

## Моделирование теплофизических свойств пористого теплоизоляционного материала при его термообработке в вихревом аппарате

СОКОЛОВСКАЯ И.Е.\*, ЧЕРНИЧЕНКО В.Е.\*\*

\*Днепродзержинский государственный технический университет

\*\* Кременчугский государственный политехнический университет им. М.В. Остроградского

В работе приводятся экспериментальные данные о влиянии различных факторов на теплофизические свойства пористых материалов. Предложена методика и математическая модель, позволяющая прогнозировать изменение теплофизических свойств в процессе термообработки.

У роботі наводяться експериментальні дані про вплив різних факторів на теплофізичні властивості пористих матеріалів. Запропоновано методику й математичну модель, що дозволяє прогнозувати зміну теплофізичних властивостей у процесі термообробки.

In work experimental data about influence of different factors on teplofizicheskie properties of porous materials are cited. A method and mathematical model allowing to forecast the change of teplofizicheskih properties in the process of heat treatment is offered.

**Введение.** Для тепловой защиты энергетических установок в промышленности используются различные пористые теплоизоляционные материалы. Свойства этих материалов и область их применения зависят от химического состава, теплофизических характеристик компонентов и способа производства.

К наиболее характерным недостаткам технологий производства легких пористых теплоизоляционных материалов, можно отнести длительность процесса производства, плохую контролируемость процесса образования пор, низкую прочность, невозможность добиться однородной пористости, токсичность продуктов разложения органических газообразователей, их высокую стоимость. Недостатком неорганических газообразователей является плохая совместимость с органическими полимерами, затрудняющая их равномерное распределение в смесях.

При температурах выше 800 °С практически все пористые теплоизоляционные материалы на основе силикатов теряют пластичность, гибкость, ударную вязкость, становятся хрупкими и изменяют свою первоначальную форму.

Поэтому исследования, направленные на разработку оборудования и технологии производства материалов, способных работать при значительных температурных градиентах, термоустойчивых, не изменяющих своих первоначальных прочностных и теплоизоляционных свойств, при воздействии высоких или низких температур, являются актуальными и требуют дальнейших исследований.

В доступных литературных источниках приводятся зависимости потребительских свойств теплоизоляторов, но определение функциональной зависимости теплофизических характеристик от структурных параметров материала остается актуальной задачей.

В данной работе приведены результаты исследований, которые позволяют определить такую функциональную зависимость в общем виде.

**Цель работы.** Исследование и моделирование теплофизических свойств нового пористого материала [1] при различных режимах его обработки.

**Материалы и результаты исследований.** Как установлено, теплофизические свойства исследуемых

пористых материалов зависят в основном от их плотности и теплопроводности [2,3]. В свою очередь плотность и теплопроводность тоже зависят от многих факторов, в частности от термических режимов вспучивания при парообразовании на стадии изготовления пористого материала. Так, в зависимости от влажности, времени выдержки и температуры нагрева исходного сырья существенно изменяется плотность материала и, соответственно, с изменением плотности меняется и его теплопроводность.

Положительной особенностью этой зависимости является то, что она может быть управляемой, а следовательно, прогнозируемой.

Нами был проведен ряд экспериментов по исследованию теплофизических свойств пористых материалов при различных термических режимах их обработки, в которых материал нагревался при различных температурах, влажности и времени, изменяющихся в заданных диапазонах. Процесс исследовался при стационарных условиях. Материал нагревали в муфельной горизонтальной печи СШОЛ, глубиной 200-250мм, d 100...120мм, с регулируемой на определенный режим термопарой ХА 0-1100. Заготовки размещались на поду печи в тиглях. В качестве исследуемых показателей процесса термической обработки материала были взяты плотность и теплопроводность (табл. 1). На основании экспериментально найденных значений плотности были получены зависимости, показанные на рис. 1-3. Плотность материала определялась по изменению веса заготовок и их геометрического размера.

Таблица 1. Результаты эксперимента

№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	+1	+1	+1	580	0,126
2	-1	+1	+1	1948	0,093
3	+1	-1	+1	2050	0,148
4	-1	-1	+1	2050	0,100
5	+1	+1	-1	683	0,145
6	-1	+1	-1	1450	0,148
7	+1	-1	-1	1850	0,135
8	-1	-1	-1	2100	0,143

9	-1,215	0	0	960	0,08
10	+1,215	0	0	648	0,07
11	0	-1,215	0	2136	0,097
12	0	+1,215	0	1820	0,061
13	0	0	-1,215	1192	0,082
14	0	0	+1,215	894	0,061
15	0	0	0	1290	0,076

$X_1$  – температура ( $T_{-1}=100^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0=300^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{+1}=500^{\circ}\text{C}$ );  
 $X_2$  – время термического воздействия ( $t_{-1}=1\text{c}$ ;  $t_0=3\text{c}$ ;  $t_{+1}=5\text{c}$ );  
 $X_3$  – влажность материала ( $\varphi_{-1}=0\%$ ;  $\varphi_0=30\%$ ;  $\varphi_{+1}=60\%$ );  
 $Y_1$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $Y_2$  – теплопроводность материала,  $\text{Вт}/(\text{мК})$ .

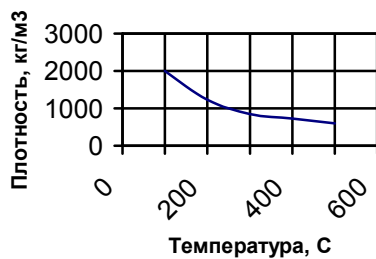


Рис. 1. Зависимость плотности от температуры

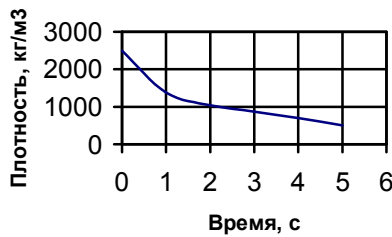


Рис. 2. Изменение плотности во времени при  $T=500^{\circ}\text{C}$



Рис. 3. Зависимость плотности от начальной влажности при  $T_{\text{печи}}=500^{\circ}\text{C}$

Теплопроводность полученных образцов была определена на измерителе теплопроводности ИТ-  $\lambda$ -400. При исследованиях использовался метод динамического калориметра [4]. В основании метода лежат закономерности монотонного разогрева тонкой пластины в режиме, когда ее температурное поле остается квазистационарным (близким к стационарному).

ИТ-  $\lambda$ -400 предназначен для измерения  $\lambda$  в диапазоне 0,1 до 5  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$ . Теловой режим измерения теплопроводности от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$ .

В ходе экспериментов исследовалось влияние температуры в печи  $X_1$ , времени термического воздействия  $X_2$ , влажности материала  $X_3$  на плотность  $Y_1$  и теплопроводность  $Y_2$  материала. Для моделирования процесса термической обработки использовались методы планирования эксперимента. Для построения квадратичной модели зависимости показателя «Y» от исследуемых факторов  $X_k$ ,  $k=1;2;3$ , использовался ортогональный центральный композиционный план второго порядка с ядром  $2^3$  [5]. В таблице 2 приведены уровни факторов в эксперименте и их фактические значения.

Таблица 2. Условия проведения эксперимента

№ п/п	Фактор	Код	Уровни факторов					$\Delta$
			-1,215	-1	0	1	1,215	
1	Температура, $^{\circ}\text{C}$	$X_1$	57	100	300	500	543	200
2	Время воздействия, c	$X_2$	0,57	1	3	5	5,43	2
3	Влажность материала, %	$X_3$	5,7	10	30	50	54,3	20

После обработки результатов экспериментов получена следующая модель зависимости:

$$Y_1 = 1101,3 - 252X_1 - 344X_2 + 16,7X_3 - 164X_1^2 + 634,4X_2^2 - 1,6X_3^2 - 235,6X_1X_2 - 43,9X_1X_3 + 30,6X_2X_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,046 + 0,005X_1 - 0,004X_2 - 0,012X_3 + 0,026X_1^2 + 0,031X_2^2 + 0,023X_3^2 - 0,001X_1X_2 + 0,012X_1X_3 - 0,005X_2X_3 \quad (2)$$

где  $X_k$ ,  $k=1;2;3$  – кодированные значения факторов.

Для проверки значимости отличия от нуля полученных коэффициентов моделей по результатам четырех повторных опытов в нулевой точке ( $X_1=X_2=X_3=0$ ) значения  $Y_1$ : 1346, 1259, 1389, 1166; и  $Y_2$ : 0,076; 0,071; 0,087; 0,071; была найдена дисперсия ошибки опытов  $S^2$ . После вычисления по формуле:

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (3)$$

получено  $S_1 = 98,78$  и  $S_2 = 0,0075$ .

С учетом полученной дисперсии ошибки опытов  $S$  были найдены пороги значимости для различных эффектов факторов  $h_k \cdot S$ , где  $h_k = t_{\text{ТАБЛ}} \sqrt{c_k}$  ( $k=1;2;3$ ),  $t_{\text{ТАБЛ}}$  – табличное значение статистики Стьюдента, найденное для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $\varphi = 3$ ,  $t_{\text{ТАБЛ}}(0,05;3) = 3,18$  [5,6],  $c_k$  – элементы дисперсной матрицы для соответствующих эффектов факторов.

В результате получим значения для плотности и теплопроводности соответственно: для линейных эффектов  $h_1 = 0,961$  и  $h_1 = 0,007$ ; для квадратичных эффектов  $h_2 = 1,525$  и  $h_2 = 0,011$ ; для парных эффектов

взаимодействия факторов  $h_3 = 1,125$  и  $h_3 = 0,008$ ,  $k$ -ый эффект факторов считается значимо отличающимся от нуля, если соответствующий ему модуль коэффициента, стоящего при нем в модели, больше порога значимости для данного эффекта, для линейных эффектов больше 94,98, для квадратичных эффектов больше 150,7, для эффектов взаимодействия факторов больше 111,1.

В результате для значимо влияющих факторов и их эффектов взаимодействия была получены следующие модели, для их кодированных значений:

$$\hat{Y}_1 = 1100,1 - 252X_1 - 344X_2 - 164X_1^2 + 634,4X_2^2 - 235,6X_1X_2 \quad (4)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,046 - 0,012X_3 + 0,026X_1^2 + 0,031X_2^2 + 0,023X_3^2 + 0,012X_1X_3 \quad (5)$$

В ходе исследований установлены следующие закономерности. Наиболее сильное влияние на плотность оказывает время термообработки материала в печи. Причем, чем оно больше, тем меньше плотность. Это объясняется тем, что в заданном температурном диапазоне на протяжении исследуемого периода времени в материале происходили процессы обезвоживания и упрочнения каркаса. Если бы мы существенно (за диапазоном измерения) повысили влажность сырьевой заготовки, то в этом случае материал был бы менее плотным и этот фактор стал бы доминирующим. Но при этом прочность готового материала не соответствовала бы потребительским качествам.

Температура также обратнопропорционально влияет на плотность. Эти зависимости отражены в уравнении (4), (5) соответствующими коэффициентами и знаками при них.

На теплопроводность оказывает влияние кроме названных факторов и влажность сырьевой заготовки. Причем, чем выше влажность, тем меньшее значение приобретает теплопроводность, что также количественно отражает уравнение (5) для  $\hat{Y}_2$ .

Для проверки адекватности полученных моделей (1) по формуле:

$$S_{OCT}^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (6)$$

была найдена остаточная дисперсия  $S_{OCT}^2$ , где  $Y_i$  - фактические,  $\hat{Y}_i$  - расчетные значения показателя  $Y$  в  $i$ -ом опыте,  $i = 1, \dots, 15$ ,  $n$  - число опытов,  $m$  - число коэффициентов в модели,  $m = 6$ . В результате расчетов по формуле (2)  $S_{OCT1}^2 = 55660,7$  и  $S_{OCT2}^2 = 0,00033$ .

Проверка адекватности полученной модели истинной зависимости проводилась по критерию Фишера. Расчетное значение статистики Фишера:

$$F_p = \frac{S_{OCT}^2}{S^2} \quad (7)$$

$F_{p1} = 5,704$  и  $F_{p2} = 5,8$ , что меньше табличного значения  $F_{ТАБЛ} = (0,05; 9; 3) = 8,812$ . Так как

$F_p < F_{OCT}$ , то полученные модели адекватны истинной зависимости и с достоверностью 0,95 она может использоваться для анализа и прогноза зависимости плотности и теплопроводности от температуры, времени воздействия, влажности материала в области близкой к области проведения эксперимента.

Исходя из вышеприведенных данных плотности и теплопроводности, можно определить зависимость этих двух параметров друг от друга (рис. 4).

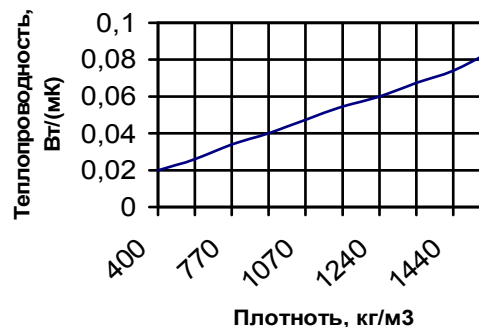


Рис. 4. Зависимость теплопроводности от плотности материала при  $T=100 \dots 500^\circ\text{C}$

#### Выводы

Исходя из полученной зависимости можно сделать вывод о том, что с увеличением плотности растет и значение теплопроводности материала. Следовательно, для получения материала с наилучшими теплофизическими свойствами (малой теплопроводностью) необходимо достигать меньшей плотности, но при этом и с необходимой прочностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 25862 Україна. МПК С 04 В 14/00. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу / Соколовська І.Є., Кошляк Г.В., Павленко А.М., заявник і власник Дніпродр. держ. техн. ун-т. № 200703899; заявл. 10.04.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. №13, 2007р.
2. Чураев Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. - М.: Химия, 1990. - 272с.
3. Горлов В.Н., Мерлин А.И. Технология производства теплоизоляционных материалов. - М.: Химия, 1987. - 236.
4. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. - Л.: Энергия, 1973 - 143с.
5. Хартман К. и др. Планирование экспериментов в исследовании технологических процессов. - М.: Мир, 1977. - 552с.
6. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. - 279с.

пост. 19.09.08