

*П.Г. Круковский, д-р техн. наук, профессор, (Институт технической теплофизики НАН Украины),
 А.И. Ковалев, канд. техн. наук, (Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля),
 К.А. Черненко, М.А. Метель, (Институт технической теплофизики НАН Украины),
 А.А. Абрамов, (ЧП «Испытательный центр ТЕСТ»)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И ОГНЕСТОЙКОСТИ МНОГОПУСТОТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ

Проведено исследование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия без и с огнезащитным штукатурным покрытием «Эндотерм 210104» с помощью испытаний на огнестойкость и расчетно-экспериментального метода на основе двух- и одномерных моделей теплопроводности и конвективного теплообмена. Показана возможность и методика использования упрощенных одномерных моделей, эквивалентных двухмерным.

Ключевые слова: моделирование, многопустотные железобетонные перекрытия, огнестойкость, штукатурные огнезащитные покрытия.

Определение огнестойкости железобетонных конструкций, а именно многопустотных железобетонных перекрытий является важной задачей, которая может решаться с помощью 3-х методов: расчетного, экспериментального и расчетно-экспериментального. Отметим, что экспериментальный метод определения огнестойкости наиболее точный, но в тоже время и наиболее дорогостоящий, требующий больших трудозатрат и специального оборудования. Расчетный метод менее трудоемкий, но требует точного задания теплофизических характеристик (ТФХ) материалов перекрытий, которые зачастую неизвестны. Поэтому определенное развитие получил расчетно-экспериментальный метод, позволяющий по данным одного или нескольких испытаний образцов, используя математические и компьютерные модели тепловых процессов, происходящих в этих образцах, оценивать огнестойкость строительных конструкций, в частности многопустотных железобетонных перекрытий.

В данной работе проведен анализ теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия с огнезащитным покрытием и без него в условиях испытаний этого перекрытия на огнестойкость при стандартном температурном режиме с помощью расчетно-экспериментального метода.

Целью работы было исследовать тепловые процессы, происходящие в многопустотных железобетонных перекрытиях с огнезащитными покрытиями и без них, и огнестойкость этих конструкций с помощью детальной двухмерной модели и упрощенной одномерной модели.

Для этого в работе были проведены испытания на огнестойкость многопустотных железобетонных перекрытий сначала без огнезащитного покрытия, а потом с ним (рис. 1).

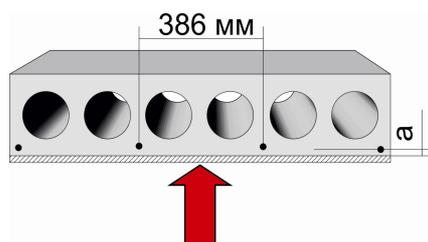


Рис.1. Общий вид многопустотного железобетонного перекрытия с огнезащитным покрытием

Испытаниям подвергались два образца железобетонных многопустотных плит перекрытия сначала без штукатурного покрытия, а потом с огнезащитным покрытием «Эндотерм 210104» производства НПП «Спецматериалы» с предварительно напряженной арматурой А500С. Размеры плит составляли: длина 4780 мм, ширина 1170 мм (сверху плиты), 1200 мм (снизу плиты), высота 220 мм. Армирование нижней части плиты осуществлено четырьмя несущими продольными арматурами Ø12 мм А500С [1] с предварительным напряжением. Значения толщины защитного слоя бетона до нижней несущей предварительно напряженной

арматуры составляет 20 мм. Плита выполнена из бетона класса В-15. Каждый образец согласно [2] устанавливался опиранием с двух сторон на проем горизонтальной печи с возможностью огневого воздействия на него с нижней стороны и нагружался грузами из калиброванных бетонных блоков через восемь распределительных балок. Для измерения средней температуры и температуры на необогреваемой поверхности каждого образца было установлено по 5 термопар (Т1–Т5): одна термопара (Т1) в центре образца и четыре – в геометрических центрах четвертей образца (рис. 2).

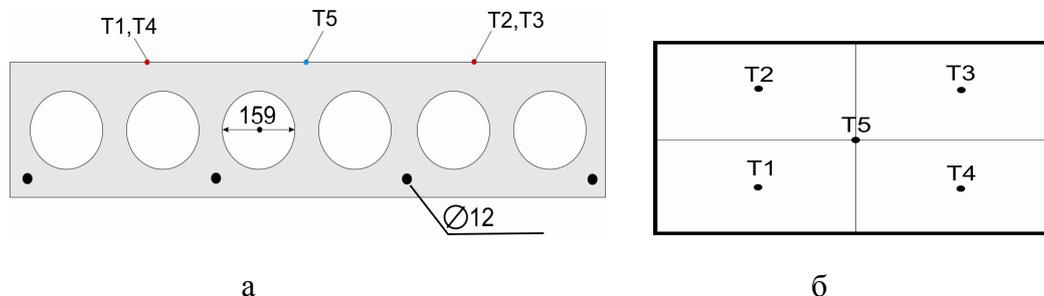


Рис. 2. Схема расположения термопар с необогреваемой поверхностью многопустотного железобетонного перекрытия при испытании на огнестойкость: а – поперечное сечение, проходящее через термопары Т1-Т2; б – вид сверху

Испытания перекрытий без огнезащиты проводились при температуре воздуха 12 °С и относительной влажности воздуха 60%. По результатам испытаний на огнестойкость предел огнестойкости этого перекрытия составил 62 мин (REI 60), что, как будет показано ниже, близко к результату расчетного анализа (рис. 4).

На перекрытия снизу и по бокам с помощью механизированного способа был нанесен слой смеси огнезащитного покрытия «Эндотерм 210104» производства НПП «Спецматериалы» г. Донецк средней толщиной 37 мм. Состав «Эндотерм 210104» представлял собой сухую смесь, состоящую из гидравлических связующих, легких инертных наполнителей и целевых добавок, к которой для приготовления рабочего раствора прибавляется вода. Покрытие служит огнезащитным барьером, предохраняющим строительные конструкции от воздействия огня. Состав позволяет повысить предел огнестойкости несущих металлоконструкций до R240, металлических воздуховодов до EI60, пустотных железобетонных плит перекрытий марки ПК до REI 180.

Результаты испытаний (температуры с необогреваемой поверхности), полученные при испытаниях на огнестойкость многопустотных железобетонных перекрытий без огнезащиты, использовали для сравнения с результатами вычислительного эксперимента – моделирования прогрева этих перекрытий в программной среде ANSYS FLUENT [3] (рис. 3) при нагреве снизу в условиях стандартного температурного режима в огневой печи.

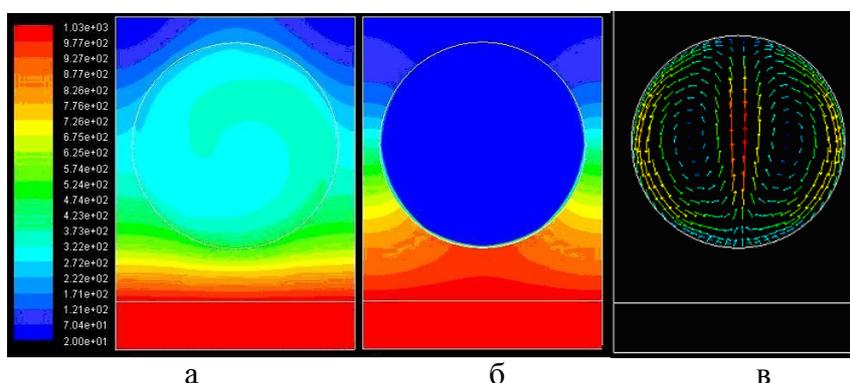


Рис. 3. Распределение температур (а и б) и скоростей воздуха в пустоте (в), полученных 2D моделированием нагрева фрагмента плиты перекрытия (рис.3,б) снизу (испытание без штукатурки) для случаев с учетом (а и в) и без (б) учета радиационно-конвективного теплообмена в полостях для момента времени 60 мин

Как видно из рис. 3, моделирование распределения температур, полученных с помощью двухмерной модели при нагреве фрагмента плиты перекрытия (рис.1), необходимо обязательно проводить с учетом радиационно-конвективного теплообмена в полостях (рис. 3,а,в), т.к. учет только теплопроводности через воздух в полости (рис. 3,б) приводит к заниженным (до 50 %) значениям температур на необогреваемой поверхности перекрытия. Восходящие конвективные потоки воздуха, которые видно по распределению скоростей на рис. 3,в, и наличие радиационного теплообмена между стенками полости перекрытия сильно влияют на значения температур с необогреваемой поверхности. При этом необогреваемая поверхность многопустотного железобетонного перекрытия более интенсивно прогревается, по сравнению с монолитным, потому что пустоты не заполнены бетоном, а через воздух в пустотах хорошо осуществляется радиационный и конвективный теплообмен.

Максимальное расхождение температур составило 5 °С (рис. 4). При моделировании учитывался радиационно-конвективный теплообмен в пустотах перекрытия.

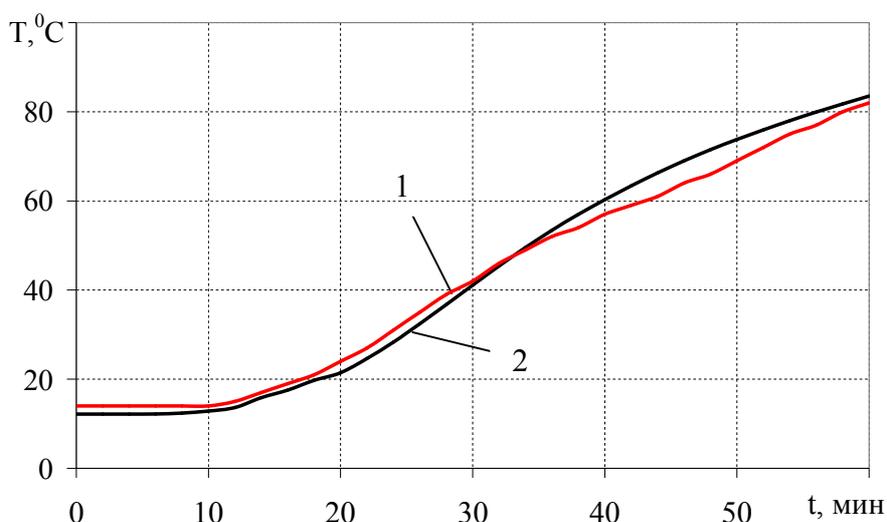


Рис. 4. Зависимость температуры от времени огневого воздействия на необогреваемой поверхности перекрытия без штукатурного покрытия: 1 – полученная по результатам испытаний на огнестойкость; 2 – полученная моделированием

Для определения огнестойкости железобетонных перекрытий использовался критерий потери теплоизолирующей способности путем измерения температуры на необогреваемой поверхности конструкции [4].

Большое значение при этом имеет правильно измеренная температура и правильность размещения термопар на необогреваемой поверхности перекрытия – над пустотами перекрытия или над бетоном между пустотами (полостями) (рис. 6, б). Расчетное исследование нестационарного теплового состояния перекрытия в двухмерной постановке с учетом радиационно-конвективного теплообмена в пустотах перекрытия с помощью программы ANSYS FLUENT показало, что разница температур в указанных выше точках составляет около 20 °С (рис. 5), что существенно влияет на точность оценки огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия как с огнезащитным покрытием, так и без него.

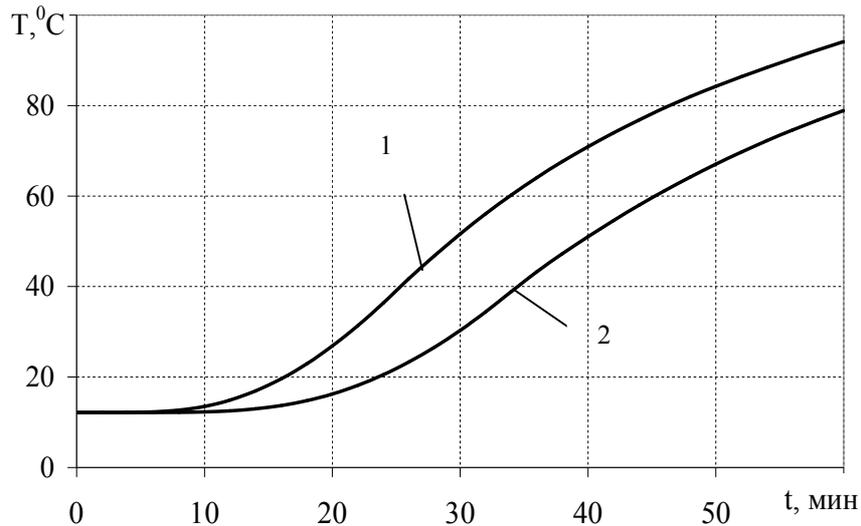


Рис. 5. Зависимость температуры от времени с необогреваемой поверхности перекрытия в разных точках измерения температур: 1 – над полостью; 2 – над перемычкой

Исследования также показали, что температуры сверху и внизу полости отличаются, так как через полость тепло передается конвективно-радиационными механизмами теплообмена более интенсивно, чем теплопроводностью над перемычкой (рис. 5).

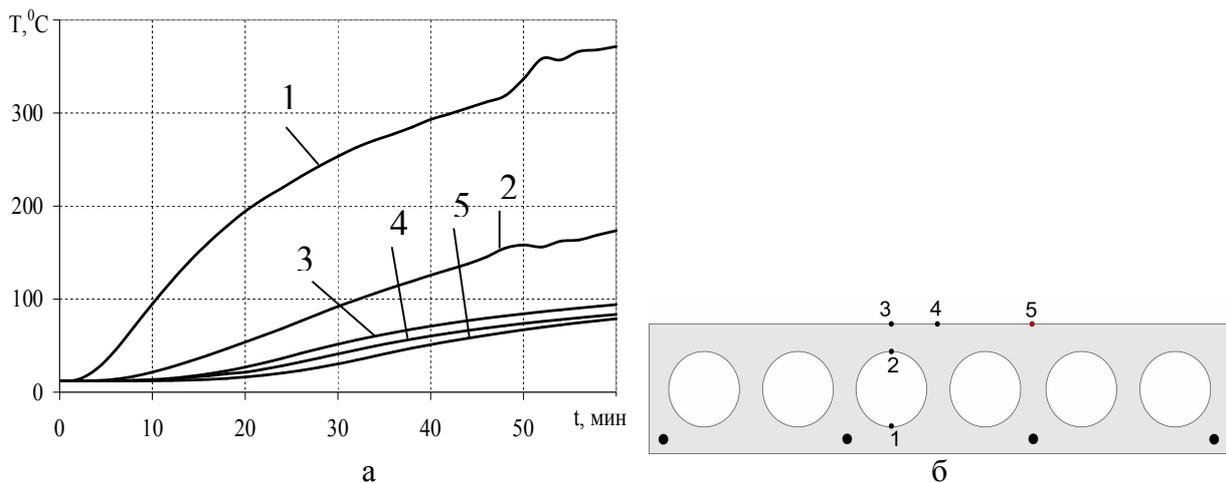


Рис. 6. Зависимости температуры от времени огневого воздействия на необогреваемой поверхности и в полости перекрытия без огнезащитного покрытия (а) и схема расположения точек мониторинга температур (б), полученных с помощью расчета: 1 – низ полости; 2 – верх полости; 3 – над полостью; 4, 5 – между полостями над перемычкой

Применение расчетно-экспериментального подхода для оценки огнестойкости такого перекрытия включает как этапы уточнения ТФХ материала перекрытия, так и определения ТФХ огнезащитного покрытия методом решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) [5,8]. Проведенный расчетный анализ показал, что определение ТФХ огнезащитного покрытия на перекрытиях в двухмерной постановке затруднено из-за большого времени расчета одной прямой задачи (до 25 минут), т.к. количество расчетов таких прямых задач может составлять сотни.

Такие же расчеты при использовании одномерной постановки задачи (например, в программной среде FRIEND [6]) занимают 1–2 минуты. Поэтому важным выводом такого анализа является вывод о необходимости применения упрощенных одномерных моделей те-

плопроводности для определения ТФХ огнезащитного покрытия методом решения ОЗТ в программной среде типа программы FRIEND. Для этого была разработана эквивалентная по тепловому состоянию физическая и математическая модель тепловых процессов, происходящих в исследуемых перекрытиях (рис. 7). Рассмотрим эту модель.

Физическая модель нагрева многопустотного железобетонного перекрытия представляется следующей. При нагреве снизу (рис. 7) теплота теплопроводностью через нижний слой бетона по всей площади перекрытия достигает пустот, прогревая сначала нижнюю их часть. Далее тем же механизмом теплопроводности нагреваются снизу вверх бетонные переемычки по бокам пустот (с существенно меньшей переменной площадью переемычек), и далее – верхний необогреваемый слой бетона опять по всей площади перекрытия. Параллельно с передачей теплоты теплопроводностью по переемычкам через пустоты теплота передается свободной конвекцией воздуха и радиацией от нижних более горячих к верхним более холодным цилиндрическим стенкам пустот.

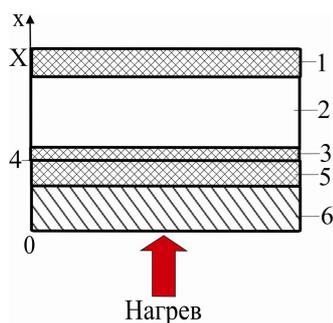


Рис. 7. Схема многопустотного железобетонного перекрытия в одномерной постановке: 1 – слой сплошного бетона между необогреваемой поверхностью и слоем с пустотами перекрытия; 2 – слой с пустотами; 3 – слой сплошного бетона между пустотами и арматурой; 4 – слой арматуры; 5 – слой сплошного бетона от арматуры до обогреваемой поверхности; 6 – штукатурное покрытие

Поскольку объем пустот соизмерим с объемом бетона в переемычках между пустотами перекрытия, то учет радиационно-конвективного теплообмена в пустотах при их нагреве является необходимой и важной особенностью, что и было дополнительного исследовано с помощью компьютерного моделирования.

При использовании одномерной модели теплового состояния представим перекрытие, состоящим из шести слоев толщиной $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$ (рис. 7). Слой 1 – слой сплошного бетона между необогреваемой поверхностью и слоем с пустотами перекрытия, слой 2 – слой с пустотами и переемычками между ними, слой 3 – слой сплошного бетона между пустотами и арматурой, слой 4 – слой сплошного бетона между пустотами и арматурой, слой 5 – слой сплошного бетона от арматуры до обогреваемой поверхности, слой 6 – штукатурное покрытие. Общая толщина перекрытия с покрытием составляет сумму толщин отдельных слоев перекрытия. Нижняя поверхность перекрытия нагревается конвективно-радиационными механизмами теплообмена от горячих газов в печи с температурой T_{C1} , близкой к кривой стандартного пожара [7;8], и коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{c2} = 25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Верхняя поверхность перекрытия охлаждается конвекцией в окружающий воздух с температурой $T_{C2} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Принимается условие идеального теплового контакта между отдельными слоями перекрытия.

Математическая модель процесса теплопроводности, описывающая рассмотренную выше физическую модель (рис. 7) детально описана в [9] и представляет собой одномерное уравнение теплопроводности с учетом лучистого теплообмена и граничными условиями 3-го рода на обогреваемой поверхности и граничными условиями 3-го рода на необогреваемой поверхности.

Как указывалось выше, такая одномерная модель теплового состояния перекрытия необходима для реализации возможности определения ТФХ огнезащитного покрытия (с помощью программ типа FRIEND), что затруднено, сделать при помощи программы ANSYS FLUENT вследствие намного меньшей, по сравнению с программой FRIEND, скоростью счета на компьютере.

Для проведения дальнейшего моделирования использовалась упрощенная одномерная модель прогрева многослойного железобетонного перекрытия, для которого была произведена разбивка плиты на слои (рис. 7) и рассчитаны приведенные толщины каждого из них [10].

Задачи решались по данным испытаний перекрытий на огнестойкость при стандартном температурном режиме пожара [2].

Особую роль при моделировании теплового состояния перекрытия занимает нахождение коэффициента теплопроводности слоя перекрытия с пустотами (рис. 7, слой 2). На основе упрощенной одномерной модели решением ОЗТ было найдено эффективное значение коэффициента теплопроводности слоя 2 с пустотами, при котором наблюдалась наибольшая близость расчетных и экспериментальных температур на необогреваемой поверхности перекрытия (рис. 1).

$$F(P) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (T_{M,j} - T_{Э,j})^2}{m}} \approx \delta, \quad (1)$$

где m – число экспериментальных измерений, используемых для решения обратной задачи; δ – среднеквадратическая ошибка измерения.

Найденный коэффициент теплопроводности слоя 2 был равен 3,18 Вт/м·К. При этом коэффициент теплоотдачи с необогреваемой поверхности задавался как известная из литературы функция от температуры.

При поиске коэффициента теплопроводности слоя 2 с пустотами, были получены расчетные температуры с необогреваемой поверхности перекрытия без огнезащитного покрытия, которые сравнивались с температурами, полученными по результатам испытаний на огнестойкость (рис. 8). При этом критерий среднеквадратичного отклонения расчетных температур от экспериментальных (1) составил 3,22 °С.

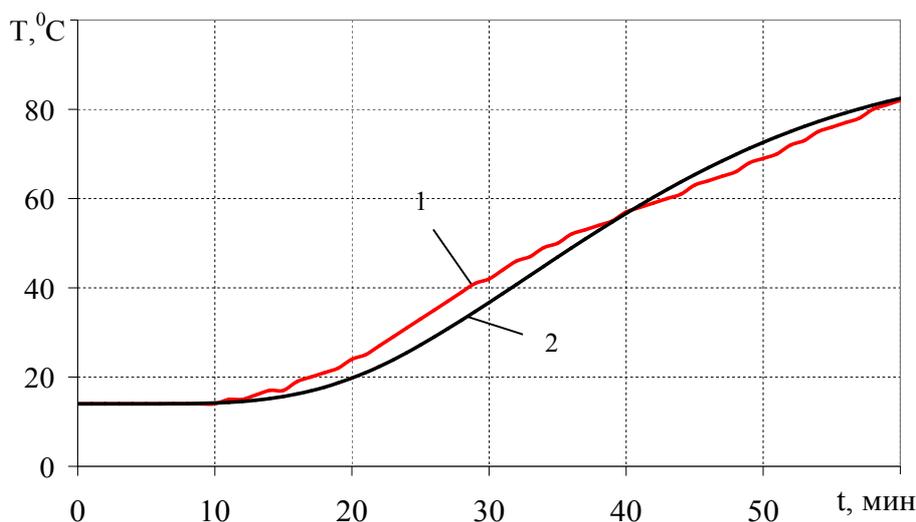


Рис. 8. Зависимость температуры от времени огневого воздействия на необогреваемой поверхности перекрытия без штукатурного покрытия: 1 – полученная по результатам испытаний на огнестойкость; 2 – расчетная кривая, полученная решением ОЗТ

Используя найденные выше ТФХ слоя 2 плиты перекрытия и температуры с необогреваемой поверхности многопустотного железобетонного перекрытия (рис. 10, кривая 1), обработанного огнезащитным штукатурным составом «Эндотерм 210104», решением ОЗТ были получены следующие ТФХ этого покрытия: постоянное значение удельной объемной теплоемкости $C_v = 1,01 \cdot 10^6$, Дж/м³·К, а теплопроводность как функция от температуры (рис. 8).

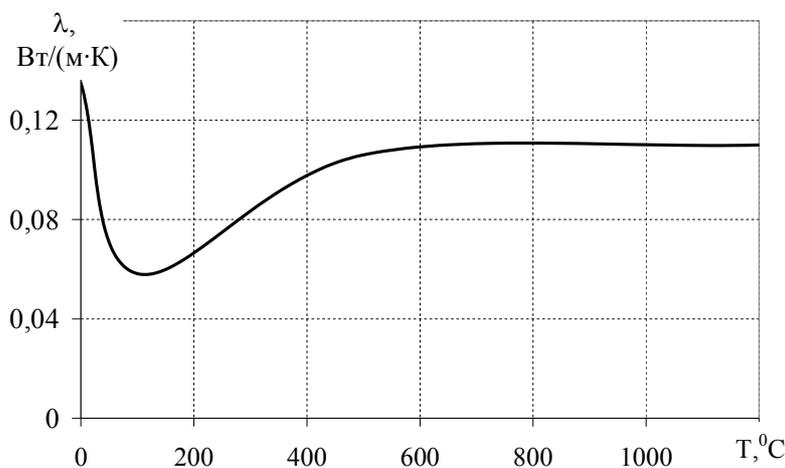


Рис. 9. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности штукатурного покрытия «Эндотерм 210104» от температуры, найденного решением ОЗТ

Как видно из рис. 9, в диапазоне температур от 0 °С до 100 °С значение коэффициента теплопроводности штукатурного покрытия «Эндотерм 210104» падает и проходит через минимальное значение 0,06 Вт/м·К (при температуре 100 °С), что можно объяснить снижением плотности и увеличением пористости покрытия за счет удаления естественной и химически связанной влаги. Рост коэффициента теплопроводности в диапазоне температур от 100 °С до 600 °С, по-видимому, объясняется появлением радиационной составляющей в порах покрытия в сочетании с его высокотемпературной усадкой.

На рис. 10 наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных температур, для которых критерий среднеквадратичного отклонения (1) составляет 1,7 °С, а максимальное расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры составляет около 9%.

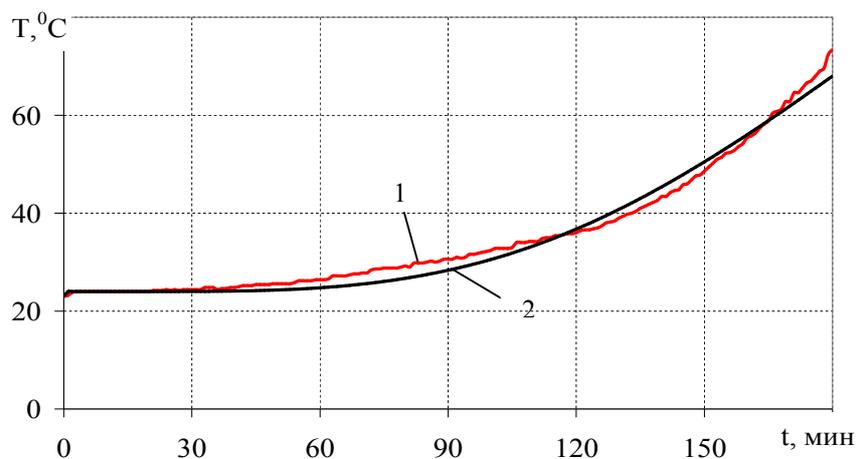


Рис. 10. Зависимость температуры от времени огневого воздействия на необогреваемой поверхности образца со штукатурным покрытием: 1 – полученная по результатам испытаний на огнестойкость; 2 – расчетная кривая, полученная решением ОЗТ

Коэффициент теплоотдачи с необогреваемой поверхности $\alpha_{с2}$ при поиске ТФХ покрытия «Эндотерм 210104» также задавался как известная из литературы функция от температуры.

Используя упрощенную одномерную модель теплового состояния многопустотного железобетонного перекрытия (рис. 7), было проведено исследование прогрева такого перекрытия с учетом конвективно-радиационного теплообмена в полостях перекрытия и прогрева такого же перекрытия с заполнением пустот бетоном (так называемое монолитное перекрытие). В результате установлено, что радиационно-конвективный теплообмен в пустотах приводит к более интенсивному (примерно в 2 раза на 60-й минуте), по сравнению с монолитными перекрытиями, нагреву необогреваемой поверхности перекрытия в условиях испытаний на огнестойкость (рис. 11).

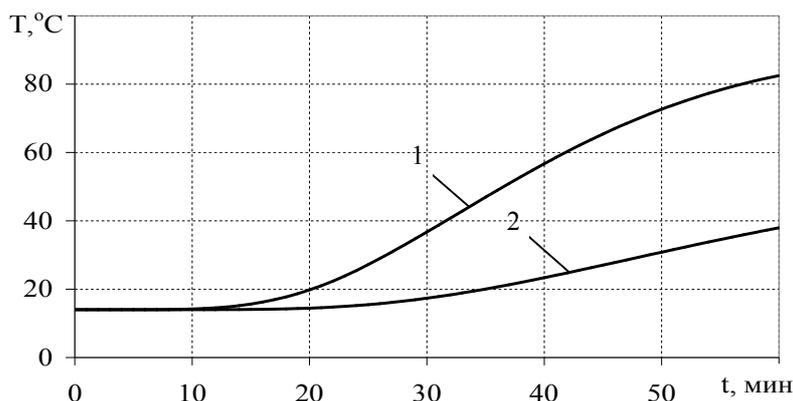


Рис. 11. Зависимость температуры от времени с необогреваемой поверхности перекрытия: 1 – многопустотного железобетонного перекрытия; 2 – монолитного железобетонного перекрытия

Проведено исследование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия без- и с огнезащитным штукатурным покрытием «Эндотерм 210104» расчетно-экспериментальным методом на основе двух- и одномерных моделей теплопроводности и конвективного теплообмена, используя результаты испытаний на огнестойкость. Показана возможность и методика использования упрощенных одномерных моделей, эквивалентных двухмерным, для определения теплофизических характеристик огнезащитного штукатурного покрытия «Эндотерм 210104». В результате, получены выводы, представленные ниже.

Выводы.

1. Исследованы особенности процессов теплообмена в полостях многопустотных железобетонных перекрытий с помощью двухмерной (в программной среде **ANSYS FLUENT**) и одномерной (в программной среде **FRIEND**) моделей. Приведено обоснование необходимости использования одномерных моделей для анализа теплофизических характеристик и характеристики огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий. При этом выявлено влияние радиационно-конвективного теплообмена в пустотах, которое приводит к более интенсивному (примерно в 2 раза), по сравнению с монолитными перекрытиями, нагреву необогреваемой поверхности перекрытия в условиях испытаний на огнестойкость.

2. Определены постоянное значение коэффициента теплопроводности слоя с пустотами многопустотного железобетонного перекрытия, равное 3,18 Вт/м·К, и зависимость коэффициента теплопроводности штукатурного огнезащитного покрытия «Эндотерм 210104», нанесенного на перекрытие, от температуры.

3. Полученные коэффициенты рекомендуется использовать для моделирования теплового состояния многопустотных железобетонных перекрытий и достоверной оценки огнестойкости таких конструкций при проектировании зданий и сооружений.

Список литературы:

1. **Прокат** арматурный для железобетонных конструкций (ISO 6935-2:1991, NEQ) : ДСТУ 3760:2006. – [Чинний від 2006-12-11]. – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – 28 с. – (Національний стандарт України).
2. **Захист від пожежі.** Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ) : ДСТУ Б В.1.1-20:2007. – [Чинний від 2007-10-26]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 14 с. – (Національний стандарт України).
3. **Ansys Fluent / Basic Analysis Produced Guide.** Rel. 2.3.
4. **Эффективность** вспучивающихся огнезащитных покрытий железобетонных конструкций при различных режимах пожара / П. Г. Круковский, Е. В. Качкар, А. И. Ковалев [и др.] // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2010. – № 1(21). – С. 75–83.
5. **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.
6. **Круковский П. Г.** Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) / Павел Григорьевич Круковский. – Киев : Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 218 с.
7. **Кошмаров Ю. А.** Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / Ю. А. Кошмаров, М. П. Башкирцев. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1987. – 444 с.
8. **Круковский П. Г.** Расчетно-экспериментальный подход к анализу процессов тепломассообмена (методология и примеры применения) / П. Г. Круковский // Промышленная теплотехника (приложение к журналу). – 2003. – Т. 25, № 4. – С. 396–398.
9. **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.
10. **Круковский П.Г.** Методика определения характеристики огнезащитной способности покрытий многопустотных железобетонных плит перекрытий / П.Г. Круковский, А.И. Ковалев // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2011. – № 1 (23). – С. 87-101.

П. Г. Круковский, А. И. Ковалев, К. А. Черненко, М. А. Метель, А. А. Абрамов,

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И ОГНЕСТОЙКОСТИ МНОГОПУСТОТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ

Проведено исследование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия без- и с огнезащитным штукатурным покрытием «Эндотерм 210104» с помощью испытаний на огнестойкость и расчетно-экспериментального метода на основе двух- и одномерных моделей теплопроводности и конвективного теплообмена. Показана возможность и методика использования упрощенных одномерных моделей, эквивалентных двухмерным.

Ключевые слова: моделирование, многопустотные железобетонные перекрытия, огнестойкость, штукатурные огнезащитные покрытия

MODELLING OF THERMAL STATE AND FIRE-RESISTANCE QUALITY OF HOLLOW CORE ARMoured CONCRETE FLOORS

Thermal state and fire-resistance quality of hollow core armoured concrete floor with and without fireproof plaster coating “Endoterm 210104” by means of fire resistance test and experiment-calculated method based on the one- and two-dimensional models of thermal conductivity and thermal convection are researched. The possibility and methodology of usage of simplified one-dimensional models as equivalent to two-dimensional models are shown.

Key words: modeling, hollow core armoured concrete floors, fire resistance, fireproof plaster coating.

