

УДК 614.841.332

Е.В. Качкар, к.т.н., Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ ПЕРЕГОРОДОК ИЗ СЕНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

В данной работе проведено исследование тепловых процессов в перегородках, при одностороннем огневом воздействии и влияние точности задания коэффициента теплоотдачи 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.

Ключевые слова: огнестойкость, параметры, трехслойные перегородки, моделирование

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 определенное количество 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. Это параметры (в данной работе): коэффициент теплоотдачи от горячих газов к нагреваемой металлической поверхности (α_{c1}), коэффициент теплоотдачи от металлической поверхности в воздух необогреваемой поверхности перегородки (α_{c2}), 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].

Анализ последних исследований и публикаций. В соответствии с [4] расчетно-экспериментальный метод является способом анализа, оптимизации и прогнозирования исследуемых процессов теплообмена на основе компьютерной (расчетной) модели, адекватность которой обеспечивается путем параметрической или структурной идентификации с помощью экспериментальной информации об исследуемом процессе, и решении обратных задач.

Расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) занимает свое определенное место среди подходов (основных методов) исследования (анализа) физических процессов (рис. 1). Основой РЭМ является математическая (расчетная, компьютерная) модель исследуемого физического процесса, а

эксперимент (экспериментальные данные) является вспомогательной составляющей, необходимой для обеспечения адекватности выбранной модели процесса.

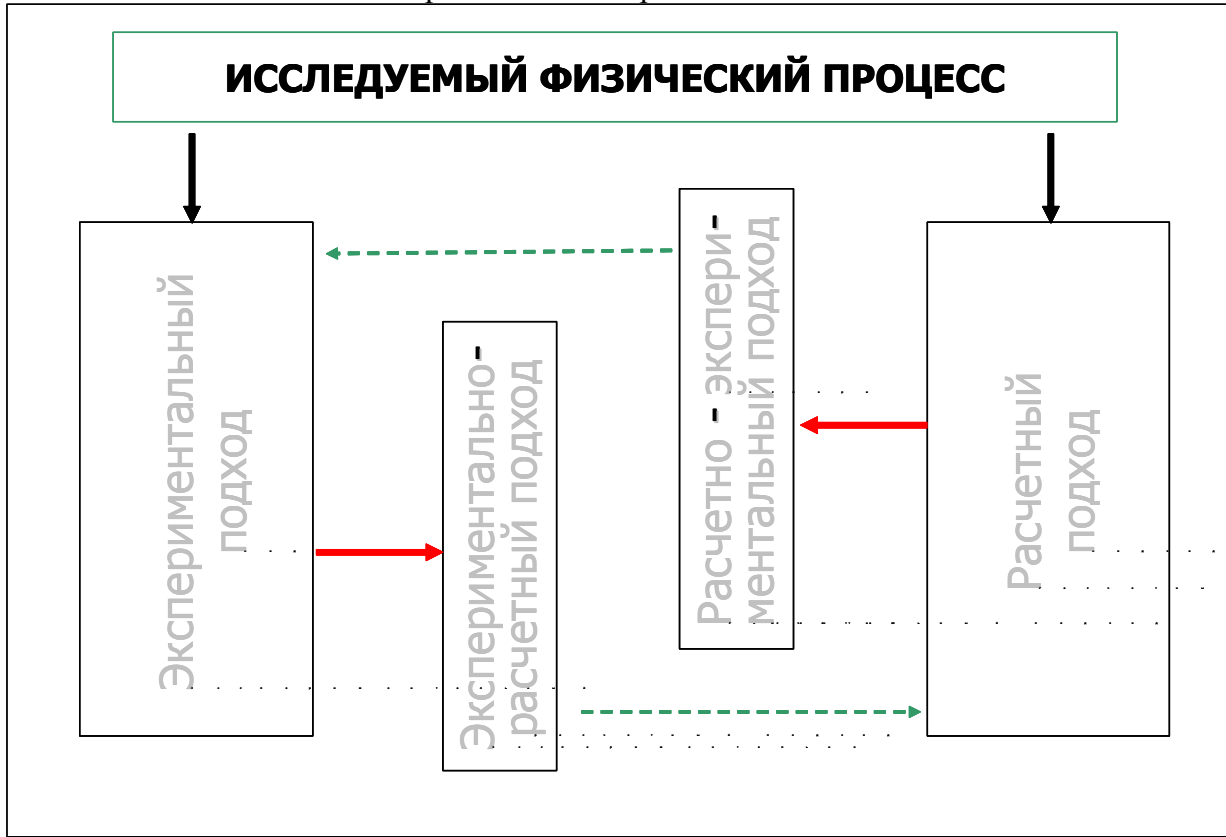


Рисунок 1 – Основные подходы, используемые для анализа физических процессов.

Постановка задачи и ее решение. Задачей исследования является определение влияния коэффициента теплоотдачи от металлической поверхности в воздух от необогреваемой поверхности перегородки (α_{c2}), которая обеспечивает достоверность расчетов зависимости минимальной толщины перегородки от необходимого предела огнестойкости.

Основные составляющие и алгоритм разработки методического обеспечения расчетно-экспериментального метода, показаны на рис. 2.

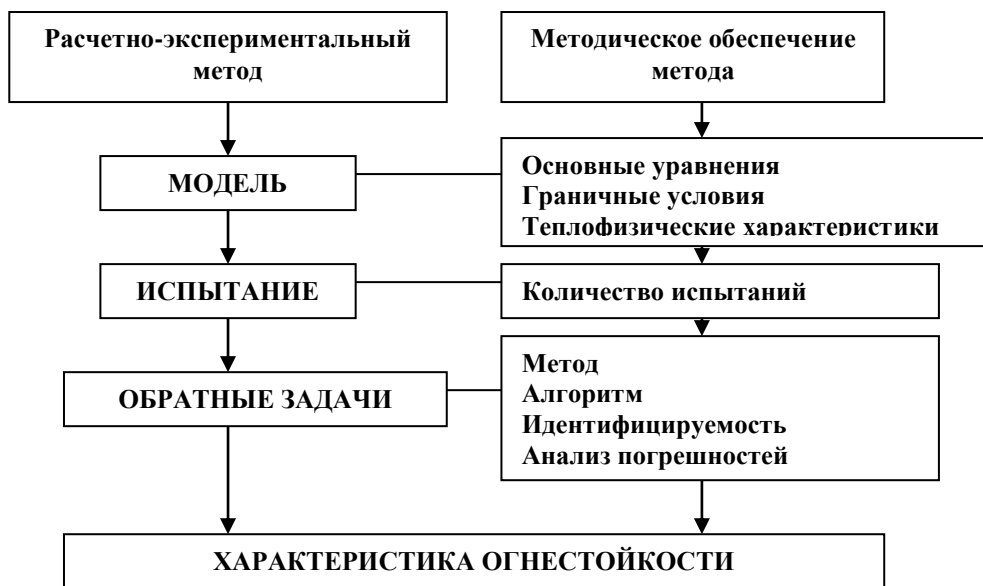


Рисунок 2 – Схема расчетно-экспериментального метода и основные составляющие его методического обеспечения.

Как было отмечено выше, составляющими и алгоритмическими шагами методического обеспечения расчетно-экспериментального подхода являются:

1. Выбор составляющих математической модели процессов теплообмена, происходящих в исследуемом объекте, которые адекватно описывают распределение температур, как по толщине, так и на поверхности образцов во время их испытаний в огневой печи.
2. Обоснованное и экспериментально подтвержденное количество образцов, минимально необходимых для определения характеристики огнестойкости исследуемого объекта.
3. Правильно выбранный метод и алгоритм решения обратных задач для определения теплофизических характеристик присутствующего в исследуемом объекте огнезащитного или теплозащитного материалов, а также, при необходимости, определения других характеристик и коэффициентов математической модели.
4. Анализ идентифицируемости характеристик и коэффициентов математической модели выбранных в п. 3, где под идентифицируемостью подразумевается принципиальная возможность получения характеристик и коэффициентов математической модели с помощью выбранного метода решения обратных задач по данным огневых испытаний.
5. Анализ погрешностей определения характеристик огнестойкости исследуемого объекта, которые определяются как погрешностями измерений параметров и температур испытываемых образцов, так и погрешностями определения теплофизических характеристик теплозащитных материалов и других составляющих математической модели.

Реализация этапов описанного выше алгоритма возможна на основе решения, так называемых, методических (тестовых) задач, в которых натурный эксперимент (испытания) заменяется вычислительным экспериментом, с помощью которого представляется возможным провести исследования и ответить на все поставленные выше задачи.

В тестовых задачах (рис. 3) параметры модели заданы и решением прямых задач теплопроводности определяется нестационарное температурное распределение в исследуемом объекте.

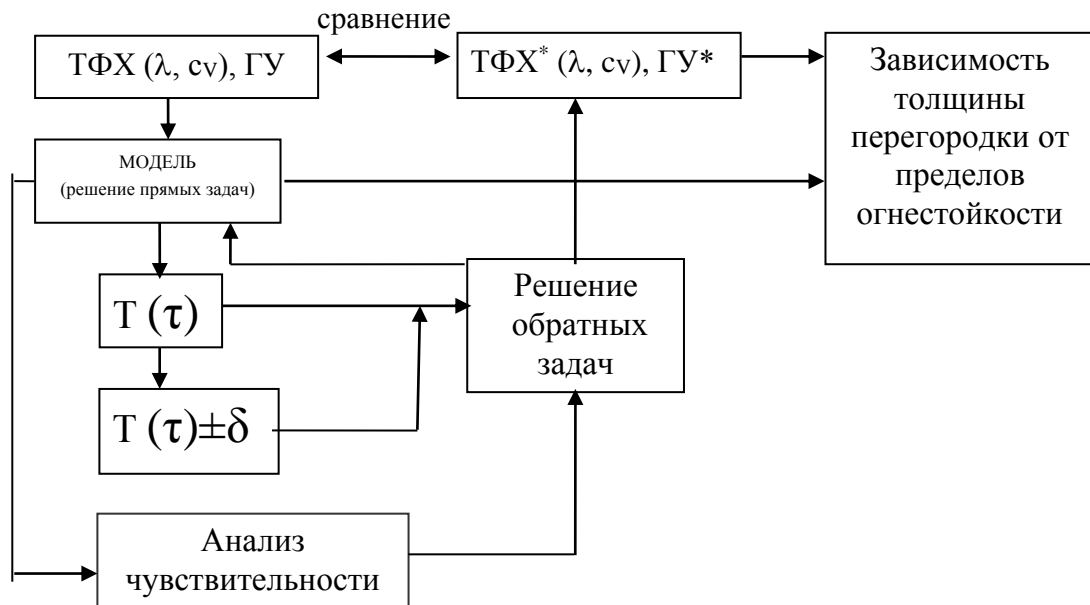


Рисунок 3 – Схема решения тестовых (методических) задач.

Затем полученные температуры искажаются, имитируя ошибки при измерении температур, и по температурам с погрешностями $T(\tau) \pm \delta$ обратными задачами определяются параметры модели и сравниваются с заданными (известными) параметрами. Это дает возможность определения параметров модели с необходимой точностью, а также установить необходимое количество испытаний для определения этих параметров модели и зависимости

толщины перегородки от предела огнестойкости. Целесообразность такого анализа диктуется также необходимостью обеспечения максимально возможной информативности и достоверности получаемых экспериментальных данных при минимально возможном количестве проводимых экспериментов. Но, если алгоритм разработки методического обеспечения расчетно-экспериментального метода для определения зависимости толщины многослойных перегородок от требуемого предела огнестойкости детально описан [2,3], то такому важному параметру как - коэффициент теплоотдачи от металлической поверхности в воздух от необогреваемой стороны перегородки (α_{c2}) и его влияние на определение огнестойкости сэндвич-панели уделено недостаточно внимания.

Изложение основного материала исследования.

Рассмотрим влияние точности задания параметра α_{c2} 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 испытании.

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):

$$Q_k = \alpha_k (\tau_{в.п.} - t_в) F \tag{1}$$

где α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи между поверхностью и омывающим ее воздухом; $\tau_{в.п.}$, $t_в$ – 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]:

$$\alpha_k = A^3 \sqrt[3]{|t_в - \tau_{в.п.}| + 60 \frac{v_в^2}{l}} \pm \frac{1}{2} c_\phi j_\phi \tag{2}$$

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; $v_в$ – 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_{c2} – 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. 4.

Для конвективно-радиационного теплообмена внутри помещения использовалась формула:

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

где 1,66 – коэффициент для вертикальных поверхностей; $v_b=0,3 \div 0,65$ – 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. 4, представлены зависимости влияния скорости (подвижности) воздуха на поверхности испытуемой перегородки.

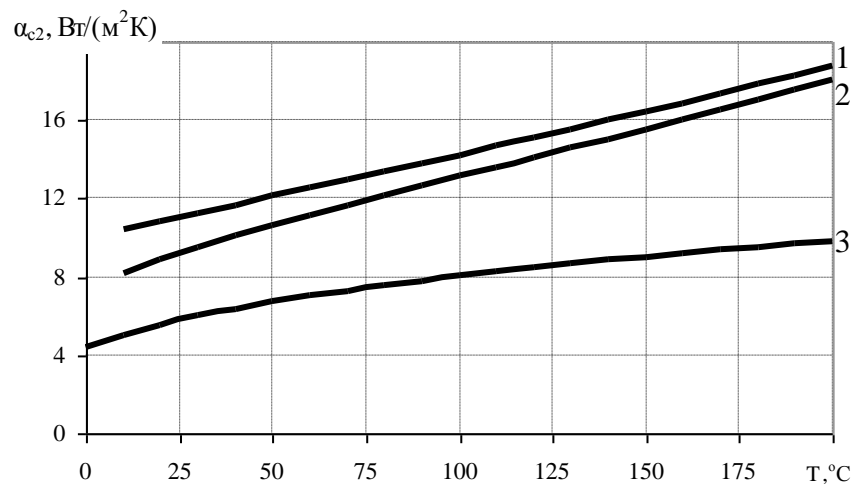


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α_{c2} от температуры на поверхности перегородки. Кривая 1 – конвективно-радиационный теплообмен при скорости воздуха – 2 м/с; 2 – конвективно-радиационный теплообмен при скорости воздуха – 1 м/с; 3 – конвективный теплообмен при скорости воздуха – 1 м/с.

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.

Решение практических задач.

С учетом представленных на рис. 4 зависимостей, решены обратные задачи теплопроводности в результате которых получены зависимости коэффициентов теплопроводности (рис. 5) и удельной объемной теплоемкости (рис. 6), 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. 7) 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 $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = f(T)$, среднее квадратичное отклонение температур $\Phi = 0,57$; (результат - кривая 1 рис. 5-7);
- 2) при $C_v = \text{const}$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = f(T)$, среднее квадратичное отклонение температур $\Phi = 1,831$; (результат - кривая 1 рис. 5-7);
- 3) при $\lambda = \text{const}$, $C_v = \text{const}$, $\alpha_{c2} = f(T)$, среднее квадратичное отклонение температур $\Phi = 16,202$ (результат - кривая 3 рис. 5-7);
- 4) при $\lambda = f(T)$, $C_v = f(T)$, $\alpha_{c2} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, среднее квадратичное отклонение температур $\Phi = 12,47$ (результат - кривая 4 рис. 7).

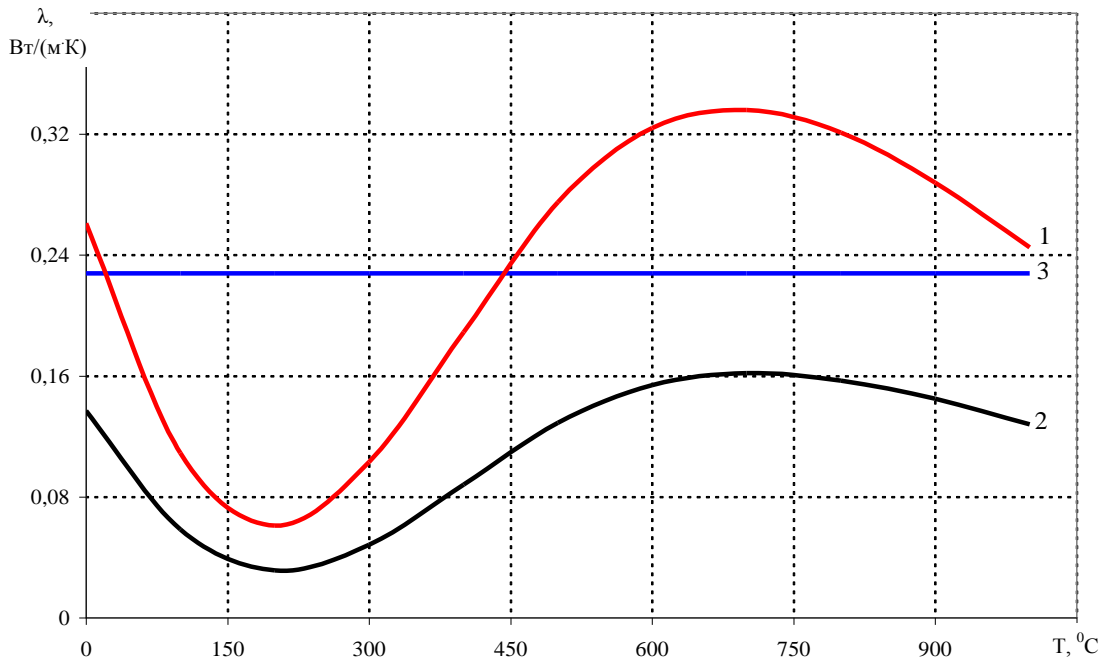


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, полученная при решении ОЗТ, для перегородки с толщиной внутреннего минераловатного слоя 60 мм: кривая 1 – точная; кривая 2 – при $C_v = \text{const}$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = f(T)$; кривая 3 – $\lambda = \text{const}$, $C_v = \text{const}$, $\alpha_{c2} = f(T)$.

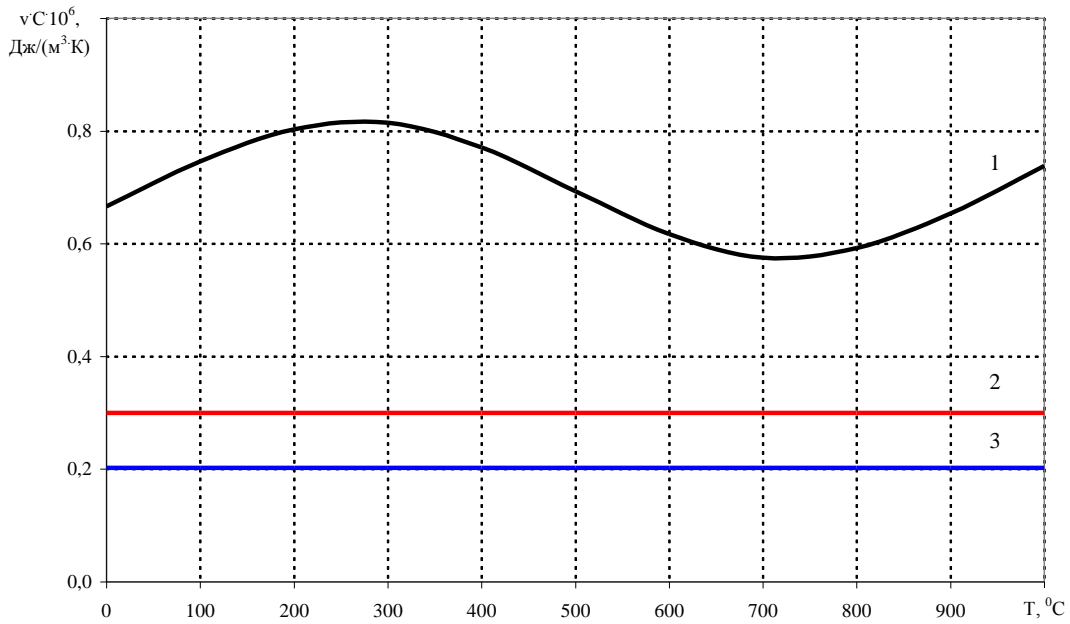


Рисунок 6 – Зависимость удельной объемной теплоемкости от температуры, полученная при решении ОЗТ, для перегородки толщиной 60 мм: кривая 1 – точная; кривая 2 – при $C_v = \text{const}$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = f(T)$; кривая 3 – $\lambda = \text{const}$, $C_v = \text{const}$, $\alpha_{c2} = f(T)$.

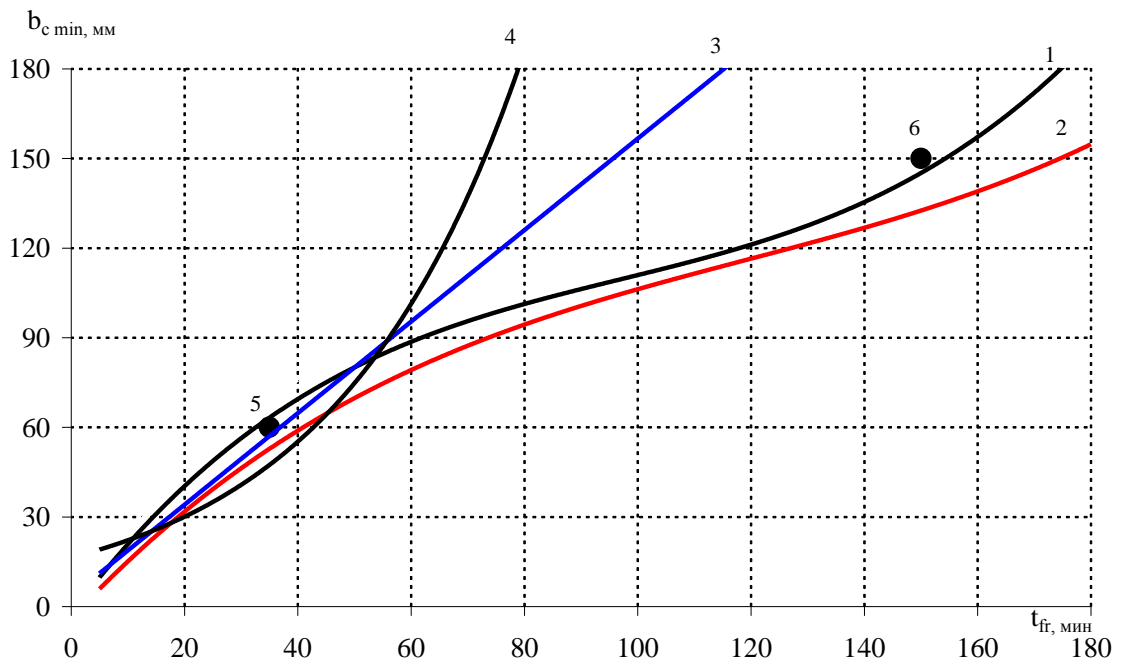


Рисунок 7 – Зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости, при решении ПЗТ: кривая 1 – точная; кривая 2 – при $C_v = \text{const}$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = f(T)$; кривая 3 – $\lambda = \text{const}$, $C_v = \text{const}$, $\alpha_{c2} = f(T)$, кривая 4 – при $C_v = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $\alpha_{c2} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в соответствии с [7], точка 5 и 6 – предел огнестойкости перегородки SANDWICHROCK фирмы ROCKWOOL толщиной 60 и 150 мм, полученные экспериментальным путем.

Проанализировав результаты испытаний (точки 5 и 6 рис. 7) и расчетных пределов огнестойкости для перегородок SANDWICHROCK фирмы ROCKWOOL толщиной 60 и 150 мм (кривая 1), можно констатировать их хорошую сходимость. Расчетные значения предела огнестойкости перегородки отличаются от экспериментальных значений на 4%. Кривая 4 –

зависимость, полученная при постоянных значениях $\alpha_{c2}=8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, при этом критерий среднеквадратичного отклонения при решении ОЗТ составил $10,8 \text{ }^\circ\text{C}$, а расхождение расчетных и экспериментальных значений огнестойкости составляет около 30%.

Выводы. Сравнение пределов огнестойкости для перегородки из сэндвич-панели SANDWICHROCK фирмы ROCKWOOL, толщиной 60 мм (рис. 7), свидетельствуют об 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.

Перспективы дальнейших исследований. По мнению автора, 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.

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. Круковський П.Г., Розробка й апробація методичного забезпечення застосування розрахунково-експериментального підходу для визначення залежності товщини перегородок від межі вогнестійкості / Круковський 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.