

УДК 697.353

Э.А.Бекиров, докт.техн.наук, З.Б.Алиева (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

### Метод расчета параметров системы стенового водяного панельно-лучистого отопления

*В работе рассмотрен способ расчета системы стенового панельно-лучистого отопления. Рассмотрен метод расчета теплоотдачи бетонных отопительных конструкций. Рассмотрен гидравлический расчет системы стенового отопления.*

**Ключевые слова:** стеновое панельно-лучистое отопление, отопительные панели, теплоотдача.

*В роботі розглянуто спосіб розрахунку системи стінового панельно-променевого опалення. Розглянуто метод розрахунку тепловіддачі бетонних опалювальних конструкцій. Розглянуто гідравлічний розрахунок системи стінового опалення.*

**Ключові слова:** стінове панельно-променеве опалення, опалювальні панелі, тепловіддача.

**Введение.** Микроклимат помещения характеризуется совокупностью температуры воздуха и поверхностей, обращенных в помещение, влажностью воздуха и скоростью движения воздуха. Температурные условия в помещении определяются сочетанием температуры воздуха  $t_e$  и температуры внутренних поверхностей  $T_i$ . Поддержание параметров микроклимата на соответствующем уровне в зимний период обеспечивает система отопления. Отопление помещения может быть конвективным и лучистым.

К конвективному относится отопление, при котором температура воздуха  $t_e$  поддерживается на более высоком уровне, чем радиационная температура помещения. Конвективным является широко распространенное отопление конвекторами и радиаторами.

Лучистым считают отопление, при котором радиационная температура помещения превышает температуру воздуха. К лучистому отоплению относится инфракрасное отопление и отопление, осуществляемое с помощью встроенных панелей с заделанными в них нагревательными элементами в виде электрических кабелей или труб. Такой вид отопления называется панельно-лучистым.

**Методика расчета.** Расчет теплоотдачи бетонных отопительных панелей.

Теплоотдача 1 м трубы, замоноличенной в массив бетона, рассчитывается по формуле [1]:

$$q = \frac{t_{cp} - t_e}{R}, \quad (1)$$

где  $R$  – термическое сопротивление, отнесенное к 1 м трубы,  $\text{м} \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$ ;  $t_{cp}$  – средняя температура воды,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_e$  – температура воздуха в помещении,  $^\circ\text{C}$ .

Термическое сопротивление  $R$  представляет сумму:

$$R = R_e + R_{cm} + R_m + R_n, \quad (2)$$

где  $R_e = \frac{1}{\alpha_e F_e}$  – сопротивление тепловосприимчивости от воды к стенке трубы;  $\alpha_e$  – коэффициент тепловосприимчивости от воды к стенке трубы,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . На рис. 1 представлен график зависимости коэффициента тепловосприимчивости  $\alpha_e$  от расхода воды  $G$  [2];  $R_{cm}$  – термическое сопротивление стенок трубы;  $R_m$  – термическое сопротивление массива бетона, окружающего трубу;

$R_n = \frac{1}{\alpha_n F_n}$  – сопротивление теплоотдаче от поверхности бетона к окружающей среде, где  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи вертикальных панелей,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . На рис. 2 показан график зависимости коэффициента теплоотдачи от поверхности отопительной панели к воздуху помещения [2];  $F_e = \pi d_e$  – внутренняя поверхность трубы длиной 1 м,  $\text{м}^2/\text{м}$ ;  $d_e$  – внутренний диаметр

трубы, м;  $F_n$  – поверхность теплоотдачи, приходящаяся на 1 м трубы, м<sup>2</sup>/м;  $S$  – расстояние между осями труб нагревательного элемента, м.

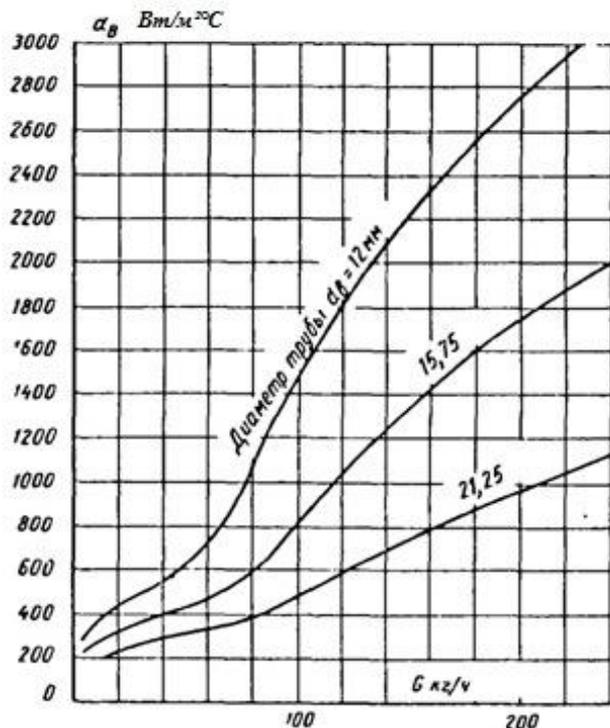


Рис. 1. Коэффициент тепловосприятия от воды к стенкам трубы.

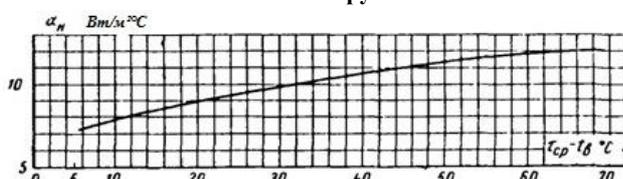


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи от поверхности отопительной панели к воздуху помещения.

Теплоотдача панели с двухсторонней теплоотдачей, которая может быть установлена во внутренних помещениях здания, определяется по формуле [2]:

$$Q_n = (q_{cp} l_{cp} + q_{кр} l_{кр}) k, \quad (3)$$

где  $q_{cp}$ ,  $q_{кр}$  – теплоотдача 1 м средних и крайних труб, Вт/м·ч;  $l_{cp}$ ,  $l_{кр}$  – длина средних и крайних труб, м;  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи в зависимости от количества теплоносителя  $G$ , проходящего через нагревательный элемент.

**Гидравлический расчет системы.** Для уменьшения количества типоразмеров отопительных панелей целесообразно применять стояки одного диаметра по всей системе отопления здания. В связи с этим расчет систем панельно-

лучистого отопления следует проводить по методу переменных перепадов температуры теплоносителя по стоякам. Для проведения расчета по этому методу, основанному на перемещении единицы объема [3], представляется более удобным использовать основное уравнение гидравлики [4]:

$$H = A \left( \frac{\lambda}{d} l + \sum \xi \right) G^2 = SG^2, \quad (4)$$

$$S = A \left( \frac{\lambda}{d} l + \sum \xi \right), \quad (5)$$

где  $S$  – гидравлическая характеристика,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2}$ ,

численно равная падению давления в участке трубопровода при расходе воды в нем 1 кг/ч;

$A = \frac{16}{2g \cdot 3600^2 \pi^2 \gamma d^3}$  – вспомогательная величина,

которая при  $\gamma = \text{const}$  становится постоянной для каждого диаметра труб (см. таблицу 1 [4]);

$l$  – длина участка, м;  $\lambda$  – коэффициент трения;  $d$  – внутренний диаметр трубы, м;  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений [4].

$\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений [4].

Таблица 1. Основные постоянные величины для расчета трубопроводов водяного отопления

Диаметр, мм			$A, \text{кг} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^2 \cdot \text{кг}^2$	$\lambda/d$
условный	наружный	внутренний		
15	21,25	15,75	$1,07 \cdot 10^{-4}$	2,85
20	26,75	21,25	$0,325 \cdot 10^{-4}$	1,9
25	33,5	27	$0,125 \cdot 10^{-4}$	1,4
32	42,25	35,75	$0,0405 \cdot 10^{-4}$	0,97
40	48	41	$0,0235 \cdot 10^{-4}$	0,8

Используя зависимость  $H=SG^2$ , и исходя из принципа равенства падения давления от точки разветвления до точки слияния потоков, можно выразить падение давления в параллельных участках равенствами:

$$H = S_1 G_1^2, \quad (6)$$

$$H = S_2 G_2^2, \quad (7)$$

$$H = S_3 G_3^2, \quad (8)$$

где  $H$  – падение давления на участке;  $G_1$ ,  $G_2$  – расход воды в параллельных участках;  $S_1$ ,  $S_2$  – гидравлические характеристики этих участков.

Значение приведенной гидравлической характеристики параллельных участков может быть найдено из следующих соотношений:

$$G = G_1 + G_2 + G_3,$$

или

$$\sqrt{\frac{H}{S'}} = \sqrt{\frac{H}{S_1}} + \sqrt{\frac{H}{S_2}} + \sqrt{\frac{H}{S_3}}.$$

Величину гидравлической характеристики  $S'$  определяем по формуле:

$$S' = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \frac{1}{\sqrt{S_3}}\right)^2}. \quad (9)$$

Разделив взаимно уравнения (6), (7) и (8), получим:

$$G_1 = G_2 \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} = G_3 \sqrt{\frac{S_3}{S_1}}, \quad (10)$$

$$G_2 = G_1 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = G_3 \sqrt{\frac{S_3}{S_2}}, \quad (11)$$

$$G_3 = G_1 \sqrt{\frac{S_1}{S_3}} = G_2 \sqrt{\frac{S_2}{S_3}}. \quad (12)$$

Так как расход в общем участке равен сумме расходов по отдельным ветвям, то, используя уравнения (10)–(12), его можно выразить:

$$G' = G_1 \left(1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} + \sqrt{\frac{S_1}{S_3}}\right),$$

$$G'' = G_2 \left(1 + \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} + \sqrt{\frac{S_2}{S_3}}\right),$$

$$G''' = G_3 \left(1 + \sqrt{\frac{S_3}{S_1}} + \sqrt{\frac{S_3}{S_2}}\right).$$

Зная расход воды  $G$  в общем участке и гид-

равлические характеристики ветвей  $S$ , расход воды в параллельных участках будет:

$$G_1 = \frac{G'}{1 + \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} + \sqrt{\frac{S_1}{S_3}}}, \quad (13)$$

$$G_2 = \frac{G''}{1 + \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} + \sqrt{\frac{S_2}{S_3}}}, \quad (14)$$

$$G_3 = \frac{G'''}{1 + \sqrt{\frac{S_3}{S_1}} + \sqrt{\frac{S_3}{S_2}}}. \quad (15)$$

**Расчет теплоотдачи панелей.** Рассмотрим пример расчета теплоотдачи бетонных отопительных панелей для каркасного здания.

Принимаем, что панель имеет параметры: длина – 2840 мм, высота – 460 мм. Толщину панели (при трубах диаметром  $d_1 = 15$  мм и  $d_2 = 20$  мм) принимаем равной 60 мм. Расчетная схема приведена на рис. 3.

Определяем длину труб. Длина крайних труб при диаметре  $d = 20$  мм:

$$l_1 = 2,68 + ((0,06 + 0,12 + 0,12 + 0,12) \cdot 2) = 3,52 \text{ м};$$

при диаметре  $d = 15$  мм:

$$l_2 = 2,68 \text{ м}.$$

Длина средних труб при диаметре  $d = 15$  мм:

$$l_3 = 2,68 \cdot 2 = 5,36 \text{ м}.$$

Определяем теплоотдачу с конвективным каналом. Теплоотдача крайних труб при  $\Delta t = 82,5 - 20 = 62,5^\circ$  и  $S = 120$  мм:

$$q_{кр} = q_{k1} \cdot (l_1 + l_2) = 106(3,52 + 2,68) = 767,58 \text{ Вт},$$

где  $q_{k1}$  – теплоотдача 1 м крайней трубы в отопительной панели (рис. 4) [5].

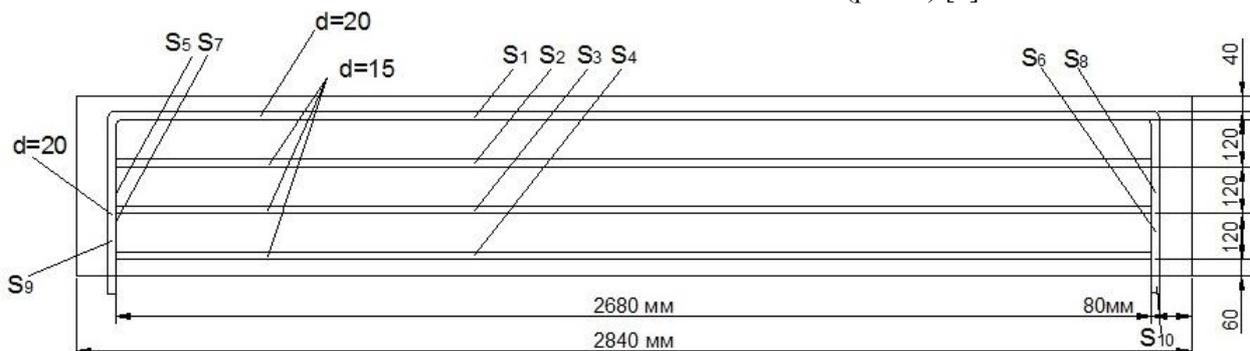


Рис. 3. Расчетная схема бетонной отопительной панели с конвективным каналом.

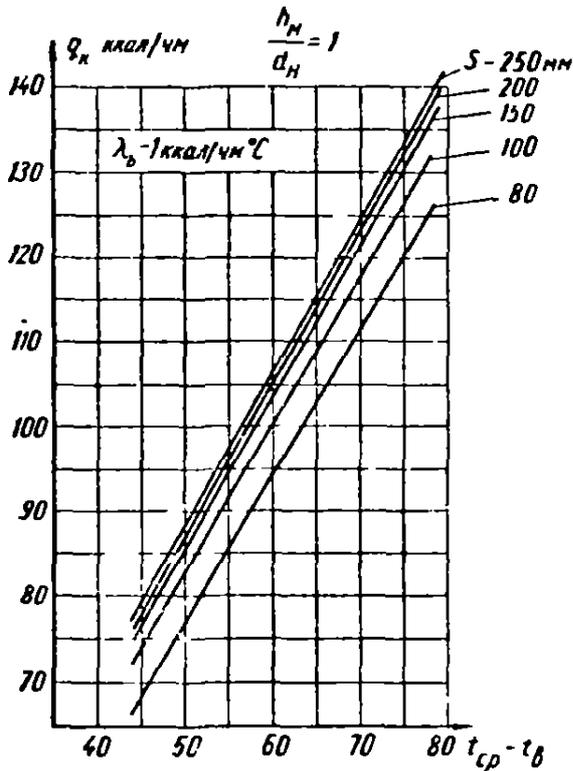


Рис. 4. Теплоотдача 1 м крайней трубы в отопительной панели с двухсторонней теплоотдачей.

Теплоотдача средних труб:

$$q_{cp} = q_{k2} \cdot l_3 = 93 \cdot 5,36 = 581,5 \text{ Вт,}$$

где  $q_{k2}$  – теплоотдача 1 м средней трубы в отопительной панели [5].

Теплоотдача панели с конвективным каналом принимается равной двухсторонней теплоотдаче с коэффициентом 0,85 [5].

$$Q = (q_{кр} + q_{cp}) \cdot k = (767,58 + 581,5) \cdot 0,85 = 1146,7 \text{ Вт.}$$

Расчетный расход теплоносителя можно принять:

$$G = \frac{Q}{y} = \frac{1146,7}{28,4} = 40 \text{ кг/ч,}$$

где  $y$  – коэффициент, учитывающий расход воды через прибор [5].

**Гидравлический расчет систем.** Чтобы учесть распределение воды по трубам, определим его гидравлическую характеристику. По формуле (5) определяем гидравлические характеристики:

Для участка 1 при диаметре  $d = 20$  мм:

$$S_1 = A \left( \frac{\lambda}{d} l + \sum \xi \right) = 0,325 \cdot 10^{-4} (1,9 \cdot 2,92 + 6) = 3,76 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2},$$

где  $A = \frac{16}{2g \cdot 3600^2 \pi^2 \gamma d^3}$  – вспомогательная величина,

которая при  $\gamma = \text{const}$  становится постоянной для каждого диаметра труб (см. таблицу 1 [4]);  $l$  – длина участка:  $l = 28,68 + 0,12 \cdot 2 = 2,92$  м;  $\lambda/d$  – коэффициент, принимаем равным 1,9 (по таблице 1[4]);  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений [4].

Для остальных участков расчет производим аналогично по формуле (5).

Для участка 2 при диаметре  $d = 15$  мм:

$$S_2 = A \left( \frac{\lambda}{d} l + \sum \xi \right) = 1,07 \cdot 10^{-4} (2,85 \cdot 2,68 + 3) = 11,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2}.$$

Для участков 3 и 4 при диаметре  $d = 15$  мм:

$$S_4 = S_3 = S_2 = 11,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2}.$$

Для участков 5, 6, 7 и 8 при диаметре  $d = 20$  мм:

$$S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = 0,325 \cdot 10^{-4} (1,9 \cdot 0,12 + 1) = 0,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2}.$$

Приведенные гидравлические характеристики совместной работы участков 1 и 2 по формуле (9):

$$S'_2 = \frac{1}{\left( \frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} \right)^2} = \frac{10^{-4}}{\left( \frac{1}{\sqrt{3,76}} + \frac{1}{\sqrt{11,4}} \right)^2} = 1,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2};$$

участков 1, 2, 5, 6 и 3:

$$S'_3 = \frac{1}{\left( \frac{1}{\sqrt{S_5 + S_2 + S_6}} + \frac{1}{\sqrt{S_3}} \right)^2} = \frac{10^{-4}}{\left( \frac{1}{\sqrt{0,4 + 1,52 + 0,2}} + \frac{1}{\sqrt{11,4}} \right)^2} = 1,11 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2};$$

участков 1, 2, 5, 6, 3, 7, 8 и 4:

$$S'_4 = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{S_7 + S'_3 + S_8}} + \frac{1}{\sqrt{S_4}}\right)^2} =$$

$$= \frac{10^{-4}}{\left(\frac{1}{\sqrt{0,4 + 1,11 + 0,4}} + \frac{1}{\sqrt{11,4}}\right)^2} =$$

$$= 0,96 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2}.$$

Чтобы получить гидравлические характеристики труб с подводками, к приведенной характеристике разветвленной части трубы  $S'_4$  нужно добавить гидравлические характеристики участков 9 и 10 диаметром 20 мм:

$$S_9 = 0,325 \cdot 10^{-4} (1,9 \cdot 0,4 + 8) = 2,84 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2};$$

$$S_{10} = 0,325 \cdot 10^{-4} (1,9 \cdot 0,4 + 3,5) = 1,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2}.$$

Полная гидравлическая характеристика системы:

$$S_p = S_{10} + S'_4 + S_9 =$$

$$= (1,4 + 0,96 + 2,84) \cdot 10^{-4} =$$

$$= 5,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{ч}^2}{\text{кг}^2}.$$

По трубкам вода распределяется (без учета влияния гравитационного давления) следующим образом (по формулам (13)–(15)):

$$G_4 = \frac{G}{1 + \sqrt{\frac{S_4}{S_7 + S'_3 + S_8}}} = \frac{40}{1 + \sqrt{\frac{11,4}{1,91}}} = 11,6 \text{ кг/ч};$$

$$G_3 = \frac{40 - 11,6}{1 + \sqrt{\frac{11,4}{2,32}}} = 8,9 \text{ кг/ч};$$

$$G_2 = \frac{28,4 - 8,9}{1 + \sqrt{\frac{11,4}{3,76}}} = 7,2 \text{ кг/ч};$$

$$G_1 = 19,5 - 7,2 = 12,3 \text{ кг/ч}.$$

Принципиальным отличием гидравлического расчета системы панельного отопления является изменение величины гидравлических сопротив-

лений нагревательных элементов в зависимости от их протяженности и способа укладки. В отопительных панелях, чем больше поверхность нагрева, тем больше протяженность труб нагревательных элементов, больше их гидравлическое сопротивление, следовательно, меньше коэффициент затекания теплоносителя. Это весьма важное обстоятельство и его нужно учитывать при гидравлическом расчете систем панельно-лучистого отопления.

**Выводы.** Стеновое панельно-лучистое отопление является распределенным отоплением: отдельные помещения отапливаются независимо друг от друга. Стеновая панельно-лучистая водяная система может обогревать помещения зимой (температура воды 30-35°C), а летом – охлаждать. Если в систему подавать воду, температура которой 18°C, то температура поверхности стен снизится, а в помещении будет приятная прохлада. Благодаря своей структуре, системы стенового панельно-лучистого отопления могут монтироваться как в новых, так и в старых домах во время модернизации системы отопления. Их можно монтировать на поверхностях любой формы: на арках, изгибах и различных кривых поверхностях. Применение систем отопления с размещением нагревательных элементов в наружных стеновых панелях, из-за повышенных теплопотерь, может быть рекомендовано в районах с повышенной влажностью. Наличие нагревательных элементов в наружных стеновых панелях обеспечит благоприятный температурно-влажностный режим и долговечность наружных ограждений.

1. Богословский В.Н. Отопление: Учебник для ВУЗов. – М.: Стройиздат, 1991. – 736 с.
2. Мачкаши А., Банхиди Л. Лучистое отопление. – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.
3. Каменев П.Н. Расчет однотрубных систем водяного отопления. – Стройиздат, 1992. – 212 с.
4. Белинский Е.А. Расчет и эксплуатационный режим однотрубных систем водяного отопления. – М.: Стройиздат, 1984. – 750 с.
5. Сандер А.А. Теплообмен в приборах панельно-лучистого отопления. Учебное пособие. – Новосибирск, 1983. – 76 с.