

УДК 614.841.332:620.197.6

ЦВИРКУН С.В.¹, КРУКОВСКИЙ П.Г.²¹ Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля МЧС Украины² Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Подається схема вогневих випробувань по визначенню вогнестійкості вогнезахисних матеріалів. Дані випробувань використовують для визначення теплофізичних характеристик матеріалів на основі розв'язку зворотних задач пошуку температурних залежностей ефективних коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності вогнезахисних матеріалів експериментальними даними нагріву декількох зразків матеріалів. В результаті проведення експериментів та розв'язку зворотних задач знайдено залежності ефективних коефіцієнтів теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності від температури для гіпсового вогнезахисного матеріалу.

Приведена схема огневых испытаний по определению огнестойкости огнезащитных материалов. Данные испытаний используются для определения теплофизических характеристик этих материалов на основе решения обратных задач по поиску температурных зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости огнезащитных материалов по экспериментальным данным нагрева нескольких образцов материалов в огневой печи. В результате проведенных экспериментов и решений обратных задач найдены зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности и удельной объемной теплоемкости от температуры для гипсового огнезащитного материала.

Given in this paper is a scheme of firing test for refractoriness definition of fire-proof materials. Test data are applied for thermal characteristic definition of the materials on basis of solving of inverse problems by searching of thermal dependencies of thermal conductivity coefficients and heat capacity of fire-proof materials according to experimental data of several samples heating of the materials in the oven. The dependencies of thermal conductivity coefficients and volumetric heat capacity on temperature for gypsum fire-proof material are obtained.

$C_V = C \cdot \rho$ коэффициент удельной объемной теплоемкости;

$l = 0, 1, \dots, L$ - номер итерации;

n - общее количество точек измерений температур в пространстве и во времени;

T_i^p - экспериментальные значения температур;

T_i^r - расчетные значения температур в точках

расположения термодатчиков;

βl - длина итерационного шага;

λ - коэффициент эффективной теплопроводности;

$\Delta P/l$ - приращение вектора искомого параметров P на итерации $l + 1$.

Введение

Покрытие конструкций и оборудования огнезащитными покрытиями из огнезащитных материалов является одним из способов обеспечения огнестойкости строительных конструкций и оборудования жилых помещений и производственных объектов. Для проектирования оптимальных параметров этих материалов, которые работают в широком диапазоне температур (от комнатных до 1200 °C), необходимы знания об их теплофизи-

ческих характеристиках (ТФХ). К таким характеристикам, прежде всего, относятся коэффициент теплопроводности и теплоемкость материалов. Для большинства огнезащитных материалов, используемых для обеспечения заданной огнестойкости строительных конструкций и оборудования, их теплофизические характеристики, как правило, существенно зависят от температуры вследствие протекающих в материалах физико-химических процессов во время нагрева. Поэтому, говоря о

ТФХ этих материалов, подразумевают не истинные их характеристики, а так называемые эффективные, учитывающие указанные выше физико-химические процессы.

Существующие традиционные методы, как правило, не позволяют найти зависимости ТФХ огнезащитных материалов от температуры в условиях темпах нагрева, близких к условиям пожара, в то время, как методы, основанные на решении обратных задач теплопроводности [1-3], позволяют находить эти зависимости в условиях нагрева, близких как к условиям реальных пожарных нагрузок, так и при температурном режиме, близком к стандартному, который воспроизводится в огневых печах при огневых испытаниях. Эти функции ТФХ могут, в свою очередь, отличаться для разных темпов нагрева из-за зависимости скорости протекания самих физико-химических процессов в материалах от темпа нагрева. Исходными данными для решения обратных задач являются значения температур в отдельных точках испытуемых образцов во времени в условиях нагрева, максимально приближенного к условиям работы материала, поэтому часто для определения ТФХ огнезащитных материалов в стандартных температурных условиях нагрева метод решения обратных задач является единственно возможным и приемлемым методом определения ТФХ огнезащитных материалов от температуры.

Цель работы

Целью работы является изложение методики определения температурных зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости огнезащитных материалов по экспериментальным данным нагрева образцов материалов в огневой печи при температурном режиме, близком к стандартному, а также иллюстрация работоспособности методики для определения ТФХ гипсовых огнезащитных плит толщиной 2 см в диапазоне температур от комнатных до 1000 °С.

Эксперимент

Одностороннему нагреву в печи были подвергнуты три квадратные плитки огнезащитного материала фирмы «Брандшудс» размером 15 × 15 × 2 см. Из них были приготовлены два образца для испытаний с разными толщинами покрытий, а именно

одна плитка толщиной 20 мм, приклеенная к металлической пластине толщиной 6 мм (образец № 1) и две плитки с толщинами 20 мм каждая, прикреплённые к металлической пластине толщиной 6 мм, которые были склеены между собой при помощи алюмосиликатного клея (образец № 2, см. рис.1). За металлической пластинкой располагались два слоя теплоизоляции толщинами 30 и 50 мм (рис. 1).

На рис. 2 приведены экспериментальные значения температур в местах установки термодпар (см. рис.1) для образца №2 и вариантов, приведенных в таблице. Температура в огневой печи изменялась по известной температурной кривой стандартного пожара.

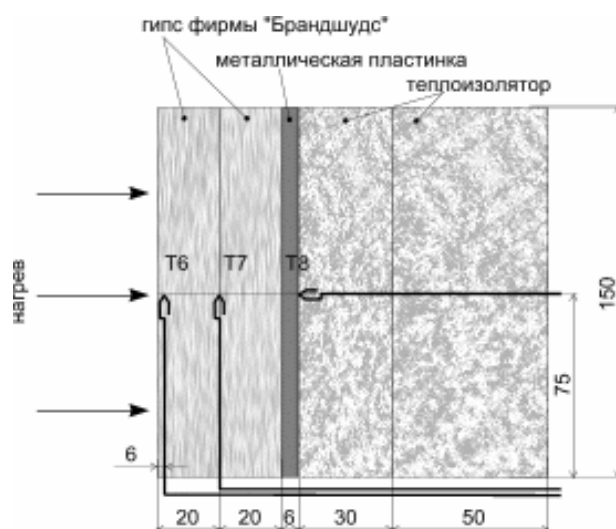


Рис. 1. Схема образца № 2 с двумя гипсовыми плитками.

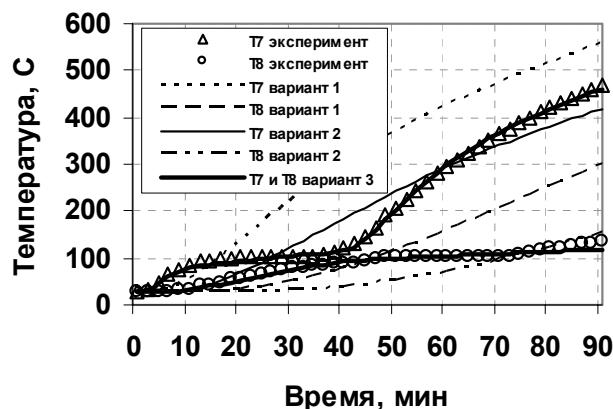


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения температур в местах установки термодпар (см. рис. 1) для образца № 2 и вариантов, приведенных в таблице.

Таблица. Варианты решений, представленных на рис. 2

Вар. №	λ , Вт/(м К)	C_p , Дж/(м ³ К)	φ , °С
1	0,24	$1,7 \cdot 10^6$	105
2	0,207	$2,8 \cdot 10^6$	34
3	рис. 3	рис. 4	6,3

Методика определения ТФХ использует так называемый расчетно-экспериментальный подход, основанный на решении обратных задач [1-3]. Для этого была создана компьютерная модель теплового состояния исследуемых образцов (одномерная модель теплопроводности), позволяющая рассчитать распределение температур во всех пространственных точках образцов во времени, и, в частности, в точках расположения термодатчиков при условиях нагрева, близких к условиям стандартного температурного режима пожара. Компьютерная модель учитывает радиационно-конвективный теплообмен между нагреваемой поверхностью образцов с одной стороны и горячими газами и нагревателями электропечи с другой стороны. Коэффициенты эффективных теплопроводности λ и удельной объемной теплоемкости $C_V = C \cdot \rho$ (ρ - плотность) гипса, зависящие от температуры, являлись искомыми характеристиками.

Математически методика заключается в поиске таких температурных функций искомого λ и C_p , для которых критерий

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

достигает минимума [1-3]. Искомые температурные зависимости λ и C_V аппроксимировались кубическими сплайнами, коэффициенты которых и представляли собой вектор искомого параметров P . Для поиска вектора P использовалась итерационная процедура Ньютона – Гаусса

$$P^{l+1} = P^l + \beta^l \cdot \Delta P^l, \quad (2)$$

где ΔP^l - приращение вектора искомого параметров P на итерации $l + 1$, определяемое решением следующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\begin{cases} Z_{1,1}^l \Delta P_1^l + \dots + Z_{1,j}^l \Delta P_j^l + \dots + Z_{1,n}^l \Delta P_n^l = T_{1\text{Э}} - T_{1\text{М}}^l \\ \dots \\ Z_{j,1}^l \Delta P_1^l + \dots + Z_{j,j}^l \Delta P_j^l + \dots + Z_{j,n}^l \Delta P_n^l = T_{j\text{Э}} - T_{j\text{М}}^l \\ \dots \\ Z_{m,1}^l \Delta P_1^l + \dots + Z_{m,i}^l \Delta P_i^l + \dots + Z_{m,n}^l \Delta P_n^l = T_{m\text{Э}} - T_{m\text{М}}^l \end{cases}, \quad (3)$$

где $Z_{j,i}^l$ - функция чувствительности (изменения) температуры $T_{j\text{М}}^l$ в j -й пространственно-временной точке измерения ($j = 1, 2, \dots, m$) к изменению i -го параметра P_i^l ($i = 1, 2, \dots, n$) вектора P . Значения $T_{j\text{М}}^l$ в (1) и (3) вычисляются решением прямой задачи теплопроводности при известных (заданных при $l = 0$) параметрах на предыдущей итерации l . Значения $T_{j\text{М}}^l$ вычисляются на каждой итерации в тех же пространственно-временных точках, в которых измерены или назначены соответствующие значения $T_{j\text{Э}}$. Итерационный процесс (2) приводит к минимизации квадратичного критерия (1). Переопределенная СЛАУ (3) решается с помощью метода наименьших квадратов [4], а дополнительная устойчивость обращения матрицы обеспечивается с помощью применением метода регуляризации А.Н. Тихонова [5].

Выход из итерационного процесса осуществляется при удовлетворении критерия (1) или удовлетворения следующего условия сходимости решения P

$$\max_i \left| \frac{\Delta P_i^l}{P_i^l} \right| \cdot 100 \leq \zeta,$$

где ζ - малая величина, например 0,005.

Изложенная методика, алгоритм и реализующая их компьютерная программа позволяют использовать измерения температур нескольких образцов одновременно для определения одних и тех же ТФХ, что позволяет резко увеличить устойчивость и отсюда точность решения ОЗТ [3]. В приведенных ниже решениях использовались экспериментальные данные двух образцов одновременно.

Результаты

На рис. 3 и 4 приведены найденные с помощью описанной выше методике зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности λ и удельной объемной теплоемкости C_p от температуры. Плотность гипса измерялась. До испытаний она составляла 980 кг/м^3 , после испытаний – 750 кг/м^3 .

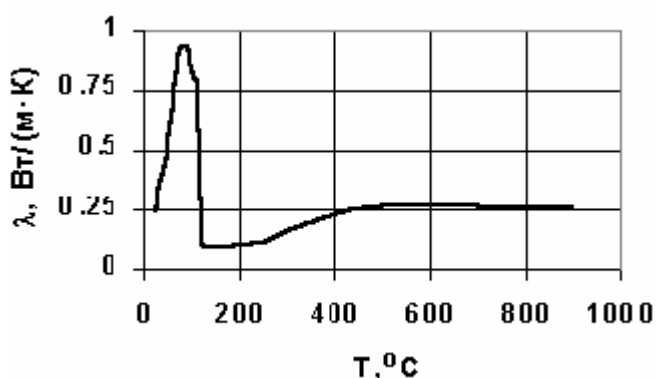


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности гипса от температуры.

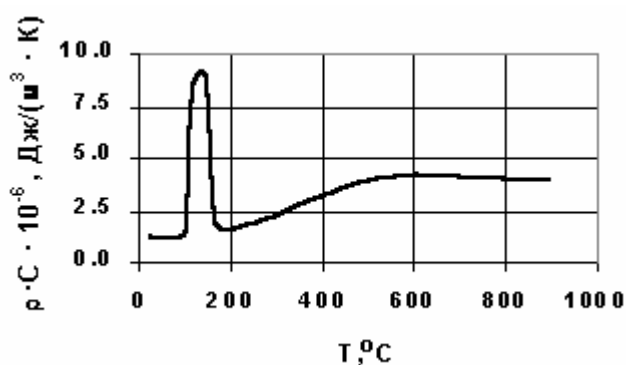


Рис. 4. Зависимость эффективной удельной объемной теплоемкости гипса от температуры.

Наличие горизонтальных участков в районе 100°C на кривых измерения температур объясняется дегидратацией и испарением содержащейся в гипсе воды [6,7], поэтому зависимость теплоемкости $C \cdot \rho$ от температуры (рис. 4) имеет в районе 100 °C «всплеск», который после 150 °C снижается. Пик теплопроводности в районе 100 °C (рис. 3) объясняется движением паров воды от мест, где происходит дегидратация.

Близость экспериментальных и расчетных значений температур в местах установки термодпар Т7 и Т8 (сплошные кривые на рис.2) показывает минимум критерия (1), который составляет 6,3 °C для варианта 3 (см. таблицу). В таблице вар.1 – литературные данные по ТФХ для гипса, вар.2 –

константы, полученные решением ОЗТ, вар.3 – функции, полученные решением ОЗТ (см. рис.3 и рис. 4).

Варианты 1 и 2 в табл. показывают намного худшие значения критерия (1) из-за больших расхождений между расчетными и экспериментальными кривыми (рис. 2). Эти варианты иллюстрируют, что постоянные значения теплопроводности и теплоемкости не могут описывать процесс теплопроводности в рассматриваемых гипсовых плитах в данном диапазоне температур. Так, например, λ и $C \cdot \rho$, данные фирмой «Брандшудс» (вар.1) или взятые из литературы (вар.2) приводят к значениям критерия расхождения между расчетными и экспериментальными кривыми (1) на уровне 100 и 34 К соответственно.

Выводы

Изложенная методика позволяет определять температурные зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости огнезащитных материалов по экспериментальным данным нагрева нескольких образцов материалов в огневой печи. Найдены зависимости от температуры эффективных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости огнезащитного материала фирмы «Брандшудс» (материал на основе гипсовых плит) в диапазоне температур от 28 °C до 900 °C в условиях нагрева образцов в огневой печи при температурном режиме, близком к стандартному. Указанный диапазон температур определяется диапазоном температур, имевших место в образцах при их нагреве.

Следует отметить, что найденные характеристики в указанном диапазоне температур строго говоря, справедливы для имевшем место условия нагрева образцов в огневой печи при температурном режиме, близком к стандартному и могут отличаться для других условий нагрева, т.к. эффективные характеристики в общем случае зависят от условий нагрева (например, от темпа нагрева).

ЛИТЕРАТУРА

1. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса.- Киев: Наукова думка, 1982.- 360 с.
2. Алифанов О.М., Занцев В.К., Панкратов Б.М., Артюхин Е.А., Мишин В.П., Жук В.И., Голосов

- А.С. Алгоритмы диагностики тепловых нагрузок летательных аппаратов/ Под ред. В.П. Мишина.- М.: Машиностроение, 1983.- 168 с.
3. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход). Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998, 224 с.
4. Фадеев Д.К., Фадеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры.- М.: Л.: Физматгиз, 1963.- 736 с.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач.- М.: Наука, 1987.- 286 с.
6. Справочник по производству гипса и гипсовых изделий/ Под ред. К.А. Зубарева.- М.: Стройиздат, 1963.- 464 с.
7. Кремнев О.А., Пиевский И.М. Тепломассообменные процессы в производстве гипсовых и гипсобетонных строительных материалов.- К.: Наукова думка, 1989.- 188 с.

Получено 11.10.2004 г.

УДК 664.38, 637.181

ШАРКОВА Н.А., ЖУКОТСЬКИЙ Е.К., ГРИЩЕНКО Г.В.

Ин-т технічної теплофізики НАН

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СОЄВИХ ПРОДУКТІВ

В статті представлені результати досліджень по розчинності білків сої та кінетики інактивації інгібітора трипсина при отриманні водного екстракту сої з метою створення технології виробництва соєвих напоїв.

В статье представлены результаты исследований по растворимости белков сои и кинетики инактиваии ингибитора трипсина при получении водного экстракта сои с целью получения технологии производства соевых напитков.

In order to work out a soy beverages producing technology the results of investigation of soy-protein solubility and ingibitor tripsine inactivation cinetics at water extract obtaining are presented in paper.

E_n – початковий вміст інгібітору трипсину, %;
 E_k – кінцевий вміст інгібітору трипсину, %;
 E_t – поточне значення вмісту інгібітору трипсину, %;
 N_{max} – максимальна швидкість інактивації трипсину, %;

n – показник, який залежить від властивостей матеріала;
 T_c – температура обробки соєвої суспензії, °C;
 τ – час, хв.;
 φ – коефіцієнт пропорційності.

Вступ

Одним із основних напрямків покращення оздоровчого ефекту в харчуванні являється створення технологій виробництва продуктів на основі високобілкової рослинної сировини, зокрема із сої. Висока біологічна цінність цієї бобової культури, унікальний хімічний склад та високі функціональні властивості відомі та використовуються давно.

Аналог коров'ячого молока – «соєве молоко» – водний екстракт сої не містить лактози та алергенів, характеризується високою харчовою цінністю та легко засвоюється. З медико-біологічних позицій воно має ту перевагу, що його склад можна змінювати в широких межах у відповідності з вимогами раціонального харчування, включаючи дієтичне та дитяче [1]. «Соєве молоко» являється основою для цілої низки продуктів оздоровчої дії