

УДК 614.841.332

А.И. Ковалев, к.т.н., с.н.с., Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

В работе приведены результаты анализа чувствительности температуры в точках измерения к параметрам модели теплового состояния многослойного железобетонного перекрытия с покрытием и без него. Сделан вывод о влиянии коэффициента теплоотдачи от бетонной поверхности в воздух необогреваемой поверхности перекрытия на точность определения коэффициента теплопроводности огнезащитного штукатурного покрытия «Эндотерм 210104»

Ключевые слова: многослойные железобетонные перекрытия, анализ чувствительности, огнезащитное покрытие, теплофизические характеристики, коэффициент теплоотдачи.

Постановка проблемы. Точность расчета теплового режима многослойных железобетонных перекрытий, как с огнезащитными покрытиями, так и без них, в значительной мере определяется точностью задания параметров модели, что обеспечивает ее адекватность реальным процессам теплообмена при испытаниях на огнестойкость.

Среди параметров модели необходимо идентифицировать те, которые являются неизвестными или недостаточно известными и наиболее влияющими на расчетные значения температур выбранной модели. Процесс определения степени влияния параметров модели на выходной результат (в нашем случае температуры) называется анализом чувствительности [1-2].

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [3] была определена степень влияния параметров модели на теплофизические характеристики, а потом и характеристику огнезащитной способности (ХОС) штукатурного покрытия и проведен анализ такой чувствительности (табл. 1,2). В качестве коэффициента чувствительности (1) выбрано отношение величины среднеквадратичного отклонения температур к относительному значению изменения анализируемого параметра модели P_i .

$$F_i = \frac{\Phi}{\Delta P_i / P_i}, \quad (1)$$

где Φ – среднеквадратичное отклонение температуры во времени; ΔP_i – величина отклонения i -го параметра относительно его значения P_i .

Методика анализа чувствительности, подробно описанная в [4; 5], состоит в последовательном возмущении параметров модели, идентификации ТФХ и решении серии прямых задач теплопроводности для получения значений среднеквадратичного отклонения температуры во времени и непосредственном расчете коэффициентов чувствительности F (1).

В табл. 1 в порядке убывания представлено количественное влияние разных параметров модели на температуры в железобетонном перекрытии без штукатурного покрытия в точках измерения. Установлено, что наиболее влияющими параметрами модели являются: коэффициент теплопроводности бетона плиты λ в слоях 1, 3, 5 и коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоя 2. Также определялась локальная чувствительность по узлам сплайна для плиты перекрытия без штукатурного покрытия. Наибольшее влияние имеют коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоя 2 при 0 °С и коэффициент теплопроводности бетона плиты λ в слоях 1, 3, 5 при 500 °С (табл. 1).

Таблица 1 – Чувствительность температур в точках измерения к параметрам модели теплопроводности плиты перекрытия без штукатурного покрытия

№	Название параметра	Величина F_i
1	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ в слоях 1, 3, 5	13,16
2	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоя 2	9,54
3	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоя 2 при 0 °С	8,78
4	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ в слоях 1, 3, 5 при 500 °С	7,4
5	Удельная объемная теплоемкость бетона C_V слоя 2	5,26
6	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ в слоях 1, 3, 5 при 0 °С	4,4
7	Удельная объемная теплоемкость бетона C_V слоев 1, 3, 5	3,4
8	Коэффициент теплоотдачи α_{c2} от бетонной необогреваемой поверхности плиты перекрытия	2,64
9	Степень черноты бетона	1,68
10	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоя 2 при 500 °С	1,06
11	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоя 2 при 1200 °С	0,4
12	Коэффициент теплоотдачи α_{c1} от горячих газов к нагреваемой стороне плиты перекрытия	0,28
13	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ в слоях 1, 3, 5 при 1200 °С	0,06

В табл. 2 в порядке убывания представлено количественное влияние разных параметров модели на температуры в железобетонном перекрытии со штукатурным покрытием в точках измерения. Установлено, что наиболее влияющими параметрами модели являются: коэффициент теплопроводности λ штукатурного покрытия и удельная объемная теплоемкость бетона C_V слоев 1, 3, 5.

Эти результаты позволили определить перечень параметров модели, которые необходимо рассчитывать с помощью обратных задач теплопроводности по данным испытаний на огнестойкость.

Постановка задачи и ее решение. Наряду с основными параметрами (коэффициент теплопроводности λ штукатурного покрытия и удельная объемная теплоемкость бетона C_V слоев 1, 3, 5), влияющими на точность определения теплофизических характеристик и характеристики огнезащитной способности покрытия (табл. 2), есть коэффициент теплоотдачи α_{c2} от бетонной необогреваемой поверхности плиты перекрытия.

Поэтому, целью работы было определить степень влияния коэффициента теплоотдачи на точность определения коэффициента теплопроводности штукатурного огнезащитного покрытия «Эндотерм 210104», а в дальнейшем и ХОС покрытия.

Таблица 2 – Чувствительность температур в точках измерения к параметрам модели теплопроводности плиты перекрытия с штукатурным покрытием

№	Название параметра	Величина F_i
1	Коэффициент теплопроводности λ штукатурного покрытия	4,72
2	Удельная объемная теплоемкость бетона C_V слоев 1, 3, 5	2,7
3	Удельная объемная теплоемкость бетона C_V слоя 2	1,94
4	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоев 1, 3, 5	0,26
5	Коэффициент теплоотдачи α_{c2} от бетонной необогреваемой поверхности плиты перекрытия	0,22
6	Коэффициент теплопроводности бетона плиты λ слоя 2	0,2
7	Удельная объемная теплоемкость штукатурного покрытия C_V	0
8	Степень черноты бетона	0
9	Коэффициент теплоотдачи α_{c1} от горячих газов к нагреваемой стороне плиты перекрытия	0

Изложение основного материала исследования.

Было выбрано одномерную математическую модель теплового состояния железобетонного перекрытия с разбивкой плиты на 6 слоев (рис. 1) [3, 6].

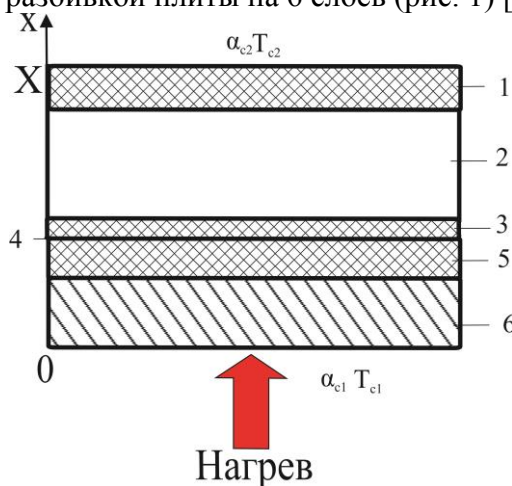


Рисунок 1 – Схема многопустотного железобетонного перекрытия в одномерной постановке: 1 – слой сплошного бетона между необогреваемой поверхностью и слоем с пустотами перекрытия; 2 – слой с пустотами; 3 – слой сплошного бетона между пустотами и арматурой; 4 – слой арматуры; 5 – слой сплошного бетона от арматуры до обогреваемой поверхности; 6 – штукатурное покрытие.

Математическая модель процесса теплопроводности в такой шестислойной системе в декартовой системе координат, описывающая рассмотренную выше физическую модель (рис. 1), многократно описана в литературе [1,3,6] и представляет собой одномерное уравнение теплопроводности с комбинацией лучистого теплообмена и граничными условиями 3-го рода на обогреваемой поверхности и граничными условиями 3-го рода на необогреваемой поверхности, учитывающим температуру окружающей среды. Распределение температуры T в перекрытии и огнезащитном покрытии описывается системой уравнений:

$$c_v(x, T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\lambda_{оп} \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \alpha^* [T_{c1}(t) - T(0, t)] \quad (3)$$

$$\alpha^* = \alpha_{c1} + \frac{C_0 \varepsilon}{T_{c1}(t) - T(0, t)} \left\{ \left[\frac{T_{c1}(t)}{100} \right]^4 - \left[\frac{T(0, t)}{100} \right]^4 \right\}, \quad (4)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T(X, t)}{\partial x} = \alpha^{**} [T(X, t) - T_{c2}] \quad (5)$$

$$\alpha^{**} = \alpha_{c2} + \frac{C_0 \varepsilon}{T(X, t) - T_{c2}(t)} \left\{ \left[\frac{T(X, t)}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_{c2}(t)}{100} \right]^4 \right\}, \quad \alpha_{c2} = A [T(X, t) - T_{c2}(t)]^{0.33}, \quad (6)$$

где C_v – удельная объемная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, t – время, x – координата, α_{c1} – коэффициент теплоотдачи от горячих газов к нагреваемой поверхности огнезащитного покрытия (ОП) или бетона, α_{c2} – коэффициент теплоотдачи от поверхности перекрытия с необогреваемой стороны в воздух, C_0 – излучательная способность абсолютно черного тела ($C_0 = 5,67$), ε – коэффициент излучения нагреваемой поверхности ОП или бетона; T_{c1} – температура горячих газов в печи при испытании; T_0 – начальная температура перекрытия перед испытанием. Коэффициент теплоотдачи от горячих газов в печи к нагреваемой поверхности образца α_{c1} принимался равным $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, степень черноты нагреваемой поверхности $\varepsilon = 0,7$. Коэффициент теплоотдачи между необогреваемой поверхностью перекрытия и окружающим воздухом α^{**} (5)–(6) также учитывает конвективный α_{c2} и радиационный теплообмен от горизонтальной поверхности ($A = 1,16$) в окружающую среду. Многослойность рассматриваемой модели учитывается зависимостями C_v и λ от координаты.

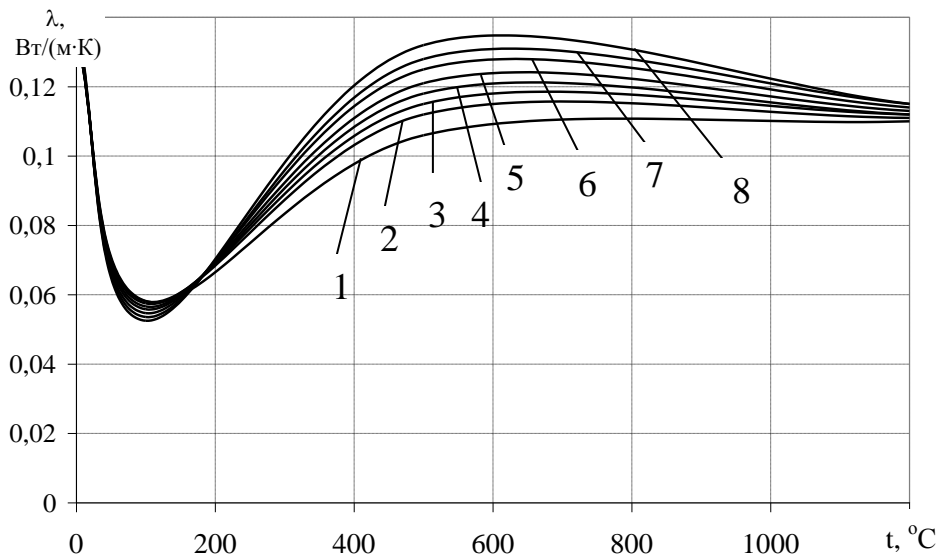


Рисунок 2 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности штукатурного покрытия от температуры, найденного решением ОЗТ по данным испытаний на огнестойкость: 1 – при α_{c2} , зависящим от температуры; 2 – $\alpha_{c2}=3$; 3 – $\alpha_{c2}=4$; 4 – $\alpha_{c2}=5$; 5 – $\alpha_{c2}=6$; 6 – $\alpha_{c2}=7$; 7 – $\alpha_{c2}=8$; 8 – $\alpha_{c2}=9$.

Система уравнений (2)-(6) решалась численно методом конечных разностей с помощью решения обратных задач (ОЗТ) теплопроводности по данным испытаний на огнестойкость, с коэффициентом теплоотдачи α_{c2} , который задавали в пределах 3-9 Вт/(м²·К), а также зависящим от температуры. В результате были получены зависимости эффективного коэффициента теплопроводности штукатурного покрытия от температуры, найденного решением ОЗТ по данным испытаний на огнестойкость (рис. 2).

Как видно из рис. 2, с увеличением коэффициента теплоотдачи с необогреваемой поверхности железобетонного перекрытия с покрытием, погрешность определения коэффициента теплопроводности увеличивается и становится 25% (для $\alpha_{c2}=9$). Также установлено, что этому коэффициенту нужно уделять особое внимание, и наиболее правильный путь – это задавать его, зависящим от температуры (рис.2, кривая 1). Значения этого параметра оказывают определяющее влияние на огнестойкость исследуемых многослойных железобетонных перекрытий, обработанных огнезащитными веществами, следовательно, на рекомендации относительно точности определения как ТФХ, так и в дальнейшем ХОС огнезащитных покрытий, что и составляет часто конечную цель расчетов тепловых процессов, происходящих в железобетонных перекрытиях.

Выводы. Таким образом, установлено, что при оценке огнестойкости многослойных железобетонных перекрытий, коэффициент теплоотдачи между необогреваемой поверхностью перекрытия и окружающим воздухом влияет на точность определения теплофизических характеристик огнезащитного покрытия (максимальная погрешность до 25% при $\alpha_{c2}=9$).

Перспективой дальнейших исследований есть определение влияния коэффициента теплоотдачи между необогреваемой поверхностью перекрытия и окружающим воздухом на точность определения характеристики огнезащитной способности покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качкар Е.В. Обоснование параметров трехслойных перегородок с минераловатными плитами для зданий и сооружений с учетом их огнестойкости : дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Качкар Евгений Владимирович. – К., 2009. – 157 с.
2. Круковский П. Г. Идентифицируемость параметров модели теплового режима типовой двухкомнатной квартиры / П.Г. Круковский, О.Ю. Тадля // Промышленная теплотехника. – Киев : ИТТФ НАН Украины. – 2007. – № 5. – С. 54–63.
3. Ковалев А.И. Усовершенствование метода оценки огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий: дисс. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Ковалев Андрей Иванович. – К., 2012. – 163 с.
4. Круковский П.Г. Расчетно-экспериментальный подход к анализу процессов теплообмена (методология и примеры применения) / П.Г. Круковский // Промышленная теплотехника (приложение к журналу). – 2003. – Т. 25, № 4. – С. 396–398.
5. Круковский П.Г. Универсальный программно-методический подход к решению обратных задач теплопереноса (программа FRIEND) / П.Г. Круковский // Идентификация динамических систем и обратные задачи : труды II Междунар. конференции. – СПб, 1994. – Т. 1. – С. А.8.1–А.8.12.
6. Ковалев А.И. Моделирование теплового состояния и огнестойкости многослойного железобетонного перекрытия / П.Г. Круковский, А.И. Ковалев, К.А. Черненко, М.А. Метель, А.А. Абрамов // Пожежна безпека: збірник наукових праць. – 2012. – № 21. – С. 85–94.