

УДК 536.24.03

Л.В.ГАПОНОВА, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПУСТОТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ

Разработана методика теплотехнического расчета пустотелой сталебетонной плиты. Выполнен сравнительный анализ железобетонной пустотелой плиты со сталебетонной плитой.

Основным направлением повышения эффективности конструкций является разработка легких теплогидроизоляционных материалов [1, 2]. Применение таких материалов в конструкциях позволит весьма существенно экономить тепловую энергию. В настоящее время широкое распространение получили сталебетонные плиты покрытий и перекрытий промышленных и гражданских зданий. Вопросы термоустойчивости таких плит исследованы недостаточно. Этим определяется актуальность настоящей работы. На термическое сопротивление конструкции влияют следующие характеристики: геометрические, отражающие размеры и форму элементов конструкции; физические и механические характеристики материалов (теплопроводность, коэффициент теплопроводности); граничные условия, отражающие характер взаимодействия с окружающей средой.

Существенным фактором, влияющим на термическое сопротивление ограждающей конструкции, является её форма, взаимное расположение пустот, направление теплового потока. В настоящее время в качестве конструкций перекрытия наиболее распространены плиты с пустотами круглой формы с осью, ориентированной вдоль перекрываемого пролёта. Площадь поперечного сечения пустот составляет примерно 50% площади поперечного сечения плиты, что создаёт внутри конструкции достаточно большие заполненные воздухом пространства, которые можно классифицировать как замкнутые воздушные прослойки. Особенностью этих элементов является то, что теплообмен в них осуществляется как при помощи теплопроводности, так и при помощи конвекции. Учёт конвективной составляющей является весьма сложной и трудоёмкой задачей, поэтому нами предложено рассматривать конвективный теплообмен в замкнутом пространстве пустот строительных конструкций как элементарное явление теплопроводности, вводя при этом понятие эквивалентной теплопроводности:

$$\lambda_{\text{экр}} = \frac{Q \times \delta}{F \times \Delta t}, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток через прослойку, Вт; δ – толщина прослойки, м; F – площадь конструкции, перпендикулярная тепловому потоку, м²; Δt – разность температур на внутренних поверхностях прослойки, °С.

Поскольку интенсивность циркуляции воздуха в пустотах является функцией разности плотностей нагретой и охлажденной среды и определяется критериями Gr (Грасгофа), Pr (Прандтля), то для коэффициента конвекции $\varepsilon_k = \lambda_{\text{экр}} / \lambda_{\text{среды}}$, характеризующего влияние конвективной составляющей в процессе теплообмена в замкнутом пространстве справедливо следующее критериальное уравнение вида:

$$\varepsilon_k = f(Gr, Pr). \quad (2)$$

В качестве определяющей температуры принимается средняя температура жидкости на нагреваемой и охлаждаемой частях внутренней поверхности пустот $t_{\text{ж}} = 0,5(t_{c1} + t_{c2})$, за определяющий размер принимается диаметр пустоты δ .

При малых значениях аргумента $Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 1000$, $\varepsilon_k = 1$. Теплопередача от горячей к холодной стенке передается только теплопроводностью.

При значениях $10^3 < Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 10^6$ $\varepsilon_k = 0,105(Gr_{\text{ж}} \times Pr_{\text{ж}})^{0,3}$; (3)

при значениях $10^6 < Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 10^{10}$ $\varepsilon_k = 0,40(Gr_{\text{ж}} \times Pr_{\text{ж}})^{0,2}$. (4)

Рассмотрим схему поперечного сечения плиты перекрытия с продольными пустотами цилиндрической формы (рис.1). Выделим вдоль пролета участок, равный 1 м.

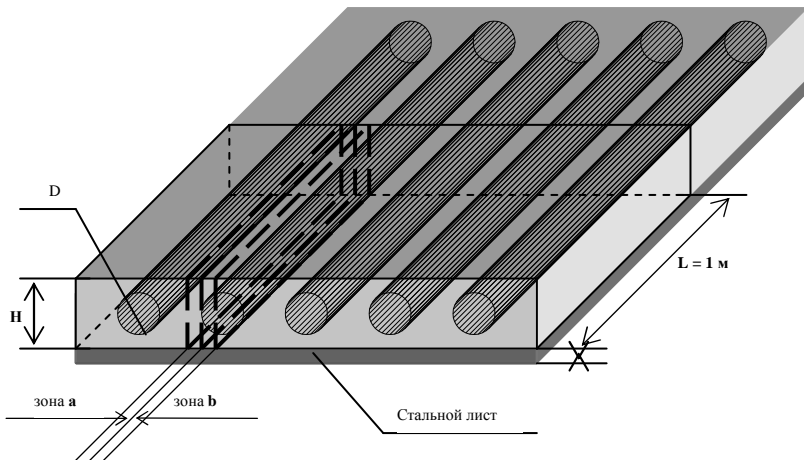


Рис.1 – Схема поперечного сечения плиты перекрытия с продольными пустотами цилиндрической формы

Рассмотрим характерную зону и используя осевую симметрию определим расчётные участки. Для упрощения расчётной схемы заменим круглую форму поперечного сечения воздушной прослойки на квадратную, с площадью поперечного сечения равновеликой исходному, т.е. $h_3 = 2 \times b = \sqrt{(\pi \times d^2) / 4}$.

В результате имеем сопряжённую конструкцию, имеющую две характерные зоны (рис.2): зона a – представляет зону между пустотами сплошного конструкционного материала; зона b – представляет зону, в которой находится замкнутая воздушная прослойка. Примем в качестве допущения гипотезу о том, что перетоки тепла в горизонтальном направлении через вертикальную плоскость A-A (рис.2) достаточно малы по сравнению с вертикальными тепловыми потоками.

В этом случае можно предположить, что процесс теплопередачи на выделенном участке представляет собой совокупность параллельно-последовательно соединённых тепловых сопротивлений (рис.3).

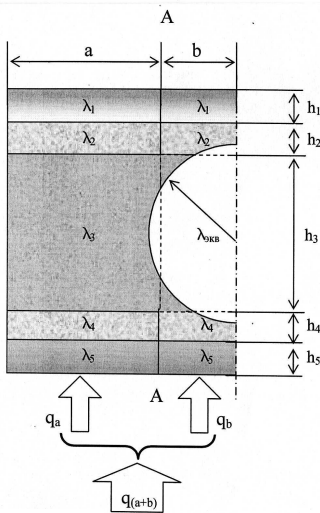


Рис.2 – Расчетная схема

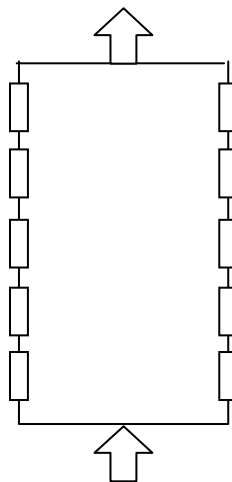


Рис.3 – Прохождение теплового потока через цепь, состоящую из последовательно и параллельно соединённых сопротивлений

Под тепловым сопротивлением элемента конструкции будем понимать величину $\rho = R/F$ (К/Вт) [3], где: R – термическое сопротив-

ление теплопередаче элемента конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; F – площадь сечения элемента конструкции, перпендикулярная тепловому потоку, м^2 .

Полагая, что площадь теплообмена каждой зоны составляет $F_a = a \cdot L$ (м^2); $F_b = b \cdot L$ (м^2) и $F_{ab} = (a+b) \cdot L$ (м^2) соответственно, и принимая $L=1$ м, можно записать:

$$\rho_a = \frac{R_a}{a \times L} = \frac{R_a}{a \times 1}; \rho_b = \frac{R_b}{b \times 1}; \rho_{ab} = \frac{R_{ab}}{(a+b) \times 1}, \text{ К/Вт.}$$

При последовательном по направлению теплового потока соединении элементов конструкции суммарное тепловое сопротивление определяется как сумма тепловых сопротивлений:

$$\rho_n = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n. \quad (5)$$

Общее тепловое сопротивление параллельно работающих по направлению распространения теплового потока элементов определяется из зависимости

$$\frac{1}{\rho_{ab}} = \frac{1}{\rho_a} + \frac{1}{\rho_b}. \quad (6)$$

Осредненное по площади внешней поверхности, или приведенное термическое сопротивление плиты определяем так:

$$R_{ab} = \frac{(a+b) \times L}{\rho_{ab}} = \frac{(a+b) \times 1}{\rho_{ab}}. \quad (7)$$

Для проведения вариантных расчётов был разработан алгоритм, реализованный средствами MS Excel.

При нахождении определяющих температур на стенках воздушной прослойки использовался метод последовательных приближений, позволяющий получить их значения с отклонением не более $\pm 1\%$, измерение теплофизических свойств воздуха в прослойке в зависимости от температуры осуществлялось по аппроксимационным зависимостям в виде полиномов второго порядка. При проведении расчётов [3] были приняты исходные данные, приведенные в табл.1.

Первоначально был выполнен расчёт теплопередачи через стандартную многопустотную железобетонную плиту перекрытия [4-6]: материал – тяжёлый бетон, $\lambda = 1,74$ Вт/(м К), общая толщина плиты $H = 0,2$ м, диаметр пустот $d = 0,15$ м.

В результате расчёта было определено, что соотношение тепловых потоков в зоне сплошного бетона (зона «а») и в зоне расположения пустот (зона «б») относятся соответственно как 69% и 31% суммарного теплового потока через рассматриваемый участок плиты.

Термическое сопротивление теплопередаче в зоне «а» составляет $R_a = 0,273 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$, в зоне «b» – $R_b = 0,715 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$, приведенное термическое сопротивление – $R_{ab} = 0,407 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$, что значительно меньше нормативного значения $R_{норм} = 2,5 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$. Интересно отметить, что термическое сопротивление воздушной прослойки (пустот) составляет $R_{пуст} = 0,503 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$, что соответствует значению $\lambda_{эKB} = 0,211 \text{ Вт/(м К)}$. Коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре в прослойке $t_{ж} = -5,45 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $\lambda_{среды} = 0,024 \text{ Вт/(м К)}$, следовательно, за счёт конвективной составляющей теплообмена в прослойке термическое сопротивление снижается практически на порядок по сравнению с неподвижным воздухом – $\epsilon_K = 8,82$.

Таблица 1 – Исходные данные

Основные показатели	Значения
Коэффициент теплопередачи на внутренней поверхности ограждения $\alpha_n \text{ (Вт/(м}^2 \text{ К))}$	8,7
Термическое сопротивление теплопередаче $R_n = 1/\alpha_n \text{ ((м}^2 \text{ К)/Вт)}$	0,114
Коэффициент теплопередачи на внешней поверхности ограждения $\alpha_n \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$	23
Термическое сопротивление теплопередаче $R_n = 1/\alpha_n \text{ ((м}^2 \text{ К)/Вт)}$	0,043
Температура внутреннего воздуха помещения $t_v \text{ (}^\circ\text{C)}$, климатические условия г.Харькова	16
Температура наружного воздуха $t_n \text{ }^\circ\text{C}$, климатические условия г.Харькова	23

Распределение температур по толщине плиты показано на рис.4.

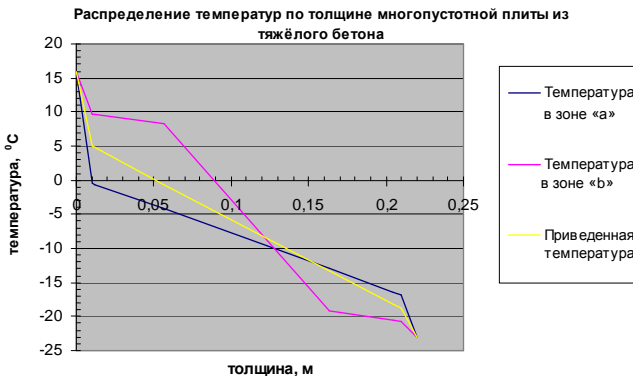


Рис.4

Анализируя распределение температур, необходимо отметить значительную неравномерность распределения температур как по толщине, так и по поверхности плиты. Как видно из графика, зона «а» плиты практически вся находится в области отрицательных температур, вплоть до внутренней (расположенной со стороны помещения) поверхности перекрытия. В то же время в зоне «b» температура на внутренней поверхности плиты и по её толщине до воздушной прослойки положительна и на внутренней поверхности даже превышает температуру точки росы (+10 °С). В то же время, с «холодной» стороны прослойки температура поверхности значительно ниже нуля (-19 °С), что способствует образованию конденсата и инея внутри пустот.

Далее был выполнен расчёт конструкции состоящей из железобетонной плиты перекрытия аналогичной предыдущему расчёту, дополненной слоем тепловой изоляции из керамзитобетона обеспечивающего достижение нормативного значения термического сопротивления перекрытия: $R_{прив} = R_{норм} = 2,5 \text{ (м}^2 \text{ К)/Вт}$.

Характеристики железобетонной плиты перекрытия – те же: утеплитель – керамзитобетон $\gamma = 500 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_{\text{ут}} = 0,17 \text{ Вт/(м К)}$, толщина слоя утеплителя – 0,33 м.

Распределение температур по толщине плиты приведено на рис.5.

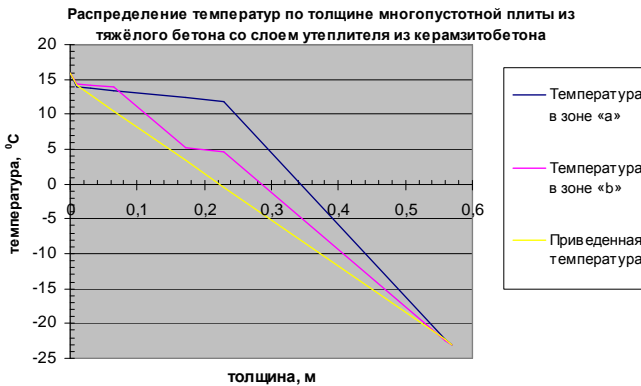


Рис.5

В этом случае соотношение тепловых потоков в зоне сплошного бетона (зона «а») и в зоне расположения пустот (зона «b») гораздо более равномерно и составляет 52,5% и 47,5% суммарного теплового потока через рассматриваемый участок плиты. Термическое сопротив-

ление теплопередаче в зоне «а» составляет $R_a = 2,23$ ($m^2 K$)/Вт, в зоне «b» – $R_b = 2,80$ ($m^2 K$)/Вт, приведенное термическое сопротивление – $R_{аб} = 2,5$ ($m^2 K$)/Вт, что соответствует нормативному значению. Термическое сопротивление воздушной прослойки (пустот) возросло и составляет $R_{пуст} = 0,633$ ($m^2 K$)/Вт. Температуры по толщине плиты распределены более равномерно, область отрицательных температур расположена в слое утеплителя и занимает примерно две трети его толщины. Температура на внутренней поверхности перекрытия находится в пределах от +13,7 до +14,3°C для зоны «а» и зоны «b» соответственно, что удовлетворяет санитарно-гигиеническим требованиям. Следует отметить, что при достижении требуемых теплотехнических характеристик толщина перекрытия составляет 0,55 м.

В качестве альтернативы рассмотрим сталебетонную плиту перекрытия, сочетающую в себе функции несущей и теплоизолирующей конструкции. Плита включает многпустотную пенобетонную плиту, армированную стальной мембраной, расположенной в нижнем поясе плиты. Толщина слоя пенобетона выбрана из условия достижения нормативного значения термического сопротивления перекрытия: $R_{прив} = R_{норм} = 2,5$ ($m^2 K$)/Вт.

Результаты расчёта сталебетонной плиты (табл.2) позволяют сделать вывод о гораздо более равномерном распределении температур по толщине перекрытия. При этом нормативное термическое сопротивление достигается при толщине перекрытия 0,28 м по сравнению с 0,55 м для бетонной плиты с утеплителем.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика – данные расчётов

	Конструктивные характеристики		
	плита перекрытия из тяжёлого бетона $\gamma=2400$ кг/м ³ , $\lambda_1=1,74$ Вт/(м К), утеплитель керамзитобетон $\gamma=500$ кг/м ³ , $\lambda_{yt} = 0,17$ Вт/(м К)	плита перекрытия сталебетонная, материал – пенобетон $\gamma = 500$ кг/м ³ , $\lambda_{yt} = 0,17$ Вт/(м К)	плита перекрытия сталебетонная, материал – пенобетон $\gamma = 500$ кг/м ³ , $\lambda_{yt} = 0,11$ Вт/(м К)
1	2	3	4
Общая толщина плиты	0,53	0,40	0,28
Диаметр пустот, D, м с шагом 0,2 м	0,12	0,12	0,12
Усредненная плотность покрытия, кг/м ³	1217	536	353
Соотношение тепловых потоков в зонах «а» и «b» q_a/q_b (%)	52,5/47,5	46,8/53,2	43,4/56,6

Продолжение табл.2

1	2	3	4
Термическое сопротивление теплопередаче в зонах «а» и «б» R_a/R_b	2,23/2,8	2,5/2,497	2,7/2,35
Приведенное сопротивление теплопередаче R_o , (м ² К)/Вт	2,5	2,5	2,5

Распределение температур в сталебетонной плите приведено на рис.6.

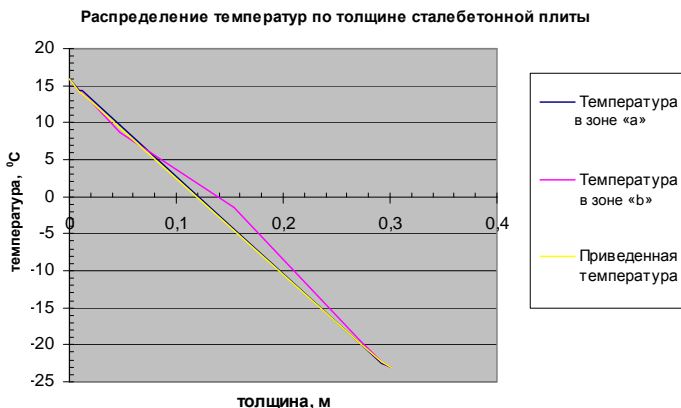


Рис.6

Расчет цепи тепловых сопротивлений показывает, что приведенное термическое сопротивление теплопередаче пустотелой железобетонной плиты $R_{ab} = 0,407$ (м² К)/Вт, что в 6 раз меньше предложенной сталебетонной плиты $R_{ab} = 2,5$ (м² К)/Вт.

- 1.Строительные материалы / Под общ. ред. В.Г.Микульского – М.: АСВ, 2000. – 419 с.
- 2.Попов К.Н., Каддо М.Б. Строительные материалы и изделия. – М. Высш. шк., 2002. – 367с.
- 3.Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия,1977. – 344 с.
- 4.СНиП II.3-79**. Строительная теплотехника / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
- 5.Маляренко В.А., Редько А.Ф., Чайка Ю.И., Поволочко В.Б. Технічна теплофізика огороджуючих конструкцій будівель та споруд. – Харків: Рубікон, 2001. – 280 с.
- 6.Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высш. шк., 1985. – 265 с.

Получено 12.09.2008