

УДК 697.4:6 21.58 (088.8):621.577 (079.1)

І.І. ПУХОВИЙ

ТЕПЛОНАСОСНЕ ТА БЕЗПОСЕРЕДНЕ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДОВКІЛЛЯ І ЇЇ ПОТЕНЦІАЛ В УКРАЇНІ

Стан проблеми та постановка задачі

Теплову енергію довкілля (ТЕД) можна використовувати опосередковано шляхом застосування теплових насосів (ТН) або безпосередньо, коли споживачам в системах опалення, вентиляції та кондиціювання повітря достатньо температур мінус 5 - плюс 20°C.

Останнім часом з'явилися систематизовані публікації, присвячені оцінці потенціалу відновлюваних джерел енергії в Україні [1,2]. В [1] зовсім не згадується ТЕД, а в [2], на наш погляд, при оцінці потенціалу ТЕД допущені деякі методичні неточності. Зокрема, в [2] вважається, що ТЕД використовують лише в

теплових насосах і що використання ТН по областях України залежить від кількості виробленої в них електроенергії, нехтуючи її перетоками в енергосистемі. Відомо [3-5], що найвигідніше використовувати ТН на техногенних ТЕД, але в [2] про різноманітність джерел теплоти для ТН мова не йде, хоч це призводить до ігнорування факту, що теплові насоси не можуть давати економію палива завжди. При цьому слід порівнювати технічні показники ТН з джерелом теплової енергії, яке ми замінюватимемо на тепловий насос.

Енергетичні характеристики теплових насосів. Кількість теплової енергії Q_T підвищеного в ТН потенціалу ($40...120^\circ\text{C}$), який використовує електричну або механічну енергію E :

$$Q_T = \varphi E. \quad (1)$$

Коефіцієнт трансформації φ залежить від типу ТН (парокомпресійний або абсорбційний) і, особливо, від абсолютних температур "холодного" джерела T_X та "гарячого" джерела T_T . Під терміном "холодне" розуміється джерело енергії, звідки тепловий насос забирає теплоту, а під терміном "гаряче" - температура теплоносія, що подається споживачу.

Найбільш розповсюджені парокомпресійні теплові насоси, для яких φ знаходиться [6] з рівняння, що враховує необоротність (реальність процесів) у зворотному циклі Карно коефіцієнтом $m=0,5...0,7$:

$$\varphi = m T_T / (T_T - T_X). \quad (2)$$

З формули (2) видно, що збільшенню φ сприяє зменшення різниці $T_T - T_X$. Величина φ для парокомпресійних ТН лежить в межах $2,5...6$, для абсорбційних - $1,5...2$.

Для знаходження економії первинного палива, що згорає на електростанції чи в тепловому двигуні, а також для порівняння ТН з котлами, печами, електронагрівачами, що виконують ту ж саму функцію теплопостачання, вводять коефіцієнт первинної енергії КПЕ [7], який для випадку електричного приводу парового компресора залежить від загального ККД теплоелектростанції η_e та електричних мереж η_m :

$$\text{КПЕ}_e = \varphi \eta_{\text{дв}} \eta_m. \quad (3)$$

Якщо паровий компресор обертається тепловим двигуном, є можливість забрати для теплопостачання теплоту з систем охолодження та викиду димових газів,

утилізація яких складає $K_y=0,3...0,4$ від теплоти внесеної в двигун паливом. Тоді КПЕ збільшується:

$$\text{КПЕ}_T = \varphi \eta_{\text{дв}} + K_y. \quad (4)$$

Величини ККД в формулах (3) та (4):

$$\eta_e = 0,3...0,38;$$

$$\eta_m = 0,85...0,93;$$

$$\eta_{\text{дв}} = 0,35...0,45.$$

Відзначимо, що КПЕ дорівнює ККД для котла, труби та печі і лежить в межах $0,7...0,95$, а для електронагрівача $\text{КПЕ}=0,25...0,28$. Для ТЕЦ, де виробляється два види енергії, $\text{КПЕ}=0,65...0,75$, але порівнювати КПЕ для ТЕЦ з КПЕ для ТН не можна, тому що ТЕЦ виробляє крім теплової ще і якісну електричну енергію.

Котли енергетично ефективніші від ТН, коли $\varphi < 2...2,5$, і тому ТН використовуються в таких випадках, якщо транспорт палива дорогий, а електропостачання централізоване і ТН може економити електроенергію. Теплові насоси дають економію первинного палива порівняно з опалювальним котлом завжди при $\varphi > 3,2...3,5$. При $t_T=60^\circ\text{C}$ і $t_X=30^\circ\text{C}$ (кінцеві температури потоків), коли $\varphi > 6$, тепловий насос залежно від приводного двигуна має $\text{КПЕ}=1,5...1,9$ [7].

При виборі джерела теплопостачання враховують, крім енергетичних показників, і вартість обладнання. Теплові насоси дорожчі котлів в $2...5$ раз (залежно від виробника). Якщо кіловат встановленої теплової потужності котла коштує $50...100$ дол. США, то для ТН - $110...700$ дол. США. Дешеві ТН українського та російського виробництва (110 дол. США/кВт [2]).

Дослідження [3,4] показали, що строк окупності ТН на техногенних викидах в умовах СНД складає $1...3$ роки. Автори [5] підкреслюють велику вигоду ТН при їх використанні з "холодним" джерелом техногенного характеру, особливо при заміні градирень оборотного водопостачання на теплові насоси. При цьому за рахунок глибшого охолодження підвищуються показники технологічних процесів, зменшується витрата води, звільнюються території, зайняті градирнями. В [7] приведенні матеріали стосовно використання теплоти, що викидається з конденсаторів теплових електростанцій. В схемі, запропонованій Кольбушем [7], $\varphi=6,6$, а $\text{КПЕ}=2$.

Безпосереднє використання теплової енергії доквілля. Теплова енергія техногенного

походження з невисоким температурним потенціалом використовується в парниках та теплицях [8]. Відомі пропозиції щодо подачі води з конденсаторів турбін безпосередньо на скляну поверхню теплиць. Для опалення приміщень з експлуатаційними температурами мінус 5...+20°C з успіхом використовується природна теплота, акумульована в ґрунті. В [9] для цього передбаченні вертикальні труби, заповнені гасом, а в [10] використовують закладені в ґрунт пластмасові труби, які забезпечують циркуляцію повітря і відбір теплоти від ґрунту. Повітряні системи [10] впроваджені в США і Австрії для опалення тваринницьких ферм взимку та охолодження там повітря влітку. При опаленні ферм взимку враховуються значні теплові надходження від тварин (на корову - 700...800 Вт), що дозволяє обійтись без традиційних джерел опалення. В США ці системи використовують для охолодження повітря і в житлових будівлях.

Використовувати теплоту кристалізації природної холодної води (ПХВ) для прямого застосування в системах опалення вперше запропоновано в Україні [11]. Ця теплота, що складає 335 кДж/кг, дозволяє підігрівати повітря з негативними температурами (мінус 7...60°C) до температур мінус 3...7°C. Принцип опалення полягає в тому, що повітря підігрівається в так званих "буферних" зонах будинку, що знаходяться по його периферії (засклені лоджії, балкони, веранди, засклені фасади систем пасивного сонячного опалення).

Система ПХВ [12,13] зменшує в 1,5...5 раз затрати традиційної енергії на опалення в житловій зоні з температурою біля 18°C. Чим нижча температура зовнішнього повітря, тим більший ефект від системи ПХВ. Таким чином, ми маємо протилежну залежність ефективності від температури довкілля T_x , ніж в тепловому насосі, тобто система ПХВ може замінити ТН в умовах континентального і холодного клімату при використанні повітря, як холодного джерела. Можливі схеми комбінованого застосування системи ПХВ та ТН у випадку, коли холодним джерелом є вода, яка після охолодження в ТН подається в систему ПХВ для кристалізації.

В Україні, де кількість морозних днів в рік менше 80...100, використання системи ПХВ з метою суттєвої економії енергії обмежене. Більш важливим для України є можливість зменшення установленної потужності традиційних генераторів теплоти [14], яка знаходиться за розрахунковою температурою, що для більшості регіонів нашої країни

нижча мінус 20°C.

Теплоту кристалізації води вигідно використовувати взимку для підігріву вентиляційного повітря і повітря, що йде на горіння в котли. При опаленні приміщень з температурами 5...10°C ефективність системи зростає [15]. Система ПХВ завдяки виробництву льоду при опаленні здатна забезпечити літнє холодопостачання при акумулюванні льоду.

Виробництво льоду взимку з акумулюванням на літо. Ця технологія дозволяє використовувати космічний холод. До 60-х років ХХ століття лід широко використовувався в різних галузях господарства, в основному для зберігання продуктів.

Є цікавий історичний факт використання льоду з його перевезення за тисячі кілометрів: на початку ХІХ століття з Аляски, що була ще російською, доставляли лід в російське поселення (форт Росс) в Каліфорнії. Згадані факти показують можливості використання льоду нині для зменшення витрати електроенергії в холодильних машинах влітку. Цей напрямок енергозбереження і економії палива незаслужено забутий і при оцінці запасів нетрадиційних джерел зовсім не згадується [1,2].

Наші дослідження показали, що холод, вироблений влітку з льоду, дешевший з енергетичної точки зору в 6...32 рази виробленого машинним методом залежно від об'ємів акумулювання льоду, типу холодильних машин, що використовуються влітку, і методів відводу теплоти від конденсаторів холодильних машин. Зауважимо, що завдяки компенсаціям, передбаченим протоколом Кіото, енергетичні затрати на виробництво і акумулювання природного льоду повністю окупуються і в деяких випадках, при акумулюванні великих об'ємів льоду, можна навіть отримувати прибуток.

Великі масштаби заготівлі льоду (об'єм льодоакумуляторів від 500 до 20 тис кубометрів) мали місце в 19 та першій половині 20 сторіччя в світі, в т. ч. і в Україні. Лід навіть повністю не використовувався і були запаси, що переходили на наступний рік, а товщина теплоізоляції з тирси досягала 1 м. В Україні лід добувався в основному на водоймах. Велика частка ручної праці при цьому призвела до розробки льодоградирень, які функціонують при температурах від мінус 2°C. Є відомості про такі градирні в районі Одеси. В таких льодоградирнях використовують бурульковий метод формування льоду, коли росте

Таблиця 1

Підприємство	Одиниці обліку	Річна витрата палива	Викиди ел. станцій з цирк. водою	Викиди з димовим и газами	Всього викидів
АЕС	В _х , млн.т.у.п/рік	25,3	17,71	-	17,71
	Е, млн.кВт.год/рік	-	144190	-	144190
КЕС	В _х , млн.т.у.п/рік	19,49	10,7	1,33	11,03
	Е, млн.кВт.год/рік	-	87098	10828	97926
ТЕЦ	В _х , млн.т.у.п/рік	7,91	2,37	0,55	2,92
	Е, млн.кВт.год/рік	-	19291	4477	23768
Технологія	В _х , млн.т.у.п/рік	74,45*	22,3		22,3
	Е, млн.кВт.год/рік	-	181522		181522
Разом	В _х , млн.т.у.п/рік	127,15*			53,96
	Е, млн.кВт.год/рік	-			447436

поверхня теплообміну і відсутній термічний опір льоду. Лід виробляється на місці акумулювання подачею розпиленої в форсунках води на різні насадки. Нині ця технологія досліджується в НТУУ КПІ (публікації автора в "Енергетиці" за 2004-2005 р.р.).

Розглядаючи запаси теплової енергії довкілля природного характеру, слід відзначити її невичерпність завдяки сонячному випромінюванню та космічному холоду. На наш погляд, оцінювати її запаси немає сенсу, тому що використання природної ТЕД зв'язано лише з рівнем технічного розвитку та обізнаністю спеціалістів. Природна ТЕД в першу чергу знайде застосування в автономних системах теплопостачання.

Відносно прямого застосування техногенних ТЕД низького потенціалу (до 35°C), то слід чекати в найближчі роки нових технічних і архітектурних рішень, а використання їх в ТН є першочерговим [3].

Економія палива при прямому застосуванні ТЕД залежить від тієї енергії, що вона заміщає і від того, чи ця енергія використовується самостійно або в комплексі з іншими нетрадиційними чи традиційними джерелами. Це питання потребує окремого розгляду.

Техногенна тепла енергія довкілля

Користуючись опублікованими в [2] матеріалами по паливному балансу України в 1999 р., а також даними про виробництво теплової і електричної енергії та споживання органічного палива енергетичним сектором України, були розраховані викиди теплоти тепловими конденсаційними електростанціями, ТЕЦ (загального користування та промислових) і АЕС. Розрахунки були зроблені з врахуванням загального ККД згаданих електростанцій та ККД енергетичних котлів. Було прийнято, що в конденсатори турбін викидається від енергії палива на АЕС-70%, на

КЕС-50%, на ТЕЦ-30%. Частка викидів з димовими газами теплових електростанцій прийнята 7%.

При розрахунку низькопотенційних теплових викидів з технологічних установок промислових підприємств було враховано використання в Україні лише вугілля та природного газу без нафтопродуктів, які в технологічних процесах практично не використовуються. Результати розрахунків техногенних викидів (без транспорту) приведені в табл. 1.

Повністю теплові техногенні викиди низького потенціалу (менше 35...40°C) не можуть бути використані ніколи. Щоб оцінити частку спожитих викидів, в майбутньому потрібно врахувати ступінь економічного розвитку в Україні, доступність і вартість енергоносіїв, інвестиційний клімат тощо. Слід також відзначити, що більша частина техногенних викидів буде використовуватися в потужних теплонасосних і інших установках. При врахуванні використання техногенної ТЕД потрібно в першу чергу оцінити вірогідність знаходження споживачів теплової енергії недалеко (до 50...60 км) від місця техногенних викидів. Слід взяти до уваги те, що 6 блоків Запорізької АЕС, які складають більше половини потужності всіх АЕС, розташовані в густо заселеному районі (Запоріжжя, Нікополь, Марганець). Ці населені пункти віддалені від АЕС на відстань, що не перевищує згадану.

Економія палива ΔB при заміні опалювальних котлів, ККД яких $\eta_{o.k.}$, на теплові насоси знайдена нами на основі аналізу рівнянь

$$(1) - (3) \text{ та того факту, що } \frac{Q_x}{Q_T} = \frac{(\varphi - 1)}{\varphi}$$

Одержана формула:

$$\Delta B = Q_T \frac{\left(\frac{1}{\eta_{o.k.}} - \frac{1}{\text{КПЕ}_{\text{ТН}}} \right)}{Q_H^p} \quad (5)$$

При однаковій тепловій продуктивності котла і ТН останній забере з запасів техногенних ТЕД кількість енергії:

$$Q_x = Q_T \frac{(\varphi - 1)}{\varphi} \quad (6)$$

Економія палива при розрахунку через Q_x :

$$\Delta B = \left[\frac{Q_x \varphi}{Q_H^p (\varphi - 1)} \right] \left(\frac{1}{\eta_{o.k.}} - \frac{1}{\text{КПЕ}_{\text{ТН}}} \right) \quad (7)$$

При обчисленні Q_x в млн. т.у.п. економію палива слід рахувати за формулою:

$$\Delta B = \left[\frac{B_{x\varphi}}{(\varphi - 1)} \right] \left(\frac{1}{\eta_{o.k.}} - \frac{1}{\text{КПЕ}_{\text{ТН}}} \right) \quad (8)$$

При коефіцієнті трансформації $\varphi = 4 \dots 5,5$ (на основні використання техногенної ТЕД) та величині $\eta_e \eta_m = 0,26 \dots 0,27$, значення КПЕ лежатимуть в діапазоні $1,04 \dots 1,5$. Приймаючи ККД опалювального котла $\eta_{o.k.} = 0,85$, одержимо, що різниця $(1/\eta_{o.k.} - 1/\text{КПЕ}_{\text{ТН}})$ змінюється від $0,216$ до $0,5$. Відношення $(\varphi - 1)/\varphi$ формули (7) та (8) змінюватиметься від $0,75$ до $0,818$, а величина $\varphi/(\varphi - 1)$ лежить в межах $1,22 \dots 1,33$. Теплота згорання умовного палива $29,3$ МДж/кг.

Зауважимо, що в енергетичній програмі на 2010 рік [16] передбачена економія $1,257$ млн. т.у.п по розділу "Енергія довілля та скидний енерготехнологічний потенціал".

При теплонасосних схемах теплопостачання з використанням природної ТЕД коефіцієнт трансформації в основному змінюється від 3 до 4 , а КПЕ від $0,81$ до $1,08$. Економію палива у відповідності до формули (4) можна досягти лише замінивши тепловими насосами котли з ККД (КПЕ) менше $0,9$.

Економія палива при $\varphi < 3$ для ТН, що споживають електроенергію, досягатиметься лише при заміні прямої витрати електроенергії на теплопостачання шляхом використання для цих цілей ТН.

Економія палива знаходитиметься за формулою:

$$\Delta B = E \frac{\left(\frac{1}{\eta_c \eta_m} - \frac{1}{\eta_c \eta_m \varphi} \right)}{Q_{\text{ТН}}^p} \quad (9)$$

де E - кількість теплової енергії від електронагрівачів, що замінюються на ТН (МДж/рік).

Використання природної ТЕД буде відбуватися головним чином в автономних системах теплопостачання, а також в кондиціонерах, що працюють в режимі ТН. Для України такі кондиціонери економитимуть значну кількість електроенергії в містах, де початок опалювального сезону зміщений порівняно з потребами опалення приміщень у вересні - жовтні.

Розподіл об'ємів виробництва теплової енергії в котельних і на ТЕЦ показує, що в багатьох промислових областях України в котельних виробляється в $1,5 \dots 2$ рази більше теплової енергії, ніж на ТЕЦ (Дніпропетровська, Донецька, Запорізька, Харківська, Черкаська області та АР Крим). Ці ж області багаті на техногенну ТЕД, тому саме для цих областей слід планувати заміну котельних на теплові насоси. Зауважимо, що Крим є ідеальним регіоном для використання природних джерел ТЕД.

Висновки

По приведених матеріалах слід зробити такі висновки:

- розглянуті системи з прямим та теплонасосним використанням ТЕД;
- розраховані техногенні теплові викиди в довілля теплових і атомних електростанцій та в технологічних процесах підприємств;
- розроблена методика та запропоновані рівняння для розрахунку економії палива при використанні ТН для заміни котельних і електронагрівачів;
- для одержання найбільшої економії палива слід планувати, в першу чергу, заміну котельних на ТН в Дніпропетровській, Донецькій, Запорізькій, Харківській, Черкаській областях та АР Крим;
- найбільш перспективною для України системою прямого використання природної ТЕД є заготівля льоду, одержаного взимку, для літнього холодопостачання;
- матеріали статті можуть бути використані під час аналізу виконання Енергетичної програми України до 2010 року та для планування на більш далекі перспективи по розділу "Енергія довілля та скидний енерготехнологічний потенціал".

Література

1. Мхитарян Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. - Киев: Наукова думка, 1999. - 313с.
2. Забарний Г.М., Шурчков А.В. Энергетический потенциал нетрадиционных джерел енергії України. - Київ: Нац.акад.наук України, ІТТФ, 2002. - 211с.
3. Рабінович М.Д. Економічні показники систем теплопостачання з нетрадиційними джерелами енергії та методика їх розрахунку // Економіка України. - 1997. №10. с. 83-85.
4. Хрилев Л.С., Калнинь С.К., Козлов Б.М., Рябчиков И.В. Внедрение теплонасосных установок - важная народнохозяйственная задача // Теплоэнергетика. 1992. - №4. - с. 19-22.
5. Семенюк П.П., Григоров В.Г. Применение тепловых насосов на промышленных предприятиях // Проблемы энергоснабжения. -1991. - Вып. 8. - с. 109-116.
6. Patry J. Stockage par chaleur latente. Paris: PYS Edition, 1981. - 200с.
7. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. - М.: Энергоиздат. - 1982. - 219с.
8. Труб И.А., Монорович Э.И. Использование отбросного тепла промышленности в теплицах и парниках. - Ташкент: Госиздат Узб.ССР, 1955. - 92с.
9. Чернюк В.П., Спиридонов В.В., Пчелин В.Н. Авт. свид. № 863959 (СССР), МКИ F24D 7/00. Система отопления здания. - 1981. - бюл. 34.
10. Щербина О.М. Геотермальна енергія та її використання // Зелена енергетика. - 2001. - №4. - с. 14-16.
11. Пуховий І.І. Пат. 1388665 (СССР), МКИ F24D 15/00. Система отопления здания И.И. Пухового. - 1988. - бюл. 34.
12. Пуховой И.И. Система отопления зданий без теплового насоса с использованием природной холодной воды // Пром. Тепло-техника.-1992.-т. 14. №1-3. - с. 47-51.
13. Пуховой И.И. Пассивные солнечные системы отопления, использующие теплоту кристаллизации воды // Пром. Теплотехника. - 1998. - т. 20. №5. - с. 47-51
14. Пуховий І.І. Дослідження та інженерні розрахунки комбінованої пасивної системи сонячного опалення з використанням теплоти кристалізації води для підігріву повітря в буферній зоні // Наукові вісті НТУУ "Київський політехнічний інститут". Серія теплоенергетики. - 1997. - с. 51-55.
15. Пуховий І.І. Використання теплоти кристалізації води для тепло- та холодопостачання об'єктів з внутрішніми температурами біля 5...10оС та житлових будівель при негативних температурах довкілля // Тезиси міжнародної конференції "Нетрадиционная энергетика в XXI веке" Ялта-2000. Ассоциация геологов Симферополя. - 2000. - с. 70-72.
16. Ковалко М.П., Денисюк С.П. Энергозбереження - пріоритетний напрямок державної політики України. Київ: НАН України, АТ "Укрэнергозбереження", 1998. 506с.