

УДК 658.24

Алексахин А.А.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПOTЕРЬ ТРУБОПРОВОДАМИ  
РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ***Харьковская национальная академия городского хозяйства*

Решение тактических вопросов энергосбережения базируется на детальном анализе потерь энергии в узлах системы и выявлении ее наиболее проблемных элементов. Одним из недостатков централизованных систем теплоснабжения, состоящих из источников тепловой энергии, тепловых сетей и систем теплоснабжения, является большая протяженность сетей и, как следствие, существенные потери теплоты при ее транспортировке. По данным [1] уровень тепловых потерь в сетях г. Харькова, имеющих протяженность 1556 км, составляет около 16,1 % от отпущенной тепловой энергии.

Величину тепловых потерь через изоляцию эксплуатируемых сетей определяют при проведении тепловых испытаний. Методика испытаний магистральных тепловых сетей изложена, например в [2, 3].

В соответствии с методикой предварительно выбирают участки магистрали, которые составляют циркуляционное кольцо с необходимыми типами прокладки участков и параметрами конструкции теплоизоляции. Необходимый тепловой и гидравлический режимы в испытываемом кольце обеспечивают на источнике теплоты. Испытания проводят после окончания отопительного сезона, в период времени, когда температура грунта и наружного воздуха максимально приближены. Замеры расходов теплоносителя и температур проводят при установившихся тепловых условиях. Показателем достижения установившегося теплового состояния является постоянство температуры теплоносителя в обратной линии кольца на входе в источник теплоты. В период испытаний все потребители теплоты отключены.

Особенностью городских тепловых сетей является их большая разветвленность. Общая длина квартальных тепловых сетей, как правило, в несколько раз превышает протяженность магистральных, поэтому, даже при меньших диаметрах трубопроводов, тепловые потери в микрорайонных сетях больше. Так, по данным [4], длина квартальных участков в г. Харькове более чем в 2,5 раза больше длины магистральных. Это обуславливает то, что при средних диаметрах трубопроводов соответственно 133 и 403 мм [4] нормативные потери теплоты [5] через изоляцию в квартальных сетях примерно на 30 % больше. Поэтому задача определения тепловых потерь трубопроводами микрорайонных сетей представляется актуальной. Проведение же тепловых испытаний квартальных сетей по указанной выше методике затруднительно.

Целью данного исследования является получение расчетной зависимости для определения тепловых потерь в разветвленных тепловых сетях.

При допущении о равномерном распределении расхода теплоносителя из подающего трубопровода вместо реального ступенчатого изменение температуры теплоносителя по длине теплопровода можно найти из предложенного в [6] уравнения, в соответствии с которым температура в сечении трубопровода, отстоящем на расстоянии  $L$  от начала координат, равна

$$\tau_1(L) = t_{окр} + (\tau_1 - t_{окр}) (1 - \alpha \cdot G_n / G_o)^4, \quad (1)$$

$$A = q_1' \cdot L / (C \cdot \Delta t_1 \cdot G_n),$$

где  $\tau_1, t_{окр}$  – температура теплоносителя на входе в трубопровод и окружающей среды для соответствующей прокладки сетей;  $G_o$  и  $G_n$  – соответственно расход теплоносителя на входе в теплопровод и через ответвления;  $q_1'$  – удельные теплотери при разнице температур теплоносителя и окружающей среды, равной  $\Delta t_1$ ;  $C$  – удельная теплоемкость теплоносителя.

Записывая величину остывания теплоносителя на участке  $\Delta \tau_1 = \tau_1(L) - \tau_1$ , после преобразований получаем выражение для средних по длине  $L$  потерь теплоты подающим трубопроводом, приведенных к разности температур  $\Delta t_1$

$$\bar{q}_1 = \frac{\Delta t_1 \cdot C \cdot G_n}{L} \cdot \frac{B}{B}; \quad (2)$$

$$B = \ln \left[ 1 - \Delta \tau_1 / (\tau_1 - t_{окр}) \right], \quad B = \ln \left[ 1 - G_n / G_o \right].$$

Поскольку величина теплотери зависит от температурного фактора, при анализе теплового состояния теплопроводов целесообразно фактические теплотери соотносить с нормативными, полученными для разницы температур  $\Delta t_1$ .

Преобразования формулы, выполненные в соответствии с [7], позволили получить выражение для относительной погрешности нахождения теплотери в виде

$$\frac{\Delta \bar{q}_1}{\bar{q}_1} = \frac{\Delta(\Delta t_1)}{\Delta t_1} + \frac{\Delta(C)}{C} + \frac{\Delta(G_n)}{G_n} + \frac{\Delta(L)}{L} + \frac{\Delta(B)}{B} + \frac{\Delta(B)}{B}.$$

Учитывая, что  $\frac{G_{mp}}{G_o} = 1 - \frac{G_n}{G_o}$  и используя разложение в ряд Маклорена функции типа  $\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots + (-1)^{n-1} \cdot \frac{x^n}{n}$  для условий  $\Delta(\Delta t_1) = \Delta(C) = \Delta(L) = 0$  окончательно получим

$$\frac{\Delta \bar{q}_1}{\bar{q}_1} = \frac{\Delta(G_n)}{G_n} + \xi_1 \cdot \left[ 1 + \frac{\sum_{i=2}^n (i-1) \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \right] + \xi_2 \cdot \left[ 1 + \frac{\sum_{i=2}^n (i-1) \cdot E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \right],$$

$$D_i = \frac{\left[ \Delta \tau / (\tau_1 - t_{окр}) \right]^i}{i}, \quad E_i = \frac{(G_n / G_o)^i}{i},$$

$$\xi_1 = 2 \cdot \Delta(t) \left[ \frac{1}{\Delta \tau} + \frac{1}{\tau_1 - t_{окр}} \right], \quad \xi_2 = \left[ \frac{\Delta(G_n)}{G_n} + \frac{\Delta(G_o)}{G_o} \right], \quad (3)$$

где  $\Delta(\dots)$  – абсолютная погрешность соответствующей величины

Структура формулы (3) свидетельствует, что в области малых значений  $\psi = G_{mp} / G_0$ , характерных для гидравлического режима квартальных сетей, возрастает значение множителя  $\xi_2$ , зависящего от величины расхода. Как видно из рис. 1, при  $\psi = 0,1$  величина множителя примерно в четыре раза превышает его значение при  $\psi = 0,8$ .

Результаты, представленные на рис. 1, получены в предположении, что погрешность величины расхода в исходных данных составляет  $\Delta(G) / G = 0,015$ .

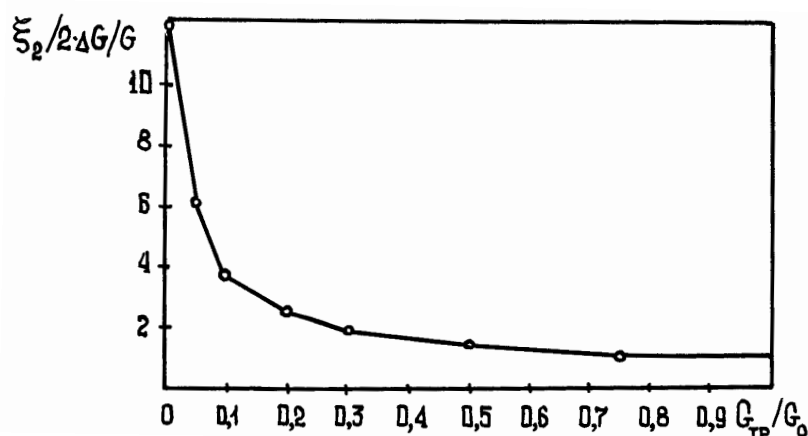


Рисунок 1 – Изменение расходного слагаемого относительной погрешности нахождения тепловых потерь в зависимости от соотношения расходов

Уменьшить расходную компоненту погрешности нахождения величины теплотерь можно увеличением значения  $\psi$ , например, путем смещения конечной расчетной точки на ветви к началу теплопровода. Изменение расходного слагаемого погрешности в зависимости от изменения координаты конечной расчетной точки на ветви показано на рис. 2. Выбирая в качестве конечной расчетной точки точку  $c$  координатой  $x / L = 0,9$ , можно более, чем вдвое уменьшить погрешность, а при  $x / L = 0,8$  обеспечивается снижение расходного слагаемого до уровня  $\xi_2 \leq 7,5$  %. Однако уменьшение расчетной длины, с другой стороны, приводит к снижению величины фиксируемого охлаждения теплоносителя и росту относительной погрешности измерения разности температур.

Оценка величины температурного слагаемого в уравнении (3) выполнена при условии, что теплотери трубопроводами находятся на уровне допустимых значений. В соответствии с [8] потери теплоты не должны составлять при длине трубопроводов до 1000 м более 4,8 % от отпущенного количества теплоты, а при длине более 1000 м – не более 13 %. Приняв также, на основании анализа данных [8], соотношение между теплотерями подающими и обратными трубопроводами 60 % и 40 %, получено значение максимального охлаждения сетевой воды.

При длине до 1000 м для температур наружного воздуха в точке излома температурного графика ( $\bar{Q}_o \approx 0,35$ ) оно равно  $0,8^\circ \text{C}$ , при расчетной для отопления темпера-

туре наружного воздуха ( $\bar{Q}_o = 1,0$ ) охлаждение составляет 2,3 °С. При длине теплопроводов более 1000 м 2,2 °С и 6,2 °С, соответственно. Исходя из этих значений была оценена координата, для которой может иметь место данное охлаждение теплоносителя. Расчеты выполнены для подземного способа прокладки сетей при допущениях, что погрешность измерения температуры равна 0,1 °С, температура сетевой воды на входе в теплопровод при  $\bar{Q}_o = \bar{Q}'_o$  равна 70 °С и при  $\bar{Q}_o = 1-120$  °С, температура грунта на оси заложения трубопровода соответственно равна 2,5 °С и 4,5 °С. Для оценки теплотерь приняты нормативные значения [5] для среднего диаметра тепловых сетей  $D_{cp} = 133$  мм, приведенные к конкретным температурным условиям. Расход теплоносителя на входе в теплопровод принят для  $D_{cp}$  из условия, что удельные потери давления не превосходят рекомендуемую для ответвлений величину 300 Па/м.

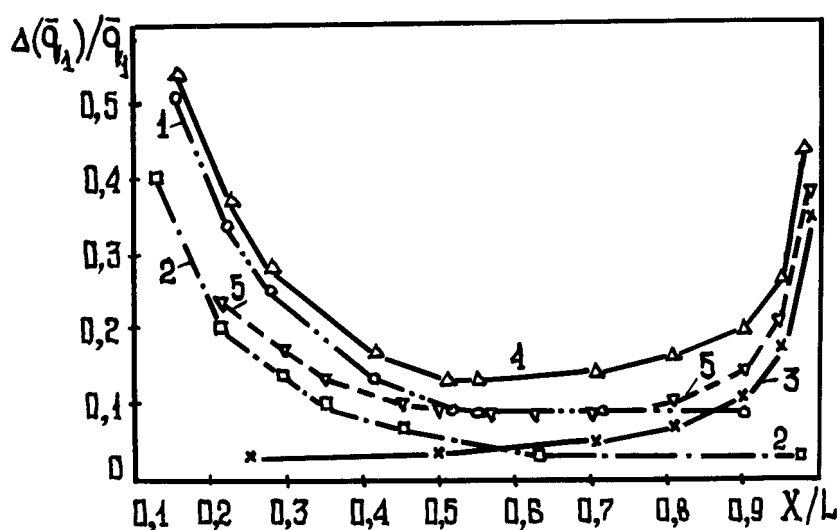


Рисунок 2 – Относительная погрешность определения теплотерь в подающем трубопроводе теплосети по формуле (2):

- 1, 2 – значение температурной компоненты в (3) при  $\bar{Q}_o = \bar{Q}'_o$  и  $\bar{Q}_o = 1$  соответственно;
- 3 – расходная компонента; 4, 5 – общая погрешность при  $\bar{Q}_o = \bar{Q}'_o$  и  $\bar{Q}_o = 1$  соответственно

Результаты расчетов, приведенные на рис. 2, показывают изменение значений  $\xi_1$  и  $\xi_2$  для  $\psi = 0,01$  в зависимости от выбора координаты конечной расчетной точки на ветви сети. Там же приведена вычисленная по (3) общая погрешность определения теплотерь для двух характерных значений температуры наружного воздуха. Полученные данные свидетельствуют, что минимальную погрешность следует ожидать при выборе координаты конечной расчетной точки на ветви в области значений  $0,5 \leq x/L \leq 0,8$ . Относительная погрешность  $\Delta \bar{q}_1 / \bar{q}_1$  в области значений  $\bar{Q}_o = 1$  ожидается примерно на 30 % ниже, чем при температурах наружного воздуха, близких к точке излома температурного графика, что делает это время отопительного сезона более предпочтительным для проведения испытаний.

Как следует из приведенных на рис. 3 графиков, для тепловых сетей с более равномерным распределением расхода вдоль трубопровода ошибка определения тепловых

потерь меньше, что исключает необходимость выбора на ветви координаты конечной расчетной точки.

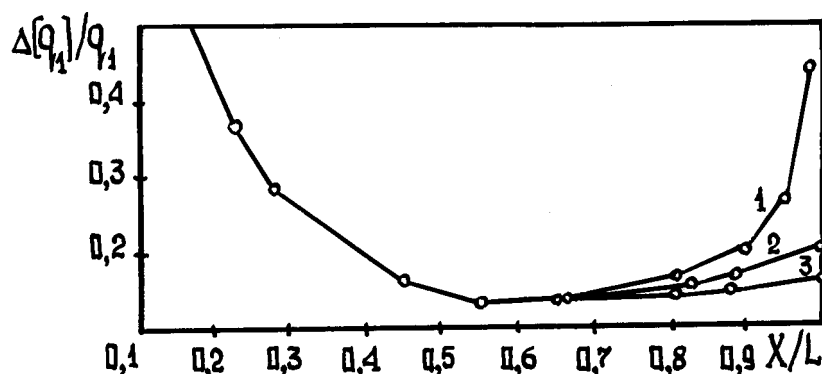


Рисунок 3 – Влияние соотношения расходов на погрешность определения теплотерь

$$\text{при } \bar{Q}_0 = 0,35 : 1 - \frac{G_{mp}}{G_0} = 0,01; 2 - 0,1; 3 - 0,2.$$

В качестве примера рассмотрен фрагмент жилого микрорайона, схема и характеристика тепловых сетей которого приведены в [6]. Распределение расхода теплоносителя по длине расчетной ветви характеризуется соотношением  $\psi = 0,0098$  и следует ожидать высокую ошибку определения тепловых потерь. Предварительно было рассчитано охлаждение теплоносителя по длине трубопровода  $L = 704,5$  м при начальной температуре  $120$  °С, температуре грунта  $4,5$  °С, нормативных линейных потерях теплоты и значении коэффициента местных потерь  $\beta = 1,15$ . Варианты расчетов различались выбором конечной расчетной точки на длине ветви. Результаты вычислений теплотерь по формуле (2) и сопоставление их с принятыми исходными значениями выполнено в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление результатов определения теплотерь на расчетной ветви (1–10) [5]

Номер варианта	Конечная расчетная точка ветви		$\psi$	$\Delta\tau_1, \text{ }^\circ\text{C}$	Теплотери, Вт/м		$\left  \frac{\Delta q}{q} \right , \%$	
	№	Координата			ф. (2)	[7]		
		$x, \text{ м}$						$x/L$
1	10	704,5	1,0	0,0098	11,22	181,98	93,95	93,7
2	8	641,5	0,91	0,048	5,65	107,35	98,0	9,5
3	7	563	0,80	0,12	3,52	109,18	102,5	5,5
4	4	279	0,4	0,6	1,0	119,67	124,1	3,6
5	3	142	0,2	0,76	0,425	118,51	121,84	2,7

Представленные данные подтверждают возможность использования формулы (2) и согласуются со сделанными ранее выводами о характере изменения ошибки счета. Расчеты по формуле (2) для режима  $\bar{Q}_0 = 0,35$  при внесении в исходные данные искус-

ственной ошибки  $\Delta(\tau_1) = -0,1$  °С,  $\Delta(\tau_1 - t_{окр}) = 0,2$  °С,  $\Delta(G)/G = 0,015$  удовлетворительно согласуются с соответствующей линией общей погрешности на рис. 2.

#### Выводы

1. Предложенная расчетная зависимость позволяет с достаточной для инженерной практики точностью определить теплотери в разветвленных тепловых сетях.
2. Повышение точности нахождения теплотери в сетях с неравномерным распределением расхода вдоль ветви можно достичь выбором конечной расчетной точки ветви в диапазоне  $0,5 < \frac{x}{L} < 0,8$ .
3. Более высокая точность может быть получена в области наружных температур воздуха, близких к расчетной для отопления.

#### Литература

1. Андреев С.Ю., Голованев Н.П., Репин А.П. Энергосбережение в коммунальной теплоэнергетике//Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.– 2007.– № 3.– С. 62–68.
2. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях. РД 34.09.255-97. Служба передового опыта ОРГРЭС. Департамент науки и техники. – М.: 1998.
3. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и тепловых сетях. – МУ 34-70-080-84. – М.: СПО Союзэнерго, 1985.
4. Програма розвитку і реформування житлово-комунального господарства в м. Харкові на 2003–2010 рр. (Коллектив авторів під керівництвом Шутенка Л.М., Бабаєва В.М., Семенова В.Т.). – Харків: ХДАМГ, 2003. – 208 с.
5. Тепловая изоляция / Под ред. Г.Ф.Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1995. – 421 с.
6. Алексахин А.А. Определение охлаждения теплоносителя в трубопроводах тепловых сетей // Коммунальное хозяйство городов: Научн.-техн. сб. Вып. 74. – К.: Техніка, 2006. – С. 349–355.
7. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
8. Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні. КТМ 204 України 244–94.

УДК 658.24

Алексахін О.О.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИТРАТ ТРУБОПРОВОДАМИ РОЗГАЛУЖЕНИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ**

Запропоновано розрахункову залежність для визначення витрат теплоти на ділянці подавального трубопроводу розгалуженої теплової мережі. Досліджено вплив температурних умов та співвідношення витрат теплоносія у початковій та кінцевій координатах вітки мережі на точність розрахунків.