УДК 519.86

Щербініна С.А.,
старший викладач кафедри економічної теорії та економічної кібернетики,
Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка
Климко О.Г.,
старший викладач кафедри економічної теорії та економічної кібернетики,
Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка
Сердюк К.І.,
студентка,
Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. У статті розроблено економіко-математичні моделі залежності обсягу теплової енергії, поданої в мережу, та обсягу реалізованої теплової енергії від факторів впливу на прикладі ОКВПТГ «Миргородтеплоенерго». Побудовано оптимізаційну модель мінімізації втрат енергоресурсів у теплових мережах.

Ключові слова: втрати енергоресурсів у теплових мережах, коефіцієнт кореляції, економіко-математична модель, оптимізаційна модель.

Постановка проблеми. Сьогодні в Україні споживання теплової енергії у житловому фонді міст майже вдвічі вище, ніж у Європі, що зумовлено значною зношеністю теплових мереж. Проблемою також є збільшення обсягів енергоресурсів у системах теплопостачання різних галузей, ціни на які постійно зростають. При цьому Україна задовольняє свої потреби в енергоспоживанні лише на 53% та імпортує 75% необхідного обсягу природного газу, 85% сирої нафти та нафтопродуктів [1]. Така структура паливно-енергетичних ресурсів не є економічно ефективною. Це породжує залежність України від країн – експортерів нафти та газу та є загрозою для її енергетичної та національної безпеки. Тому проблема економічної оцінки рівня споживання теплової енергії з використанням економіко-математичного моделювання є актуальною, оскільки результати будуть спрямовані на мінімізацію втрат енергоресурсів у теплових мережах.

Аналіз останніх досліджень і публікації. Вивченню проблем ефективного та раціонального використання енергоресурсів у теплових мережах присвячено багато праць вітчизняних учених. Питання моделювання систем енергопостачання для економії енергоресурсів та поліпшення якості і надійності теплопостачання розглядали Є.Б. Артамонов [2], А.Н. Ганжа, Н.А. Марченко, В.Н. Подкопай [3; 4]. Можливості підвищення ефективності рішень щодо управління теплозабезпеченням об'єктів соціально-бюджетної сфери шляхом розроблення моделей, інформаційної технології та системи підтримки прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності досліджувала Ю.В. Парфененко [5]. Принцип вибору енергозберігаючих заходів за економічним критерієм з урахуванням особливостей їх інвестування, а також визначення економічної ефективності цих заходів вивчав В.В. Джеджула [6]. Методику розроблення системи показників оцінки енергетичної ефективності енергозберігаючих заходів на місцевому рівні запропонував О.Ю. Трач [7]. Проблеми енергоефективності у житлово-комунальному господарстві України досліджував В.П. Волков [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проте відкритим залишається питання оптимізації втрат енергоресурсів у теплових мережах, у тому числі із застосуванням економіко-математичних методів. Цю роботу присвячено розробленню оптимізаційної моделі мінімізації втрат енергоресурсів у теплових мережах на основі економіко-математичних моделей залежності обсягу теплової енергії, поданої в мережу, та обсягу реалізованої теплової енергії від факторів впливу.

Мета статті полягає у формуванні економіко-математичної моделі мінімізації втрат енергоресурсів у теплових мережах

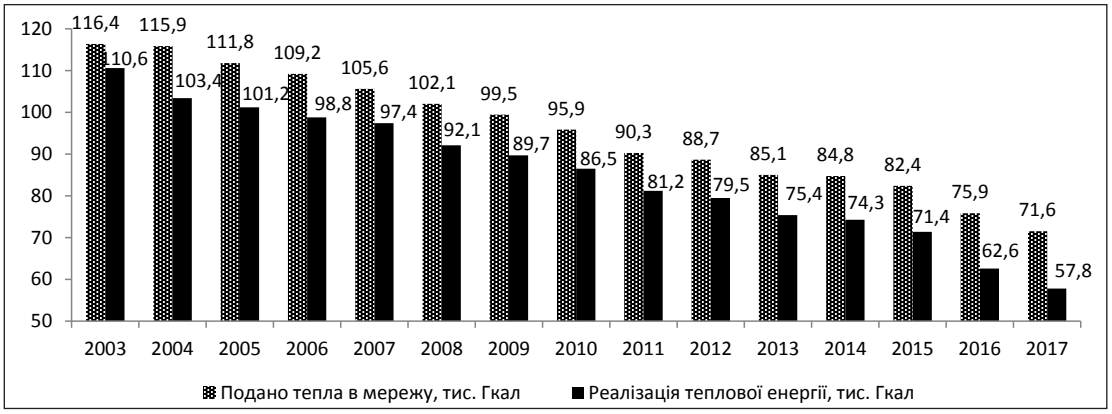

Рис. 1. Динаміка поданої та реалізованої енергії в тепломережах ОКВПТГ «Миргородтеплоенерго» за 2003-2017 рр.

для наукового розроблення теоретичних засад ефективного використання енергоресурсів у теплових мережах та подальшого й вдосконалення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Низька енергоефективність функціонування підприємств теплопостачання пояснюється більшою мірою технічними факторами: станом генеруючого обладнання та характеристиками експлуатаційних режимів, великими втратами енергії під час її передачі та розподілу тепловими мережами (нормативні втрати на транспортування теплової енергії в мережах не мають перевищувати 13%, хоча фактичні можуть сягати 30% і вище). До економічних проблем підприємств теплопостачання відносять також недостатні якість та повноту обліку, вплив децентралізації систем теплопостачання на економічні показники централізованих систем, аварійність теплових мереж та витратний механізм ціноутворення, який не стимулює до економії енергоресурсів у процесах генерації та транспортування теплової енергії і не забезпечує розширене відтворення основних фондів підприємств теплопостачання (теплогенеруючого обладнання та теплових мереж) [9].

Прикладну частину дослідження виконано на статистичних матеріалах ОКВПТГ «Миргородтеплоенерго» за період 2003-2017 рр. (рис. 1).

Втрати в теплових мережах за досліджуваний період збільшилися від 5% до 20%, незважаючи на загальну тенденцію до зменшення теплопостачання. Отже, питання мінімізації втрат енергоресурсів у теплових мережах є актуальним для ОКВПТГ «Миргородтеплоенерго».

За результативні признаки вибрано Y_1 – обсяг теплової енергії, поданої в мережу, тис. Гкал, та Y_2 – обсяг реалізованої теплової енергії, тис. Гкал. За допомогою коефіцієнта кореляції визначено фактори, що мають тісний зв'язок із результативними ознаками (табл. 1).

Для побудови та реалізації економетричних моделей використано пакет прикладної програми STATISTICA 8.0, це універсальна інтегрована система, призначена для статистичного аналізу та обробки даних [10].

Визначено залежність Y_1 (обсяг теплової енергії, поданої в мережу, тис. Гкал) від факторів впливу, формула (1).

$$Y_1 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (1)$$

Розв'язком (1) є таке рівняння множинної лінійної регресії:

$$Y_1 = 10,95 + 0,007X_1 - 0,407X_2 - 0,00005X_3 \quad (2)$$

Результати оцінювання параметрів рівняння (2) наведено на рис. 2.

Одним з основних показників щільності кореляційного зв'язку показника Y з факторами X_i *(i=1,m)*, а також показника ступеня близькості математичної форми зв'язку до вибіркових даних є коефіцієнт множинної кореляції. Коефіцієнт кореляції змінюється у межах від –1 до 1, причому: якщо $R > 0$, то між випадковими величинами X і Y існує пряма залежність, якщо $R < 0$, то між цими випадковими величинами існує обернена залежність. Для розробленої моделі *Multiple R (коефіцієнт множинної кореляції) = 0,987*, що свідчить про тісний зв'язок

N=15	Regression Summary for Dependent Variable: Y_1 (Spreadsheet1 R= ,98697270 R?= ,97411511 Adjusted R?= ,96705559 F(3,11)=137,99 p<,00000 Std.Error of estimate: 2,6102					
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(11)	p-level
Intercept			10,93892	10,62296	1,02974	0,325241
X_1	0,869563	0,056848	0,00682	0,00045	15,29638	0,000000
X_2	0,011588	0,054959	0,39327	1,86518	0,21085	0,836859
X_3	-0,204558	0,056917	-0,00005	0,00001	-3,59394	0,004214

Рис. 2. Підсумкова статистика для рівняння (2)

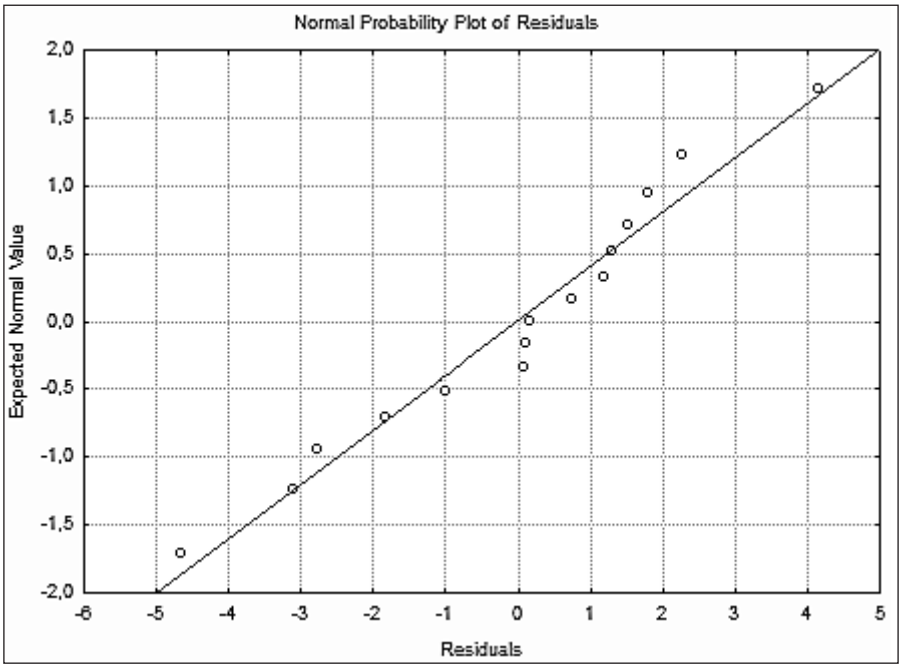

Рис. 3. Залежність залишків, передбачених за допомогою моделі (2)

Таблиця 1

Фактори впливу на результативні ознаки

Фактор	Характеристика	Одиниці виміру	R
X_1	спожитий газ, цей показник показує значення необхідної кількості палива для вироблення та подачі тепла в мережу	$м^3$	0,96
X_2	власні потреби підприємства	тис. Гкал	0,44
X_3	розмір опалювальної площі	$м^2$	-0,61
X_4	навантаження на опалення	ккал/год	-0,99
X_5	втрати в мережах	%	-0,88

Variable	Predicting Values for (Spreadsheet1) variable: Y_1		
	B-Weight	Value	B-Weight * Value
X_1	0,006823	12170,0	83,0406
X_2	0,393275	1,6	0,6292
X_3	-0,000050	402000,0	-20,2292
Intercept			10,9389
Predicted			74,3796
-95,0%CL			71,3009
+95,0%CL			77,4583

Рис. 4. Результати прогнозу за рівнянням (2)

N=15	Regression Summary for Dependent Variable: Y_2 (Spreadsheet1 R= ,99645435 R?= ,99292128 Adjusted R?= ,99174149 F(2,12)=841,61 p<,00000 Std.Error of estimate: 1,4057					
	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(12)	p-level
Intercept			207,6213	4,303710	48,2424	0,000000
X_4	-0,790304	0,041051	-4,2970	0,223201	-19,2517	0,000000
X_5	-0,242797	0,041051	-1,0665	0,180313	-5,9145	0,000071

Рис. 5. Підсумкова статистика для рівняння (4)

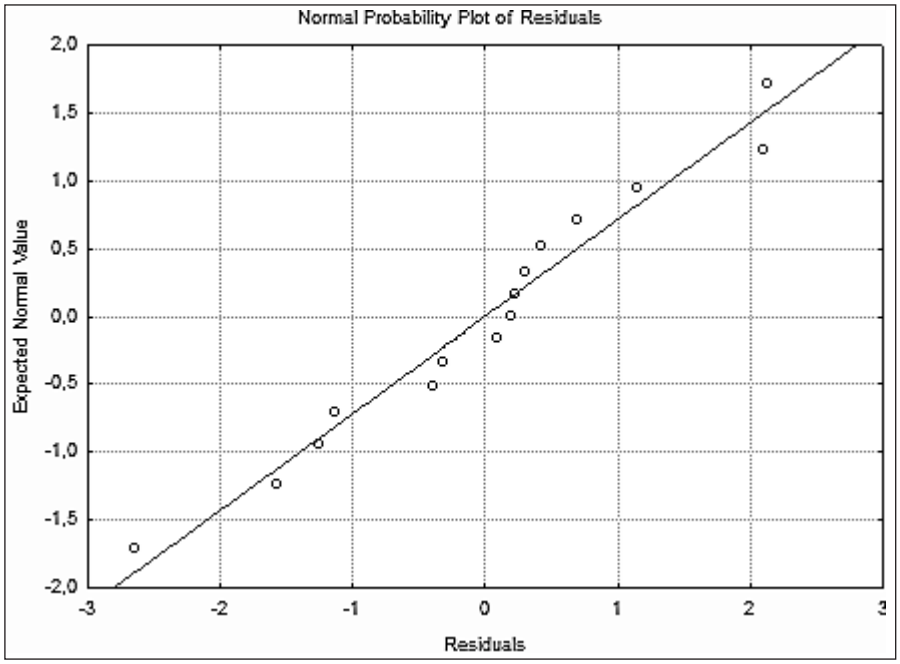

Рис. 6. Залежність залишків, передбачених за допомогою моделі (4)

Variable	Predicting Values for (Spreadsheet1) variable: Y_2		
	B-Weight	Value	B-Weight * Value
X_4	-4,29700	30,00000	-128,910
X_5	-1,06646	19,00000	-20,263
Intercept			207,621
Predicted			58,448
-95,0%CL			56,402
+95,0%CL			60,495

Рис. 7. Результати прогнозу за рівнянням (4)

Y_1 з факторами X_1 X_2 X_3, а також близькість вибраної математичної моделі до вибіркових даних.

Відношення суми квадратів центрованих теоретичних значень показника до суми квадратів центрованих вибіркових значень показника називається вибірковим коефіцієнтом множинної детермінації. Чим ближче вибіркові (експериментальні) значення наближаються до лінії регресії, тим ближче коефіцієнт вибіркової множинної детермінації наближається до 1. У нашому випадку *R-square = R^2 (коефіцієнт детермінації) = 0,974* та *Adjusted R^2 (скоректований коефіцієнт детермінації) = 0,967*, що свідчить про якість опису наявної залежності.

Суттєвість впливу факторів на показник можна визначити з використанням *F*-статистики. За критерієм Фішера *F(3,11) = 137,99*, що значно перевищує критичне табличне значення і свідчить про значимість зв'язку. За *t*-тестом Стьюдента отримані оцінки коефіцієнтів є статистично значимими. Міра розсіювання значень, що спостерігаються відносно регресійної прямої, тобто стандартна похибка оцінки, дорівнює *2,61*. Цю величину надалі можна використовувати для побудови границь прогнозу поданого тепла в мережу в Миргородському районі. На таку величину збільшується прогнозне значення за оптимістичного прогнозу й, відповідно, зменшується за песимістичного прогнозу.

Однією з умов коректного застосування регресійного аналізу є відповідність закону розподілу залишків нормальному закону. Припущення про нормальність залишків може бути перевірене за допомогою *Normal probability plot* – нормальних імовірнісних графіків. Стандартний нормальний імовірнісний графік будується так. Спочатку відбувається впорядкування відхилень від відповідних середніх (залишків). По цих рангах обчислюються стандартизовані значення нормального розподілу і відкладаються на осі *Y*. Якщо спостережувані значення (відкладені по осі *X*) нормально розподілені, то значення потраплять на пряму лінію. Якщо розподіл відмінний від нормального, то на графіку спостерігатиметься сильне відхилення від прямої. На рис. 3 представлена залежність передбачених за допомогою моделі (2) залишків і фактичних залишків. Подивившись на графік, можна зазначити, що залишки мають приблизно рівну варіацію по всьому ряду і немає очевидного тренду або зрушення в них.

Отже, отримана математична модель адекватна експериментальним даним та демонструє залежність обсягу поданої теплової енергії в мережу від обсягу спожитого газу, власних потреб підприємства, величини опалювальної площі.

Рівняння регресії можна використовувати для прогнозу значень результативної ознаки. Припущено, що $X_1 = 12\ 170\ м^3$, $X_2 = 1,6$ *тис. Гкал*, $X_3 = 402\ 000\ м^2$, тоді $Y_1 = 74,38$ *тис. Гкал*. Результати прогнозу наведено на рис. 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2	Y_1	*Подано в мережу, тис.Гкал*					Y_2	*Реалізація теплової енергії, тис. Гкал*			
3	X_1	*Спожитий газ, м3*					X_4	*Навантаженість на опалювання, ккал/год*			
4	X_2	*Власні потреби підприємства, тис.Гкал*					X_5	*Норма втрат в тепломережах, %*			
5	X_3	*Опалювальна площа, м2*									
6											
7	Y_1	10,93892+0,00682X1-0,39327X2-0,00005X3					Y_2	207,6213-4,2970X4-1,07X5			
8			74,31					65,76			
9	Y_3	*Загальні втрати теплоенергії в мережі, тис.Гкал*									
10			*Обмеження*								
11	X_1	12 357,26	12 357,26	X_1^*							
12	X_2	1,63	1,63	X_2^*							
13	X_3	405 310,02	8,55	Y_3^*							
14	X_4	30,15									
15	X_5	11,50									
16	Y_3	8,55									

Рис. 8. Результати оптимізації

У таблиці вказано передбачений (*predicted*) обсяг поданої теплової енергії в мережу – 74,38 тис. Гкал з 95-відсотковим довірчим інтервалом (71,3; 77,46).

Наступним кроком визначено залежність Y_2 (обсяг реалізованої теплової енергії, тис. Гкал) від факторів впливу, формула (3):

$$Y_2 = b_0 + b_1 \% _4 + b_2 \% _5 \quad (3)$$

Розв'язком (3) є таке рівняння множинної лінійної регресії:

$$Y_2 = 207,6 - 4,3X_4 - 1,07X_5 \quad (4)$$

Результати оцінювання параметрів рівняння (4) наведено на рис. 2

Оскільки коефіцієнт множинної кореляції $R = 0,996$ близький до одиниці, то між обсягом реалізованої теплової енергії і факторними ознаками існує щільний множинний зв'язок. Одержана множинна лінійна регресія є значимою за критерієм Фішера $F(2,12) = 848,61$. Аналіз коефіцієнтів Стьюдента дає змогу зробити висновок, що отримані оцінки коефіцієнтів є статистично значимими. Стандартна похибка оцінки дорівнює $1,4$.

На рис. 6 представлена залежність передбачених за допомогою моделі (4) залишків і фактичних залишків.

Знайдено прогнозне значення результативної ознаки. Припущено, що $X_4 = 30$ ккал/год, $X_5 = 19\%$, тоді $Y_2 = 58,45$ тис. Гкал. Результати прогнозу наведено на рис. 7.

У таблиці вказано передбачений (*predicted*) обсяг реалізації теплової енергії – 58,45 тис. Гкал з 95-відсотковим довірчим інтервалом (56,4; 60,5).

Для отримання мінімальних утрат у теплових мережах необхідно передусім дотримуватися відповідних норм. Норми споживання – кількісні показники споживання житлово-комунальних послуг, затверджені, згідно із законодавством, відповідними органами виконавчої влади та органами місцевого самоврядування.

За результатами проведеного дослідження побудовано оптимізаційну модель мінімізації втрат енергоресурсів у теплових мережах:

$$Y_3 = Y_1 - Y_2 = (a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3) - \\ -(b_0 + b_1X_4 + b_2X_5) \to \min \quad (5)$$

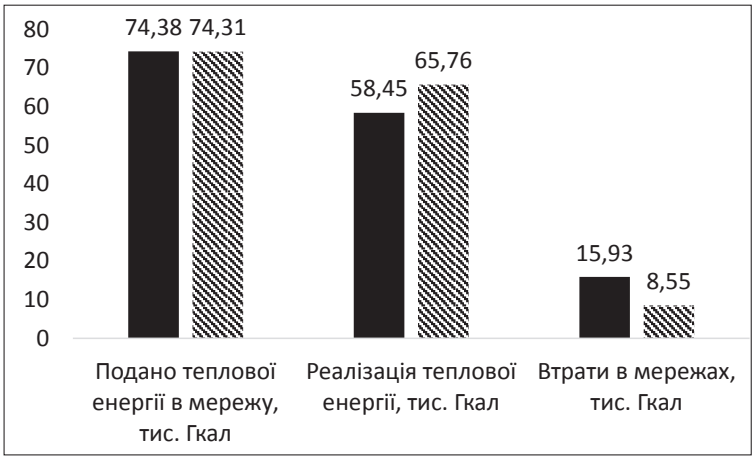

Рис. 9. Результати прогнозування та оптимізації

за таких обмежень:

1) $X_1 = X_1^*$, де $X_1^* = Y_1^* 166,3$ (кількість тепла, поданого в мережу, збільшено з урахуванням питомої норми витрат палива на 1 Гкал);

2) $X_2 \le X_2^*$, де $X_2^* = Y_1^* 0,022$ (кількість тепла, поданого в мережу, на власні потреби не може бути більшою 2,2% за визначеними нормами потреб);

3) $Y_3 = Y_3^*$, де $Y_3^* = Y_1^* X_5$ (загальні втрати в мережах Y_3 повинні відповідати нормам утрат у теплових мережах);

4) $X_5 = 11,5$ (середньорічні норми витрат у теплових мережах повинні відповідати значенню $11,5\%$);

5) $319\,483,65 \le X_3 \le 498\,587,54$ (величина опалювальної площі знаходиться у межах мінімального та максимального значень);

6) $X_4 \le 30,5$ (навантаження на опалення повинно бути меншим максимального значення навантаження за попередній рік).

Для вирішення поставленої задачі застосовано табличний процесор Microsoft Excel. При цьому інструментом для вирішення задачі вибрано надбудову «Пошук рішення» (рис. 8).

За отриманими результатами якщо підприємство використовує паливо в кількості 12 357,26 м^3, на власні потреби відведено 1,63 тис. Гкал. Опалювальна площа – 405 310,02 м^2, за навантаженості на опалення 30,15 ккал/год та норми втрат

у мережах 11,50% ОКВПТГ «Миргородтеплоенерго» отримає мінімальні втрати – 8,55 тис. Гкал.

$Y_3 = Y_1 - Y_2 = (10,93892+0,00682 \cdot 12357,26 - 0,39327 \cdot 1,63 - 0,00005 \cdot 405310,02) - (207,6213 - 4,2970 \cdot 30,15 - 1,0665 \cdot 11,50) = 8,55$ *тис. Гкал.*

Прогнозне значення втрат теплової енергії в мережах, визначено як різницю між прогнозами кількості поданого та реалізованого тепла. За прогнозними значеннями втрати в мережах становлять 21%, що не відповідає середньорічним нормам утрат тепла в мережах.

На рис. 9 представлено гістограму втрат у теплових мережах, обсяг поданої теплової енергії та її реалізація за прогнозним значенням та за розрахованою оптимізаційною моделлю.

Для досягнення мінімального рівня втрат у теплових мережах, відповідно до встановлених норм, підприємству необхідно залучати інвестиційні програми з енергозбереження.

Основні заходи щодо енергозбереження в системах теплопостачання: поступова заміна центральних теплових пунктів на індивідуальні в блок-модульному виконанні; зниження тепловтрат в інженерних мережах шляхом поступового переходу на сучасні трубопроводи, зокрема на теплові мережі з пінополіуретановою ізоляцією; оптимізація режимів роботи мереж теплопостачання через упровадження систем автоматизованого керування і регульованого приводу насосних агрегатів; реконструкція теплових пунктів із застосуванням ефективного тепломеханічного устаткування; оптимізація процесів горіння у топках котелень і впровадження оптимальних графіків регулювання з використанням засобів автоматики і контролю; перерозподіл теплових навантажень шляхом кільцювання теплових мереж [1].

Висновки. Побудована оптимізаційна модель мінімізації енергоресурсів у теплових мережах якнайкраще відображає тенденцію між моделлю «як є» і моделлю «як повинно бути». За зниження втрат енергоресурсів у теплових мережах підприємство матиме можливість виробляти менший обсяг теплової енергії для забезпечення населення теплом, що, своєю чергою, знизить витрати на виробництво та транспортування теплової енергії та забезпечить надання населенню якісних послуг. Наведену методику дослідження можна застосовувати для визначення показників енергоефективності на регіональному рівні.

Література:

1. Оптимізація систем теплопостачання із використанням економіко-математичного моделювання: монографія / За заг. ред. О.М. Гаврися. Х.: НТУ «ХПІ», 2015. 209 с.
2. Артамонов Є.Б. Підхід до моделювання систем теплопостачання через аналіз причин виникнення втрат теплової енергії і теплоносія в системі. Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку. 2013. № 1(25). С. 83-88.
3. Обґрунтування варіантів реконструкції системи теплопостачання житлового масиву з використанням математичного моделювання теплових втрат при транспортуванні теплоносія / А.Н. Ганжа, Н.А. Марченко, В.Н. Подкопай. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2013. № 13(987). С. 104-109.
4. Математическое моделирование и идентификация фактических тепловых потерь из-за поврежденной изоляции трубопроводов теплотрасс / В.Н. Подкопай, А.Н. Ганжа, Н.А. Марченко. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2014. № 12(1055). С. 83-89.
5. Парфененко Ю.В. Моделі та інформаційна технологія підтримки прийняття рішень при управлінні теплозабезпеченням об'єктів соціально-бюджетної сфери: дис. … к.т.н.: спец. 05.13.06 «Інформаційні технології»; Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. Харків, 2016. 167 с. URL: http://radapm.kname.edu.ua/images/Disser/Parfenenko_d.pdf.
6. Джеджула В.В. Організаційно-економічний механізм енергозбереження промислових підприємств: дис. … д.е.н.: спец. 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності»; Хмельницький національний університет. Хмельницький, 2014. 419 с. URL: http://www.khnu.km.ua/root/res/2-21-4-10.pdf.
7. Трач О.Ю. Енергозбереження як запорука сталого розвитку міст. Економіка України: фінансово-економічні проблеми інноваційного розвитку: колективна монографія; за ред. В.Ф. Беседіна, А.С. Музиченко. К.: НДЕІ, 2012. 478 с.
8. Волков В.П. Проблеми енергозбереження в житловому фонді. Економічний вісник університету. 2013. Вип. 20(1). С. 83-90.
9. Братковська К.О. Щодо енергетичної моделі сталого споживання теплової енергії. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4592.
10. Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учебник; 3-е изд. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.

Щербинина С.А., Климко Е.Г., Сердюк К.И. Экономико-математическая модель минимизации потерь энергоресурсов в тепловых сетях

Аннотация. В статье разработаны экономико-математические модели зависимости объема тепловой энергии, поданной в сеть, и объема реализованной тепловой энергии от факторов влияния на примере ОКППТХ «Миргородтеплоэнерго». Построена оптимизационная модель минимизации потерь энергоресурсов в тепловых сетях.

Ключевые слова: потери энергоресурсов в тепловых сетях, коэффициент корреляции, экономико-математическая модель, оптимизационная модель.

Shcherbinina S.A., Klymko O.H., Serdyuk K.I. Economic-mathematical model of minimization of energy resources losses in heat networks

Summary. In the article economical-mathematical models of the dependence of the amount of heat energy supplied to the network and the volume of heat energy sold on the factors of influence on the example of RMHPE «Mirgorodteploenergo» are developed. An optimization model for minimizing energy losses in thermal networks is constructed.

Keywords: energy resources losses in thermal networks, correlation coefficient, economic-mathematical model, optimization model.