

*Е.В. Качкар, заместитель начальника отдела АПБ
им. Героев Чернобыля МЧС Украины*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВНУТРЕННЕГО ЗАПОЛНЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ
ПЕРЕГОРОДОК С МИНЕРАЛОВАТНЫМИ ПЛИТАМИ**
(представлено д-ром техн. наук А.С. Беликовым)

На основе результатов огневых испытаний, проведено уточнение теплофизических характеристик внутреннего заполнения трехслойных перегородок с минераловатными плитами в диапазоне температур от 20-1000 °С.

Постановка проблемы. Одним из материалов, которые используются для обеспечения огнестойкости ограждающих перегородок, являются минераловатные плиты, которые широко применяются в конструкциях современных зданий. При проектировании таких перегородок возникает необходимость знания характеристики огнестойкости – зависимости минимальной толщины перегородки от требуемого предела её огнестойкости, что является в определенной мере проблемой, требующей применения теоретических и технических (экспериментальных) подходов ее решения.

Анализ последних исследований и публикаций. В научных работах Страхова В.Л., Крутова А.М., Давыдкина Н.Ф., Круковского П.Г., Харченка И.А., Новака С.В., Довбыша А.В., Цвиркуна С.В. и др. широко рассмотрено применение расчетно-экспериментального подхода определения пределов огнестойкости и характеристик огнезащитной способности различных видов строительных конструкций и их элементов. Этот подход, нашел достаточное развитие и применение для определения характеристик огнезащитной способности огнезащитных покрытий, на металлических двухслойных конструкциях [1] и обосновании применения гипсокартонных плит, применяемых в качестве огнезащиты [2], однако требует теоретического и практического развития для многослойных огнезащитных конструкций, к которым относятся перегородки, состоящие из облицовочных слоев с расположенным между ними минераловатными плитами.

Одним из основных этапов определения пределов огнестойкости огнезащитных материалов или конструкций является этап определения теплофизических характеристик (ТФХ)

огнезащитных материалов, используемых в частности в трехслойных (многослойных) перегородках [3,4].

Традиционные методы определения ТФХ материалов (методы регулярного и монотонного нагревов и другие), как правило, не позволяют найти зависимости ТФХ минераловатных теплоизоляционных материалов, в широком диапазоне температур (от 20 до 1000 °С и более) при стандартном температурном режиме. Поэтому, для определения ТФХ применяемых огнезащитных материалов, метод решения обратных задач теплопроводности является единственно приемлемым и возможным.

Определение эффективных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости огнезащитных материалов, используемых в перегородках, с помощью решения обратных задач на основе использования стандартных схем испытаний, остается актуальной задачей, решение которой, для конкретного материала, позволяет проводить дальнейший расчет по определению зависимости минимальной толщины перегородки (с или без внутреннего заполнения) от требуемого предела огнестойкости конструкции.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является определение теплофизических характеристик внутреннего заполнения трехслойной перегородки, состоящей из двух металлических листов с расположенным между ними теплоизоляционным материалом из минераловатных плит Rockwool.

Теплофизические характеристики внутреннего заполнения перегородки получены на основе огневых испытаний разработанной математической модели тепловых процессов в перегородке и решения обратных задач теплопроводности.

Для проведения испытаний использовались следующие средства: огневая печь, испытываемые образцы, измерительные устройства, оборудование для фотосъемок. Печь обеспечивала стандартный температурный режим и избыточное давление в её рабочем пространстве в соответствии с ДСТУ [5,6].

Испытуемый образец – не несущая стена (рис.1) из трехслойных стеновых панелей с внутренним заполнением (ширина 3200 мм, толщина 60, 80, 100 и 150 мм). Внутреннее заполнение перегородки 2 (в данном случае – минераловатная плита) это совокупность материалов и конструктивных элементов прочности перегородки, находящихся между ограждающими плоскими элементами перегородки 1 и 3.

Каждый образец выполнен из трех панелей при условии обеспечения двух для горизонтальных (для перегородок 60 и 80 мм) и вертикальных (для перегородок 100 и 150 мм) стыков длиной 3200 мм. Панели скреплены саморезами на двух горизонтально

расположенных гнутых П-образных профилей размерами 100x100x3 мм, расстояние между которыми составляло 1м. На стыках панелей перед их стягиванием проложена лента из базальтовой плиты ROCKMIN. Каждый образец обрамлен по контуру П-образным профилем из оцинкованной стали толщиной 2 мм.

Панель выполнена из двух стальных оцинкованных листов толщиной 0,5 мм с нанесением лакокрасочного покрытия, между которыми расположена минераловатная теплоизоляционная плита.

Перегородка состоит из трех слоев толщиной $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ (рис. 1). Наружные металлические слои одинаковой толщины $\delta_1 = \delta_3 = 0,5$ мм. Общая толщина перегородки $X = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$. При испытании левая поверхность перегородки ($x=0$) нагревается конвективно-радиационными механизмами теплообмена от горячих газов в печи с температурой T_{c1} , близкой к кривой стандартного пожара [5,6]. Правая поверхность ($x=X$) охлаждается конвекцией в окружающий воздух с температурой $T_{c2} = 20$ °С. Внутри перегородки тепло передается теплопроводностью от металлического листа слева к минераловатной плите и далее через правый металлический лист в окружающий воздух. Принимается условие идеального теплового контакта между отдельными слоями перегородки. Теплопроводность через П-образные профили, периодически с шагом 1м соединяющие металлические листы между собой, в модели будет учитываться в эффективных теплофизических характеристиках внутреннего заполнения перегородки.

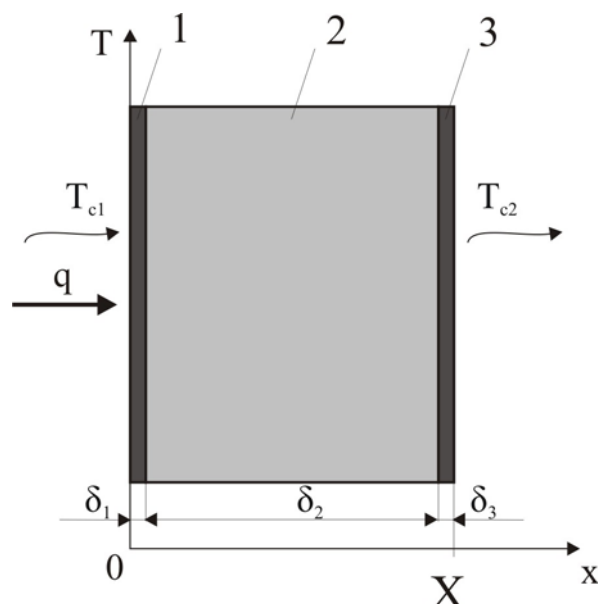


Рисунок 1 – Схема исследуемой трехслойной перегородки: 1,3 – металлические листы; 2 – слой внутреннего заполнения перегородки с минераловатным теплоизоляционным материалом

На основе описанной выше физической модели процесса нестационарного теплообмена рассматриваемой трехслойной перегородки при огневом воздействии на нее слева ($x=0$) и охлаждении справа ($X=\delta_1+\delta_2+\delta_3$) можно записать следующую математическую модель:

$$c_v(x,T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x,T) \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$0 < x < X; T = T(x, t);$$

$$T(x, 0) = T_0;$$

$$c_v = \begin{cases} c_{vM}, & 0 \leq x \leq \delta_1, \delta_1 + \delta_2 \leq x \leq \delta_3; \\ c_{vH}, & \delta_1 < x < \delta_2 + \delta_2 \end{cases};$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_M, & 0 \leq x \leq \delta_1, \delta_1 + \delta_2 \leq x \leq \delta_3; \\ \lambda_H, & \delta_1 < x < \delta_2 + \delta_2 \end{cases}; \quad (2)$$

$$\lambda_M \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} + \alpha^* [T_{C1}(t) - T(0, t)] = 0; \quad (3)$$

$$\alpha^* = \alpha_{C1} + \frac{C_0 \varepsilon}{T_{C1}(t) - T(0, t)} \left\{ \left[\frac{T_{C1}(t)}{100} \right]^4 - \left[\frac{T(0, t)}{100} \right]^4 \right\}; \quad (4)$$

$$\lambda_M \frac{\partial T(X, t)}{\partial x} = \alpha_{C2} [T(X, t) - T_{C2}], \quad (5)$$

где C_v – удельная объемная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, t – время, x – координата, α_{C1} – коэффициент теплоотдачи от горячих газов к нагреваемой металлической поверхности, α_{C2} – коэффициент теплоотдачи от металлической поверхности в воздух справа от перегородки, C_0 – излучательная способность абсолютно черного тела, ε – коэффициент излучения металлического листа перегородки; T_{C1} – температура горячих газов в печи при испытании; T_0 – начальная температура перегородки перед испытанием. Индексы "м", "и" определяют, что

рассматриваемые параметры относятся к материалу слоя металла и внутреннему слою, соответственно.

Рассмотренная математическая модель (1)-(5) учитывает радиационно-конвективный теплообмен (3)-(4) между нагреваемой поверхностью перегородки и горячими газами печи и конвективный теплообмен между не обогреваемой поверхностью и окружающим воздухом (5).

Коэффициент конвективного теплообмена от горячих газов в печи к нагреваемой поверхности образца принимался равным 25 Вт/(м² К), степень черноты нагреваемой поверхности - металлического оцинкованного листа принималась равной 0,65. Коэффициент конвективного теплообмена от образца к окружающему воздуху принимался равным 5 Вт/(м²К). Коэффициент теплопроводности металлического оцинкованного листа принимался равным 45 Вт/(м·К), а удельная объемная теплоемкость 4·10⁶ Дж/(м³·К). Коэффициенты эффективной теплопроводности и удельной объемной теплоемкости минераловатной теплоизоляционной плиты являлись искомыми характеристиками.

Специальный итерационный метод и программа, описанные в [7], позволяют находить эти теплофизические характеристики как функции, зависящие от температур, и одновременно получать расчетные кривые температур в точках размещения термопар.

Математически методика заключается в минимизации критерия среднеквадратичного отклонения

$$\phi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [T_i^{\text{Э}} - T_i^{\text{Р}}(\lambda, C)]^2} \longrightarrow \min, \quad (1)$$

где $T_i^{\text{Э}}$ - экспериментальные значения температур, $T_i^{\text{Р}}$ - расчетные значения температур в точках расположения термопар, n – общее количество точек измерений температур в пространстве и во времени.

В приведенных ниже решениях использовались экспериментальные данные двух образцов с одинаковой толщиной теплоизоляционного материала одновременно в соответствии с ДСТУ [5,6].

Для определения коэффициентов теплопроводности и удельной объемной теплоемкости испытуемого материала по данным огневых испытаний, определялись значения температур для термопар расположенных в печи (рис. 2) и расположенных на образце (рис. 3).

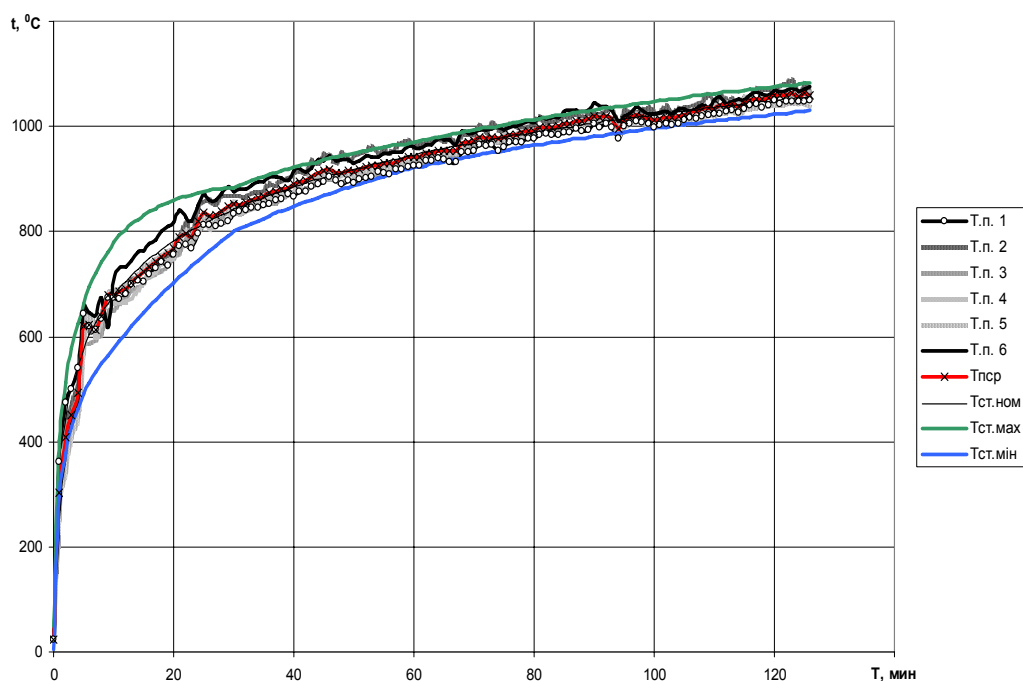


Рисунок 2 – Экспериментальные значения температур для термопар T1-T6 расположенных в печи

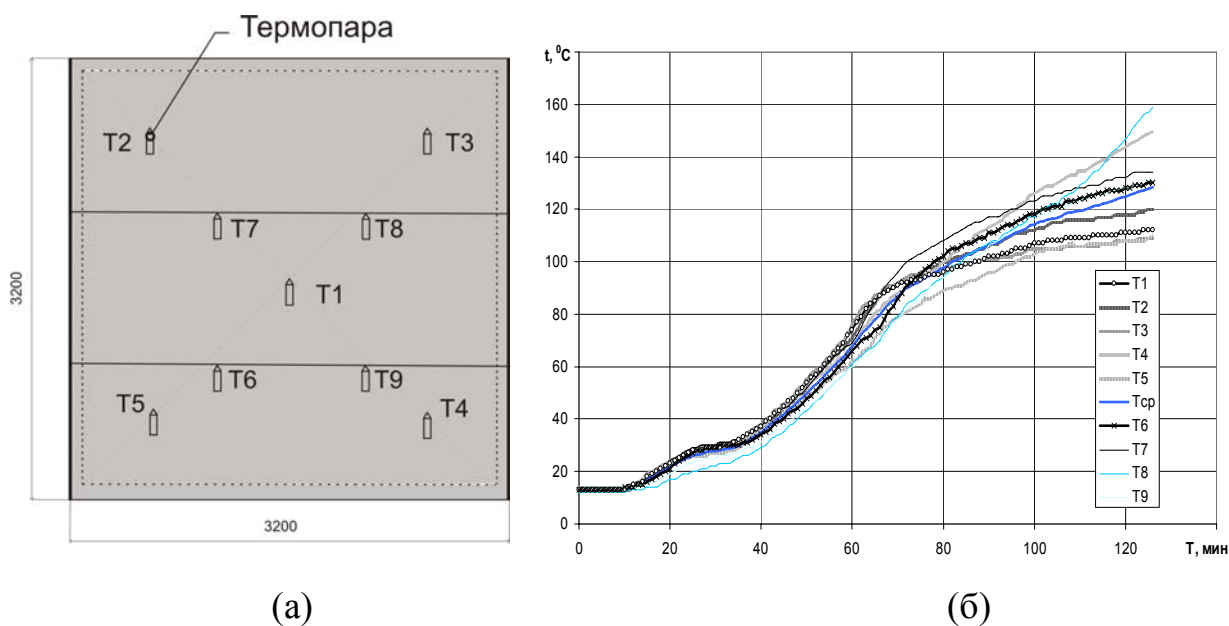


Рисунок 3 – Схема расположения термопар на образце (а) и графики зависимости температуры от времени для термопар T1-T9 (б)

На рис. 4 приведены зависимости экспериментальных и расчетных температур от времени в местах установки термопар T1-T9, для различных вариантов решенных обратных задач теплопроводности.

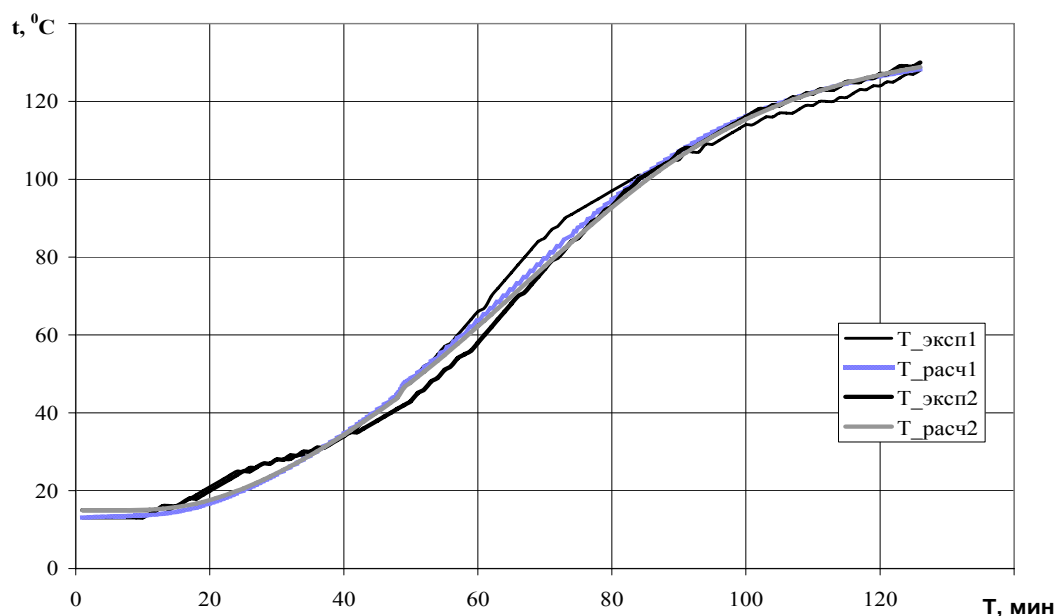


Рисунок 4 – Расчетные и экспериментальные значения температур в местах установки термодпар для внутреннего заполнения трехслойной перегородки с толщиной минераловатного слоя $L=0,1\text{м}$

Сходимость экспериментальных и расчетных значений температур, в местах установки термодпар Т1-Т9 показывает величина критерия среднеквадратичного отклонения, который для данного расчета составляет $2,44^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5 приведены найденные зависимости коэффициентов теплопроводности (а) и удельной объемной теплоемкости (б) от температуры для внутреннего заполнения трехслойной перегородки с толщиной минераловатного слоя $L=0,1\text{м}$.

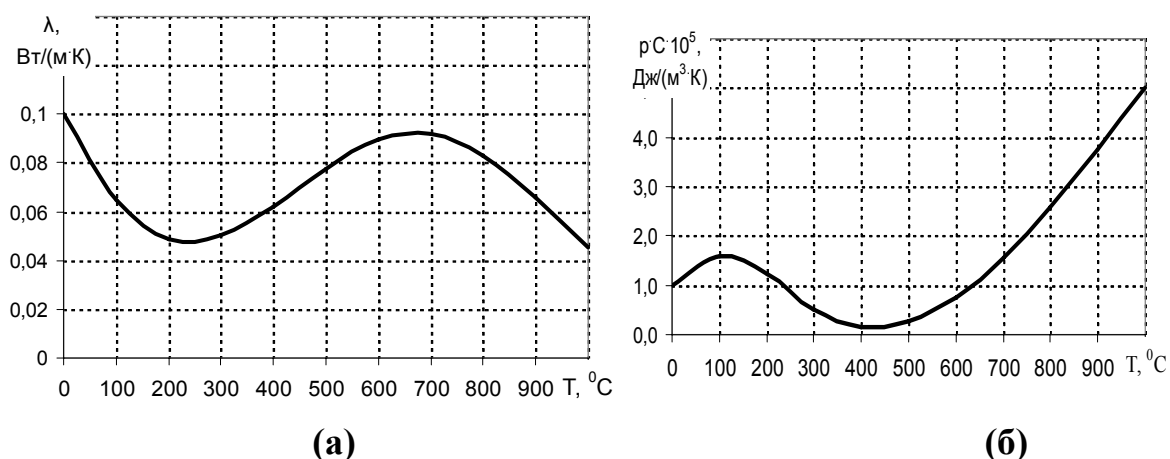


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплопроводности (а) и удельной объемной теплоемкости (б) от температуры, для внутреннего заполнения трехслойной перегородки с толщиной минераловатного слоя $L=0,1\text{м}$

Предварительный анализ экспериментальных кривых температуры во времени в местах установки термопар Т1-Т5 показывает наличие горизонтальных участков в районе 90-100°C, это объясняется дегидратацией и испарением содержащейся в минеральной вате влаги, поэтому зависимость удельной объемной теплоемкости от температуры (рис. 5б) имеет в районе 100°C «всплеск», который после 150°C снижается.

Снижение теплопроводности в диапазоне 20-200°C (рис. 5а) объясняется деформацией металлических листов, что приводит к образованию воздушных зазоров и поэтому уменьшению теплопроводности внутреннего заполнения.

При нагреве минеральных волокон до 450-550 °C отмечается небольшое снижение массы, обусловленное потерей химически связанной воды, а при дальнейшем нагревании - увеличение массы, вызванное присоединением кислорода воздуха при окислении двухвалентного железа в трехвалентное [8].

На графике зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности (рис. 5а) в районе 700-750 °C наблюдается характерный излом кривой, которая отображают зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Это объясняется тем, что при нагреве минераловатных волокон наблюдается их укорачивание, которое после термической обработки при 800-1000 °C составляет около 0,5 %. При этом происходит появление пустот во внутреннем заполнении перегородки из-за уплотнения волокон, которое начинается в диапазоне 600-700 °C. В результате термического воздействия, уже при 900 °C плотность волокон возрастает от 2,85 до 3,07 г/см³ [9,10].

Используя полученные экспериментальные данные для образцов с толщиной внутреннего заполнения 60, 80 и 150 мм, коэффициенты эффективной теплопроводности и удельной объемной теплоемкости были определены для каждого образца по методике описанной выше.

Выводы.

1. Разработаны физическая и математическая модели тепловых процессов в трехслойных перегородках с теплоизоляционным материалом из минераловатных плит в условиях испытаний в огневых печах, при стандартном температурном режиме.

2. Впервые с помощью разработанной математической модели тепловых процессов в трехслойных перегородках, результатах огневых испытаний и решении обратных задач теплопроводности определены температурные зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности и удельной объемной теплоемкости внутреннего

заполнения типовой перегородки с минераловатными плитами rockwool в диапазоне температур 20-1000 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новак С.В. Харченко И.А., Круковский П.Г. Расчетно-экспериментальный метод определения теплозащитной способности огнезащитных покрытий строительных металлических конструкций. В кн. Тепломассообмен - ММФ - 96. Материалы III-го Минского международного форума, Минск: АНК "ИТМО им. А.В.Лыкова" АНБ, 1996, т. IX, ч. 1, С.153-157.
2. Новак С.В., Довбиш А.В. Вогнестійкість багатошарових перегородок з гіпсокартонних плит // Природничі науки та їх застосування в діяльності служб цивільного захисту: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2006. С.87-89.
3. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход). – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 224 с.
4. Новак С.В., Харченко И.А., Хмельницкий В.В., Круковский П.Г. Математическое моделирование тепловых процессов в решении задач пожарной безопасности. – В кн. Проблемы пожарной безопасности. – Київ: МВС України, 1995. – С.349-351.
5. ДСТУ Б В. 1.1-15-2007 «Защита от пожара. Перегородки. Метод испытания на огнестойкость. Общие требования».
6. ДСТУ Б В. 1.1-4-98 «Строительные конструкции. Методы испытаний на огнестойкость».
7. Цвиркун С.В., Круковский П.Г. “Определение теплофизических характеристик огнезащитных покрытий по данным огневых испытаний”, Проблемы пожарной безопасности: Сб. научн. трудов АГЗУ. – Вып.16.- Харьков, 2004.- С.240-247.
8. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций /Под редакцией Ю.А. Кошмарова. – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 2000. – С.196-197.
9. Базальтоволокнистые материалы: Сборник статей // под ред. Костикова В.И., Смирнова Л.Н. – М.: Информконверсия, 2001-307 с.
10. Композиционные материалы на основе базальтовых волокон: Сборник научных трудов – Киев.: ИПМ, 1989-164 с.

Статья поступила в редакцию 18.03.2009 г.