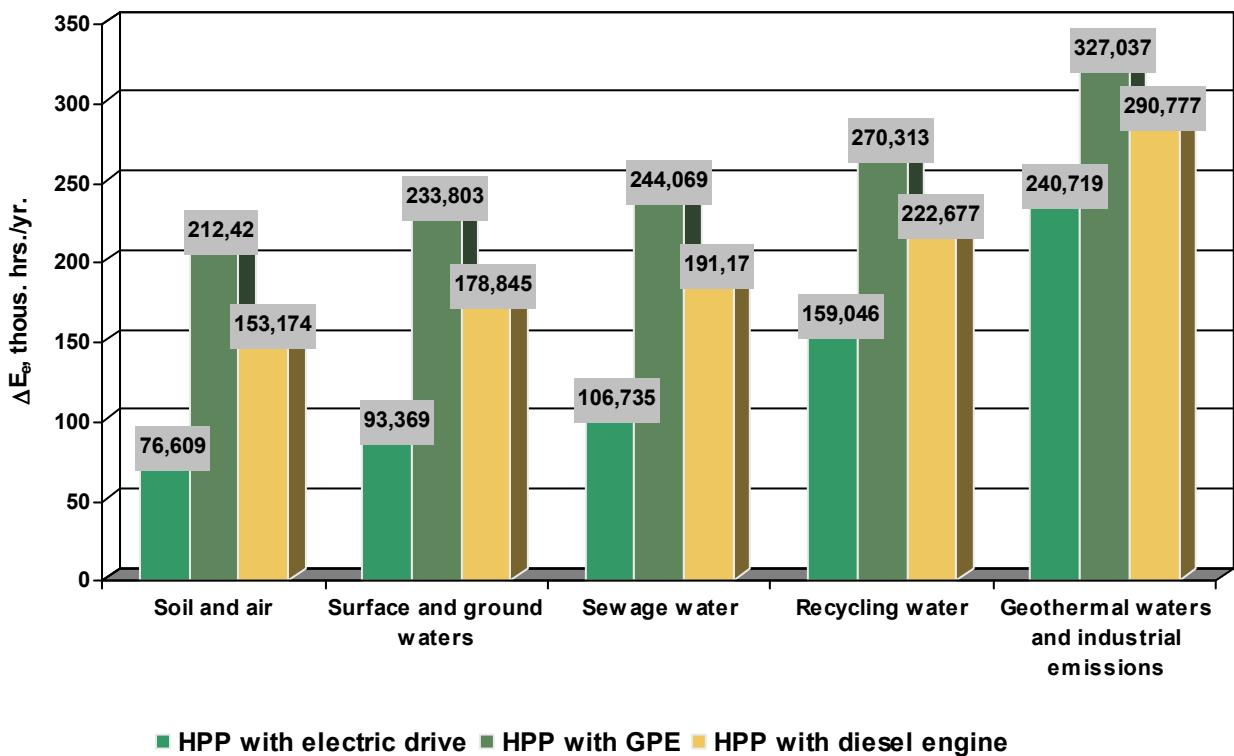


Fig. 7. Values of annual cost saving on CO₂ emissions, using 1 MW HPP with various types of drive on different sources of low temperature heat, as compared with the operation of gas-fired boiler house

Fig. 8 shows the distribution of annual saving of finance on the fuel ΔE_f and emissions ΔE_e for the cases of usage of HPP with GPE drive, at different sources of low temperature heat, as compared with the operation of gas-fired boiler house. As it is seen from Fig. 8, the greatest values of annual saving of finance on fuel and emissions correspond to the following sources of heat for HPP: circulating water, geothermal waters and industrial heat emissions. It is stipulated by high temperature level of the above-mentioned sources of low temperature heat, high energy efficiency of HPP and considerable saving of fuel in case of usage of these sources of low temperature heat.

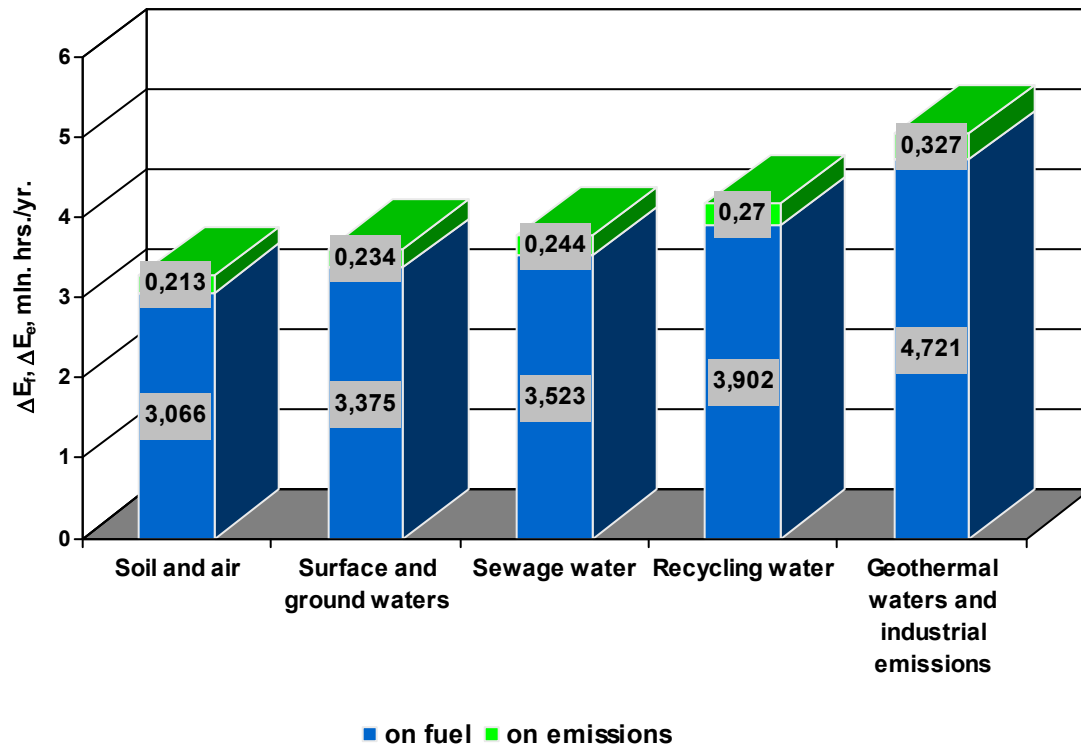


Fig. 8. Distribution of annual cost saving on fuel and emissions for the cases of HPP with GPE-drive, at different sources of low temperature heat, as compared with the operation of gas-fired boiler house

Fig. 9 shows the distribution of annual saving of finance on fuel and energy resources ΔE_f and emissions ΔE_e as a result of usage of HPP with electric drive, for various sources of low temperature heat, as compared with the operation of gas-fired boiler house.

It is seen from Fig. 8 and 9 that in case of usage of HPP with electric drive greater finance saving is obtained (on fuel and general) than for HPP with GPE drive. It is stipulated, first of all, by considerable amounts of expensive working fuel saving (natural gas) as a result of application of HPP with electric drive.

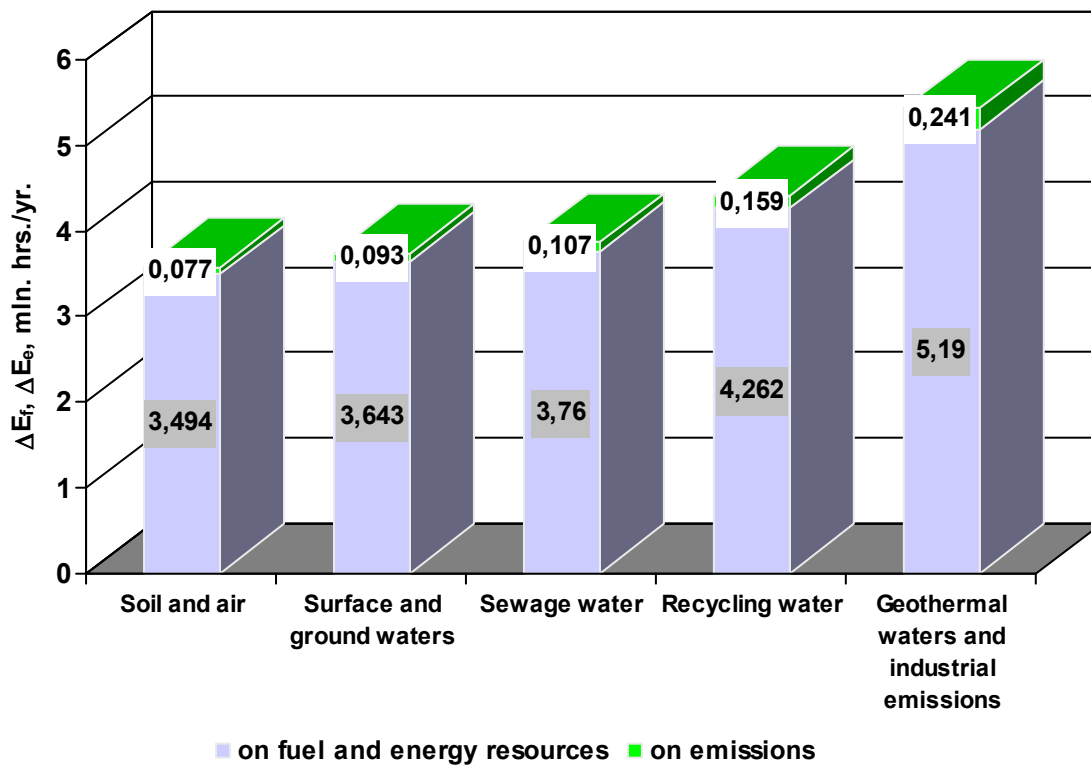


Fig. 9. Distribution of annual cost saving on fuel and emissions as a result of HPP with electric drive usage, for different sources of low temperature heat, as compared with the operation of gas-fired boiler house

Conclusions

Evaluation of energy, ecological and economic efficiency of steam compressor HPP with different types of drive in the systems of heat supply as compared with alternative sources of heat supply is carried out.

Values of annual saving of equivalent fuel for 1 MW HPP with different types of drive, using the heat of various low temperature sources are determined. Depending on the chosen sources of low temperature heat the saving of equivalent fuel is: for HPP with electric drive 18.51...54.53%; for HPP with GPE drive – 48.11...74.07%; for HPP with the drive from diesel engine – 42.63...70.71%. The greatest values of equivalent fuel saving correspond to such sources of heat for HPP as: circulating water, geothermal waters and industrial heat emissions, that is stipulated by their high temperature level.

Reduction of CO₂ emissions while using 1 MW HPP as compared with the operation of hot-water boiler of the same power, functioning on natural gas, was evaluated. It was determined, that:

- for HPP with different types of drive, for all investigated sources of low temperature heat, reduction of the amount of CO₂ emissions is provided;
- for HPP with GPE drive considerable reduction of annual amount of CO₂ emissions than for HPP with electric drive is registered;
- if HPP with diesel engine is used, annual amount of CO₂ emissions is greater than for HPP with GPE drive, but is less, than for HPP with electric drive;
- HPP produce less impact on the environment, than boiler houses.

Economy of finance for fuel and energy resources and emissions for 1 MW HPP with different types of drive, using the heat of various low temperature sources is evaluated. When HPP with electric drive is used, greater saving of resources (on fuel and general), than for HPP with GPE drive is obtained. It is stipulated, first of all, by considerable volumes of expensive working fuel saving (natu-

ral gas) as a result of HPP with electric drive application.

The greatest values of equivalent fuel saving, annual reduction of the amount of CO₂ emissions, annual saving of finance resources on fuel and emissions correspond to such sources of heat for HPP as: circulating water, geothermal waters and industrial heat emissions. It is stipulated by high temperature level of the above-mentioned sources of low temperature heat, high energy efficiency of HPP and considerable saving of fuel in case of usage of these sources of low temperature.

REFERENCES

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 / Беяева Т. Г., Ругенко 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., Беяева Т. Г., Ругенко 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 ВПШ. – 2010. – № 3. – С. 67 – 71.
11. Energy, ecology and economy aspects of the efficiency of heat power stations operating on natural and industrial heat sources [Електронний ресурс] / Ostapenko O. P., Bakum Y. V., Yuschishina A. V. // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – 2013. – № 3. Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3040/4628>.
12. Energy efficiency of heat pumping station s with different heat sources on condition of variable operation modes [Електронний ресурс] / Ostapenko O. P., Shevchenko O. V., Bakum O. V. // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – 2013. – № 4. Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3448/5068>.
13. Національна комісія регулювання електроенергетики України [Електронний ресурс] // Режим доступу: www.nerc.gov.ua.

Ostapenko Olga – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor with the Department of Heat Power Engineering.

Slobodianiuk Olexandre – Student of the Institute of Civil Engineering, Heat Power Engineering and Gas Supply.
Vinnytsia National Technical University.