

Резюме. Результаты исследования показывают, что правильно запроектированные совмещенные покрытия обеспечивают надежную защиту здания от влияния атмосферных условий. В массовом строительстве нет оснований отказываться от совмещенных покрытий в пользу трудоемких и дорогостоящих крыш с чердаками.

Л и т е р а т у р а

1. Аврутин Ю.Е., Кричевская Е.И., Фоломина А.И. Железобетонные крыши жилых и общественных зданий. М., 1971.
2. Штейн И.И. Устройство крупнопанельных крыш. Л., 1973.
3. Фоломин А.И., Кузина Л.О. О влажностном режиме совмещенных невентилируемых крыш из керамзитобетонных панелей. - "Строительство и архитектура", 1968, №5.
4. Фоломин А.И., Кузина Л.О. Влажностный режим невентилируемых однослойных крыш из керамзитобетонных панелей. - "Жилищное строительство", 1969, №11.
5. Künzel H., Gertis K. Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in gosbetondächern. - "Betonzeitung", 1969, N 1.
6. Иванова Л.А., Козловский А.М., Скрибо В.И. Панели невентилируемого совмещенного покрытия для жилищного строительства. - "Строительство и архитектура Белоруссии", 1972, №4.

УДК 666.97.015

И.П. Жук (канд. техн. наук)

Л.А. Иванова (канд. техн. наук), Л.П. Минченкова

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОБЛЕГЧЕННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С УТЕПЛИТЕЛЕМ ИЗ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Задачи оптимального использования строительных материалов привели к созданию многослойных конструкций с дифференцированным назначением слоев (теплоизоляционный, звукоизоляционный, несущий, декоративный). В настоящее время для теплотехнического расчета в основном используются приближенные расчетные соотношения [1,2], которые не учитывают особенности многослойности конструкций и резкого отличия теплофизических слоев материалов (бетон - минеральная вата). Для современного строительства пока характерно строительство опытных зданий с последующим их обследованием в

натурных условиях, что препятствует своевременному и экономному использованию материалов.

В данной работе дается пример теплотехнического расчета многослойной конструкции, где в качестве теплоизоляционного материала применен пенополистирол – один из наиболее перспективных в последнее время материалов, а несущим – железобетон. Размеры панели покрытия для жилых зданий указаны на рис. 1.

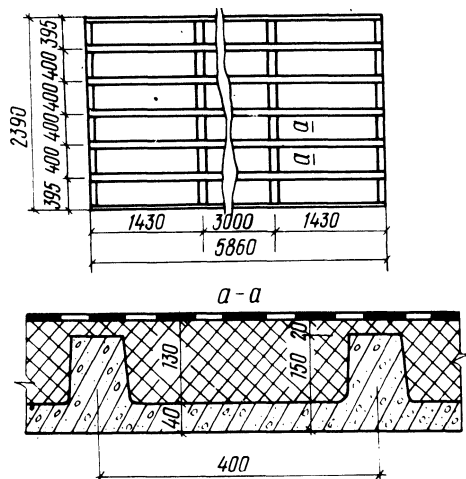


Рис. 1. Панель совмещенного покрытия.

температуры окружающего воздуха [2]).

Зимой температура поверхности здания при ясном безоблачном небе (наиболее холодное время) бывает на 5°C – 10°C ниже температуры окружающего воздуха в ночное время [3]. Таким образом, вводимое нами допущение можно считать оправданным и правомерным.

2. Температура внутреннего воздуха считается постоянной (для зданий с кондиционированием воздуха это соответствует действительности, а высокие требования, предъявляемые к микроклимату, делают его оправданным).

Принимаем, что теплообмен конструкции с внутренним воздухом происходит по закону Ньютона. Тогда математическая формулировка задачи имеет вид

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}; \quad (1) \quad \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Начало отсчета выбрано на наружной поверхности, а ось OX направлена по нормали внутрь конструкции.

С целью упрощения решения, анализа и выявления основных закономерностей проведем расчет двухслойной конструкции. При этом делаем ряд допущений:

1. Считаем, что температура наружной поверхности изменяется по гармоническому закону (это допущение правомерно для расчета конструкции в летних условиях, так как температура поверхности для бесчердачных перекрытий значительно выше температу-

Граничные условия запишутся в следующем виде:

$$t_1(x, \tau) /_{x=0} = t_0 + t_m \cos \omega \tau; \quad (3)$$

$$t_1(x, \tau) /_{x=1_1} = t_2(x, \tau) /_{x=1_1}; \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} /_{x=1_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x /_{x=1_1}}; \quad (5)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} /_{x=1_2} = -\alpha(t_2 - t_B). \quad (6)$$

За начальное распределение температур принимаем стационарное, которое устанавливается в конструкции, когда $t_H = t_0$, а с внутренней стороны происходит теплообмен по закону Ньютона со средой с постоянной температурой t_B .

Решение поставленной задачи, полученное с использованием преобразования Лапласа, имеет вид

$$t_1(x, \tau) = t_{1x} + t_m \sqrt{\frac{\Delta_1(x, \omega)}{\Delta_0(1_1, 1_2, \omega)}} \cos(\omega \tau - \delta + \delta_1 x); \quad (7)$$

$$t_2(x, \tau) = t_{2x} + t_m \sqrt{\frac{\Delta_2(x, \omega)}{\Delta_0(1_1, 1_2, \omega)}} \cos(\omega \tau - \delta + \delta_2 x), \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} t_{1x} &= t_0' + \frac{R_1 x}{R_0} (t_B - t_0'); \\ R_0 &= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1_2 - 1_1}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}; \quad R_1 = \frac{x}{\lambda_1}; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$t_{2x} = t_0' + \frac{R_1 + R_2 x}{R_0}; \quad R_2 = \frac{x - 1_1}{\lambda_2}; \quad (10)$$

$$t_{н.пов}^i = t_0 + t_m \cos \omega \tau;$$

$$\Delta_0(1_1, 1_2) = \frac{2t_m^2 \lambda_2^2 \omega k^2}{a_2} + (ch 2\delta_+ + \cos 2\delta_+) + \frac{k_-^2}{k_+^2} (ch 2\delta_- + \cos 2\delta_-) + Bi^*{}^2 (ch 2\delta_+ - \cos 2\delta_+) + \frac{Bi^*{}^2 k_-^2}{k_+^2} (ch 2\delta_- - \cos 2\delta_-)$$

$$\begin{aligned}
& -\cos 2\delta_-) + \frac{2(k_{12}^2 - 1)}{k_+^2} (\text{ch} 2\delta_2 \cos 2\delta_1 + \text{ch} 2\delta_1 \cos 2\delta_2) + \\
& + \sqrt{2} \text{Bi}^* (\text{sh} 2\delta_+ + \sin 2\delta_+) + \frac{2\sqrt{2} \text{Bi}^* (k_{12}^2 - 1)}{k_+^2} (\text{sh} 2\delta_1 \cos 2\delta_2 + \\
& + \text{ch} 2\delta_1 \sin 2\delta_2) + \frac{\sqrt{2} \text{Bi}^* k_-^2}{k_+^2} (\text{sh} 2\delta_- + \sin 2\delta_-) + \\
& + \frac{2\text{Bi}^{*2} (k_{12}^2 - 1)}{k_+^2} (\text{ch} 2\delta_2 \cos 2\delta_1 - \text{ch} 2\delta_1 \cos 2\delta_2) \}; \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
\text{Bi}^* &= \frac{\alpha}{\sqrt{c_2} \gamma_2 x_2 \omega} ; k_{12} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} ; k_+ = k_{12} + 1 ; k_- = k_{12} - 1 ; \\
\delta_1 &= \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} 1_1 ; \delta_2 = \sqrt{\frac{\omega}{2a_2}} (1_2 - 1_1) ; \delta_+ = \delta_2 + \delta_1 ; \\
\delta_- &= \delta_2 - \delta_1 ;
\end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
\Delta_1(x, \omega) &= \frac{2t_m^2 \lambda_2^2 \omega k_+^2}{a_2} \left\{ (\text{ch} 2\delta_+^x + \cos 2\delta_+^x) + \frac{k_-^2}{k_+^2} (\text{ch} 2\delta_-^x + \right. \\
& + \cos 2\delta_-^x) + \text{Bi}^{*2} (\text{ch} 2\delta_+^x - \cos 2\delta_+^x) + \frac{\text{Bi}^{*2} k_-^2}{k_+^2} (\text{ch} 2\delta_-^x - \\
& - \cos 2\delta_-^x) + \frac{2(k_{12}^2 - 1)}{k_+^2} (\text{ch} 2\delta_2 \cos 2\delta_1^x + \text{ch} 2\delta_1 \cos 2\delta_2^x) + \\
& + \sqrt{2} \text{Bi}^* (\text{sh} 2\delta_+^x + \sin 2\delta_+^x) + \frac{2\sqrt{2} \text{Bi}^* (k_{12}^2 - 1)}{k_+^2} \times \\
& \times (\text{sh} 2\delta_1^* \cos 2\delta_2^* + \text{ch} 2\delta_1^* \sin 2\delta_2^* + \\
& + \frac{\sqrt{2} \text{Bi}^* k_-^2}{k_+^2} (\text{sh} 2\delta_-^x + \sin 2\delta_-^x) + \frac{2\text{Bi}^{*2} (k_{12}^2 - 1)}{k_+^2} \times
\end{aligned}$$

$$x(\text{ch}2\delta_2\cos2\delta_1^* - \text{ch}2\delta_1^x\cos2\delta_2)}\}; \quad (13)$$

$$\delta_+^x = \delta_2 + \delta_1^x; \delta_-^x = \delta_2 - \delta_1^x; \delta_1^x = \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}(l_1 - x)}; \quad (14)$$

$$\Delta_2(x, \omega) = \frac{4tm^2\lambda_2^2k_{12}^2\omega}{a_2} \left[(\text{ch}2\delta_x'' + \cos2\delta_x'') + \text{Bi}_x^{*2} \right. \\ \left. x(\text{ch}2\delta_x'' - \cos2\delta_x'') + \sqrt{2} \text{Bi}_x^* (\text{sh}2\delta_x'' + \sin2\delta_x'') \right]; \quad (15)$$

$$\gamma = \arccos \frac{F}{\sqrt{\Delta_0}}; \gamma_1^x = \arccos \frac{F_1}{\sqrt{F_1^2 + \epsilon_1^2}};$$

$$\gamma_2^x = \arccos \frac{F^x}{\sqrt{(F^x)^2 + (\epsilon^x)^2}}; \quad (16)$$

$$F = 2 \left[\frac{\lambda_2^k + \sqrt{\omega}}{\sqrt{2a_2}} (\text{ch}\delta_+ \cos\delta_+ - \text{sh}\delta_+ \sin\delta_+) + \right. \\ \left. + \frac{\lambda_2^k - \sqrt{\omega}}{\sqrt{2a_2}} (\text{ch}\delta_- \cos\delta_- - \text{sh}\delta_- \sin\delta_-) + \alpha k_+ \text{sh}\delta_+ \cos\delta_+ + \right. \\ \left. + \alpha k_- \text{sh}\delta_- \cos\delta_- \right]; \quad (17)$$

$$F_1 = 2t_m k + \left[\frac{\lambda_2^k + \sqrt{\omega}}{\sqrt{2a_2}} (\text{ch}\delta_+^x \cos\delta_+^x - \text{sh}\delta_+^x \sin\delta_+^x) + \right. \\ \left. + \frac{\lambda_2^k - \sqrt{\omega}}{\sqrt{2a_2}} (\text{ch}\delta_-^x \cos\delta_-^x - \text{sh}\delta_-^x \sin\delta_-^x) + \alpha k_+ \text{sh}\delta_+^x \cos\delta_+^x + \right. \\ \left. + \alpha k_- \text{sh}\delta_-^x \cos\delta_-^x \right]; \quad (18)$$

$$F^x = 2t_m k_{12} \left[\frac{\lambda_2 \sqrt{\omega}}{\sqrt{2a_2}} (\text{ch}\delta_x'' \cos\delta_x'' - \text{sh}\delta_x'' \sin\delta_x'') + \right. \\ \left. + \alpha \text{sh}\delta_x'' \cos\delta_x'' \right]; \quad (19)$$

$$\sqrt{F_1^2 + \epsilon_1^2} = \sqrt{\Delta_1(x, \omega)}; \quad \sqrt{(F^x)^2 + (\epsilon^x)^2} = \sqrt{\Delta_2(x, \omega)}. \quad (20)$$

Пользуясь уравнениями (7), (8), (15), можно определить температуру в любой точке конструкции в любой момент времени, а также запаздывание колебаний. Для оценки конструкции мы определяем затухание колебаний и время запаздывания их на поверхности $x = l_2$.

Проведем численный расчет для нашей конструкции ($\lambda_1 = 0,03$ ккал/м·ч·град; $\gamma_1 = 40$ кг/м³; $l_1 = 0,13$ м; $c_1 = 0,35$; $\lambda_2 = 1,4$ ккал/м·ч·град; $\gamma_2 = 2500$ кг/м³; $l_2 = 0,04$ м; $c_2 = 0,2$). Зная порядок расположения слоев и теплофизические свойства материалов, по соотношениям (8), (10), (12), (14) вычисляем

$$\omega = \frac{2\pi}{24} = 0,262 \text{ (учитываем суточные колебания)}, \quad k_{12} = 0,021;$$

$$k_+ = 1,021; \quad k_- = -0,979; \quad \delta_1 = 0,666; \quad \delta_2 = 0,595; \quad \delta_+ = 0,071; \quad \delta_- = -1,261; \quad Bi^* = 0,554.$$

Подставляя вычисленные значения в выражение (8), получим для затухания колебаний следующее выражение:

$$\frac{t_2(x, \tau) - t_{2x}}{t_m} = \sqrt{\frac{\Delta_2(x, \omega)}{\Delta_0(l_1, l_2, \omega)}} = \gamma.$$

Время запаздывания колебаний на внутренней поверхности можно определить из выражения (8), приравнивая $\cos(\omega \tau - \delta_+ + \delta_2 x) = 0$ при $x = l_2$.

Подставляя значения входящих величин, получим $\omega \tau - \delta_+ + \delta_2 x = 1,57$, откуда $\tau = 5$ ч 15 мин.

Анализ полученных решений. Изучая решения (7), (8), мы видим, что затухание колебаний определяется величиной

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{\Delta_1}{\Delta_0}}, \text{ т.е. величинами } k_{12} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}; \\ & 2\delta_+ = 2(\delta_2 + \delta_1) = 2 \left[\sqrt{\frac{\omega}{2a_2}} (l_2 - l_1) + \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} l_1 \right] = \\ & = \sqrt{2} (R_1 S_2 + R_1 S_1) = \sqrt{2D} \text{ (тепловая инерция по СНИПу); } (4) \\ & 2\delta_- = 2(\delta_2 - \delta_1) = \sqrt{2(R_2 S_2 - R_1 S_1)}; \end{aligned}$$

$$2\delta_1 = 2\sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} l_1 = \sqrt{2R_1 S_1};$$

$$2\delta_2 = 2\sqrt{\frac{\omega}{2a_2}} (l_2 - l_1) = \sqrt{2R_2 S_2}; \quad Bi^* = \frac{\alpha}{\sqrt{c_2 \delta_2 \lambda_2 \omega}}.$$

Таким образом, сложная зависимость затухания колебаний от свойств материалов слоев, соотношения их размеров и порядка расположения их в конструкции и условий теплообмена позволяет, изменяя эти параметры, выбрать оптимальные размеры конструкции в зависимости от того или иного ее назначения.

Сравнение результатов расчета с натурными исследованиями. В 1971 г. в Минске был построен 120-квартирный жилой дом с совмещенным покрытием, поперечный разрез которого представлен на рис.2.

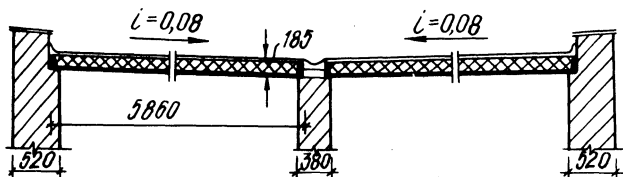


Рис.2. Поперечный разрез совмещенного покрытия.

На этом объекте выполнялся комплекс тепловлажностных исследований невентилируемого покрытия: влияние солнечной радиации на микроклимат помещений верхнего этажа, тепловой поток через покрытие и влажностный режим.

Температуры на наружной и внутренней поверхностях покрытия в наиболее характерных местах: под продольными несущими ребрами и между ребер замерялись хромель-копелевыми термопарами, запись производилась автоматическим потенциометром ЭПП-09 МЗ, градуированным на температуру 0 - 100°C, непрерывно 5 раз в час.

Для наблюдений была выбрана угловая комната с юго-западной ориентацией стен. Окно, расположенное с западной стороны, на время эксперимента было закрыто плотной занавесью. Помещение в период испытаний не проветривалось.

За изменением температуры в характерных точках велось наблюдение с 15 по 17 июля 1972 г., когда температура кровли достигала максимума 61°C в 13 ч., а воздуха 32°C в 14 ч.

Максимальная температура на внутренней поверхности составляла $24,7^{\circ}\text{C}$. Амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности была равна $1,65^{\circ}\text{C}$, а в $1,5$ м от пола составила $1,4^{\circ}\text{C}$.

Расчетные соотношения для амплитуды колебаний на внутренней поверхности, соответствующие амплитуде на наружной

$$\frac{61^{\circ}\text{C} - 8}{2} = 26,5^{\circ}\text{C},$$

составляют

$$A \sqrt{\frac{\Delta_2}{\Delta_0}} = 0,48.$$

Время запаздывания колебаний на внутренней поверхности равно 5 ч 45 мин.

Отсюда видно, что наблюдаемые и измеренные данные дают хорошее совпадение.

Некоторое увеличение амплитуды колебаний на внутренней поверхности в натуральных условиях по сравнению с расчетными можно объяснить изменением внутренней температуры воздуха во времени (в расчетах она принималась постоянной). Этим же можно объяснить и несоответствие между временами запаздывания колебаний.

Таким образом, проведенный расчет и натурные исследования показывают, что рекомендуемая конструкция в теплотехническом отношении удовлетворяет условиям климатической зоны БССР, а предлагаемые расчетные соотношения могут быть использованы при создании конструкций из новых материалов и выборе их оптимальных размеров.

Резюме. Показано, что приведенная математическая модель теплопередачи через ограждающие конструкции хорошо согласуется с результатами натуральных исследований для летних условий климатической зоны БССР, что позволяет использовать ее для практических расчетов.

Л и т е р а т у р а

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М., 1973.
2. Шкловер А.М. Теплопередача периодических тепловых воздействий. М., 1952.
3. Нэш Г.Д., Комри Дж., Бротон Г.Ф. Теплоизоляция зданий. М., 1964.
4. Строительные нормы и правила. Строительная теплотехника. Нормы проектирования II-A, 7-71. М., 1971.