

*Е.В. Качкар, канд. техн. наук, зам. нач. отд, АПБ им. Героев Чернобыля*

## **ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СЕНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С МИНЕРАЛОВАТНЫМИ ПЛИТАМИ**

(представлено д-ром техн. наук Куценко Л.М.)

В статье определено и обосновано количество огневых испытаний трехслойных перегородок, данные температурных измерений которых обеспечивают достаточную точность для идентификации ТФХ внутреннего заполнения перегородки и получения зависимости минимальной толщины перегородки от требуемого предела огнестойкости.

**Ключевые слова:** огнестойкость, параметры, трехслойные перегородки, моделирование.

**Постановка проблемы** В вопросах обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений, где применяются перегородки из сэндвич-панелей, первоочередной задачей их применения ставится определение предела огнестойкости перегородок, для чего при тепловом проектировании огнестойких ограждающих конструкций необходимо знание зависимости минимальной толщины перегородки от требуемого предела огнестойкости. Необходимость такого исследования диктуется, кроме научного интереса, высокой стоимостью проведения испытаний и необходимостью обеспечения максимально возможной информативности и достоверности получаемых экспериментальных данных при минимально возможном количестве проводимых испытаний.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В [1,2,3] представлены модели теплового состояния строительных конструкций различной сложности и назначения. Однако в этих моделях присутствуют параметры, которые являются индивидуальными для каждой строительной конструкции и известны с недостаточной точностью, поэтому точность решения задач теплопроводности в значительной мере определяется точностью задания параметров модели, что обеспечивает ее адекватность реальным процессам теплообмена в исследуемых строительных конструкциях.

**Постановка задачи и ее решение.** Задачей исследования является определение минимально необходимого количества образцов для огневых испытаний перегородок состоящих из сэндвич-панелей, которая обеспечивает достоверность расчетов зависимости минимальной толщины перегородки от необходимого предела огнестойкости.

При проведении реального эксперимента, согласно [4] имеются погрешности измерений, которые учитываются в вычислительном эксперименте путем введения в значения температур искусственных ошибок случайного характера, соответствующих уровню реальных ошибок измерений. Обратные задачи, решаются как на «точных» значениях температур (без учета погрешностей экспериментальных измерений), так и на «возмущенных» значениях температур, чтобы показать влияние случайных составляющих ошибок измерений, на точность определения параметров модели. Влияние систематических составляющих ошибок измерений – вопрос сложный в практике реальных измерений, их учет также возможен в вычислительном эксперименте и анализе идентифицируемости, но нами не рассматривается.

Под идентифицируемостью параметров подразумевается процедура, которая показывает, во-первых, принципиальную возможность нахождения параметров с помощью решения обратных задач и, во-вторых, если они находятся, то с какой погрешностью. Обратные задачи обеспечивают нахождение таких значений параметров модели, которые дают близость экспериментальных и расчетных значений температур в точках измерения исследуемых трехслойных перегородок [5].

Анализ идентифицируемости параметров модели, обычно проводится путем решения тестовых задач [4,6], в которых значения температур в предполагаемых точках измерения определяются из вычислительного эксперимента (расчета температур при заданных параметрах модели, решение прямых задач).

В тестовых задачах с помощью модели, заданных теплофизических характеристик (ТФХ) и граничных условий (ГУ) решением прямых задач теплопроводности, получают нестационарное температурное распределение в перегородке  $T(t)$ . Затем точки полученной зависимости возмущаются, имитируя ошибки  $\delta$  измерения температур, и по температурам с погрешностями  $T(t) \pm \delta$ , обратными задачами определяются ТФХ и ГУ, которые далее сравниваются с заданными. Это дает возможность исследовать алгоритм определения этих ТФХ и ГУ с необходимой точностью, а также установить необходимое количество испытуемых образцов для определения этих параметров модели и зависимости толщины перегородки от предела огнестойкости [6].

Для определения влияния погрешностей измерений температур на зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости, решен ряд тестовых задач, в которых с помощью генератора случайных чисел имитировались ошибки в измерении температуры при испытании. Погрешности измерений вводились с максимальной амплитудой до 10% и представлены на рис 1. Видно, что максимальные разности между температурами достигают  $10^{\circ}\text{C}$  и больше.

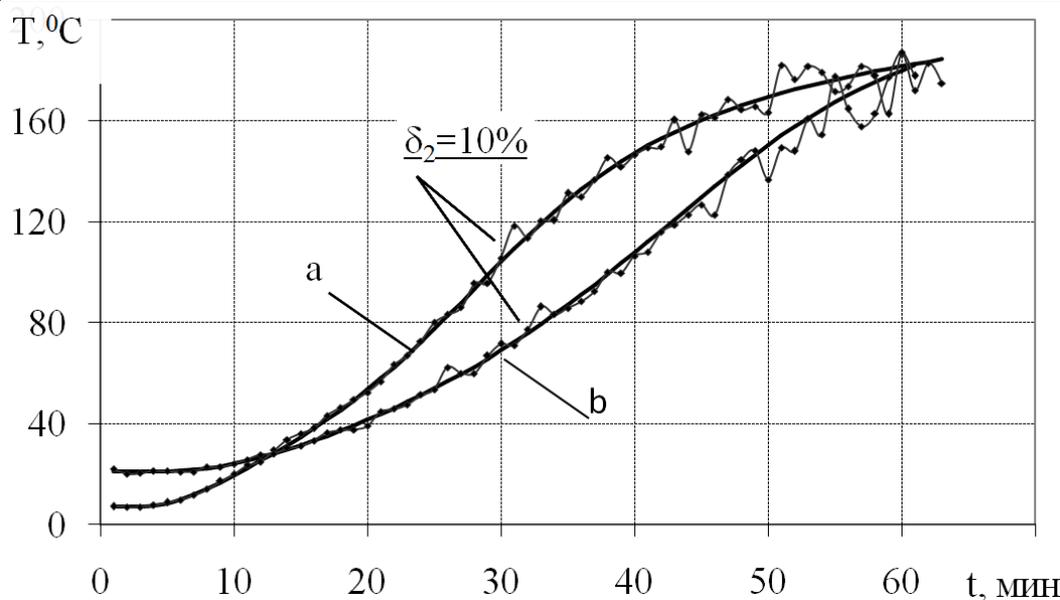


Рис. 1. – Расчетные и возмущенные до 10 % значения температур на необогреваемой стороне перегородок с толщиной теплоизоляционного слоя 60 (a) и 80 (b) мм

Ниже представлены результаты решения двойных ОЗТ, при которых идентифицировались ТФХ по данным испытаний образцов перегородки с толщиной 60 и 80 мм одновременно. В результате решения двойной ОЗТ получены зависимости коэффициентов теплопроводности (рис. 2) и удельной объемной теплоемкости (рис. 3),

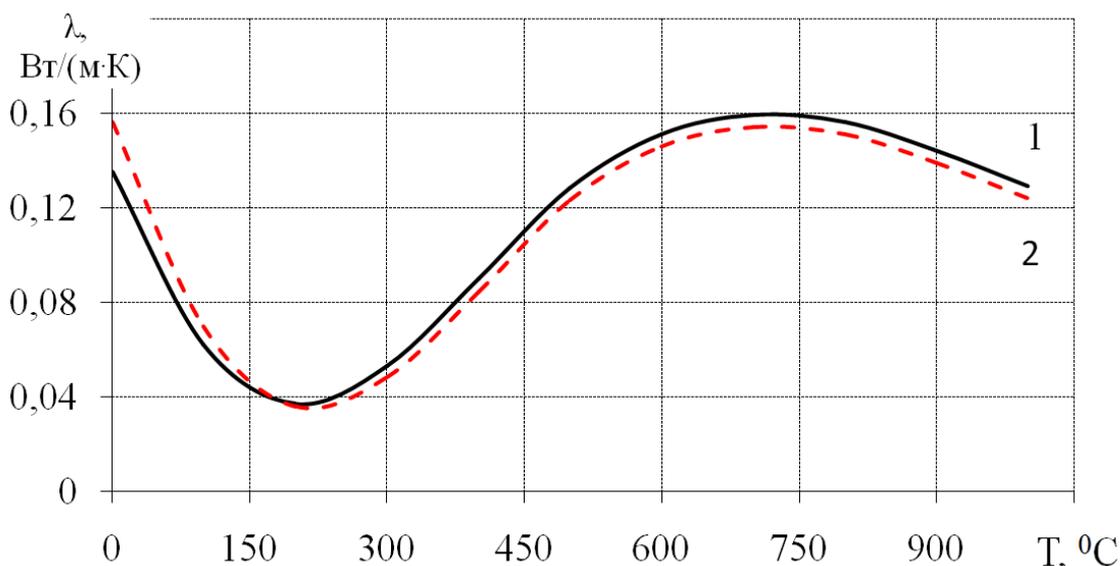
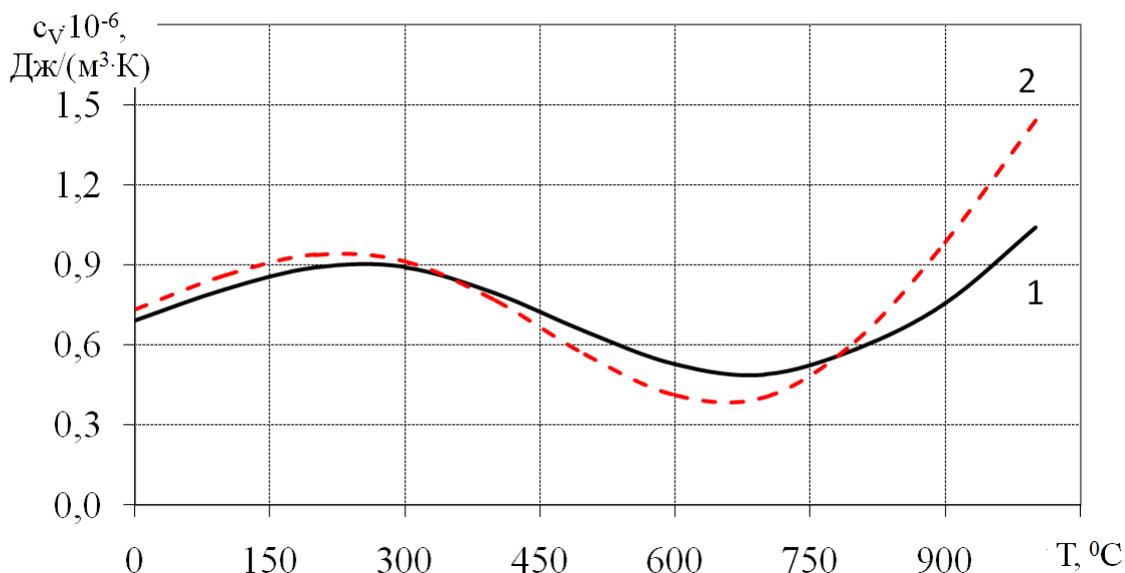


Рис. 2. – Зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности трехслойных перегородок от температуры, полученных при решении двойной ОЗТ с толщиной теплоизоляционного слоя в перегородках 60 и 80 мм. Кривая 1 – рассчитана при точных значениях температур, 2 – при возмущенных значениях температур до 10%



**Рис. 3. – Зависимости эффективных коэффициентов удельной объемной теплоемкости трехслойных перегородок от температуры, с толщиной теплоизоляционного слоя 60 и 80 мм. Кривая 1 – рассчитана при точных значениях температур, 2 – при возмущенных значениях температур до 10%**

которые показывают влияние погрешностей измерений температуры. При этом критерий среднеквадратичного отклонения составил 3,93 °С.

Определение влияния погрешностей измерений температур на зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости заключалось в поиске таких ее значений толщины перегородки, для которых температура на не обогреваемой поверхности перегородки составляла 160 °С. При этом во время решения прямой задачи теплопроводности задавали следующие значения параметров модели:  $\alpha_{c1} = 25 \text{ Вт} \times \text{м}^{-2} \times \text{К}^{-1}$ ;  $\varepsilon = 0,65$ ;  $T_0 = 20 \text{ °С}$ ;  $\alpha_{c2}$  - значения полученные согласно зависимости (1) и представлены на рис. 4.

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

На рис. 5 представлены результаты исследования влияния количества использованных образцов трехслойных перегородок на зависимость толщины перегородки от предела огнестойкости.

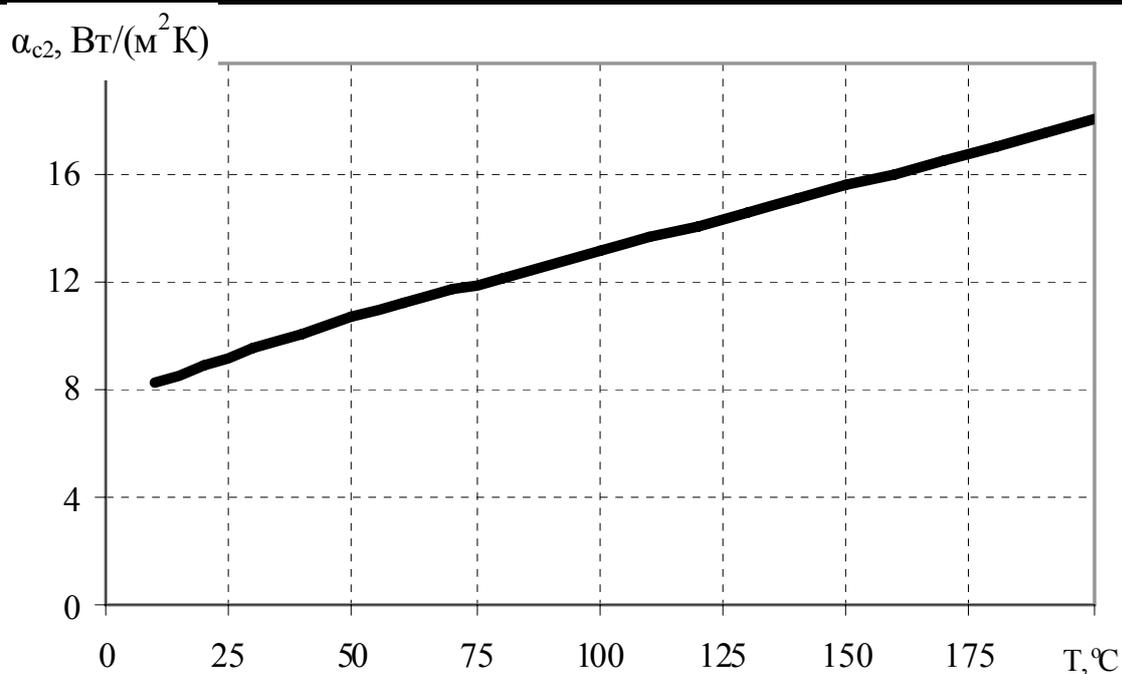


Рис. 4. – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{c2}$  от температуры на поверхности перегородки при  $v_b = 1$  м/с

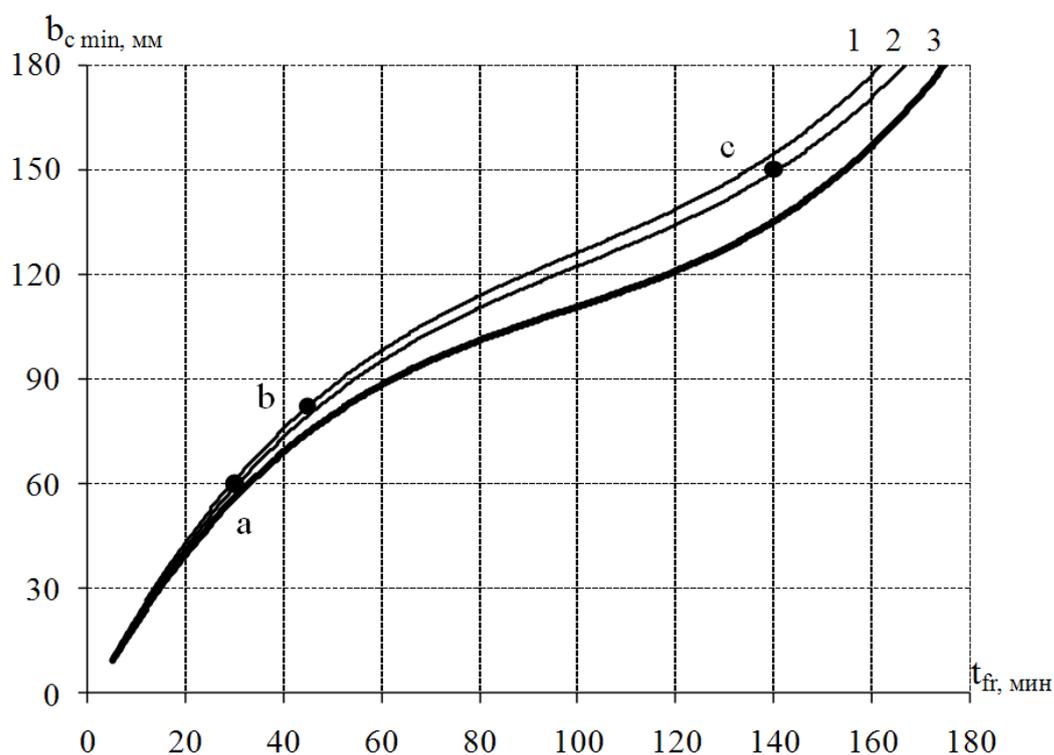


Рис. 5. – Зависимости минимальной толщины перегородки от требуемого предела огнестойкости, полученные по результатам решения тестовых задач

На рис. 5 кривая 1 рассчитана по температурам с погрешностью в измерении до 10% для перегородки толщиной 60 мм, 2 - по температурам с погрешностью в измерении до 10% для перегородок с толщиной 60 и 80 мм, 3 - по точным температурам. Точки a, b и c

значение пределов огнестойкости, полученные по данным огневых испытаний образцов перегородок толщиной 60, 80 и 150 мм соответственно в отдельности. Расхождение зависимости, найденной по точным температурам (кривая-3) от зависимости, найденной по возмущенным температурам для перегородки толщиной 60 мм (кривая - 1) и одновременно для перегородки с толщиной 60 и 80 мм (кривая - 2) составляет 13% и 8% соответственно. Наблюдается также удовлетворительное совпадение расчетной огнестойкости для перегородки толщиной 80 мм (точка - b) с огнестойкостями перегородок с толщиной 60 и 150 мм (точки - a, c).

Эти исследования показали, что для достоверного (в пределах 13%) определения зависимости минимальной толщины перегородки от предела огнестойкости в диапазоне 10-180 мин, достаточно результатов температурных измерений, полученных при испытании перегородки с одной толщиной, например с толщиной 80 мм. Использование результатов температурных измерений двух образцов, с толщиной 60 и 80 мм, дает незначительное повышение точности кривой (на 5%).

Для подтверждения полученного результата, был решен ряд тестовых задач, при постановке которых использовались результаты температурных измерений, полученных в натуральных огневых экспериментах, для исследуемых перегородок [7]. Согласно процедуре проведения идентификации ТФХ исследуемых трехслойных перегородок, описанной выше, получены зависимости толщины перегородок от предела огнестойкости для перегородок толщиной 60, 80 и 150 мм в отдельности.

### **Выводы.**

1. В работе решена задача определения минимально необходимого количества образцов перегородок при проведении огневых испытаний, для достоверного расчета зависимости минимальной толщины перегородки от предела огнестойкости (в пределах до 13%), которая обеспечивает наилучшую идентифицируемость параметров модели теплопередачи в трехслойной перегородке.

2. Проведенный анализ идентифицируемости параметров модели тепловых процессов в перегородках показал возможность определения ТФХ и зависимости толщины перегородки от пределов огнестойкости по данным температурных измерений при проведении испытания одной перегородки. Это подтверждается для случая построения зависимости толщины перегородки от предела огнестойкости перегородки SANDWICHROCK, фирмы ROCKWOOL толщиной 60 мм и удовлетворительным совпадением расчетного предела огнестойкости с пределами огнестойкости перегородок SANDWICHROCK фирмы ROCKWOOL толщиной 80 и 150 мм.

---

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Новак С.В. Вогнезахисна здатність гіпсокартонних плит для сталевих будівельних конструкцій / С.В. Новак, А.В. Довбиш // Науковий вісник УкрНДІПБ. - 2004. К.: - № 2 (10). - С.102-105.
2. Круковский П.Г. Особенности и сравнение методик огнезащитной способности покрытий металлических конструкций / П.Г. Круковский, С.В. Цвиркун // Науковий вісник УкрНДІПБ. - 2006. К. - № 1(13). - С. 13-23.
3. Новак С.В. Математическое моделирование процессов теплообмена в огнестойких конструкциях: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.05 «Теоретическая теплотехника» / С.В. Новак. - Харьков, 1996. - 24 с.
4. Защита от пожара. Перегородки. Метод испытания на огнестойкость. Общие требования. (EN 1364-1:1999, NEQ) ДСТУ Б В. 1.1-15-2007 [Чинний від 2007-01-28]. К.: Укрархбудинформ. – 2009. – 17 с.
5. Методы решения обратных задач теплопереноса / [Коздоба Л.А., Круковский П.Г.]. – Киев, Наукова думка, – 1982. – 360 с.
6. Круковский П.Г. Идентифицируемость параметров модели теплового режима типовой двухкомнатной квартиры. / П.Г. Круковский, О.Ю. Тадля// Промышленная теплотехника. – 2007.– Киев: № 5– С. 54-63.
7. Круковський П.Г., Розробка й апробація методичного забезпечення застосування розрахунково-експериментального підходу для визначення залежності товщини перегородок від межі вогнестійкості./ П.Г. Круковський, Є.В. Качкар// Пожежна безпека: теорія і практика. – 2009. – Черкаси: АПУ, – Вип.3. – С. 98-111.

Е.В. Качкар

**Идентифицируемость параметров модели теплового состояния сендвич-панелей с минераловатными плитами.**

У статті визначена й обґрунтована кількість вогневих випробувань тришарових перегородок, дані температурних вимірів яких забезпечують достатню точність для ідентифікації теплофізичних характеристик внутрішнього заповнення перегородки й розрахунку залежності мінімальної товщини перегородки від необхідної межі вогнестійкості.

**Ключові слова:** вогнестійкість, параметри, тришарові перегородки, моделювання.

E.V. Kachkar

**An identifiable model parameters thermal state sandwich panels with mineral wool.**

The article defines and reasonable number of fire tests of three-layer walls, these temperature measurements which provide sufficient accuracy to identify the physical characteristics of internal partitions and calculating the required minimum thickness of walls depends on the desired limit of fire resistance.

**Keywords:** fire resistance, options, three-layer walls, simulation.