

УДК 614.841.332

**ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОТ
НЕОБОГРЕВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ
ПЕРЕГОРОДОК ИЗ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ****к.т.н. Е.В. Качкар, к.т.н., с.н.с А.И. Ковалев***Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля*

Постановка проблемы. Анализ теплового состояния многослойных перегородок с минераловатными плитами (в данной работе трехслойных сэндвич-панелей) и выработка рекомендаций для проектирования зданий из таких конструкций, возможен с помощью моделирования тепловых процессов происходящих при огневом воздействии на исследуемые образцы. Существует множество моделей теплового состояния многослойных перегородок с минераловатными плитами различного уровня сложности и назначения [1,2]. Однако в этих моделях присутствуют параметры, которые являются индивидуальными для каждой перегородки и они известны с недостаточной точностью, поэтому точность расчета теплового режима многослойных перегородок в значительной мере определяется точностью задания параметров модели, что обеспечивает ее адекватность реальным процессам теплообмена при огневых испытаниях.

Анализ последних исследований и публикаций. Это параметры (в данной работе): коэффициент теплоотдачи от горячих газов к нагреваемой металлической поверхности (α_{c_1}), коэффициент теплоотдачи от металлической поверхности в воздух необогреваемой поверхности перегородки (α_{c_2}), коэффициент излучения металлического листа перегородки (ϵ), коэффициент теплопроводности (λ) и удельная объемная теплоемкость (C_v). С одной стороны, если параметры коэффициентов теплоотдачи от горячих газов к нагреваемой металлической поверхности и излучения металлического листа перегородки можно оценить, то величины коэффициентов теплоотдачи от металлической поверхности в воздух с необогреваемой стороны перегородки, теплопроводности и удельной объемной теплоемкости многослойных перегородок в основном, возможно, определить (идентифицировать) только по данным экспериментального измерения температур при огневых испытаниях. Под идентификацией подразумевается нахождение таких значений параметров тепловой модели, которые обеспечивают близость экспериментальных и расчетных значений температур при решении прямых и обратных задач теплопроводности. С другой стороны среди параметров модели идентифицировать необходимо 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 данном случае на характеристику огнестойкости) называется анализом чувствительности, порядок определения которого детально описан в [3,4].

Постановка задачи и ее решение. Задачей исследования является определение влияния коэффициента теплоотдачи от металлической поверхности в воздух от необогреваемой поверхности перегородки (α_{c_2}), которая обеспечи-

вает достоверность расчетов зависимости минимальной толщины перегородки от необходимого предела огнестойкости.

Изложение основного материала исследования. Рассмотрим влияние точности задания параметра α_{c_2} на зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости. Для определения влияния данного коэффициента на зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости, решен ряд тестовых задач, в которых имитировались изменения данного коэффициента (в пределах 10-20%) при вычислительном эксперименте.

С целью упрощения расчетов конвективного теплообмена в помещении, где проводятся испытания, принимают допущение, что температура воздуха в каждый момент времени одинакова по всему объему помещения. Таким образом, расчет конвективного теплообмена в помещении сводится к вычислению конвективных тепловых потоков между поверхностями испытуемых образцов и воздухом, омывающими (обдувающими) эти поверхности, по формуле (1):

$$Q_{\kappa} = \alpha_{\kappa} (\tau_{\text{в.п.}} - t_{\text{в}}) F \quad (1)$$

где α_{κ} – коэффициент конвективной теплоотдачи между поверхностью и омывающим ее воздухом; $\tau_{\text{в.п.}}$, $t_{\text{в}}$ – соответственно температура поверхности и воздуха; F – площадь поверхности образцов, омываемой воздухом.

Особенности конвективного теплообмена в помещении учитывает эмпирическая формула (2), для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи, предложенная В.Н. Богословским [5]:

$$\alpha_{\kappa} = A \sqrt[3]{|t_{\text{в}} - \tau_{\text{в.п.}}| + 60 \frac{v_{\text{в}}^2}{l} \pm \frac{1}{2} c_{\phi} j_{\phi}} \quad (2)$$

где A – эмпирический коэффициент, который в условиях помещения для вертикальных поверхностей равен 1,66, для горизонтальных поверхностей при потоке тепловых потоков снизу вверх равен 2,16; при потоке тепловых потоков сверху вниз равен 1,16; $v_{\text{в}}$ – общая подвижность воздуха в помещении; l – характерный размер поверхности помещения; c_{ϕ} – удельная теплоемкость воздуха; j_{ϕ} – расход фильтруемого воздуха через единицу поверхности ограждения.

Параметр j_{ϕ} в правой части уравнения (2) учитывает влияние на коэффициент конвективного теплообмена воздуха, который происходит, как правило, в зимнее время через наружные ограждения. При эксфильтрации этот член принимается со знаком «плюс», при инфильтрации - со знаком «минус».

Проведенный выше анализ показывает, что для достоверного описания тепловых процессов в перегородке при огневом воздействии необходимо с максимальной точностью описывать теплообмен на поверхности перегородки, которая не обогревается. Поскольку температура на этой поверхности достигает 180 °С и выше, то необходимо учитывать смешанный радиационно-конвективный теплообмен. Установлено [5], что α_{c_2} – коэффициент теплоотдачи от необогреваемой поверхности перегородки сильно влияет на температуру поверхности сэндвич-панели, которая подвергается огневому испытанию. Такие зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры при разных режимах представлены на рис. 1.

Для конвективно-радиационного теплообмена внутри помещения использовалась формула:

$$\alpha_{c2} = 1,66 \left(|T(X,t) - T_{c2}| + 60 v_b^2 / h \right)^{0,33} + \varepsilon C_0 \left[(T(X,t) / 100)^4 - (T_{c2} / 100)^4 \right] / (T(X,t) - T_{c2}), \quad (3)$$

где 1,66 – коэффициент для вертикальных поверхностей; $v_b=0,3\pm 0,65$ – скорость воздуха внутри помещения; $h=3,2$ м – характерный размер для испытуемых образцов, $C_0=5,67$; $\varepsilon=0,65$ [4].

Первое слагаемое зависимости (3) описывает конвективный теплообмен, второе – радиационный теплообмен. На рис. 1, представлены зависимости влияния скорости (подвижности) воздуха на поверхности испытуемой перегородки.

Очевидно, что в выбранных зависимостях уровень коэффициента теплоотдачи α_{c2} в разы (до 4-х раз) отличается от значения, рекомендуемого Еврокодами [7], в данной работе этот коэффициент составлял $\alpha_{c2}=8$ Вт/(м²К). Предложенная зависимость (3) и позволила получить наиболее точный результат, при котором критерий среднеквадратичного отклонения температур при решении обратных задач теплопроводности составил ≤ 1 , и позволила применять расчетно-экспериментальный метод для определения минимальной толщины перегородки от предела огнестойкости. При этом определение коэффициента α_{c2} сводилось к уточнению скорости (подвижности) воздуха V_b на поверхности перегородки.

С учетом представленных на рис. 1 зависимостей, решены обратные задачи теплопроводности, в результате которых получены зависимости коэффициентов теплопроводности (рис. 2) и удельной объемной теплоемкости (рис. 3), а также показано влияние изменения коэффициента теплоотдачи от металлической поверхности в воздух на необогреваемой поверхности перегородки на ТФХ исследуемой сэндвич-панели. При этом, значение α_{c2} изменялось от исходного на 10% и 20%, имитируя неточности при задании этого параметра в исходном условии.

Нахождение зависимости толщины исследуемой перегородки от предела огнестойкости (рис. 4) при $\alpha_{c2}=f(T)$ и постоянных значений ТФХ: $C_v=\text{const}$, $\lambda=\text{const}$ (в качестве исходных данных взяты результаты огневых испытаний перегородки с толщиной внутреннего минераловатного слоя 60 мм):

1) при $C_v=f(T)$, $\lambda=f(T)$, $\alpha_{c2}=f(T)$, среднеквадратичное отклонение температур $\Phi=0,57$; (результат - кривая 1 рис. 2-4);

2) при $C_v=\text{const}$, $\lambda=f(T)$, $\alpha_{c2}=f(T)$, среднеквадратичное отклонение температур $\Phi=1,831$; (результат - кривая 1 рис. 2-4);

3) при $\lambda=\text{const}$, $C_v=\text{const}$, $\alpha_{c2}=f(T)$, среднеквадратичное отклонение температур $\Phi=16,202$ (результат – кривая 3 рис. 2-4);

4) при $\lambda=f(T)$, $C_v=f(T)$, $\alpha_{c2}=8$ Вт/(м²К), среднеквадратичное отклонение температур $\Phi=12,47$ (результат – кривая 4 рис. 4).

Проанализировав результаты испытаний (точки 5 и 6 рис. 4) и расчетных пределов огнестойкости для перегородок SANDWICHROCK фирмы ROCKWOOL толщиной 60 и 150 мм (кривая 1), можно констатировать их удовлетворительную сходимость. Расчетные значения предела огнестойкости перегородки отличаются от экспериментальных значений на 4%. Кривая 4 – зависимость, полученная при постоянных значениях $\alpha_{c2}=8$ Вт/(м²К), при этом критерий среднеквадратичного отклонения при решении ОЗТ составил 10,8 °С, а расхождение расчетных и экспериментальных значений огнестойкости составил около 30%.

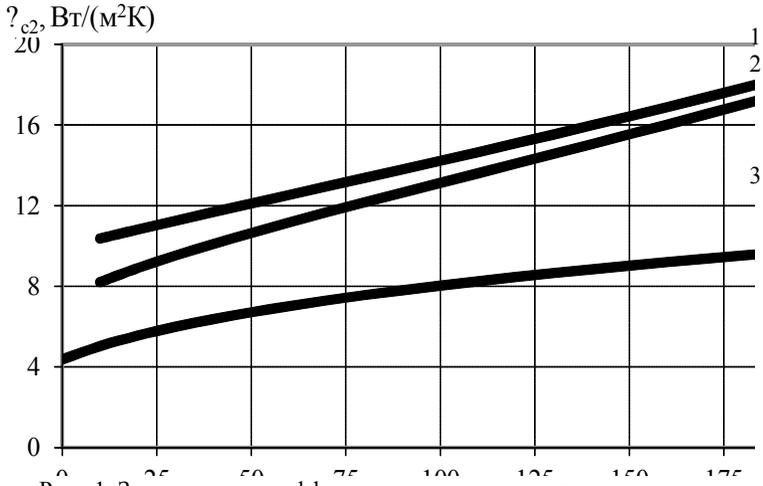


Рис. 1 Зависимость коэффициента теплоотдачи α_{c2} от температуры на поверхности перегородки. Кривая 1 – конвективно-радиационный теплообмен при скорости воздуха – 2 м/с; 2 – конвективно-радиационный теплообмен при скорости воздуха – 1 м/с; 3 – конвективный теплообмен при скорости воздуха – 1 м/с.

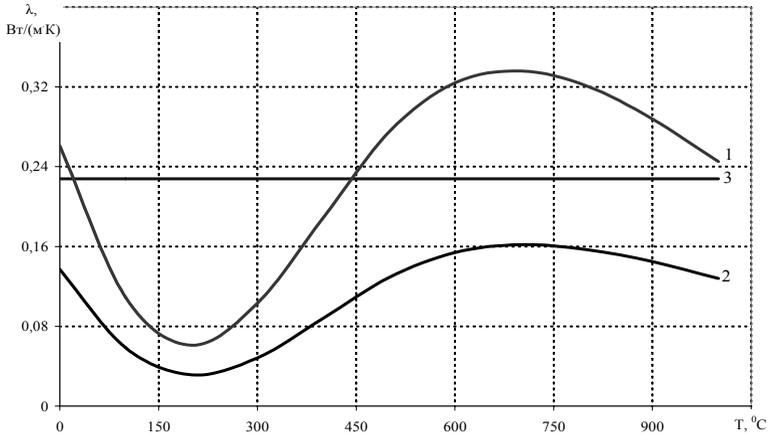


Рис. 2 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, полученная при решении ОЗТ, для перегородки с толщиной внутреннего минераловатного слоя 60 мм: кривая 1 – точная; кривая 2 – при $C_v = \text{const}$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = f(T)$; кривая 3 – $\lambda = \text{const}$, $C_v = \text{const}$, $\alpha_{c2} = f(T)$.

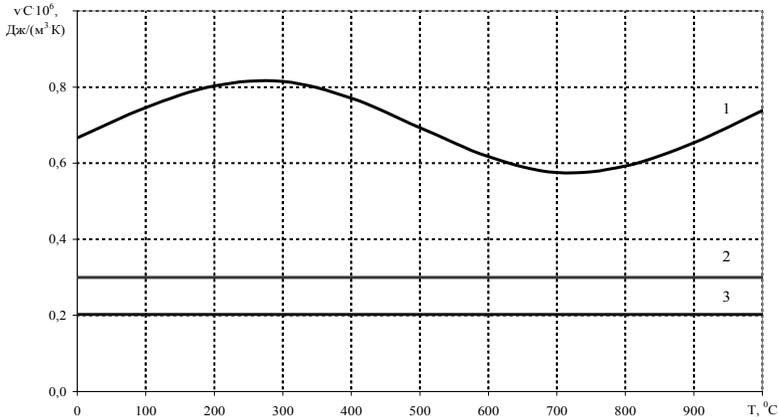


Рис. 3 Зависимость удельной объемной теплоемкости от температуры, полученная при решении ОЗТ, для перегородки толщиной 60 мм: кривая 1 – точная; кривая 2 – при $C_v = \text{const}$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{e2} = f(T)$; кривая 3 – $\lambda = \text{const}$, $C_v = \text{const}$, $\alpha_{e2} = f(T)$.

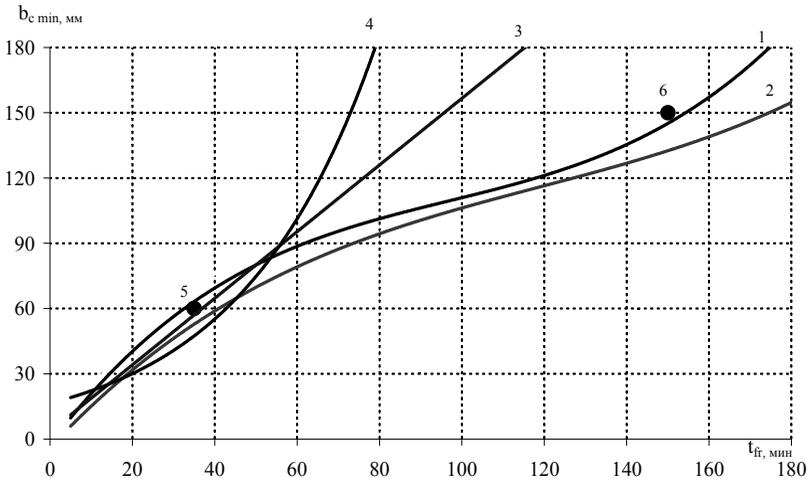


Рис. 4 Зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости, при решении ПЗТ: кривая 1 – точная; кривая 2 – при $C_v = \text{const}$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{e2} = f(T)$; кривая 3 – $\lambda = \text{const}$, $C_v = \text{const}$, $\alpha_{e2} = f(T)$, кривая 4 – при $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{e2} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ в соответствии с [7], точка 5 и 6 – предел огнестойкости перегородки SANDWICHROCK фирмы ROCKWOOL толщиной 60 и 150 мм, полученные экспериментальным путем.

Выводы.

Сравнение пределов огнестойкости для перегородки из сэндвич-панели SANDWICHROCK фирмы ROCKWOOL, толщиной 60 мм (рис. 4), свидетельствуют о сильном влиянии точности задания параметра α_{c2} на зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости. Расчетные значения предела огнестойкости перегородки с заданными параметрами: $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = f(T)$ отличаются на 30% от упрощенного, где применены постоянные значения.

В данной работе проведено исследование тепловых процессов в перегородках, при одностороннем огневом воздействии и научно обосновано точность задания параметра α_{c2} на зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости, которые показали сильное влияние граничного условия, описывающего процессы теплоотдачи на необогреваемой поверхности перегородки, на точность определения пределов огнестойкости исследуемой конструкции.

По мнению авторов, влияние точности задания параметра коэффициента теплоотдачи от испытуемого объекта в окружающую среду, на огнестойкость исследуемых строительных конструкций, которые при испытании подвержены как естественной (подвижности) воздуха, так и принудительному обдуву, как, например, при испытаниях на огнестойкость воздуховодов с огнезащитой, необходимо учитывать зависимость (3), что позволит получить наиболее точный результат по определению характеристики огнестойкости.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Круковский П.Г. Идентифицируемость параметров модели теплового режима типовой двухкомнатной квартиры / Круковский П.Г., Тадля О.Ю. // Промышленная теплотехника. – 2007. – Киев: № 5 – С. 54–63.
2. Круковский П.Г., Розробка й апробація методичного забезпечення застосування розрахунково-експериментального підходу для визначення залежності товщини перегородок від межі вогнестійкості / Круковский П.Г., Качкар Є.В. // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2009. – Черкаси: АПБУ, – Вип.3. – С. 98–111.
3. Качкар Е.В., Идентифицируемость параметров модели теплового состояния сэндвич-панелей с минераловатными плитами / Качкар Е.В. // Проблемы ПБ. – Харьков: НУГЗУ, 2010. – Вып.27. – С.70–76.
4. Качкар Є.В. Обґрунтування параметрів тришарових перегородок з мінераловатними плитами для будівель та споруд з урахуванням їх вогнестійкості: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / Є.В. Качкар. – Київ, 2009. – 22 с.
5. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха).- М.: Высшая школа, 1970. – 376 с.
6. Фрамм Дж. Численное изучение конвекции в потоках, движущихся в закрытых помещениях // Численные методы в механике жидкостей.- М.: Мир. – 1973. – С. 171–176.
7. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.