

УДК 620:621.31

А.П. ЛЕВЧУК, канд. техн. наук, Д.О. БОЦУЛА, В.Г. ЗАГУРСКИЙ, Ю.А. ЛЕВЧУК (Институт общей энергетики НАН Украины, Киев)

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КАК РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СЕТЕВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ

Приведена оптимизация выходных параметров источников тепла участка магистральной тепловой сети и распределения между ними суммарной нагрузки путем решения нелинейной сетевой транспортной задачи

Задачи оптимизации технико-экономических характеристик работы городских систем централизованного снабжения потребителей газом, теплом, электричеством и питьевой водой целесообразно ставить и решать как нелинейные сетевые транспортные задачи [1, 2].

Рассмотрим преимущества такого подхода на примере системы централизованного теплоснабжения города, в которой мощные источники тепловой энергии соединены между собой магистральными теплосетями, на определенных расстояниях которых установлены задвижки (перемычки). При этом существует возможность бесперебойного теплоснабжения потребителей в случае отключения части участка теплосети, для проведения аварийных или ремонтно-профилактических работ, с одновременным обеспечением тепловой энергией потребителей от второго источника тепловой энергии. В нормальном состоянии перемычки разделяют источники тепла таким образом, что каждый источник работает на свой участок магистральной тепловой сети автономно. Существует также возможность перемещения точки разделения зон теплоснабжения (рис. 1).

К основным расходам энергии при работе тепловых сетей относятся [3]:

- потери тепловой энергии на теплопередачу;
- потери тепловой энергии с утечкой теплоносителя;
- расходы электроэнергии на перекачку теплоносителя.

Примем потребление тепловой энергии равномерным вдоль всей длины теплосети. При прочих равных условиях система теплоснабжения будет работать с минимальными потерями и максимальной прибылью в случае, когда каждый источник будет обеспечивать теплом распределительные сети до точки равенства себестоимостей тепла от каждого из источников (точка У на рис. 1). Следует отметить, что здесь и далее себестоимость тепла включает затраты на выработку тепла (себестоимость на выходе источника тепла) с добавлением затрат на тран-

спорт тепла в заданную точку сети так, что себестоимость тепла в разных точках сети разная и зависит от их удаления от источника тепла.

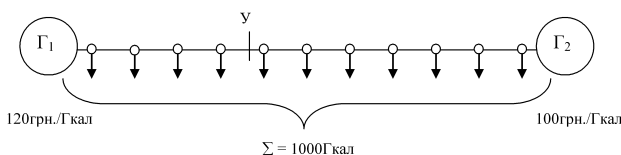


Рис. 1

Предположим, в самом простом случае, что потери тепловой энергии вдоль теплосети пропорциональны объему теплоносителя и описываются следующим соотношением:

$$\Delta Q = \kappa \pi \frac{d^2}{4} L, \quad (1)$$

где κ – коэффициент пропорциональности; $\pi \frac{d^2}{4}$ – площадь среза трубы; L – длина трубы.

Предположим также, что потери тепловой энергии по всей длине трубопровода будут составлять 20% от всего количества тепловой энергии, отпущенной потребителям. Тогда (1) запишется в виде:

$$\Delta Q = k_{\pi} Q x, \quad (2)$$

где $k_{\pi} = 0,2$ коэффициент потерь; $x = L_x/L$ – относительное значение координаты x на трубе длиной L .

Поскольку в связи с затратами на транспорт стоимость тепла для потребителей в разных точках сети отличается, для решения задачи определены суммарные затраты потребителей на теплоснабжение, равные сумме произведений стоимости 1 Гкал тепла на объем для отдельных потребителей. Взятые по всей сети, они равны затратам источника тепла на теплоснабжение:

$$\sum_i C_i v_i = \sum_j Z_j$$

где C_i – цена 1 Гкал тепла для i -го потребителя; v_i – объем тепла для i -го потребителя, Z_j – затраты источника тепла.

Суммарные затраты потребителей за потребленную тепловую энергию объемом ΔQ в точке x будут равны:

$$C_x \Delta Q = (1 + k_n x) C_n \Delta Q,$$

откуда

$$C_x = (1 + k_n x) C_n \tag{3}$$

где C_n – себестоимость тепловой энергии на выходе источника теплоснабжения; C_x – себестоимость тепловой энергии в точке x трубопровода.

Суммарные затраты потребителей, расположенных на расстоянии x от начала трубы, запишутся в виде:

$$\sum B = \kappa_1 \int_0^x C_x d\zeta = C_n 1000(x + \frac{x^2}{2} k_n), \tag{4}$$

где $\kappa_1 \int_0^1 dx = 1000$ – потребление тепла вдоль всей теплотрассы.

Таким образом, целевую функцию минимизации затрат на выработку тепловой энергии потребителям, равномерно подключенным вдоль трубы (рис. 1), можно записать в виде:

$$C = \left[1000 C_{n1} (x_1 + \frac{x_1^2}{2} k_{n1}) + 1000 C_{n2} (x_2 + \frac{x_2^2}{2} k_{n2}) \right] \rightarrow \min,$$

уравнение связи: $x_1 + x_2 = 1$;

ограничения: $1 \geq x_1 \geq 0$; $1 \geq x_2 \geq 0$.

Пусть себестоимость тепловой энергии от первого и второго источников тепловой энергии соответственно равна 120 и 100 грн./Гкал. Потребление тепловой энергии по всей длине теплотрассы составляет 1000 Гкал (рис. 1). Решением поставленной задачи будут следующие данные (рис. 2): источник тепла с себестоимостью в 120 грн./Гкал будет обеспечивать потребителей подключенных к трубе на протяжении 0,152 ее общей длины, остальную часть потребителей будет обеспечивать источник с себестоимостью 100 грн./Гкал.

Оптимизация работы тепловой сети с учетом потерь в линии				
	X ₁	X ₂	ΣX	
	1	1	1	1
			З.ц.ф	
Функция цели	18595,04	95647,38	114242,4	
Верхние границы В	1	1		
Переменные X	0,151515	0,848485		
Нижние границы Н	0	0		

Рис. 2

При этом значение целевой функции, равное затратам двух источников тепловой энергии на его производство и транспортировку, будет составлять 114242,4 грн. Себестоимость тепловой энергии в точке перераспределения зон теплоснабжения будет равной. Проверка правильности решения дает следующие результаты:

$$C_{x1}(0,152) = 125,45 \text{ грн./Гкал,}$$

$$C_{x2}(0,848) = 125,45 \text{ грн./Гкал.}$$

Задачу можно усложнить с целью построения оптимизационной модели рассматриваемых сетей, изменив себестоимость произведенной тепловой энергии в зависимости от объема произведенной энергии и объединив источники двумя теплотрассами разной длины, разного диаметра и соответственно с разными потерями (рис. 3).

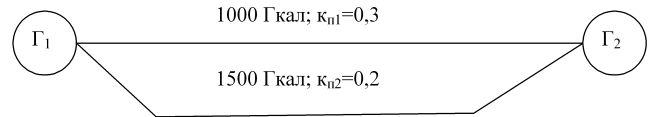


Рис. 3

Характеристику изменения себестоимости тепловой энергии от объема первого источника представим в виде уравнения:

$$C_{Г1} = (-2E - 09x^3 + 1E - 05x^2 - 0,0258x + 128,44) \text{ грн./Гкал}$$

Характеристику изменения себестоимости тепловой энергии от объема второго источника представим в виде уравнения:

$$C_{Г2} = (-5E - 09x^3 + 3E - 05x^2 - 0,0483x + 102,92) \text{ грн./Гкал.}$$

Тогда целевая функция затрат источников на производство и транспорт тепла будет иметь вид:

$$C = 1000 C_{Г1} (x_1 + \frac{x_1^2}{2} \kappa_{n1}) + 1000 C_{Г2} (x_2 + \frac{x_2^2}{2} \kappa_{n1}) + 1500 C_{Г1} (x_3 + \frac{x_3^2}{2} \kappa_{n2}) + 1500 C_{Г2} (x_4 + \frac{x_4^2}{2} \kappa_{n2}) \rightarrow \min.$$

Уравнения связи: $x_1 + x_2 = 1$; $x_3 + x_4 = 1$.

Ограничение: $0 \leq x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 1$.

Расчетная модель с проведенной минимизацией расходов у генераторов тепла представлена на рис. 4.

Оптимизация двух тепловых сетей						
	X1	X2	X3	X4	ΣX	У
		1	1		1	1
				1	1	1
Функция цели	49127.30474	51550.93	75189.92	71277.2		247145.3
Верхние границы В		1	1	1	1	
Переменные X	0.55744939	0.442551	0.582427	0.417573		
Нижние границы Н		0	0	0	0	
Нагрузка по направл.	604.0618629	471.9283	924.5238	652.5145		
Нагрузка И.т.	1528.585623	1124.443				
Себестоимость т.(Сх)	81.32826745	109.2347				
Цены на границах	49.12730474	51.55093	75.18992	71.2772		

Рис. 4

Следует заметить, что при решении данной задачи себестоимость тепловой энергии на границе распределения зон теплоснабжения может быть разной. Это объясняется тем, что при формировании оптимальной точки распределения

границ теплоснабження, крім втрат в тепло-сетях, учивався характер изменения стоимости тепловой энергии от объема ее выработки.

Этот факт удостоверяет необходимость изменения подхода к тарифной политике в вопросе теплоснабжения и указывает на необходимость создания таких расчетных оптимизационных моделей для управления теплосетями.

Рассмотрим реальную сеть теплоснабжения города, которая включает две районные котельные – РК 1 и РК 2 и 12 участков теплосетей (рис. 5). Диаметры труб и длины участков соответственно равны: 1 – Ø1000 мм, длиной 1,5 км; 2 – Ø400 мм, длиной 1,5 км; 3 – Ø1000 мм, длиной 1,5 км; 4 – Ø500 мм, длиной 1,2 км; 5 – Ø1000 мм, длиной 0,5 км; 6 – Ø500 мм, длиной 1,5 км; 7 – Ø700 мм, длиной 7,7 км; 8 – Ø700 мм, длиной 8,4 км; 9 – Ø700 мм, длиной 4,7 км; 10 – Ø700 мм, длиной 1,1 км; 11 – Ø500 мм, длиной 0,9 км; 12 – Ø500 мм, длиной 2,3 км.

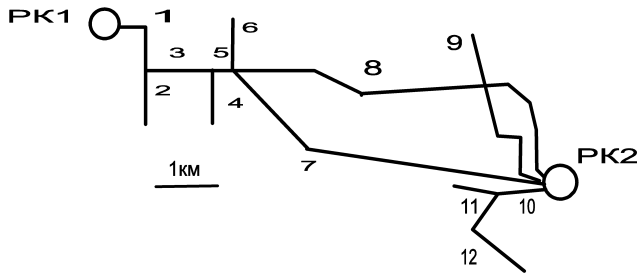


Рис. 5

Количество отпущенной тепловой энергии за год составляет 1,4958 МГкал. Потери тепла в сетях составляют 14% – 0,1838 МГкал. Общее потребление тепловой энергии потребителями – 1,312 МГкал.

Характеристика себестоимости тепла в зависимости от объема в млн. грн. от млн. Гкал. (верхняя строчка) для источника РК-1 в виде табл. 1 и графика представлена на рис. 6.

Аналогично характеристика себестоимости тепла в зависимости от объема в млн. грн. от млн. Гкал. (верхняя строчка) для источника РК-2 в виде табл. 2 и графика представлена на рис. 7.

Согласно [3] потери тепла на теплообмен находятся как $\sum q_i L_i$, где q_i нормы густоты тепло-

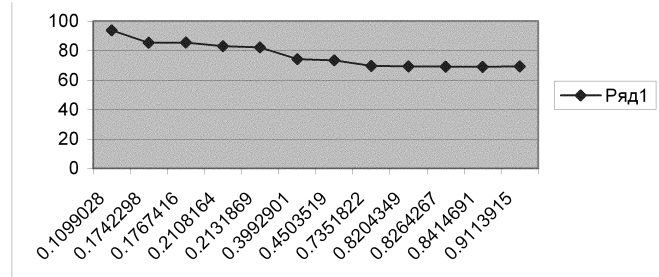


Рис. 6

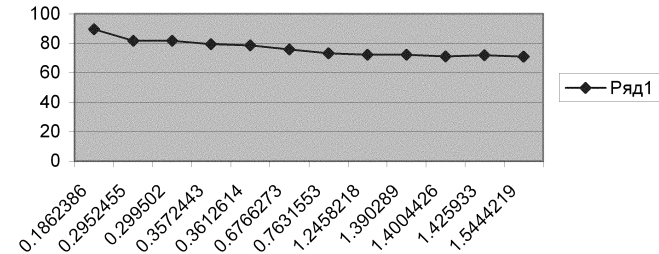


Рис. 7

вого потока для i -той трубы, L_i длина трубы в км. Относительные значения q_i для указанных труб сети теплоснабжения на рис. 4 равняются: Ø400 мм – 1; Ø500 мм – 1,15; Ø700 мм – 1,35; Ø1000 мм – 1,65. Тогда сумма множителей относительных значений густоты тепловых потоков на длины труб находятся согласно выражению

$$\sum q_i L_i = 1,65 \times 1,5 + 1 \times 1 + 1,65 \times 1,5 + 1,15 \times 1,2 + 1,65 \times 0,5 + 1,15 \times 1,1 + 1,35 \times 7,4 + 1,35 \times 8,4 + 1,35 \times 4,7 + 1,35 \times 1,1 + 1,15 \times 0,9 + 1,15 \times 2,3 = 41,905 \text{ км}^*.$$

Относительные потери на км* равны – $1 \text{ км}^* = 0,1838 / 41,905 = 0,004386 \text{ м.Гкал.}$

Потери, связанные с расходами теплоносителя, в данном случае не учиваем.

Расходы электроэнергии учиваем следующим образом. Известно, что расходы электроэнергии на перекачку теплоносителя по сети составляют около 5% себестоимости тепла поставленного потребителю. Тогда 5% себестоимости всего тепла сети, найденные для РК-2, составляют 4,94 млн. грн. Для упрощения задачи допускаем, что такая же сумма необходима РК-1 для перекачки теплоносителя по сети. Затраты на перекачку теплоносителя учиваем

Таблица 1

0.109903	0.17423	0.176742	0.21082	0.213187	0.39929	0.450352	0.735182	0.820435	0.826427	0.841469	0.911392
93.84748	85.50538	85.61327	83.165	82.38	74.22734	73.52679	69.7721	69.38218	69.26943	69.031	69.33878

Таблица 2

0.186239	0.295246	0.299502	0.35724	0.361261	0.676627	0.763155	1.245822	1.390289	1.400443	1.425933	1.544428
89.58168	81.61877	81.72176	79.3848	78.63545	75.85337	73.18466	72.154	72.1592	71.057	71.89	70.835

ваються наступним образом. Згідно СНиП [3,4] для доставки 1 Гкал тепла необхідний потік теплоносія 12,5 м³/час, для гарячого водопостачання (ГВС) – 17,3 м³/час. Приймаємо середній потік рівний 15 м³/час, оскільки витрати тепла на опалення і ГВС приблизно однакові. Тоді витрати електричної енергії РК пропорційні потіку, помножені на тиск, будуть змінюватися лінійно, оскільки при зміні положення розділюючої перемички вздовж труби, зміні координати x , кількість споживачів збільшується лінійно (за умовою). Додається ще складова, пов'язана з втратами тиску, пропорційна четвертій степені x , оскільки самі втрати пропорційні потіку в квадраті, помножені на довжину труби, і ще раз множаться на x . Математичне моделювання з використанням параметрів магістральної мережі і насоса дало наступну характеристику в вигляді полінома четвертої степені $P=(91,203x^4+136,81x^3-90,536x^2+392,42x-0,6439)$ кВт (5) для врахування витрат електричної енергії від координати x , розділюючої перемички для кожного РК (рис. 8).

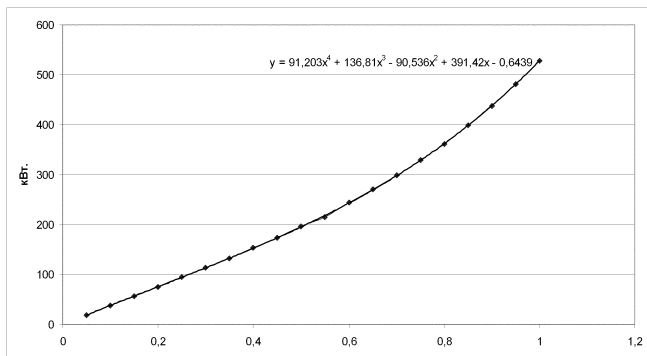


Рис. 8

Введемо наступні позначення: координата перемички, яка розділяє теплотрису на дві половини, в відносних одиницях, при русі від РК-1 позначимо як x_1 , при русі від РК-2 – x_2 . Оскільки довжина труб на ділянках 7 і 8 приблизно однакова, то вважаємо, що координати x рухаються по ній паралельно, хоча для розділення мережі на цій ділянці необхідні дві задвижки (реально чотири для перекриття прямої і зворотної труби теплопроводу). Оскільки до основної ділянки мережі (який з'єднує теплоісточники РК-1 і РК-2) підключені труби відгалужень, розбиваємо основну ділянку на чотири звена.

X₁.

1-е звено. Включає трубу першого ділянки до підключення труби відгалуження другого ділянки: $0 < x_1 < 1,5/10,9 = 0,1376$.

Витрати на звено: 0,3095 м.Гкал.

Втрати: $1,65 \times 1,5^x \times 0,004386 = 0,01086$ м.Гкал.

Загальні витрати тепла на звено:

$0,3095 + 0,01086 = 0,3204$ м.Гкал.

Сума витрат РК-1: $\Sigma Z_{13x_1} = C_{x_1}(0,3204/0,1376)x_1 + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25 = C_{x_1}12,328x_1 + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25$, де ΣZ_{13} – сума витрат РК-1 на теплотрису споживачів першого звена з врахування витрат на перекачку теплоносія; C_{x_1} – собівартість одиниці тепла при заданому об'ємі на виході РК-1.

2-е звено. Включає трубу другого ділянки третій ділянку до труби четвертого ділянки: $0,1376 < x_1 < 3/10,9 = 0,2752$. Далі розрахунок проводиться аналогічно.

Сума витрат: РК-1 $\Sigma Z_{23x_1} = C_{x_1}[0,3578 + (x_1 - 0,1376)(0,1856/0,2752 - 0,1376)] + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25 = C_{x_1}[0,3578 + (x_1 - 0,1376)1,363] + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25$.

3-тє звено. Сума витрат РК-1: $\Sigma Z_{33x_1} = C_{x_1}[0,565 + (x_1 - 0,2752)(0,2922/0,3125 - 0,2752)] + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25 = C_{x_1}[0,565 + (x_1 - 0,2752)0,783] + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25$.

4-е звено. Сума витрат РК-1: $\Sigma Z_{43x_1} = C_{x_1}[0,6143 + (x_1 - 0,3125)(0,5893/1 - 0,3125)] + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25 = C_{x_1}[0,6143 + (x_1 - 0,3125)0,857] + 4,94(91,203x_1^4 + 136,81x_1^3 - 90,536x_1^2 + 392,42x_1 - 0,6439)/528,25$.

X₂.

1-е звено. Сума витрат РК-2: $\Sigma Z_{13x_2} = C_{x_2}[0,2828 + x_2 \cdot 0,5893/0,6875] + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 + 392,42x_2 - 0,6439)/528,25 = C_{x_2}(0,2828 + 0,857x_2) + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 + 392,42x_2 - 0,6439)/528,25$.

2-е звено. Сума витрат РК-2: $\Sigma Z_{23x_2} = C_{x_2}[0,8921 + (x_2 - 0,6875)(0,0,2922/0,7248 - 0,6875)] + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 + 392,42x_2 - 0,6439)/528,25 = C_{x_2}[0,8921 + (x_2 - 0,6875)0,783] + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 + 392,42x_2 - 0,6439)/528,25$.

3-тє звено. Сума витрат РК-2: $\Sigma Z_{33x_2} = C_{x_2}[0,941 + (x_2 - 0,7248)(0,1856/0,8624 - 0,7248)] + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 +$

Таблиця 3

0.109903	0.17423	0.176742	0.21082	0.213187	0.39929	0.450352	0.735182	0.820435	0.826427	0.841469	0.911392
93.84748	85.50538	85.61327	83.165	82.38	74.22734	73.52679	69.7721	69.38218	69.26943	69.031	69.33878

$$+392,42x_2 - 0,6439) / 528,25 = C_{x_2} [0,941 + (x_2 - 0,7248)1,363] + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 + 392,42x_2 - 0,6439) / 528,25.$$

4-ое звено. Сумма затрат РК-2: $\Sigma Z_{43x_2} = C_{x_2} [1,166 + (x_2 - 0,8624)(0,3204 / 1 - 0,8624)] + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 + 392,42x_2 - 0,6439) / 528,25 = C_{x_2} [1,166 + (x_2 - 0,8624)2,328] + 4,94(91,203x_2^4 + 136,81x_2^3 - 90,536x_2^2 + 392,42x_2 - 0,6439) / 528,25.$

С учетом вышеизложенного составлена оптимизационная модель, в которой функция цели запишется в виде:

$$C = \sum Z_{13x_1} + \sum Z_{23x_1} + \sum Z_{33x_1} + \sum Z_{43x_1} + \sum Z_{13x_2} + \sum Z_{23x_2} + \sum Z_{33x_2} + \sum Z_{43x_2} \rightarrow \min$$

Уравнение связи: $x_1 + x_2 = 1.$

Ограничение: $0 \leq x_1, x_2 \leq 1.$

Модель с полученным оптимизационным решением представлена на рис. 9.

	x1	x2	Σx	y
	1	1	1	1
			З.ц.ф	
Функция цели	51.52355	57.40326	108.927	
	0	0		
Верхние границы В	1	1		
Переменные X	0.439493	0.560508		
Нижние границы Н	0	0		
Нагрузка	0.723133	0.763155		

Рис. 9

Таким образом, видно, что минимальная сумма затрат РК-1 и РК-2 по теплоснабжению потребителей рассматриваемой теплосети, при заданной себестоимости, составляет 108,927 м.грн. Исторически сложилось, что разделяющая перемычка установлена при $x_1 = 0,15$, что соответствует 112,4253 м. грн. (табл. 3). Следовательно, в данном случае только одной оптимальной установкой перемычки можно сэкономить в тепловой системе до 4% расходов.

Следует отметить, что в результате решения нелинейной сетевой транспортной задачи определена интегральная затратная характеристика сети как функция положения разделяющей перемычки (средняя кривая на рис. 10), которая с течением времени изменяется следующим образом: увеличивается с увеличением потерь,

1. Васильева Е.М., Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. *Нелинейные транспортные задачи на сетях.* - М.: Финансы и статистика, 1981. - 104 с.

2. Меренков А.П., Хасилев В.Я. *Теория гидравлических цепей.* - М.: Наука, 1985.

3. СНИП. 2.04.07-86. *Тепловые сети.*

4. СНИП. 2.04.05-86. *Отопление, вентиляция и кондиционирование.* - М., 1988. - оф. изд.

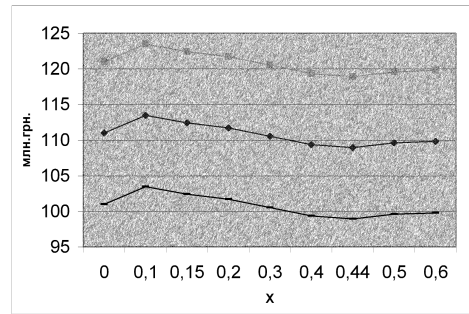


Рис. 10

связанных со старением сети (верхняя кривая), или уменьшается с уменьшением потерь при реконструкции и модернизации (нижняя кривая) и может быть использована для идентификации состояния сети при длительной эксплуатации.

Поскольку себестоимость тепловой энергии РК-1 и РК-2 не сильно отличается, что связано с малым изменением КПД использования топлива для разных по мощности котелов, а себестоимость тепла на 80% зависит от себестоимости сжигаемого газа, то, очевидно, и это подтверждено результатами расчета задачи, что перемычку следует размещать близ середины труб, соединяющих станции. Это связано с расходами электроэнергии на перекачку носителя, которые зависят от длины трубы в степени большей единицы (см. соотношение (5)).

Выводы

1. Проведенные расчеты показали, что оптимизацией режимов в тепловой сети (решением нелинейной сетевой транспортной задачи) можно экономить до 10% непроизводительно расходуемых материальных ресурсов.

2. Приведенная методика оптимизации режимов в тепловых сетях позволяет:

- определять интегральную затратную характеристику сети и, соответственно, оценивать текущее её состояние;
- оптимально устанавливать разделяющие перемычки;
- правильно рассчитывать тарифы и проводить единую тарифную политику.