

Расчет сопротивления теплопередаче многослойных ограждающих конструкций

Дмитрий Андреев
Научный руководитель д.т.н. А.М. Цирлин

В работе предложена методика расчета сопротивления теплопередаче многослойных строительных конструкций, содержащих отражающую изоляцию. Учитывается фактор теплообмена ограждающей конструкции с внешней средой и фактор конвективного и лучистого теплообмена в вертикальных воздушных прослойках. Тепловое поле является однородным и стационарным.

1. Введение

Появление новых изоляционных материалов и их использование в строительстве дает новые возможности проектирования новых и модернизации существующих ограждающих конструкций. Эти конструкции могут состоять из нескольких слоев различных материалов, содержать как массивную, так и отражающую изоляцию, наличие которой требует присутствия воздушной прослойки между слоями алюминиевой фольги и массивной изоляции. Так как в воздушных прослойках теплообмен происходит иначе, нежели в телах твердых и сыпучих, то аналитический расчет ограждений невозможен. Ниже рассмотрена методика численного итеративного расчета многослойных строительных конструкций, содержащих отражающую изоляцию.

2. Постановка задачи

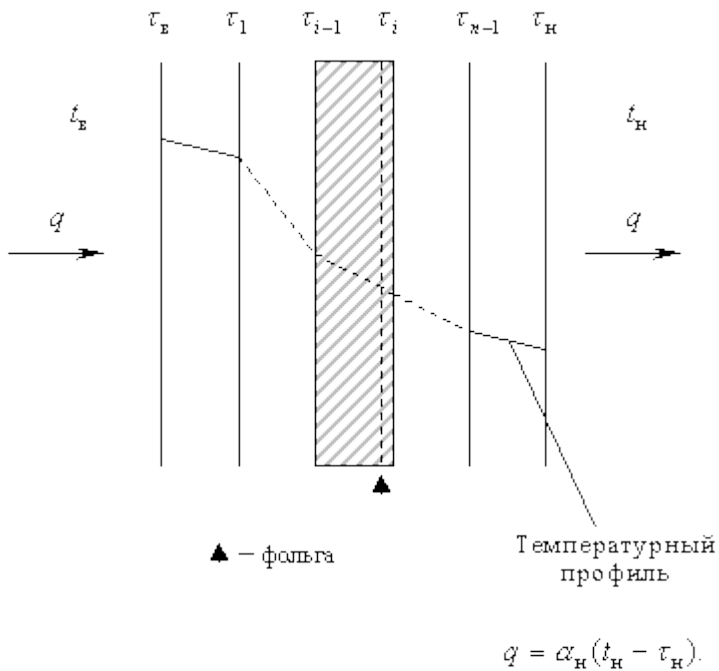
Рассмотрим ограждающую конструкцию, показанную на рис. 1. Здесь обозначены через t_b и t_n температуры внутреннего и наружного воздуха; t_v и t_n – температуры на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции; t_i – температура на границе i -го и $(i+1)$ -го слоев; q – тепловой поток, [Вт]. Температуры измеряются в градусах Кельвина. Задача состоит в том, чтобы рассчитать профиль температур $\{t_i\}$ и сопротивление теплопередаче ограждения R_0 , [м² К / Вт]. Исходные данные следующие: граничные условия третьего рода, то есть температуры t_b и t_n , [К]; толщины слоев d_i , [м]; коэффициенты теплопроводности материалов слоев λ_i , [Вт / м К], коэффициенты теплоотдачи a_v и a_n , [Вт / м² К], среды внутри и снаружи конструкции.

3. Процедура исследования

3.1. Температурный профиль и сопротивление теплопередаче

Тепловой поток от наружного воздуха к внутренней поверхности ОК и от наружной поверхности ОК к наружному воздуху определяют по формулам [Арнольд и др.,1979]:

$$q = \alpha_{\text{в}} (t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}), \quad (1)$$



Тепловой поток, прошедший сквозь слой массивной изоляции определяется по формуле [Арнольд и др., 1979]:

$$q = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (\tau_{i-1} - \tau_{iE}), \quad (3)$$

где $i = 1...n$.

Для слоя отражающей изоляции тепловой поток распадается на две составляющие: $q = q_{\text{луч}} + q_{\text{конв}}$ [Фокин, 1959]. Пусть у нас слой с номером i – отражающий, тогда для него имеем

$$q_{\text{конв}} = \frac{\lambda_{\text{в.п.}}}{\delta_{\text{в.п.}}} (\tau_{i-1} - \tau_{iE}), \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{в.п.}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, [Вт / м К]; $d_{\text{в.п.}}$ – толщина воздушной прослойки, [м]. В отличие от обычного коэффициента этот коэффициент величина не постоянная, а зависит от толщины прослойки и разности температур на поверхностях прослойки. Приблизительно его значение можно найти по формуле:

$$\lambda_{\text{в.п.}}(\delta_{\text{в.п.}}, \Delta\tau) = 0,02 + 6,1 \cdot 10^{-4} \Delta\tau + 7,27 \cdot 10^{-1} \delta_{\text{в.п.}} + 2,69 \cdot 10^{-2} \Delta\tau \cdot \delta_{\text{в.п.}}, \quad (5)$$

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>

где $D t = t_{i-1} - t_i$. Эта формула составлена методом аппроксимации эмпирических данных, поэтому справедлива для значений $D t$, изменяющихся в диапазоне от 1 до 30 [K], и для значений d , изменяющихся в диапазоне от 1 до 25 [см].

Данные, по которым проводилась аппроксимация, приведены в таблице 1 [Фокин, 1959].

Лучевая составляющая теплового потока [Фокин, 1959]

$$q_{\text{луч}} = \alpha_{\text{луч}} (\tau_{i-1} - \tau_i) \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{луч}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, [Вт / м² K], вычисляемый по формуле:

$$\alpha_{\text{луч}}(\tau_{i-1}, \tau_i) = C \frac{(\tau_{i-1}/100)^4 - (\tau_i/100)^4}{\tau_{i-1} - \tau_i} \quad (7)$$

Таблица 1.

D t, [K]	Значения $\alpha_{\text{луч}}$, [Вт / м ² K], при $d_{\text{в.п.}}$, [м]									
	0,01	0,02	0,3	0,05	0,07	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25
1	0,023	0,024	0,034	0,049	0,063	0,081	0,093	0,112	0,14	0,163
2,5	0,023	0,031	0,042	0,062	0,079	0,104	0,117	0,14	0,174	0,206
5	0,024	0,037	0,05	0,073	0,094	0,123	0,141	0,166	0,207	0,241
10	0,026	0,044	0,059	0,087	0,112	0,145	0,165	0,198	0,248	0,297
15	0,028	0,049	0,065	0,097	0,123	0,16	0,184	0,219	0,274	0,321
20	0,03	0,052	0,071	0,104	0,133	0,173	0,198	0,235	0,294	0,345
25	0,033	0,056	0,074	0,109	0,141	0,183	0,209	0,249	0,312	0,365
30	0,034	0,058	0,078	0,115	0,147	0,191	0,221	0,261	0,326	0,383

Здесь C – коэффициент, зависящий от отражательных свойств стенок воздушного промежутка, [Вт / м² K]:

$$C = \frac{1}{1/C_{i-1} + 1/C_i - 1/C_s} \quad (8)$$

где C_{i-1} и C_i – коэффициенты излучения поверхностей воздушной прослойки, [Вт / м² K⁴]; C_s – коэффициент излучения абсолютно черного тела (5,7 [Вт / м² K⁴]).

Таким образом, для слоя отражающей изоляции имеем тепловой поток

$$q = \frac{\lambda_{\text{в.п.}} + \alpha_{\text{лучд в.п.}} \delta_{\text{в.п.}}}{\delta_{\text{в.п.}}} (t_{i-1} - t_i). \quad (9)$$

Выражение $\lambda_{\text{в.п.}} + \alpha_{\text{лучд в.п.}} \delta_{\text{в.п.}}$ назовем эквивалентным коэффициентом теплопроводности воздушной прослойки и обозначим $\lambda_{\text{э}}$ [Фокин, 1959].

Для того, чтобы найти профиль температур $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ и $\{t_i\}$ ограждающей конструкции, состоящей из n слоев, нужно решить систему уравнений:

$$\begin{cases} q = \alpha_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_{\text{в}}), \\ q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{\text{в}} - t_1), \\ \vdots \\ q = \frac{\lambda_n}{\delta_{\text{в.п.}}} (t_{i-1} - t_i), \\ \vdots \\ q = \frac{\lambda_n}{\delta_n} (t_{n-1} - t_{\text{н}}), \\ q = \alpha_{\text{н}} (t_{\text{н}} - t_{\text{н}}). \end{cases} \quad (10)$$

Так как количество уравнений, $(n+2)$, не совпадает с количеством неизвестных величин, $(n+3)$, то система (10) решается численно методом итераций.

Термическое сопротивление R_K , [$\text{м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$], многослойной ограждающей конструкции определяется как сумма термических сопротивлений отдельных слоев [СНиП, 1998]:

$$R_K = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (11)$$

где $R_i = d_i / \lambda_i$ – термическое сопротивление слоя массивной изоляции, [$\text{м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$]. Для воздушной прослойки $R_i = d_{\text{в.п.}} / \lambda_{\text{э}}$.

Сопротивление теплопередаче R_0 , [$\text{м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$], ограждающей конструкции следует определять по формуле [СНиП, 1998]:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_K + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}. \quad (12)$$

3.2. Метод итераций

Имеется система уравнений (10) с $(n+2)$ уравнениями и $(n+3)$ неизвестными: $\{t_i\}$ ($i = 1, \dots, n-1$), t_v , t_n и l_ε .

Метод заключается в следующем:

1. Считаем слой отражающей изоляции воздушным и $l_\varepsilon = l_{в.п.} = 0,025$ [Вт / м К] (это справочное значение при $(t_{i-1} - t_i) / 2 = 283$ [К]).
2. Решаем систему (10) и получаем $\{R_i^0\}$ ($i = 1, \dots, n$), $\{t_j^0\}$ ($j = 1, \dots, n-1$), t_v^0 , t_n^0 , q^0 – первое приближение.
3. Учитываем $q_{луч}$ и $q_{конв}$ для слоя отражающей изоляции и находим l_ε .
4. Снова решаем систему (10) и получаем следующее приближение $\{R_i^1\}$ ($i = 1, \dots, n$), $\{t_j^1\}$ ($j = 1, \dots, n-1$), t_v^1 , t_n^1 . При этом $R_0^1 < R_0^0$ и $q^1 > q^0$.
5. Если $|R_0^1 - R_0^0| < \varepsilon$ (значение ε можно взять равным 0,0001), то расчет окончен, в противном случае переходим к шагу 3.

4. Результаты

С помощью программного комплекса "Энергосбережение в строительстве" были проведены расчеты двух конструкций. При этом характеристики материалов брались в условиях эксплуатации "Б" [СНиП, 1898], коэффициенты a_v и a_n равными 8,7 [Вт / м² К] и 23 [Вт / м² К] соответственно [СНиП, 1998] и температуры t_v , t_n равными +18 [°C] и -26 [°C].

4.1. Конструкция 1

Расположение слоев следующее:

1. Листы облицовки, $d = 1$ [см], $l = 0,21$ [Вт / м К].
2. Воздушная прослойка, $d = 1$ [см].
3. Фольга из полированного алюминия, коэффициент черноты 0,05 [Вт / м² К⁴].
4. Пенополиуретан, $d = 4$ [см], $l = 0,04$ [Вт / м К].
5. Кирпичная кладка, $d = 51$ [см], $l = 0,81$ [Вт / м К].
6. Наружная штукатурка, $d = 1$ [см], $l = 0,93$ [Вт / м К].

Расчет проводился для двух вариантов расположения слоев: указанном и “зеркальном” отображении. Результаты приведены в таблице 2.

4.2. Конструкция 2

Расположение слоев следующее:

1. Листы облицовки, $d = 1$ [см], $\lambda = 0,21$ [Вт / м К].
2. Пенополиуретан, $d = 4$ [см], $\lambda = 0,04$ [Вт / м К].
3. Фольга из полированного алюминия, коэффициент черноты $0,05$ [Вт / м² К⁴].
4. Воздушная прослойка, $d = 1$ [см].
5. Кирпичная кладка, $d = 51$ [см], $\lambda = 0,81$ [Вт / м К].
6. Наружная штукатурка, $d = 1$ [см], $\lambda = 0,93$ [Вт / м К].

Расчет проводился для двух вариантов расположения слоев: указанном и “зеркальном” отображении. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 2.

№ варианта	Название слоя	Толщина слоя, [м]	Термическое сопротивление слоя, [Вт / м К]	Температура на границе слоя, [°С]
1	Листы облицовки	0,01	0,048	+14,6
	Воздух	0,01	0,285	+8,8
	Фольга	0	0	+8,8
	Пенополиуретан	0,04	1	-11,9
	Кирпич	0,51	0,63	-24,9
	Штукатурка	0,01	0,011	-25,1
2	Штукатурка	0,01	0,011	+15,4
	Кирпич	0,51	0,63	+2,5
	Пенополиуретан	0,04	1	-18,1
	Фольга	0	0	-18,1
	Воздух	0,01	0,291	-24,1
	Листы облицовки	0,01	0,048	-25,1

Таблица 3.

№ варианта	Название слоя	Толщина слоя, [м]	Термическое сопротивление слоя, [Вт / м К]	Температура на границе слоя, [°С]
1	Листы облицовки	0,01	0,048	+14,7
	Пенополиуретан	0,04	1	-6
	Фольга	0	0	-6
	Воздух	0,01	1,289	-11,9
	Кирпич	0,51	0,63	-24,9
	Штукатурка	0,01	0,011	-25,1
2	Штукатурка	0,01	0,011	+15,4
	Кирпич	0,51	0,63	+2,4
	Фольга	0	0	+2,4
	Воздух	0,01	0,287	-3,5
	Пенополиуретан	0,04	1	-24,1
	Листы облицовки	0,01	0,048	-25,1

5. Выводы

Из результатов расчетов видно, что слой отражающей изоляции должен располагаться в ограждающей конструкции в зоне как можно более низких температур таким образом, чтобы перепад температур на границах слоя был как можно больше. Кроме того, величина сопротивления теплопередаче не зависит от того, на какой поверхности воздушной прослойки находится фольга.

Литература

1. [Арнольд и др., 1979] Арнольд Л.В., Михайловский Г.А., Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача - М., Высшая школа, 1979.
2. [СНиП, 1998] СНиП II-3-79* Строительная теплотехника / Госстрой России – М., ГУП ЦПП, 1998.

[Фокин, 1959] Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий – М., 1973.