

УДК 664.2.032.1

И.Е. Соколовская, А.В. Кошлак, В.Е. Черниченко, А.М. Павленко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ

Введение. Пористые материалы находят широкое применение в различных отраслях техники, в частности в качестве теплоизолирующей среды для ряда термонапряженных установок, работающих в разных температурных диапазонах. Поэтому такие материалы должны обладать соответствующими теплофизическими и механическими свойствами. 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 пористых материалов при различных режимах его обработки.

Материалы и результаты исследований. Как установлено, теплофизические свойства исследуемых пористых материалов зависят в основном от их плотности и теплопроводности [1,2]. 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 ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂
1	+1	+1	+1	580	0,126	9	-1,215	0	0	960	0,08
2	-1	+1	+1	1948	0,093	10	+1,215	0	0	648	0,07
3	+1	-1	+1	2050	0,148	11	0	-1,215	0	2136	0,097
4	-1	-1	+1	2050	0,100	12	0	+1,215	0	1820	0,061
5	+1	+1	-1	683	0,145	13	0	0	-1,215	1192	0,082
6	-1	+1	-1	1450	0,148	14	0	0	+1,215	894	0,061
7	+1	-1	-1	1850	0,135	15	0	0	0	1290	0,076
8	-1	-1	-1	2100	0,143	16					

X₁ – температура (T₋₁=100°С; T₀=300°С; T₊₁=500°С);

X₂ – время термического воздействия (t₋₁=1с; t₀=3с; t₊₁=5с);

X₃ – влажность материала (φ₋₁=0%; φ₀=30%; φ₊₁=60%);

Y₁ – плотность материала, кг/м³;

Y₂ – теплопроводность материала, Вт/(мК).

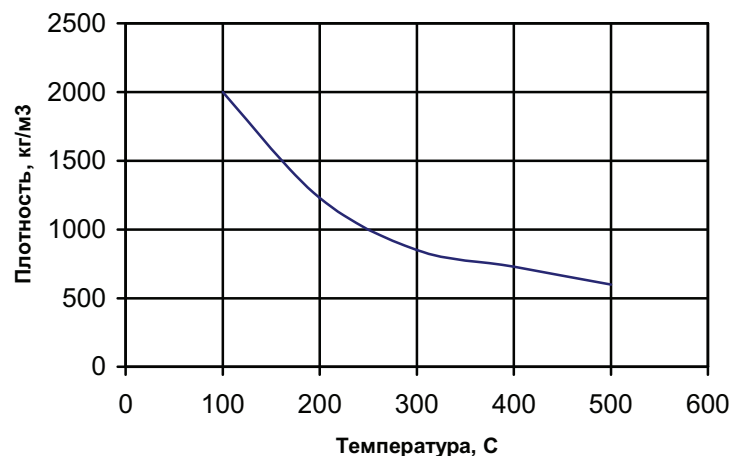
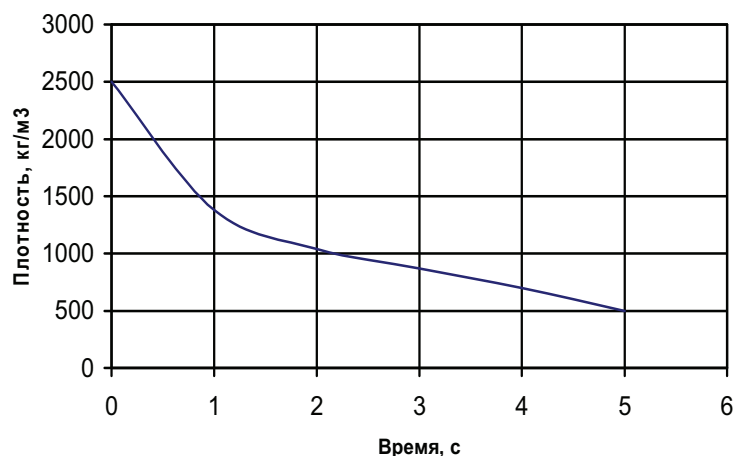
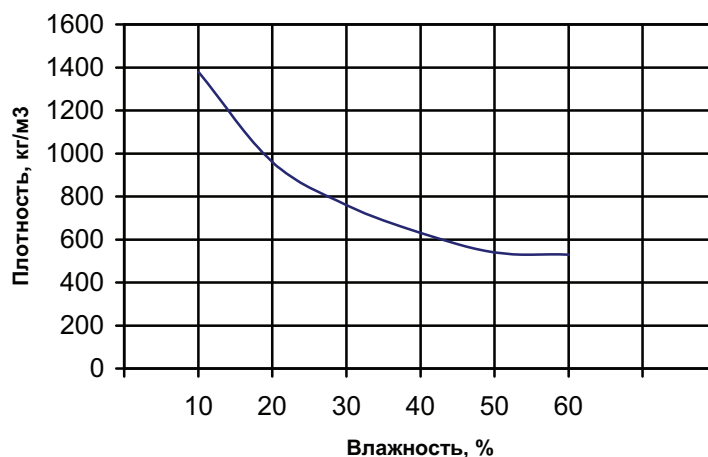


Рисунок 1 - Зависимость плотности от температуры

Рисунок 2 - Изменение плотности во времени при $T=500^{\circ}\text{C}$ Рисунок 3 – Зависимость плотности от начальной влажности при $T_{\text{печи}}=500^{\circ}\text{C}$

Теплопроводность полученных образцов была определена на измерителе теплопроводности ИТ- λ - 400. При исследованиях использовался метод динамического калориметра [3]. В основании метода лежат закономерности монотонного разогрева тонкой пластины в режиме, когда ее температурное поле остается квазистационарным (близким к стационарному).

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

На рис. 4 приведена тепловая схема метода. Образец, который испытывается 4, пластина 3 и стержень 5 монотонно разогреваются тепловым потоком $Q(\tau)$, поступающим от основания 1.

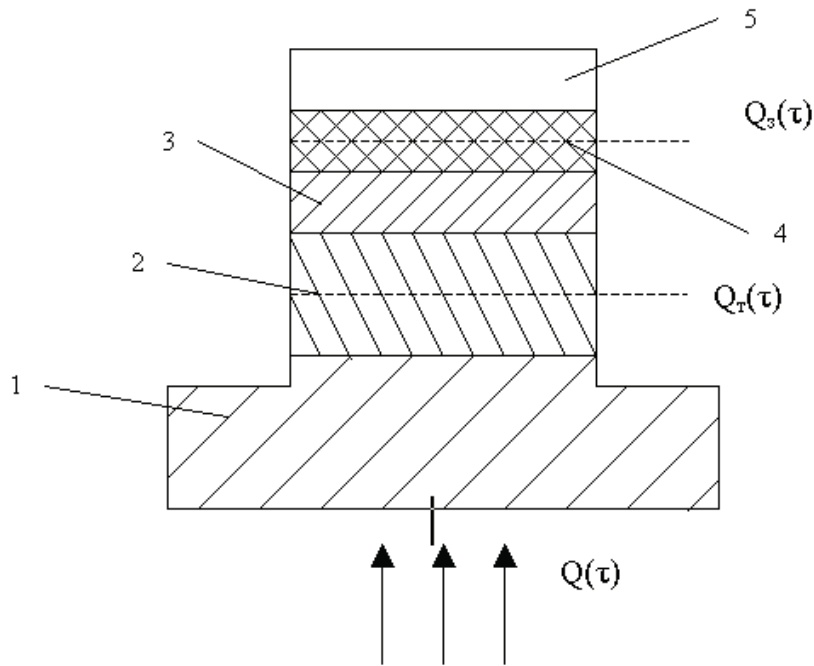


Рисунок 4 – Тепловая схема метода: 1 - основа; 2- пластина; 3–контактная пластина; 4- исследуемый образец; 5- стержень

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 [4]. В таблице 2 приведены уровни факторов в эксперименте и их фактические значения.

Таблица 2

Условия проведения эксперимента

№ п/п	Фактор	Код	Уровни факторов					Δ
			-1,215	-1	0	1	1,215	
1	Температура, $^{\circ}\text{C}$	X_1	57	100	300	500	543	200
2	Время воздействия, с	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 $h_k = t_{ТАБЛ} \sqrt{c_k}$ ($k=1;2;3$), $t_{ТАБЛ}$ – табличное значение статистики Стьюдента, найденное для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $\varphi = 3$, $t_{ТАБЛ}(0,05;3) = 3,18$ [4,5], 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 $h_2 = 0,007$; для квадратичных эффектов $h_3 = 1,525$ и $h_4 = 0,011$; для парных эффектов взаимодействия факторов $h_5 = 1,125$ и $h_6 = 0,008$, к-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:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_1 &= 1100,1 - 252X_1 - 344X_2 - 164X_1^2 + 634,4X_2^2 - 235,6X_1X_2, \\ \mathcal{F}_2 &= 0,046 - 0,012X_3 + 0,026X_1^2 + 0,031X_2^2 + 0,023X_3^2 + 0,012X_1X_3. \end{aligned} \quad (4)$$

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.

Плотность обратнопропорциональна температуре. Эти зависимости отражены в уравнении (4) 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 (4) для ϵ_2 .

Для проверки адекватности полученных моделей (1) по формуле:

$$S_{OCT}^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \epsilon_i)^2, \quad (5)$$

была найдена остаточная дисперсия S_{OCT}^2 , где Y_i - фактические, ϵ_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:

$$F_p = \frac{S_{OCT}^2}{S^2}; \quad (6)$$

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

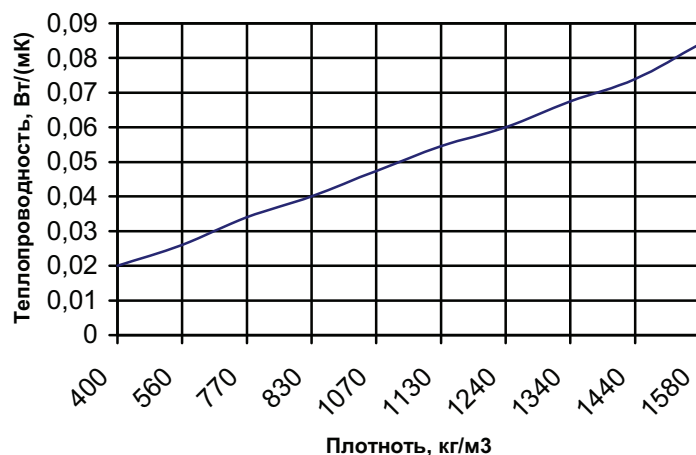


Рисунок 5 – Зависимость теплопроводности от плотности материала при $T=100...500^{\circ}\text{C}$

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. Чураев Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. – М.: Химия, 1990. - 272с.
2. Горлов В.Н., Мерлин А.И. Технология производства теплоизоляционных материалов. –М.: Химия, 1987. – 236.
3. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. – Л.: Энергия, 1973 – 143с.
4. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 552с.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. – 279с.

Получено 13.04.2007 г.