

РАСЧЕТ СИСТЕМ НАПОЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. АКЕЛЬЕВ В. Д., канд. техн. наук СИЗОВ В. Д.,
студ. ДОВНАР Е. И.

Белорусская государственная политехническая академия

В отопительной технике очевиден приоритет напольного отопления, характеризующегося экономичным потреблением теплоты, значительная доля которого передается излучением помещению, людям. Тепловой поток, проходящий через стенки отопительного контура (стеклянные, стальные, медные, полимерные трубы), слой бетона и покрытие пола, превращает перекрытие в отопительную плиту. Тепловой комфорт в помещении достигается при нагреве воздуха радиаторами, конвекторами до 21...22 °С, а при напольной системе отопления – до 20 °С. В таких помещениях более нагретые слои воздуха располагаются в нижней зоне, и изменение температуры воздуха в помещении до 2 °С практически не ощущается человеком.

Напольное отопление применяют в коттеджах, жилых домах, магазинах, крытых рынках, бассейнах, вокзалах, гостиницах, зданиях специального назначения, где оно предусмотрено функционально технологией.

В напольном отоплении слой тепловой изоляции выполняется из пенопластовых, жестких волокнистых минеральных и других плит с термическим сопротивлением теплопроводности 2,0...2,25 (м²·К)/Вт. Минимальная толщина краевой тепловой изоляции составляет 5 см, а высота равна отливке бетона. Гидроизоляция выполняется из полиэтиленовой пленки или алюминиевой фольги и располагается под теплоизоляционным слоем, если он может подвергаться воздействию влаги. Пол под каменную или керамическую облицовку армируют стальной сеткой. Термическое сопротивление теплопроводности покрытия не должно превышать 0,15 (м²·К)/Вт. Элементы, крепящие отопительный контур, сделаны из проволоки, стальной сетки, металлических полос, якорных шпилек. Отопительный контур заливается бетоном, в котором могут быть пластификаторы. Бесшовный пол способствует выравниванию температур. Одноразовая заливка поверхности не превышает 40 м², а длина границы бесшовного пола – 8 м. В противном случае следует предусматривать разделительные швы шириной 5 мм, заполненные эластичным материалом. Минимальное расстояние от трубопроводов до поверхности наружной стены составляет 0,6, а до внутренней – 0,3 м. Температуры теплоносителей обычно равны: 55/45, 50/40, 45/35, 40/30 °С. Допустимые температуры поверхностей пола t_{Fmax} в жилых комнатах – 29...31, ванн \approx 33, у наружных стен \approx 35 °С.

Известны змеевидный и бифилярный способы укладки трубопроводов отопительных контуров (рис. 1).

Благодаря чередованию нагретых труб бифилярный способ обеспечивает равномерную температуру поверхности пола. При укладке змеевидным способом трубы с более высокой температурой располагают у наружных стен.

Линейная плотность теплового потока для цилиндра равна [1]

$$q = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) \right] + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (1)$$

где $t_{ж1}, t_{ж2}$ – температуры жидкости в цилиндре и окружающей среды, омывающей наружную поверхность, °С;

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от жидкости к внутренней поверхности стенки цилиндра и от наружной поверхности изоляции к окружающей среде, Вт/(м²·К);

d_1, d_i, d_{i+1} – диаметры внутренней поверхности цилиндра, i -го и $(i + 1)$ -го слоев, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала стенки цилиндра и слоев теплоизоляции, Вт/(м·К). Если температура поверхностей и коэффициенты теплопроводности материалов постоянны, то λ_i можно принять по формуле Кирхгофа–Варшавского

$$\lambda = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\lambda}{t_2 - t_1} dt, \quad (2)$$

где t_1, t_2 – температуры ограничивающих поверхностей.

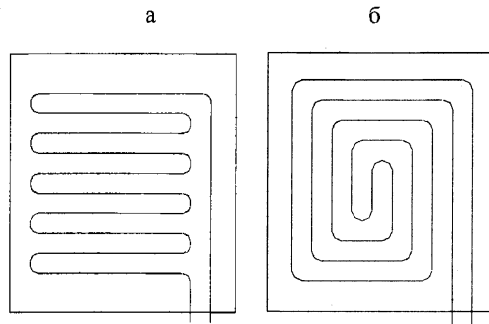


Рис. 1. Схемы способов укладки труб напольного отопления:
а – змеевидный; б – бифилярный

Тепловой поток от поверхности цилиндра длиной 1 м, расположенного параллельно свободной поверхности полуограниченного массива, определяется по формуле Форхгеймера [2]

$$q = \pi \frac{\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{\ln\left(\frac{h}{d} + \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 - 1}\right)}, \quad (3)$$

где h – расстояние от поверхности массива до оси цилиндра;

λ – коэффициент теплопроводности массива;

t_{C1}, t_{C2} – температура поверхностей цилиндра и массива, °С.
 Для тонкостенного теплопроводного цилиндра с теплоизоляцией

$$q = \pi \frac{(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \left(\frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \left(\frac{d_{из}}{d_1} \right) + \frac{1}{2\lambda} \ln \left(\frac{h + \frac{\lambda}{d_2}}{d_{из}} \right) \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (4)$$

где $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя между поверхностью цилиндра и массивом.

Линейную плотность теплового потока от поверхностей двух горизонтальных цилиндров в полуограниченном массиве можно рассчитать по формуле Шубина [3] и [4], а для ряда цилиндров одного диаметра, расположенных параллельно друг другу и поверхности массива на одной глубине h , имеющих одинаковую температуру поверхностей t_{C1} , при расстоянии между осями цилиндров (шаге) b (рис. 2) – по формуле Власова [2]

$$q = \frac{2\pi\lambda(t_{C1} - t_{C2})}{\ln \left(\frac{b}{\pi d_1} \left(\exp \left(\frac{2\pi h}{b} \right) - \exp \left(-\frac{2\pi h}{b} \right) \right) \right)}. \quad (5)$$

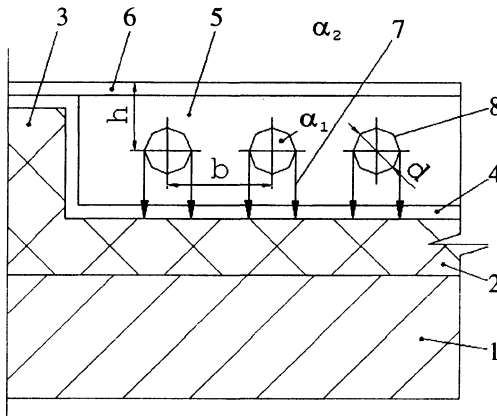


Рис. 2. Схема конструкции напольного отопления: 1 – плита перекрытия; 2, 3, 4 – тепловая, тепловая крайняя и гидроизоляция; 5 – бетон; 6 – покрытие пола; 7 – якорная скоба; 8 – труба нагревательного элемента

Полное термическое сопротивление теплопередаче, (м·К)/Вт, с учетом теплоотдачи на контурах для ряда цилиндров одинакового диаметра, по которым проходит теплоноситель с одинаковой температурой, если цилиндры расположены в полуограниченном массиве, можно рассчитать по формуле

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \left[\frac{b}{\pi d} \left(\exp \left(2\pi \frac{h + \frac{\lambda}{\alpha_2}}{b} \right) - \exp \left(-2\pi \frac{h + \frac{\lambda}{\alpha_2}}{b} \right) \right) \right] \quad (6)$$

Расчет сопротивления теплопередаче для неоднородного в термическом отношении полуограниченного тела можно выполнить по формуле (6), заменив коэффициент теплопроводности λ эквивалентным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{эКВ}}$, Вт/(м·К), который рассчитывается по формуле

$$\lambda = \lambda_{\text{эКВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i}, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1}^n \delta_i$ – сумма толщин слоев, расположенных между осью трубопровода и поверхностью пола, м;

$\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i$ – сумма термических сопротивлений теплопроводности слоев, расположенных между осью трубопровода и поверхностью пола, Вт/(м²·К).

Тогда линейное сопротивление теплопередаче, (м·К)/Вт, от оси трубопроводов до поверхности напольного покрытия можно определить по формуле

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i}{2 \sum_{i=1}^n \delta_i} \ln \left[\frac{b}{\pi d_1} \left(\exp \left(2\pi \frac{h + \frac{\lambda_{\text{эКВ}}}{\alpha_2}}{b} \right) - \exp \left(-2\pi \frac{h + \frac{\lambda_{\text{эКВ}}}{\alpha_2}}{b} \right) \right) \right] \quad (8)$$

При обработке (8) на ЭВМ были составлены таблицы, графики, номограммы, некоторые из них приведены в табл. 1 и на рис. 3, 4.

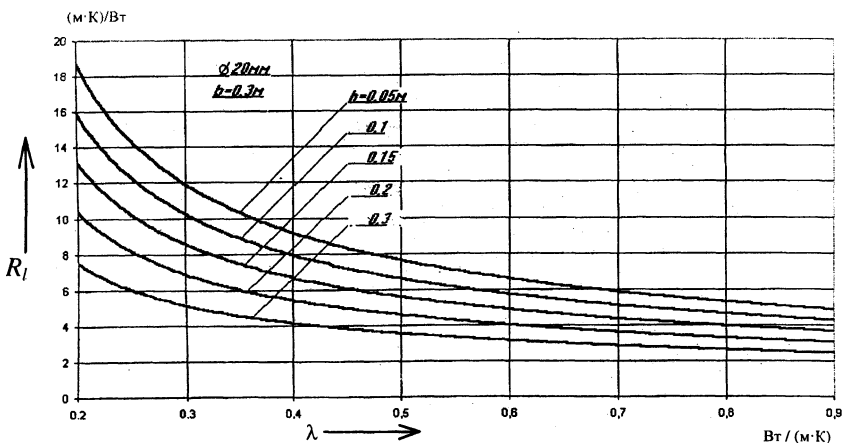


Рис. 3. Зависимость линейного термического сопротивления теплопередаче от эквивалентного коэффициента теплопроводности и глубины заложения труб

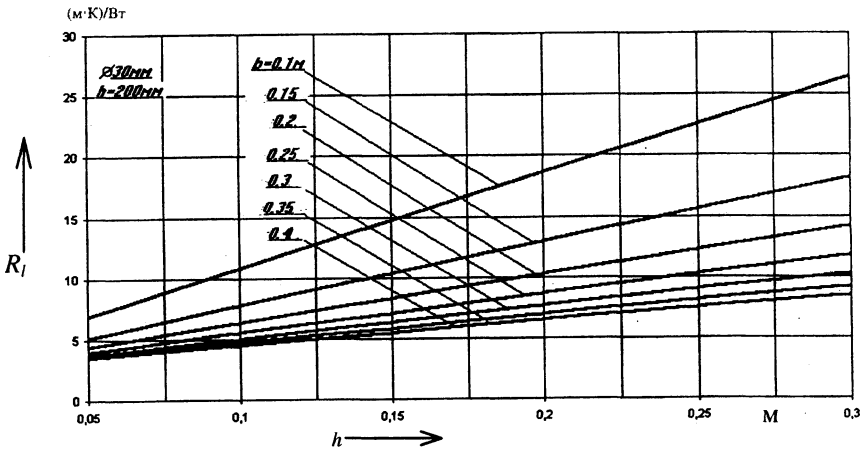


Рис. 4. Зависимость линейного термического сопротивления теплопередаче от глубины заложения и шага труб

Линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К), от теплоносителя к воздуху в помещении определяется по формуле

$$k_l = \frac{1}{R_l}. \quad (9)$$

Количество теплоты, Вт, передаваемое в помещении от теплоносителя к воздуху трубопроводом длиной L , м, равно

$$Q = \pi L k_l (t_{ж1} - t_{ж2}). \quad (10)$$

Температура поверхности пола $t_{с2}$, °С, которая не должна быть выше t_{Fmax} , определяется по формуле

$$t_{пл} = t_b + q_F \frac{1}{\alpha_2} = t_{ж1} + q_F \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (11)$$

где q_F – плотность теплового потока от поверхности пола, Вт/м²,

$$q_{пл} = \frac{Q}{F_{пл}}, \quad (12)$$

α_2 – коэффициент теплоотдачи поверхности пола, Вт/(м²·К); $\alpha_2 = 11,3$ Вт/(м²·К);

\bar{t} – средняя температура теплоносителя в греющем контуре, °С,

$$\bar{t} = \frac{t'_{ж1} + t''_{ж1}}{2}, \quad (13)$$

где $t'_{ж1}$ и $t''_{ж1}$ – соответственно температура теплоносителей в параллельных (смежных) трубах отопительного контура.

Линейное термическое сопротивление теплопередаче слоев, расположенных между осью трубопровода и поверхностью пола

Шаг трубы, м	Внутренний диаметр трубы, м	Эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Расстояние от уровня пола до оси трубы, м	Линейное сопротивление теплопередаче, (м·К)/Вт
0,25	0,01	0,2	0,05	9,442
			0,1	12,661
			0,15	15,809
			0,2	18,951
0,25	0,02	0,2	0,05	7,671
			0,1	10,889
			0,15	14,037
			0,2	17,179
0,25	0,03	0,2	0,05	6,644
			0,1	9,863
			0,15	13,011
			0,2	16,153
0,25	0,01	0,3	0,05	6,715
			0,1	8,842
			0,15	10,939
			0,2	13,033
0,25	0,02	0,3	0,05	5,521
			0,1	7,648
			0,15	9,745
			0,2	11,84
0,25	0,03	0,3	0,05	4,832
			0,1	6,959
			0,15	9,056
			0,2	11,151
0,25	0,01	0,4	0,05	5,345
			0,1	6,932
			0,15	8,504
			0,2	10,075
0,25	0,02	0,4	0,05	4,441
			0,1	6,027
			0,15	7,599
			0,2	9,17
0,25	0,03	0,4	0,05	3,921
			0,1	5,507
			0,15	7,079
			0,2	8,65

Шаг трубы, м	Внутренний диаметр трубы, м	Эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Расстояние от уровня пола до оси трубы, м	Линейное сопротивление теплопередаче, (м·К)/Вт
0,25	0,01	0,5	0,05	4,521
			0,1	5,786
			0,15	7,043
			0,2	8,3
0,25	0,02	0,5	0,05	3,789
			0,1	5,054
			0,15	6,311
			0,2	7,568
0,25	0,03	0,5	0,05	3,789
			0,1	5,054
			0,15	6,311
			0,2	7,568
0,25	0,01	0,6	0,05	3,97
			0,1	5,021
			0,15	6,069
			0,2	7,116
0,25	0,02	0,6	0,05	3,354
			0,1	4,405
			0,15	5,453
			0,2	6,5
0,25	0,03	0,6	0,05	3,003
			0,1	4,053
			0,15	5,102
			0,2	6,149
0,25	0,01	0,7	0,05	3,576
			0,1	4,475
			0,15	5,373
			0,2	6,271
0,25	0,02	0,7	0,05	3,042
			0,1	3,942
			0,15	4,84
			0,2	5,737
0,25	0,03	0,7	0,05	2,74
			0,1	3,639
			0,15	4,537
			0,2	5,435

Длина отопительного контура равна

$$L = \frac{QR_i}{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})} \quad (14)$$

Его линейная теплоотдача составит

$$q_l = \frac{Q}{L}. \quad (15)$$

Таким образом, соблюдается равенство

$$Q = q_l L = q_F F_{C2}, \quad (16)$$

где F_{C2} – площадь пола помещения, м^2 .

Скорость движения воды определится по формуле

$$w = \frac{m}{3600 \rho f_{\text{тр}}}, \quad (17)$$

где m – расход воды, кг/ч ;

ρ – плотность воды, кг/м^3 ;

$f_{\text{тр}}$ – площадь живого сечения трубы, м^2 .

Потери давления на трение в трубах составят

$$\Delta p = pL, \quad (18)$$

где p – линейные потери давления на трение по длине, Па/м ;

L – длина трубопровода, м .

Если потери давления в отопительной системе превышают 20 кПа, то предусматривается устройство нескольких контуров. Тогда

$$F_{C2} = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (19)$$

где n – количество отопительных контуров;

F_i – площадь поверхности пола, м^2 , соответствующая i -му контуру.

Количество теплоты, компенсируемое каждым контуром, равно

$$Q_i = Q \frac{F_i}{F_p}. \quad (20)$$

Пример расчета греющего контура системы напольного отопления.

Дано: теплопотери помещения $Q = 1300$ Вт; паркет штучный $\delta = 0,015$ м, $\lambda = 0,1$ Вт/(м·К); прослойка из клеящей мастики $\delta = 0,001$ м; $\lambda = 0,2$ Вт/(м·К); стяжка из цементно-песчаного раствора М150 $\rho = 1800$ кг/м^3 , $\delta = 0,02$ м, $\lambda = 0,58$ Вт/(м·К); бетон монолитный на гравии $\rho = 2400$ кг/м^3 , $\delta = 0,055$ м, $\lambda = 1,51$ Вт/(м·К). Слои находятся на пенополистирольных плитах. В качестве отопительного контура приняты трубы из сплошного полиэтилена диаметром 0,02 м, толщиной стенки 0,002 м, $\lambda = 0,41$ Вт/(м·К); $b = 0,15$ м, $h = 0,071$ м (находятся в бетоне на глубине 0,035 м). Расстояние от оси трубы до уровня пола. Теплоноситель – вода

с параметрами 55/45 °С. Температура воздуха в помещении $t_{ж2} = 20$ °С. Площадь пола помещения $F_{C2} = 18$ м². Способ укладки труб – бифилярный.

Расчет.

Плотность теплового потока равна

$$q_{C2} = \frac{Q}{F_{C2}} = \frac{1300}{18} = 72,2 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура поверхности пола находится

$$t_{C2} = t_{ж2} + q_{C2} \frac{1}{\alpha_2} = 20 + 72,2 \frac{1}{11,3} = 26,4 \text{ °С}.$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности слоев равен

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i} = \frac{0,015 + 0,001 + 0,02 + 0,035}{\frac{0,015}{0,1} + \frac{0,001}{0,2} + \frac{0,02}{0,58} + \frac{0,035}{1,51}} = 0,334 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

По (8) линейное термическое сопротивление теплопередаче $R_l = 8,05$ (м·К)/Вт, и по (14) вычисляется длина отопительного контура

$$L = \frac{QR_l}{\pi(\bar{t} - t_{ж2})} = \frac{1300 \cdot 8,05}{3,14 \left(\frac{55 + 45}{2} - 20 \right)} = 111,1 \text{ м}.$$

Массовый расход воды равен

$$m = \frac{0,86Q}{(t_{ж1} - t_{ж2})} = \frac{0,86 \cdot 1300}{(55 - 45)} = 111,8 \text{ кг/ч}.$$

Потери давления составят

$$\Delta p = pL = 29 \cdot 100,8 = 2923 \text{ кПа}.$$

Скорость движения воды равна

$$w = \frac{m}{3600 \rho f_{\text{тр}}} = \frac{111,8}{3600 \cdot 988 \frac{3,14 \cdot 0,016^2}{4}} = 0,16 \text{ м/с}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
2. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 660 с.
3. Шубин Е. П. Материалы, методы, устройство и расчет тепловой изоляции трубопроводов. – СЗИ, 1948.
4. Иоффе И. А. О стационарном температурном поле в полуограниченном массиве с внутренними источниками тепла // Журнал технической физики. – 1958. – Т. 28, № 5. – С. 1084–1088.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 31.10.2001

УДК 621.771.6.001.57

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАЛОЛИСТОВЫХ РЕССОР ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

**Докт. техн. наук, проф. ИСАЕВИЧ Л. А., канд. техн. наук, доц. СЕДНИН В. А.,
аспиранты ГЕРАСИМОВА А. Г., МОЛЧАН М. Е.**

Белорусская государственная политехническая академия

В последнее время для большегрузных автомобилей широко используются малолистовые рессоры. На кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» БГПА разработан способ формообразования заготовок переменной толщины в валках [1] для автомобилей МАЗ, МАЗ-МАН, микроавтобусов РАФ, прицепов «Зубренок», который внедрен в производство на Минском рессорном заводе.

Способ заключается в следующем (рис. 1). Полосовую заготовку 2 после нагрева в индукционной установке 1 до температуры 900...920 °С подают в прокатный стан, где ее прижимают посередине к торцу профилированной с двух сторон оправки 4 и с помощью неприводных валков 3 при поступательном движении оправки предварительно изгибают по оси симметрии до полного прилегания концов заготовки к оправке, а затем прокатывают при жестко фиксированном зазоре между валками. По окончании процесса прокатки заготовку снимают с оправки и разгибают. Профилирование заготовок обеспечивается соответствующим контуром рабочих по-