

УДК 658.264

Алексахин А.А., Ена С.В., Гордиенко Е.П.

## РАСЧЕТ ТЕПЛОПOTЕРЬ ПОДАЮЩИМИ ТРУБОПРОВОДАМИ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Одним из недостатков централизованных систем теплоснабжения является значительная протяженность и разветвленность тепловых сетей [1]. Тепловая энергия по магистральным трубопроводам от источников теплоты подается к тепловым пунктам, которые являются узлами управления и учета отпуска теплоты [2]. В жилых микрорайонах от центральных тепловых пунктов теплота по распределительным сетям транспортируется к зданиям и сооружениям. Причем суммарная длина распределительных сетей, как правило, значительно превосходит протяженность магистральных теплопроводов города.

Известные методики экспериментального определения потерь теплоты на магистральных направлениях тепловых сетей [3] предполагают выделение фрагмента сети, образующего кольцо между источником и потребителем, отключение потребителей от теплоснабжения на время проведения испытаний и измерения остывания теплоносителя на участках. Тепловые испытания микрорайонных сетей, как правило, не проводятся.

Целью данной работы является получение расчетных формул для нахождения потерь теплоты при функционирующей в штатном режиме тепловой сети, без отключения систем теплоснабжения, что позволило бы проводить постоянный мониторинг уровня теплотерь при транспортировке тепловой энергии.

Поскольку тепловые сети состоят из участков с неизменным диаметром трубопроводов, и, следовательно, неизменным расходом теплоносителя, реальное распределение расхода сетевой воды по длине ветвей сети имеет ступенчатый характер. При выполнении расчетов бывает удобно вместо реального закона изменения расхода использовать монотонную функцию. В [4] для описания использована степенная зависимость, позволяющая, варьируя показатель степени  $n$ , получать удовлетворительную аппроксимацию закона изменения расхода теплоносителя по длине

$$\overline{G}_0(x_0) = 1 - \overline{G}_{TP}(x_0), \quad (1)$$

где  $x_0 = x/L$  – отопительная координата,  $L$  – длина ветви;  $\overline{G}_0 = G_0/G_{\max}$ ;  $\overline{G}_{TP} = G_{TP}/G_{\max}$ ;  $G_0$  – расход на входе в ветвь;  $G_{TP}$  – расход теплоносителя у наиболее удаленного от входа потребителя.

Анализ теплового баланса для элементарного участка подающего трубопровода теплосети позволяет получить дифференциальное уравнение

$$G(x_0) dt_1 = -Q_{II}/C, \quad (2)$$

где  $t_1$  – температура сетевой воды;  $C$  – удельная теплоемкость.

Величину потерь теплоты  $Q_{II}$  удобно записать в виде

$$Q_{\Pi} = q \cdot \beta \cdot dx, \quad (3)$$

где  $q$  – удельные (линейные) тепловые потери трубопроводом, Вт/м;  $\beta$  – коэффициент для учета теплопотерь конструктивными элементами сети (принимается в зависимости от способа прокладки сети [5]).

Использование уравнения (1) при подстановке его в (2) приводит к необходимости интегрирования иррациональной функции. Поэтому в работе приняты линейная и дробно–рациональные функции для описания закона изменения расхода теплоносителя по длине. В результате решения уравнения (2) получены формулы для нахождения изменения температуры теплоносителя по длине ветви разветвленной сети (табл. 1).

Таблица 1 – Уравнения для определения расхода и температуры сетевой воды по длине теплопровода

| № п/н | Расход сетевой воды           | Температура                                | Номер формулы |
|-------|-------------------------------|--|---------------|
| 1     | $\bar{G} = 1 + ax_0$          | $t = \tau_1 - \frac{A_1}{a} \ln(1 + ax_0)$ | (4)           |
| 2     | $\bar{G} = (1 + bx_0^2)^{-1}$ | $t = \tau_1 - A_1 (x_0 + bx_0^3/3)$        | (5)           |
| 3     | $\bar{G} = (1 + cx_0)^{-1}$   | $t = \tau_1 - A_1 (x_0 + cx_0^2/2)$        | (6)           |

В приведенных формулах  $A_1 = q/B$ ;  $B = G_0 \cdot C/(\beta \cdot L)$ ;  $\tau_1$  – температура сетевой воды на входе в ветвь.

При известных значениях температуры теплоносителя на концах исследуемого фрагмента сети представляется возможным, воспользовавшись формулами (4)–(6), определить средние на участке длиной  $L$  потери теплоты трубопроводами. Как правило, результаты определения теплопотерь в сети сопоставляют с нормативными значениями [5], которые разнятся в зависимости от способа прокладки и диаметра трубопровода. Формулы для определения удельных теплопотерь на участке разветвленной сети, приведенные к нормативным температурным условиям, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Уравнения для определения удельных теплопотерь

| Расход                        | Удельные температуры, Вт/м   | Номер формулы |
|-------------------------------|--|---------------|
| $\bar{G} = 1 + ax_0$          | $q = \frac{B \cdot a \cdot \Delta t_n (\tau_1 - \tau_k)}{(\ln 1+a )[(\tau_1 + \tau_k)/2 - t_{окр}]}$ | (7)           |
| $\bar{G} = (1 + bx_0^2)^{-1}$ | $q = \frac{B \cdot \Delta t_n (\tau_1 - \tau_k)}{(1+b/3)[(\tau_1 + \tau_k)/2 - t_{окр}]}$            | (8)           |
| $\bar{G} = (1 + cx_0)^{-1}$   | $q = \frac{B \cdot \Delta t_n (\tau_1 - \tau_k)}{(1+c/2)[(\tau_1 + \tau_k)/2 - t_{окр}]}$            | (9)           |

В формулах (7)–(9)  $\tau_k$  – температура теплоносителя на входе в систему теплопотребления,  $\Delta t_n$  – разница температур теплоносителя и окружающей среды при кото-

рой выполнена нормировка тепловых потерь [5]. В качестве температуры окружающей среды принимают температуру наружного воздуха при надземной прокладке сетей и температуру грунта на глубине заложения теплопроводов при бесканальном способе и прокладке в непроходных каналах.

Формулы (7)–(9) можно использовать для анализа теплового состояния микрорайонных сетей. Установленная на ТРС микрорайонов измерительная аппаратура позволяет определять расход и температуру теплоносителя на входе в микрорайонную сеть. Устанавливаемые в определенных зданиях теплосчетчики, делают возможной фиксацию параметров теплоносителя в отдельных точках по длине ветвей.

Проверка возможности использования полученных формул выполнена на примере отопительной сети для идеализированных групп зданий, приведенных на рис. 1, 2. Группы составлены из зданий с одинаковой отопительной нагрузкой, равной 0,61 МВт. Расход теплоты на отопление группы составляет 6,1 МВт. Расход сетевой воды вычислен по формуле (10)

$$G = Q / [C \cdot (\tau_1 - \tau_2)], \quad (10)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка;  $C$  – удельная теплоемкость воды;  $\tau_1, \tau_2$  – расчетная температура воды в подающем и обратном трубопроводах теплосети (принято  $\tau_1 = 150$  °С,  $\tau_2 = 70$  °С).

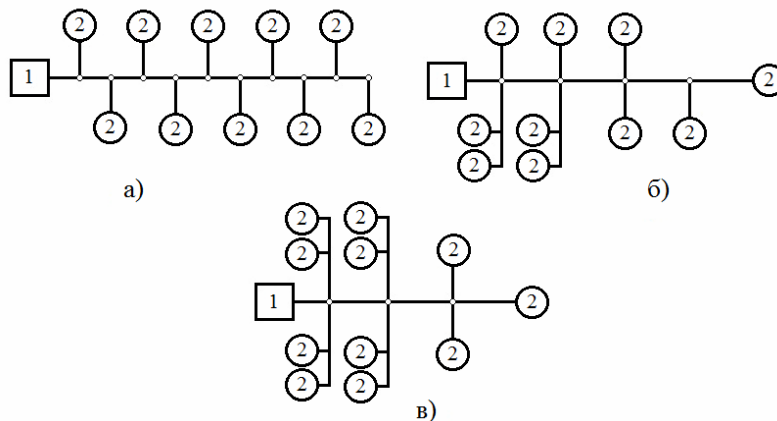


Рисунок 1 – Варианты исполнения тепловой сети  
1 – теплораспределительная станция; 2 – здания

Диаметры трубопроводов на участках определены из гидравлического расчета при условии, что удельные потери из-за трения находятся в диапазоне  $40 \leq R \leq 80$  Па/м. Числовые значения коэффициентов  $a, b, c$  в уравнениях изменения расхода для принятых к рассмотрению вариантов исполнения сети найдены по методу наименьших квадратов [6]. В расчетах принято, что трубопроводы проложены в непроходных каналах, удельные потери теплоты трубопроводами равны нормативным, коэффициент, учитывающий теплотери конструктивными элементами сети,  $\beta = 1,15$ . Длины расчетных участков для варианта 1 приняты одинаковыми  $l_{1-2} = l_{2-3} = \dots = l_{10-11} = 100$  м. Длины участков для вариантов 2, 3 найдены из условия одинаковой для всех вариантов материальной характеристики сети  $M = \sum_{i=1}^n d_i \cdot l_i = 133,8 \text{ м}^2$  ( $d_i$  – диаметр трубопровода

на участку;  $l_i$  – длина расчетного участка;  $n$  – число участков). Для варианта 2 длины расчетных участков одинаковы и равны 207 м, для варианта 3 длины ближайших к ТРС участков приняты равными 100 м, остальных – по 552 м.

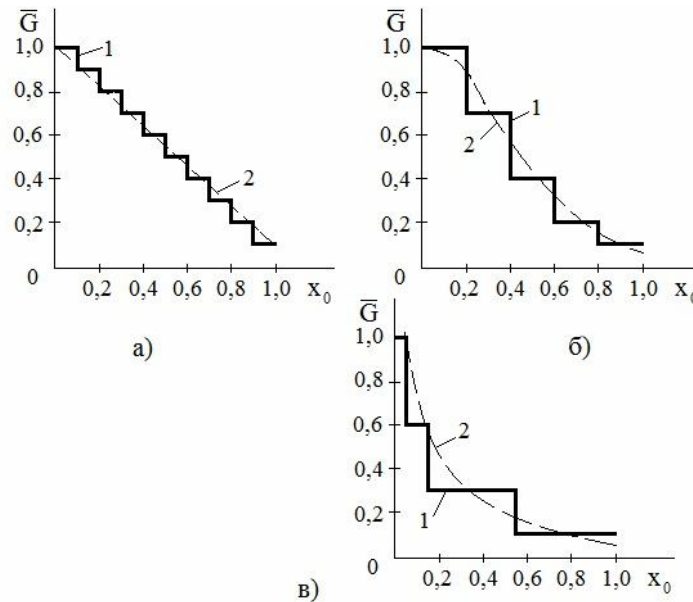


Рисунок 2 – Изменение расхода по длине расчетной ветви  
 а, б, в – номера вариантов исполнения сети (см. рис. 1)  
 1 – реальный закон; 2 – принятая аппроксимация

Температура сетевой воды на входе в микрорайонную отопительную сеть принята 90 °С. Температура воды в конце расчетного участка вычислена по формуле

$$\tau'' = \tau' - Q_{yч} / (C \cdot G_{yч}), \tag{11}$$

где  $\tau'$  – температура сетевой воды на входе в участок;  $Q_{yч}$ ,  $G_{yч}$  – соответственно, расход теплоты и воды на расчетном участке;  $C$  – удельная теплоемкость воды.

Параметры гидравлического режима отопительной сети приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Характеристики вариантов

| Показатель                                       | Номер расчетного варианта |                              |                            |
|--|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
|  | 1 (рис. 1,а)              | 2 (рис. 1,б)                 | 3 (рис. 1,в)               |
| Принятый закон изменения расхода                 | $1 - 0,902 \cdot x_0$     | $1 / (1 + 7,33 \cdot x_0^2)$ | $1 / (1 + 8,73 \cdot x_0)$ |
| Средняя погрешность аппроксимации расхода, %     | 0,5                       | 6,2                          | - 0,9                      |
| Общая длина ветви, м                             | 1000                      | 1035                         | 1304                       |
| Материальная характеристика сети, м <sup>2</sup> | 133,8                     | 133,8                        | 133,8                      |

Расчеты теплотерь подающим трубопроводом тепловой сети выполнены для трех характерных режимов отопительной сети: при температурах наружного воздуха, близких к расчетному значению (температура сетевой воды принята равной  $\tau_1 = 130^\circ\text{C}$ ), при средней за отопительный период температуре наружного воздуха ( $\tau_1 = 90^\circ\text{C}$ ) и температуре наружного воздуха, соответствующей точке излома температурного графика теплосети (принято  $\tau_1 = 77^\circ\text{C}$ ). Результаты нахождения теплотерь трубопроводами, приведенные нормативным температурным условиям, даны в табл. 4, из которой видно, что при использовании предложенных формул следует ожидать приемлемую точность нахождения теплотерь (не выше 4 %). Анализ результатов выполненных расчетов не позволил выявить влияние температуры сетевой воды на точность определения тепловых потерь. Однако, при проведении натурных измерений, скорее всего, следует отдать предпочтение режимам с меньшими температурами наружного воздуха. В этом случае, вследствие большего остывания воды, точность измерения изменения температуры воды на длине испытываемой ветви сети будет выше.

Таблица 4 – Результаты определения удельных тепловых потерь подающим трубопроводом отопительной сети

| Параметр  | Температура воды на вводе в сеть, $^\circ\text{C}$ | Номер расчетного варианта |              |            |
|---|--|---------------------------|--------------|------------|
|   |  | 1                         | 2            | 3          |
| Нормативные удельные теплотери для исходного расчета (средние по длине), Вт/м                       | 130  | 69,25                     | 67,7         | 60,45      |
|   | 90   | 69,25                     | 67,7         | 60,45      |
|   | 77   | 69,25                     | 67,7         | 60,45      |
| Расчетное остывание воды на ветви, $^\circ\text{C}$   | 130  | 4,127                     | 5,523        | 9,614      |
|   | 90   | 2,741                     | 3,66         | 6,4        |
|   | 77   | 2,417                     | 3,23         | 5,63       |
| Расчетные удельные теплотери (формулы (7), (8), (9)), Вт/м (в скобках относительная погрешность, %) | 130  | 71,66 (3,47)              | 69,55 (2,73) | 62,8 (3,9) |
|   | 90   | 71,3 (3,0)                | 69,06 (2,01) | 62,6 (3,6) |
|   | 77   | 71,62 (3,42)              | 69,5 (2,71)  | 62,7 (3,8) |

### Выводы

1. Предложены формулы для определения распределения температуры теплоносителя по длине ветви и тепловых потерь трубопроводами разветвленной сети для ряда характерных вариантов исполнения сети.

2. Удовлетворительная точность серии тестовых расчетов показала возможность использования полученных формул при экспериментальном определении потерь теплоты трубопроводами системы теплоснабжения.

### Литература

1. Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем [Текст] / Н.М. Зингер. – М.: Энергоиздат, 1986. – 320 с.

2. Повышение эффективности работы тепловых пунктов [Текст] / Н.М. Зингер, В.Г. Бестолченко, А.А. Жидков. – Стройиздат, 1990. – 185 с.

3. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях. РД 34.09.255–97 [Текст] – М.: 1998. – 56 с.
4. Справочник по гидравлике [Текст] / под общ. ред. В.А. Большакова. – К.: Вища школа, 1984. – 368 с.
5. Тепловая изоляция [Текст] / под ред. Г.Ф. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1995. – 421 с.
6. Демидович Б.П. Численные методы анализа [Текст]/ Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.

Bibliography (transliterated)

1. Zinger N.M. Gidravlicheskiye i teplovyye rezhimy teplofikatsionnykh sistem [Tekst]. N.M. Zinger. – М.: Energoizdat. 1986. – 320 p.
2. Povysheniye effektivnosti raboty teplovykh punktov [Tekst]. N.M. Zinger. V.G. Bestolchenko. A.A. Zhidkov. – Stroyizdat. 1990. – 185 p.
3. Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu teplovykh poter v vodyanykh teplovykh setyakh. RD 34.09.255?97 [Tekst] – М.: 1998. – 56 p.
4. Spravochnik po gidravlike [Tekst]. pod obshch. red. V.A. Bolshakova. – К.: Vishcha shkola. 1984. – 368 p.
5. Teplovaya izolyatsiya [Tekst]. pod red. G.F. Kuznetsova. – М.: Stroyizdat, 1995. – 421 p.
6. Demidovich B.P. Chislennyye metody analiza [Tekst]. B.P. Demidovich. I.A. Maron. E.Z. Shuvalova. – М.: Nauka. 1967. – 368 p.

УДК 658.264

Алексахін О.О., Єна С.В., Гордієнко О.П.

**РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИТРАТ ПОДАЮЧИМИ ТРУБОПРОВОДАМИ  
РОЗГАЛУЖЕНИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ**

На підставі розв'язання диференційного рівняння для розподілу температури по довжині гілки розгалуженої мережі теплопостачання запропоновано формули для обчислення втрат теплоти теплопроводами. Можливість використання запропонованих формул доведено при обчисленнях теплових втрат трубопроводами опалювальної мережі ідеалізованих груп будівель.

Aleksakhin O.O., Yena S.V., Hordiienko O.P.

**CALCULATION OF HEAT LOSSES OF SUPPLYING PIPELINES  
OF THE BRANCHED HEAT SUPPLY NETWORKS**

The branched manifold of heat supply system was considered. The differential equation for temperature distribution along the manifold branch was solved. Calculating formulas for manifold heat losses were offered on the basis the decision of the differential equation. The possibility of the offered formulas using were proved by the calculations of the manifold heat losses for idealized groups of buildings.