Енергозберігаючі технології

УДК 621.36:66.096.5
DOI: 10.33070/etars.1.2020.04

Нікітін Є.Є., докт. техн. наук, **Дутка О.В.**
Інститут газу НАН України, Київ
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: adutka@ukr.net

Техніко-економічна ефективність комбінованих систем централізованого теплопостачання з локальним тепловим джерелом для гарячого водопостачання

Розглянуто принципову схему комбінованих систем централізованого теплопостачання, у яких для опалення використовується централізоване, а для гарячого водопостачання локальне джерело теплової енергії. Розроблено математичну модель, яка дає можливість виконати порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик двох сценаріїв модернізації системи теплопостачання: заміна котлів, теплових мереж та насосів зі збереженням традиційної схеми гарячого водопостачання; заміна цих елементів із встановленням локального теплового джерела гарячого водопостачання, яке забезпечує споживача гарячою водою за допомогою локальної теплової мережі, протяжність якої істотно менша від існуючої. Як локальні теплові джерела розглянуто електробойлери та сонячні колектори з електричним догрівом. Показано переваги комбінованих схем централізованого теплопостачання на горизонті планування 10 років. Виконано розрахунковий аналіз впливу різних факторів на перевагу схеми комбінованих систем централізованого теплопостачання. Розроблена модель може бути використана для підготовки техніко-економічних обґрунтувань проектів енергоефективної модернізації систем централізованого теплопостачання. *Бібл. 4, рис. 7, табл. 1.*

Ключові слова: система централізованого теплопостачання, модернізація, комбіновані схеми, теплові джерела, теплові мережі, локальне гаряче водопостачання, сонячні колектори, техніко-економічне моделювання.

Системи централізованого теплопостачання (СЦТ) є найбільш ефективним та екологічно чистим джерелом теплової енергії для населених пунктів [1]. Однак їм притаманний суттєвий системний недолік: визначення встановленої потужності теплових джерел та діаметрів труб теплових мереж здійснюється, виходячи з максимального навантаження для найбільш холодного періоду опалювального се-

зону. У неопалювальний період теплові джерела (ТД) працюють на навантаженні, яке значно нижче встановленої потужності, а по трубах теплової мережі (ТМ) транспортується лише невелика (близько 25 %) частка максимальної (розрахункової) кількості теплової енергії, яка необхідна тільки для гарячого водопостачання (ГВП). Це призводить до збільшення питомих втрат теплової енергії в ТМ (рис.1).

Рис.1. Питомі втрати тепла в теплових мережах у типовому мегаполісі з централізованим гарячим водопостачанням.

Рис.2. Спрощений вигляд комбінованої схеми централізованого опалення та локального цілорічного ГВП: 1 — споживач тепла; 2 — теплова мережа опалення; 3 — теплове джерело опалення; 4 — теплове джерело ГВП; 5 — локальна теплова мережа.

При використанні якісної системи регулювання теплового навантаження у споживачів у перехідні періоди спостерігаються так звані «перетопи» через необхідність підтримки необхідної за санітарно-гігієнічними нормами температури гарячої води [2]. Ці особливості функціонування СЦТ, пов'язані з ГВП, призводять до зниження техніко-економічної ефективності централізованого теплопостачання, збільшення собівартості теплової енергії та, як наслідок, відключення споживачів від систем централізованого ГВП.

Рис.3. Середній місячний рівень сонячної радіації, (кВт·год/м²)/день, для Києва та Одеси протягом року.

Часто теплопостачальні організації, бажаючи зменшити свої фінансові втрати, вводять графік подачі послуги ГВП у певні години протягом доби, що створює дискомфорт для споживачів. У таких умовах споживачі починають самостійно відключатися від централізованого ГВП, встановлюють електробойлери та інші водонагрівальні прилади [3].

Пропонується вирішення цієї проблеми на основі застосування комбінованих схем централізованого опалення та локального цілорічного ГВП.

Сутність комбінованої схеми (рис.2) полягає в тому, що замість традиційної схеми теплопостачання, що має теплового споживача (1), ТМ (2) та ТД (3), пропонується використовувати схему, до якої, крім перерахованих елементів, входить локальне теплове джерело (4), що забезпечує споживача гарячою водою за допомогою локальної теплової мережі (5), протяжність якої істотно менша, ніж існуючої ТМ (2).

Базове ТД (3) забезпечує споживача тепловою енергією тільки для опалення в опалювальний період. При цьому вибір встановленої потужності ТД (3) та діаметрів труб теплової мережі (4) здійснюється на основі приєданого навантаження на опалення. Локальне ТД (4) забезпечує навантаження на ГВП цілий рік. Важливо, що локальна ТМ (5) для забезпечення ГВП істотно коротша, ніж ТМ на опалення (2). У деяких випадках вона взагалі може бути відсутня.

Як локальні джерела ГВП мають бути використані екологічно чисті ТД, розташовані в безпосередній близькості від теплових споживачів. До числа таких джерел слід віднести, у першу чергу, електробойлери та сонячні колектори з електричним догрівом, тому що Україна має значний потенціал сонячної енергії (рис.3).

Як видно з рис.3, Київ та Одеса мають хороший потенціал використання сонячної енергії. Середні значення рівня сонячної радіації за рік — 3,10 та 3,55 (кВт·год/м²)/день відповідно, що дає можливість отримати в середньому гарячої води за рік 63 та 72 (л/м²)/день.

Мета даного дослідження — аналіз техніко-економічної ефективності, а також труднощів та бар'єрів на шляху до практичної реалізації комбінованих схем в існуючих та новостворюваних СЦТ.

У даний час у багатьох містах України самими споживачами СЦТ вже здійснено та продовжує здійснюватися перехід на комбіновані систе-

ми із застосуванням індивідуальних електричних бойлерів. Такий варіант комбінованої схеми знайшов широке застосування через організаційно-технічну простоту та відносну дешевизну її реалізації. Однак цей перехід у більшості випадків здійснюється хаотично. Його техніко-економічні наслідки для окремих будівель, СЦТ та систем електропостачання у повній мірі не вивчені. З методичної точки зору цей варіант переходу на комбіновані схеми можна використовувати для порівняння з іншими варіантами комбінованих схем, які можуть виявитися економічно більш вигідними.

Далі розглядається методологія порівняльного техніко-економічного аналізу традиційних та комбінованих схем, а також вибору кращого варіанту комбінованої схеми. Об'єкт дослідження — умовний тепловий район, який містить такі складові: ТД — газова котельня, ТМ та приєднані до них будівлі за двотрубною схемою. Всі перераховані вище об'єкти потребують модернізації. ТМ та котельня вичерпали свій ресурс роботи. Коефіцієнт ефективності використання палива у котельні істотно нижче за показник, який досягається в сучасних котлах. Втрати тепла в трубах ТМ істотно вищі за ті, що будуть при використанні сучасних попередньо ізольованих труб.

Розглядаються різні сценарії на горизонті планування 10 років.

А. Базовий сценарій — без капіталовкладень. Всі витрати йдуть на енергоресурси при існуючих потребах тепла, експлуатацію існуючого обладнання, ліквідації аварій у ТМ, заробітну плату персоналу тощо.

В. Модернізація СЦТ із заміною котлів, ТМ, мережних насосів (МН) та збереженням існуючих приєднаних навантажень на потреби опалення та ГВП, встановленої потужності ТД та діаметрів труб ТМ.

С. Модернізація СЦТ із заміною котлів, ТМ, МН при зменшеному тепловому навантаженні (тільки опалення), а також переведення системи ГВП на цілорічне живлення від локальних ТД із встановленням сонячних колекторів з електричним догрівом по нічному тарифу для населення, що дає можливість покрити потребу в гарячій воді до 55 % протягом року. При такій схемі теплозабезпечення (комбінована схема) буде досягнуто економії капітальних витрат на менш потужні котли, ТМ менших діаметрів, МН меншої потужності. Зменшаться також експлуатаційні витрати, особливо внаслідок відсутності перевитрат теплової енергії у неопалювальний сезон.

Д. Модернізація СЦТ, як у варіанті С, із такою відмінністю: цілорічна локальна система ГВП із встановленням електричного бойлера, який працює 50 % часу за нічним тарифом для населення. При такій схемі буде досягнуто економії капітальних витрат аналогічно варіанту С. Капітальні витрати на локальні ТД будуть менші, ніж у варіанті С, а експлуатаційні витрати на електроенергію будуть більшими, ніж у варіанті С.

Порівняння сценаріїв А, В, С та Д здійснюється за критерієм мінімізації сумарних (капітальних та експлуатаційних) витрат за період планування 10 років.

Методичний підхід сформульованої вище задачі базується на використанні метода аналізу витрат та вигод (Cost Benefit Analysis).

Далі розглядаються такі витрати:

- капітальні витрати на заміну котлів, труб ТМ та МН з частотним регулюванням із врахуванням вартості додаткового обладнання, проектних та монтажних робіт;

- капітальні витрати на встановлення локальних ТД, у тому числі проектні та монтажні роботи (варіанти С та Д);

- експлуатаційні витрати, у тому числі на паливо (природний газ) для виробництва теплової енергії, на електроенергію для транспортування теплоносія та догрів гарячої води при використанні сонячних колекторів, на ліквідацію аварій у ТМ, на оплату персоналу, на обслуговування локальних ТД.

Як критерій порівняння розглядається величина сумарних (капітальних та експлуатаційних) витрат щодо запропонованих сценаріїв.

Розглянута вище модель теплового району реалізована у вигляді електронних таблиць Excel, для кожного з розглянутих сценаріїв (А, В, С, Д). Таблиці відрізняються за даними, що характеризують рівень енергоефективності та надійності елементів системи в кожному з розглянутих сценаріїв.

Як приклад використання розробленої моделі розглянуто тепловий район з газовими котлами, загальною опалювальною площею 220 000 м² (180 000 м² — населення, 40 000 м² — бюджет), сумарним приєднаним тепловим навантаженням 15,8 МВт (з врахуванням середнього навантаження системи ГВП 2,8 МВт), протяжністю ТМ 10 км (у двотрубному обчисленні). Горизонт планування прийнятий 25 років. Вихідні дані наближено відповідають технічним та економічним характеристикам існуючих СЦТ, обладнання та будівель. Результати зіставлення чотирьох розглянутих сценаріїв представлені у таблиці.

Основні показники сценаріїв (варіанти А, В, С, D)

Параметр	А	В	С	D
Річне питоме споживання тепла на опалення, кВт·год/м²:				
житлових будівель	250	250	250	250
бюджетних будівель	300	300	300	300
Середня потреба ГВП, кВт:				
житлових будівель	2500	2500	2500	2500
бюджетних будівель	300	300	300	300
Приєднана теплова навантаження на опалення, кВт	12978	12978	12978	12978
Середнє теплове навантаження на ГВП, кВт	2800	2800	0	0
Сумарне приєднане навантаження, кВт	15778	15778	12978	12978
Еквівалентний діаметр трубопроводу теплової мережі, м	0,45	0,45	0,41	0,41
Ефективність використання палива у котельні, %	85	92	92	92
ККД мережевого насоса, %	60	80	80	80
Потужність мережевого насоса, кВт	527	395	366	366
Втрати у теплової мережі взимку, кВт (%)	2847 (27)	978 (11)	895 (12)	895 (12)
Втрати у теплової мережі влітку, кВт (%)	1708 (38)	587 (17)	0 (0)	0 (0)
Річна кількість розривів трубопроводів, шт./км	2,00	0,10	0,10	0,10
Капітальні витрати, тис. у.о.:				
котли	0	161	146	146
насоси з ЧП	0	99	92	92
труби	0	4583	3730	3730
локальне ТД	0	0	2503	834
всього з урахуванням додаткових витрат	0	6168	7561	5892
Річні експлуатаційні витрати., тис. у.о./рік:				0
паливо	2303	1811	1068	1068
електроенергія	347	260	272	459
заробітня плата	38	38	31	31
обслуговування локальних ТД	0	0	16	16
усунення пошкоджень труб	10	0,5	0,5	0,5
Річні експлуатаційні витрати, млн у.о.	3,0	2,1	1,5	1,7
Сумарні витрати за період планування, млн у.о.	30	27	22	23
Термін окупності (в порівнянні з варіантом А), років	—	7,1	5,0	4,7

У наведеному прикладі всі варіанти є швидко окупними (5,0–7,1 років), проте найкращим за критерієм мінімізації сумарних витрат та терміну окупності є варіант С. Тобто на горизонті планування 10 років економічно більш доцільним є застосування комбінованої схеми СЦТ з переведенням системи ГВП на цілорічне живлення від локальних ТД із встановленням сонячних колекторів з електричним догрівом за нічним тарифом для населення.

Це обумовлено трьома основними факторами.

1. Потенціал підвищення енергоефективності за рахунок локальних ТД із встановленням сонячних колекторів з електричним догрівом істотно перевищує потенціал підвищення енергоефективності ТД та ТМ, особливо в неопалювальний період, де втрати теплової енергії сягають до 38 % при існуючих ТД та ТМ.

2. Впроваджуючи локальні ТД для систем ГВП будинків, ми тим самим зменшуємо приєднане теплове навантаження, а отже й необхідну потужність ТД, необхідний діаметр труб ТМ, втрати теплової енергії у ТД та ТМ, споживання електроенергії на транспортування теплоносія, а також капітальні витрати на установку нових ТД, ТМ та МН. Так, у розглянутому прикладі після встановлення локальних ТД для ГВП необхідна потужність ТД знижується з 15,8 до 13,8 МВт, діаметр трубопроводу — з 0,45 до 0,4 м, потужність мережного насоса — з 527 до 366 кВт.

3. Локальні ТД на основі сонячних колекторів здатні покрити потребу в гарячій воді до 55 % протягом року за рахунок використання сонячної енергії. Крім того, вони дають можливість забезпечити споживачів цілодобовою якісною послугою ГВП протягом всього року.

Рис.4. Капітальні та експлуатаційні витрати для варіантів А, В, С та D.

Співвідношення капітальних та експлуатаційних витрат для варіантів А, В, С та D для горизонту планування 10 років проілюстровано на рис.4.

З рис.4 видно, що витрати на впровадження комбінованої схеми СЦТ з модернізацією ТД, ТМ, МН та з встановленням локальних ТД для потреб ГВП потребують більше капіталовкладень, ніж просто модернізація СЦТ із заміною існуючого обладнання, але не зважаючи на це сумарні витрати через 10 років ек-

Рис.5. Вплив горизонту планування на сумарні витрати.

Рис.6. Вплив ціни природного газу на термін окупності капітальних витрат варіантів В, С та D.

Рис.7. Вплив протяжності теплових мереж на термін окупності капітальних витрат варіантів В, С та D.

плуатації системи для варіанту С у 1,23 рази менші, ніж для варіанту В, коли локальні ТД не встановлюються, тому в цьому випадку експлуатаційні витрати в 1,44 рази більші. Перевага варіанту С над D полягає у більших експлуатаційних витратах на електроенергію через постійне використання електробойлерів.

Перевагу сценарію С у залежності від зміни вартості природного газу, горизонту планування та протяжності трубопроводів ТМ проілюстровано на рис.5–7.

Перевага варіанту С над варіантами В та D не завжди є очевидною.

Як видно з рис.5, перевага варіанту С над варіантом В проявляється після 2-х років експлуатації, над варіантом D — після семи років, далі зростає зі збільшенням горизонту планування через постійно менші експлуатаційні витрати.

Простий термін окупності має перевагу для варіанту С над варіантом D при ціні газу до 150 у.о./тис. м³, при збільшенні вартості природного газу простий термін окупності цих варіантів практично однаковий. Варіант В має перевагу над варіантами С та D при ціні газу до 90 та 120 у.о./тис. м³ відповідно (рис.6).

Як видно з рис.7, варіант В має перевагу при незначній довжині ТМ (< 2 км), далі переважає варіант D із постійним скороченням відриву від варіанту С через значні експлуатаційні витрати на електроенергію.

Отже, для обраного прикладу найкращим (за критерієм мінімальних сумарних витрат за весь час проекту) є варіант С — комбінована схема СЦТ — модернізація СЦТ із заміною котлів, ТМ, МН з переведенням системи ГВП на цілорічне живлення від локальних ТД із встановленням сонячних колекторів з електричним догрівом.

Впровадження комбінованих схем централізованого опалення та локального гарячого водопостачання потребує вдосконалення ор-

ганізаційно-технічних підходів до планування робіт на рівні органів місцевого самоврядування та теплопостачальних організацій. Пріоритетними для модернізації слід вважати теплові райони з неоптимальною структурою (наявність протяжних, слабонавантажених ділянок труб ТМ), зношеними ТМ та неефективними котельнями. Установку комбінованих схем централізованого опалення та локального гарячого водопостачання треба здійснювати не фрагментарно на різних зонах дії різних ТД, а комплексно у пріоритетній зоні дії одного ТД.

Висновки

Системним недоліком традиційних СЦТ є зниження їх енергетичної ефективності в неопалювальний період через великі питомі втрати теплової енергії в трубопроводах, які з'єднують ТД та споживачів гарячої води.

Розглянуто принципіву схему комбінованої СЦТ, яка має, крім централізованого ТД, декілька локальних ТД, розташованих у безпосередній близькості від теплових споживачів. Локальні ТД цілий рік забезпечують споживачів гарячою водою. При цьому встановлена потужність централізованих ТД та діаметри трубопроводів визначаються, виходячи з опалю-

вального теплового навантаження, що дає можливість знизити витрати на їх модернізацію.

Техніко-економічні дослідження, виконані з використанням розробленої математичної моделі, показали, що сумарні витрати для комбінованої СЦТ менші, ніж для традиційних СЦТ, на горизонті планування більш ніж 10 років. Зі збільшенням вартості природного газу економічна ефективність схеми комбінованої СЦТ підвищується у порівнянні зі схемою традиційних СЦТ.

Список літератури

1. Claverton Group [Електронний ресурс]. — <http://www.claverton-energy.com>
2. Нікітін Є.Є. Підвищення енергетичної ефективності систем централізованого теплопостачання : Дис. ... докт. техн. наук із спеціальності 05.14.01. Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2015. 120 с.
3. Фомич С.В., Тарадай А.М., Есин Е.С., Болотских Н.С. Причины массовых отказов систем централизованного горячего водоснабжения. *Научный вестник будівництва*. 2017. № 1.
4. Никитин Е.Е. Системный подход к разработке энергоэффективных схем теплоснабжения городов и населенных пунктов. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2009. № 4. С. 89–97.

Надійшла до редакції 20.11.19

Никитин Е.Е., докт. техн. наук, **Дутка А.В.**

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Десятковская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: adutka@ukr.net

Технико-экономическая эффективность комбинированных систем централизованного теплоснабжения с локальным тепловым источником для горячего водоснабжения

Рассмотрена принципиальная схема комбинированных систем централизованного теплоснабжения, в которых для отопления используется централизованное, а для горячего водоснабжения локальный источник тепловой энергии. Разработана математическая модель, позволяющая выполнить сравнительный анализ технико-экономических характеристик двух сценариев модернизации системы теплоснабжения: замена котлов, тепловых сетей и насосов с сохранением традиционной схемы горячего водоснабжения; замена этих элементов с установлением локального теплового источника горячего водоснабжения, которое обеспечивает потребителя горячей водой при помощи локальной тепловой сети, протяженность которой существенно меньше имеющейся. В качестве локальных тепловых источников рассмотрены электробойлеры и солнечные коллекторы с электрическим подогревом. Показано преимущества схем комбинированных систем централизованного теплоснабжения на горизонте планирования 10 лет. Выполнен расчетный анализ влияния разных факторов на преимущества схемы комбиниро-

ванных систем централизованного теплоснабжения. Разработанная модель может быть использована для подготовки технико-экономических обоснований проектов энергоэффективной модернизации систем централизованного теплоснабжения. *Библ. 4, рис. 7, табл. 1.*

Ключевые слова: система централизованного теплоснабжения, модернизация, комбинированные схемы, тепловые источники, тепловые сети, локальное горячее водоснабжение, солнечные коллекторы, технико-экономическое моделирование.

Nikitin Ye.Ye., Doctor of Technical Sciences, Dutka O.V.
The Gas Institute of NAS of Ukraine, Kyiv
39, Degtjariivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: adutka@ukr.net

Technical and Economic Efficiency of Combined District Heating with Local Heat Source for District Hot Water

The scheme of combined district heating systems is used, in which centralized heating is used for heating and local heat source is used for hot water supply. A mathematical model has been developed that allows to perform a comparative analysis of the technical and economic characteristics of two scenarios of modernization of the heat supply system: replacement of boilers, heat networks and pumps while using the traditional hot water supply scheme, and replacement of these elements in combination with the installation of a local hot water supply source that provides the hot water supply. hot water by means of a local heat network whose length is substantially smaller than the existing one. Electric heaters and solar collectors with electric heating are proposed as local heat sources. The advantages of combined district heating schemes on the planning horizon of 10 years are shown. The analysis of the influence of various factors on the advantage of the combined scheme of district heating is performed. The developed model can be used for preparation of feasibility studies of projects of energy efficient modernization of district heating systems. *Ref. 4, Fig. 7, Tab. 1.*

Key words: district heating, modernization, combined schemes, heat sources, heat networks, local hot water supply, solar collectors, technical and economic modeling.

References

1. Claverton Group [Electronic resource]. — <http://www.claverton-energy.com>
2. Nikitin E.E. [Improving of energy efficiency of population centres district heating systems] : Dis. for a Degree Doctor of Technical Sciences. Kyiv : National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2015. (Ukr.)
3. Fomich S.V., Taraday A.M., Esin E.S., Bolotsky N.S. Reasons for mass failure systems of centralized hot water supply. *Scientific Bulletin of Construction*. 2017. No. 1. (Rus.)
4. Nikitin E.E. The System Approach to Energy efficient Heat Supply Schemes for Cities and Settlements Development. *Energotehnologii i Resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2009. No. 4. pp. 89–97. (Rus.)

Received November 20, 2019