УДК 697.343

В.М. Горячкін, О.В. Жевжик, О.Ю. Степура

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРІВ ТРУБОПРОВОДІВ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Анотація. В статті розглянуто методику оптимізації розмірів трубопроводів систем теплопостачання по мінімуму витрат на спорудження та експлуатацію системи. Отримана залежність оптимального діаметру трубопроводів теплової мережі від витрати теплоносія з урахуванням сучасних економічних факторів.

Ключові слова: теплопостачання, теплова мережа, оптимальний діаметр, трубопровід, енергозбереження.

Вступ

Теплова енергія є одним з найпоширеніших видів енергії в Україні та світі. Так, за даними Державної служби статистки України [1], наприклад, в 2016 році в Україні було спожито 59 876 529 Гкал теплової енергії, що відповідає 8 554,8 тис тон умовного палива.

Значна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів припадає на експлуатацію житлового фонду. Так, на одного мешканця в рік на утримання житла витрачається 1,3...1,4 т умовного палива, а на опалення 100 м^2 загальної площі житлових будинків в рік витрачається приблизно 5,6...8,7 т умовного палива. В розрахунку на 1 м^2 загальної площі на теплопостачання житла в Україні витрачається в 1,5 рази більше енергоресурсів, ніж в США і в 2,5...3,0 рази більше, ніж в Швеції [2].

На опалення будинків витрачається більше 43 % всієї теплової енергії, яка виробляється, що в 2...3 рази перевищує відповідні витрати у західних країнах. Зокрема, на опалення багатоповерхових будинків в Україні витрачається 300...600 кВт·год/м^2 в рік, в той час як в Німеччині – не більше 260 кВт·год/м^2 в рік, Швеції та Фінляндії – 135 кВт·год/м^2 в рік. Непродуктивні витрати теплової енергії при транспортуванні її від виробника до опалювального приладу житлової кімнати в деяких регіонах сягають 40 %, а вартість транспортування складає близько 10...15 % від відпускної ціни.

© Горячкін В.М., Жевжик О.В., Степура О.Ю., 2018

 ISSN 1562-9945

Потреби житлово-комунального сектора та промисловості в тепловій енергії забезпечуються системами теплопостачання від теплоелектроцентралей (ТЕЦ), районних, групових і місцевих котелень. Найпоширеніше в Україні – централізоване теплопостачання від ТЕЦ і великих котелень, для якого потрібна розгалужена теплова мережа, що пов'язує джерело теплопостачання з споживачем. Економічність, надійність і довговічність цих систем залежить від правильно прийнятих проектних рішень і якості їх технічної експлуатації. Враховуючи стан більшості систем теплопостачання в Україні, їх суттєва модернізації є не тільки економічно доцільною, а, в багатьох випадках, невідкладною через неможливість подальшої нормальної експлуатації.

Виходячи з цього, будь-які роботи, що направлені на енергозбереження в системах виробництва, транспортування та використання енергоносіїв і, зокрема, теплової енергії, є дуже актуальними.

Існують три базових напрямки енергозбереження для економії теплової енергії:

– економія палива за рахунок використання теплоти з низьким потенціалом, вторинних енергоресурсів та відновлюваних джерел енергії, що включає в себе використання геліоустановок у системах опалення та гарячого водопостачання, впровадження сонячних пасивних систем опалення, теплових помп, що використовують низькотемпературний потенціал для теплопостачання (прикладом застосування такого підходу є роботи [3, 4, 5]);

– впровадження заходів з енергозбереження під час транспортування виробленої теплової енергії, зокрема, оптимізація теплових мереж за рахунок раціонального вибору способів і маршрутів прокладки трубопроводів, оптимального вибору їх розмірів з точку зору мінімізації поверхонь, через які відбуваються втрати теплоти в навколишнє середовище, та витрат енергії на транспортування теплоносія, покращення ізоляції трубопроводів;

– впровадження заходів з енергозбереження на етапі споживання, що включає утеплення огороджувальних конструкцій (стін, даху, підлоги, суміщеного покриття та перекриття над підвалами тощо), утеплення конструкцій, що відкриваються (вікна, кватирки, двері, балкони), встановлення індивідуальних теплових пунктів з регулюванням кількості теплоносія, що подається, встановлення квар-

тирних теплових лічильників, які стимулюють індивідуальне економне теплоспоживання, встановлення термостатичних вентилів на радіаторах (такий підхід розглянутий, наприклад, в роботах [2, 6, 7]).

Додатковою перевагою впровадження енергозберігаючих заходів є скорочення споживання палива і, як наслідок, зниження викидів у навколишнє середовище забруднюючих речовин, що утворюються при виробництві теплової та електричної енергії.

Постановка задачі і мета досліджень

На сьогоднішній день проектування теплових мереж систем теплопостачання здійснюється відповідно норм ДБН В.2.5-39:2008, прокладання внутрішніх трубопроводів систем опалення – відповідно ДБН В.2.5-67:2013. Згідно першого з цих нормативних документів встановлені вимоги до проектування систем теплопостачання, надійності їх функціонування, безпечної експлуатації, екології, енергозбереження, другого – вимоги до труб, обладнання, арматури, що використовується в системах опалення.

Виходячи з цього, вирішення задачі про вибір розмірів і конфігурації конкретного трубопроводу доцільно супроводжувати економічно обґрунтованою оцінкою варіантів, що розглядаються. Для розробки методики вибору трубопроводів, що передбачає мінімізацію втрат теплоти в навколишнє середовище і витрат енергії на транспортування теплоносія, була розглянута задача оптимізації розмірів трубопроводу по мінімуму витрат на спорудження та експлуатацію системи.

В літературі відомі роботи присвячені оптимізації трубопроводів систем теплопостачання. Так, в роботі [8] розглянуто складання та розв'язок рівнянь при оптимізації обладнання системи теплопостачання. Зокрема при виборі оптимальних розмірів і конфігурації трубопроводів пропонується виходити з мінімуму приведених видатків, які визначаються як віднесена до терміну експлуатації сума капітальних та експлуатаційних витрат. Однак, використана при цьому залежність вартості трубопроводу від діаметру не відображає сучасні тенденції. Аналогічний підхід для оптимізації гідросистем включно з вибором обладнання насосних станцій запропоновано в роботі [9].

В роботі [10] розглянуті принципи оптимізації при проектуванні розвідних трубопроводів при прокладанні нових сучасних систем теплопостачання. В ній розглянуті і проаналізовані різні варіанти

сумісного прокладання кількох трубопроводів разом, наведені методи проектування таких систем, включаючи комбінацію сумісного ізолювання з асиметрією розташування труб і застосування труб кількох різних діаметрів.

Оптимізація систем опалення, незважаючи на те, що існують рекомендації по пошуку найбільш енергоефективних варіантів прокладки трубопроводів [11], на практиці зазвичай проводиться за умовою мінімуму капітальних витрат на спорудження системи.

Разом з тим, останнім часом з'явилися нові технології і матеріали, які використовуються при виготовленні і прокладанні трубопроводів, зросла вартість енергоносіїв. Це вимагає того, щоб при оптимізації розмірів трубопроводів розглядалось також питання скорочення витрат на експлуатацію систем теплопостачання, зокрема на транспортування теплоносія в них, оскільки, як показує практика, вона є суттєвою складовою собівартості теплової енергії, що відпускається споживачам.

Виходячи з цього, метою роботи є формулювання і розв'язок задачі оптимізації розмірів трубопроводів систем теплопостачання і, в тому числі, систем опалення та розробка рекомендацій по зниженню витрат енергії на транспортування теплоносіїв в нових та існуючих системах.

Методика досліджень

Оптимізацію розмірів трубопроводу проводили виходячи з мінімуму фінансових видатків на спорудження і експлуатацію системи теплопостачання протягом всього терміну експлуатації, включно з втратами теплоти в навколишнє середовище.

Цільовою функцією задачі оптимізації є приведені видатки на спорудження та експлуатацію системи

$$S = K + ET, \qquad (1)$$

де K – капітальні витрати на спорудження системи теплопостачання, грн; E – витрати на експлуатацію, грн/рік; T – термін експлуатації системи теплопостачання, рік.

Капітальні витрати при прокладанні трубопроводів складаються з вартості труб та допоміжного обладнання, що використовується при прокладці (наприклад, залізобетонні елементи при підземній, опори при надземній прокладці трубопроводів тощо). Разом з тим, вартість допоміжного обладнання, хоча і залежить від розмірів тру-

бопроводу, при оптимізації діаметру труби не буде мати суттєвого впливу. Зважаючи на це, до цільової функції з капітальних витрат можна включити тільки вартість труб, умовно знехтувавши в подальшому похідною від вартості допоміжного обладнання. Тоді капітальні витрати будуть визначатися залежністю

$$K = B_m l, \tag{2}$$

де B_m – вартість погонного метру труби, грн/м; l – довжина трубопроводу, м.

Витрати при експлуатації трубопроводів складаються з видатків, пов'язаних з витратою енергії на транспортування теплоносія, втратами теплоти в навколишнє середовище, витрат на ремонт трубопроводів тощо. З цих витрат безпосередньо від діаметру трубопроводу будуть залежати тільки витрати на транспортування теплоносія та витрати, пов'язані з втратами теплоти, які, на відміну від інших витрат, що не залежать від діаметру трубопроводу, були враховані при складанні цільової функції. Таким чином, витрати на експлуатацію

$$E = E_m + E_{втр}, \tag{3}$$

де E_m – витрати на електроенергію при транспортуванні теплоносія, грн/рік; $E_{втр}$ – витрати пов'язані з втратами теплоти в навколишнє середовище, грн/рік.

Витрати на електроенергію при транспортуванні теплоносія

$$E_m = \frac{0,001Q(P_{тр} + P_{мс})Ц_e T_p}{\eta}, \tag{4}$$

де $Q = \frac{\pi d^2}{4} V$ – витрата теплоносія, м^3/с; $P_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho V^2}{2}$ і $P_{мс} = \Sigma\zeta \frac{\rho V^2}{2}$ – втрати тиску на тертя і на місцеві опори, Па; V – швидкість теплоносія, м/с; $Ц_e$ – ціна електроенергії, грн/(кВт·год); T_p – тривалість роботи системи протягом року, год; η – коефіцієнт корисної дії насосів.

Коефіцієнт тертя для шорстких труб визначали за формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11\left(\frac{k}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0,25}, \tag{5}$$

 ISSN 1562-9945

де d – внутрішній діаметр труби; k – шорсткість, м; $\mathrm{Re} = \frac{Vd}{\nu}$ – число Рейнольдса, ν – кінематична в'язкість, м^2/с.

Витрати, пов'язані з втратами тепла в навколишнє середовище, визначаються як

$$E_{втр} = \pi q d Ц_т T_р,$$

де q – питомі втрати тепла з поверхні трубопроводу, що залежать від характеру теплообміну з навколишнім середовищем, Вт/м^2; $Ц_т$ – ціна теплової енергії, грн/(кВт·год).

Мінімуму приведених видатків буде відповідати значення похідної

$$\frac{dS}{dd} = 0. \qquad (6)$$

яка, відповідно формули (1), в загальному випадку має вигляд

$$\frac{dS}{dd} = \frac{dK}{dd} + T\frac{dE}{dd},$$

де, враховуючи (2)-(5),

$$\frac{dK}{dd} = l\frac{dB_т}{dd};$$

$$\frac{dB_т}{dd} = 16592d + 3020;$$

$$\frac{dE}{dd} = \frac{dE_т}{dd} + \frac{dE_{втр}}{dd};$$

$$\frac{dE_{втр}}{dd} = \pi q l Ц_т T_р$$

$$\frac{dE_т}{dd} = \frac{0,001 Q Ц_е T_р \left(\frac{dP_{тр}}{dd} + \frac{dP_{мс}}{dd}\right)}{\eta};$$

$$\frac{dP_{тр}}{dd} = \frac{l}{d}\frac{\rho V^2}{2}\frac{d\lambda}{dd} - \lambda\frac{l}{d^2}\frac{\rho V^2}{2} + \lambda\frac{l}{d}\rho V\frac{dV}{dd};$$

$$\frac{dP_{мс}}{dd} = \Sigma\zeta\rho V\frac{dV}{dd};$$

$$\frac{d\lambda}{dd} = 0,0275\left(\frac{k}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{-0,75}\left(-\frac{K}{d^2} - \frac{68}{\mathrm{Re}^2}\frac{d\,\mathrm{Re}}{dd}\right);$$

$$\frac{d\,\mathrm{Re}}{dd} = \frac{V}{\nu} + \frac{d}{\nu}\frac{dV}{dd};$$

$$\frac{dV}{dd} = -\frac{8Q}{\pi d^3}.$$

Результати досліджень

Вартість погонного метру труб ДСТУ Б В.2.5-31:2007, що використовуються для прокладання теплових мереж, за даними моніторингу цін взятих з [12], яка була використана при подальших розрахунках, в залежності від їх внутрішнього діаметру (умовний прохід) показана на рис. 1.

На рис. 2, в якості прикладу, показані витрати на експлуатацію теплової мережі, що включають в себе витрати на транспортування теплоносія і витрати, пов'язані з втратою теплоти в навколишнє середовище при наступних умовах: l=1000 м, k=1·10^{-4} м, $\Sigma\zeta$=25, ρ=950 кг/м^3, ν=2,65·10^{-7} м^2/с, q=10 Вт/(м^2·К), Δt=150 К, $Ц_e$=1,5 грн/(кВт·год), $Ц_m$=1,893 грн/(кВт·год) (2200 грн/Гкал), T_p=4200 год, T=10 років. Як випливає з графіка, положення мінімуму витрат на експлуатацію залежить від витрати теплоносія. При цьому, як і слід було очікувати, для забезпечення мінімуму витрат теплові мережі з більшою витратою теплоносія мають прокладатися з трубопроводами більшого діаметру.

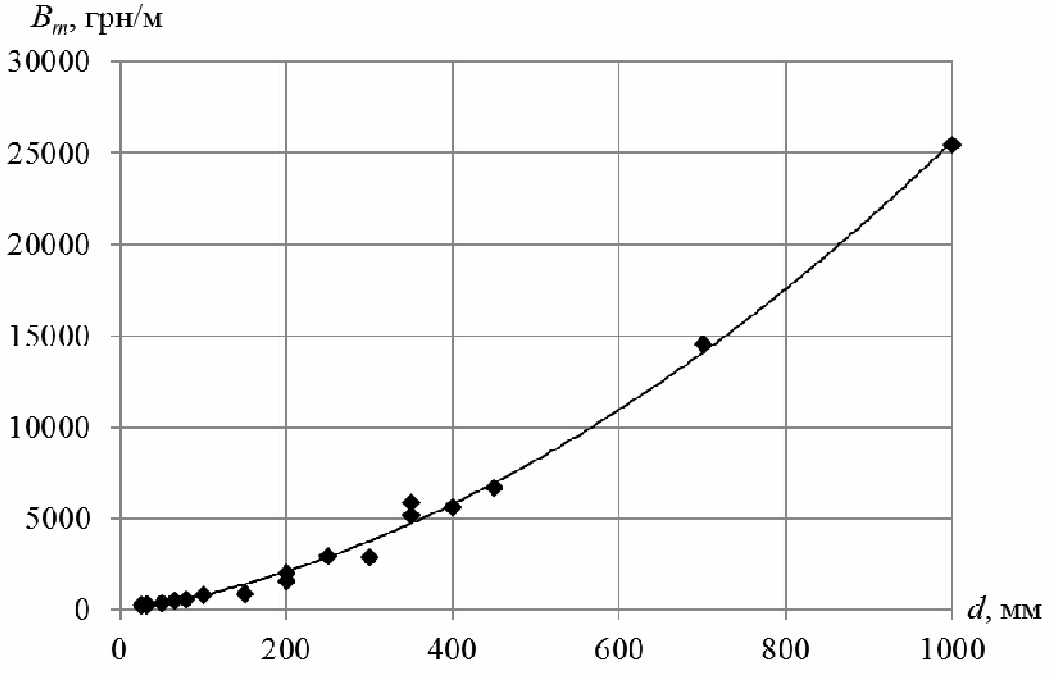

Рисунок 1 – Вартість погонного метру труб ДСТУ Б В.2.5-31:2007

 ISSN 1562-9945

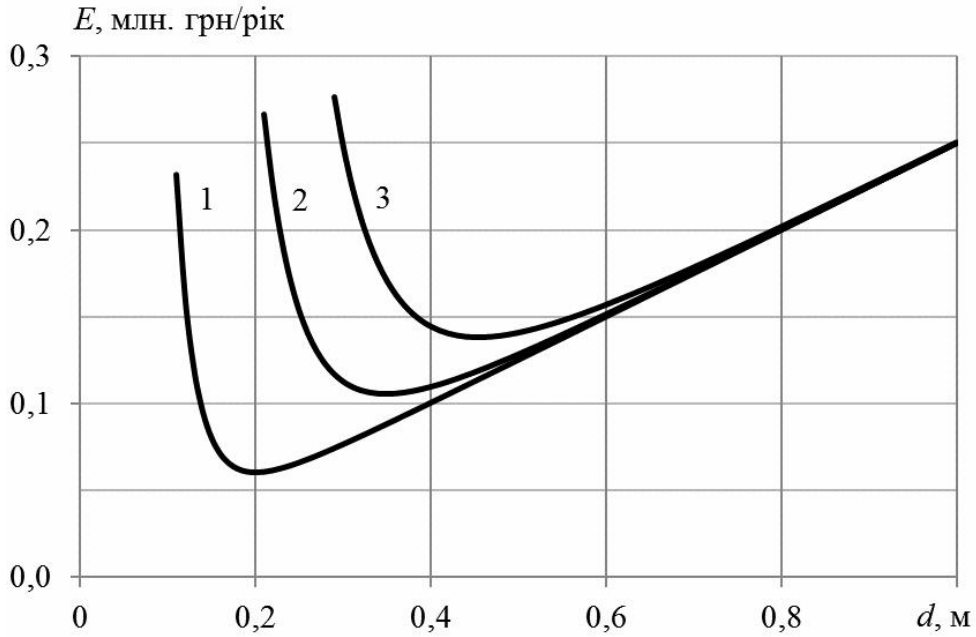

Рисунок 2 – Витрати на експлуатацію теплової мережі:
1 – Q=100 м3/год, 2 – 300 м^3/год, 3 – 500 м^3/год

Оптимальний внутрішній діаметр трубопроводу для теплової мережі, при якому сума капітальних витрат на спорудження системи теплопостачання та витрат на її експлуатацію буде мінімальною для наведених вихідних даних, показаний на рис. 3.

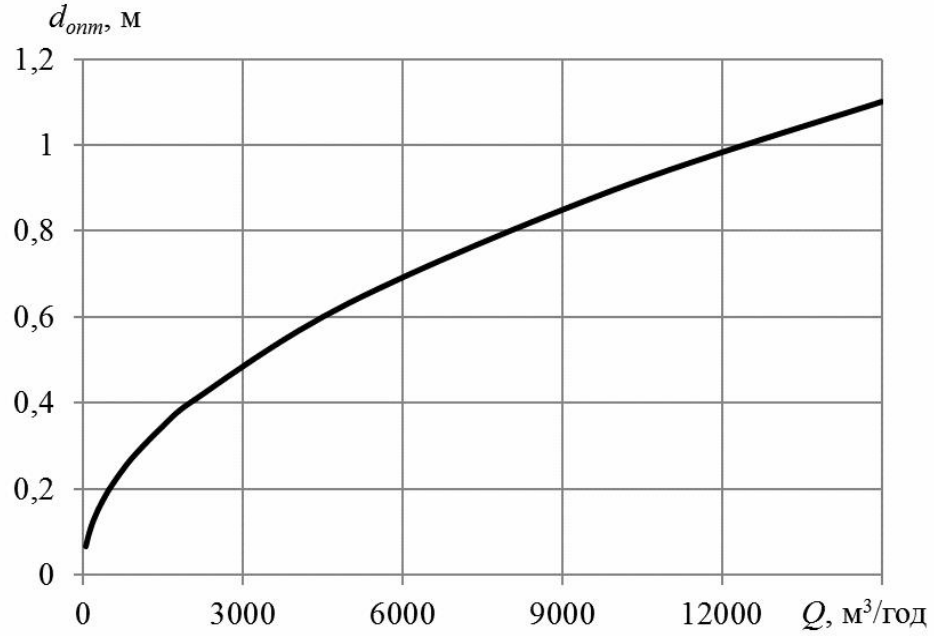

Рисунок 3 – Оптимальний діаметр трубопроводу в залежності від витрати теплоносія

Висновки

Наведена в роботі методика розрахунку оптимального діаметру трубопроводу теплової мережі дозволяє визначити розміри трубопроводів, що відповідають мінімуму витрат на її спорудження і експлуатацію, і може використовуватись при проектуванні систем теплопостачання. Застосування цієї методики, як очікується, дозволить знизити приведені видатки на 5...10 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. Статистичний бюлетень «Постачання та використання енергії за 2016 рік» / Державна служба статистики України. – 2017. – 23 с.

2. Ратушняк Г.С. Енергозбереження та експлуатація систем теплопостачання / Г.С. Ратушняк, Г.С. Попова // Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 120 с.

3. Гелетуха Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні. / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Желєзна, Ю.Б. Матвєєв, М.М. Жовмір / Промышленная теплотехника. – Т. 28, № 2. – 2006. – С. 85-93.

4. Крижанівський Є.І. Зниження обсягів споживання природного газу для теплопостачання шляхом використання теплових насосів. / Є.І. Крижанівський, Ф.В. Козак, Л.Ю. Козак // Нафтогазова енергетика. – № 1(10). – 2009. – С. 88-93.

5. Олексюк А.О. Створення енергоресурсозберігаючих систем геотермального теплопостачання з використанням сонячної енергії та теплових насосів / А.О. Олексюк, С.О. Челапко, А.А.Горделюк // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – № 1(12). – 2011. – С. 143-150.

6. Пшінько О. М. Аналіз ефективності системи теплопостачання студмістечка Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту / О.М. Пшінько, В.О. Габрінець, В.М. Горячкін // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С. 74 –82.

7. Демченко В.В. Методи підвищення енергоефективності будівлі. // В.В. Демченко, Х.М. Чуприна, О.В. Невмержицький – Управління розвитком складних систем. – 2013. – № 16. – С. 138-143.

8. Ионин А.А. Теплоснабжение: Учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая. – М., Стройиздат, 1982. – 336 с.

9. Коваль В.П. Гидрогазодинамика трубопроводов. / В.П. Коваль, Ф.И. Аврахов. – Днепропетровск, ДГУ, 1972. – 123 с.

10.Боом Б. Принципы оптимизации при проектировании разводящих трубопроводов / Б. Боом, Х. Кристенсен // Энергосбережение – №4. – 2007.–С.66-71.

11. Дмитриев А.Н. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия/ А.Н. Дмитриев, Ю.А. Табунщиков, И.Н. Ковалев, Н.В. Шилкин. – М.:АВОК-ПРЕСС, 2005, 120 с.

12. Стальные изолированные трубы в Украине. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Електронні дані.– Режим доступу: https://prom.ua/ua/Stalnye-izolirovannye-truby.html (дата звернення 01.11.2017) – Назва з екрана.

 ISSN 1562-9945