

5. Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. 3. Дробление включений дисперсной фазы / А.А.Долинский, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т.21. – №2-3. – С.5-6.
6. Иваницкий Г.К. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа / Г.К.Иваницкий, А.А.Корчинский, М.В.Матюшкин // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25. – №1. – С.29-35.
7. Новиков В.С. Гомогенизация и диспергирование в современной технологии // Промышленная теплотехника. – 1990. – Т.12. – №5. – С.40-59.
8. Эмульсии / под ред. Ф.Шермана. – Л.: Химия, 1972. – 312с.

УДК 532.5.072.15

КОШЛАК А.В., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА**

**Введение.** Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов Украины в условиях их постоянного дефицита и дороговизны остается крайне низкой. На сегодняшний день одной из стратегических задач курса энергосбережения является снижение топливно-энергетических затрат в различных теплоагрегатах, при возведении и эксплуатации зданий, промышленных установок, аппаратуры трубопроводов, холодильников и т.д. В сложившихся условиях, учитывающих современный энергетический кризис в производстве промышленной и строительной теплоизоляции, возникла острая потребность в разработке и применении эффективных теплоизоляционных материалов для всех отраслевых хозяйств страны. Распространенность природных залежей кремнеземистых пород в регионах Украины (32 месторождения в 12 регионах), дешевое и доступное экологически чистое сырье и технология производства являются важным аргументом для дальнейших исследований, разработок и внедрений новых технологий производства теплоизоляционных материалов на основе гидросиликатов. Исследования в области получения таких теплоизоляционных материалов должны быть направлены на улучшение их теплофизических и конструктивных свойств.

**Постановка задачи.** Пористые теплоизоляционные материалы имеют широкий круг применения в различных областях техники. Поэтому к данным материалам предъявляют и соответствующие требования по интервалу значений теплофизических характеристик, в частности, теплопроводности, термической устойчивости и прочности. Очевидно, что эти показатели взаимосвязаны. Поэтому при производстве теплоизоляции следует решать оптимизационные задачи, позволяющие прогнозировать уровень значений названных характеристик.

В литературе [1, 2, 3] приводится описание состава и свойств нового пористого теплоизоляционного материала, полученного путем вспучивания с применением газообразователей. Состав и процентное соотношение компонентов сырьевой смеси в целом определяют теплофизические свойства конечного материала. Поэтому для его производства важно знать, как взаимосвязаны эти компоненты и технологические режимы с некоторыми наиболее интересующими технологов свойствами. Таким образом, задачей исследования является изучение влияния различных факторов на теплофизические характеристики пористых теплоизоляционных материалов.

**Результаты работы.** В технологиях вспучивания кремнистых пород или кремнеземистых материалов техногенного происхождения сопровождается выделением га-

зообразных продуктов во всем объеме материала, находящегося в пластично-вязком состоянии, в процессе нагрева. Среднетемпературными газообразователями служат гидратная вода, бикарбонат натрия и глина, которые при нагреве образуют газы. Вспучивание газообразованием предполагает, что выделяющийся в процессе газообразования газ остается в гелеобразной пластичной газонепроницаемой фазе, которая кристаллизуется при среднетемпературном воздействии 100-120°C, с образованием ячеистой структуры пор. При этом с материалом происходят следующие превращения:

- 1) образование геля, насыщенного газообразователями и равномерно распределенного в объеме материала;
- 2) застывание геля без термического воздействия;
- 3) гранулирование;
- 4) вспучивание и образование монодисперсной пористой структуры с фиксированным размером пор, поверхность которой покрыта сплошной пленкой;
- 5) окончательная кристаллизация гранулы пористого материала при контакте со среднетемпературным теплоносителем.

При предварительной подсушке гранул температурой воздуха 100-120°C вязкость материала повышается, при этом начинается активное газообразование, которому способствует наличие в исходной смеси гидратной воды, бикарбоната натрия и глины. Интенсивность этого процесса регулируется температурой и временем воздействия теплоносителя, которые подбираются таким образом, что газовые ячейки увеличиваются до определенного, заданного размера, не сливаясь и не схлопывая. Таким образом, внутренние поверхности газовых ячеек стабилизированы, а наружная поверхность гранул покрыта сплошной пленкой. Время температурного воздействия определяет как структурные характеристики (пористость и размер пор), так и прочностные свойства материала и его термостойкость. Окончательное структурирование материала происходит при более высокой непродолжительной термообработке.

Глина является дополнительным низкотемпературным газообразователем. Сильная щелочь при взаимодействии с окислом алюминия растворяет защитную окисную пленку на поверхности алюминия:



Алюминий переходит в раствор в виде ионов  $\text{Al}^{3+}$ , при этом выделяются три моля водорода:



Глина повышает термостойкость полученного материала. В результате взаимодействия глины с компонентами смеси под воздействием высоких температур образуются новые химические соединения, обладающие более высокими огнеупорными свойствами.

Для оценки влияния состава сырьевой смеси и термических режимов ее обработки на теплофизические свойства конечного образца разработана математическая модель.

В качестве показателей процесса, характеризующих поведение материала при тепловой и механической нагрузках, были взяты пористость  $Y_1$ , теплопроводность  $Y_2$ , модуль Юнга  $Y_3$  и термостойкость материала  $Y_4$ . В качестве факторов, влияющих на эти показатели, использованы содержание глины  $X_1$ , содержание  $\text{Na}_2\text{CO}_3$   $X_2$ , влажность материала  $X_3$  и температура обработки  $X_4$ .

Данные, полученные в ходе эксперимента, приведены в табл.1, 2. Для построения моделей использовался ортогональный центральный композиционный план второго порядка с ядром  $2^4$ [4].

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

X	-1,414	-1	0	+1	+1,414	$\Delta$
X <sub>1</sub>	16,7	25	45	65	73,3	20
X <sub>2</sub>	2,17	3	5	7	7,83	2
X <sub>3</sub>	11,7	20	40	60	68,3	20
X <sub>4</sub>	258,6	300	400	500	541,4	100

Таблица 2 – Значения показателей Y<sub>1</sub>

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
1	+1	+1	+1	+1	0,181	0,020	16,8	1200
2	-1	+1	+1	+1	0,362	0,031	16,2	800
3	+1	-1	+1	+1	0,395	0,038	35,3	1080
4	-1	-1	+1	+1	0,519	0,076	31,3	760
5	+1	+1	-1	+1	0,154	0,023	39,6	1200
6	-1	+1	-1	+1	0,416	0,035	39	600
7	+1	-1	-1	+1	0,433	0,041	41,9	980
8	-1	-1	-1	+1	0,429	0,039	41	590
9	+1	+1	+1	-1	0,159	0,018	34	1240
10	-1	+1	+1	-1	0,428	0,044	32	810
11	+1	-1	+1	-1	0,444	0,048	37,7	1000
12	-1	-1	+1	-1	0,433	0,046	37	740
13	+1	+1	-1	-1	0,190	0,025	40,6	1190
14	-1	+1	-1	-1	0,388	0,039	39	630
15	+	-	-	-	0,419	0,053	40,9	900
16	-	-	-	-	0,530	0,078	40,4	650
17	-1,414	0	0	0	0,321	0,047	31,4	1200
18	+1,414	0	0	0	0,375	0,051	21,9	800
19	0	-1,414	0	0	0,322	0,046	18,4	960
20	0	+1,414	0	0	0,353	0,050	38	900
21	0	0	-1,414	0	0,421	0,056	15	1100
22	0	0	+1,414	0	0,519	0,076	31	980
23	0	0	0	-1,414	0,283	0,038	17,4	860
24	0	0	0	+1,414	0,480	0,063	36	820
25	0	0	0	0	0,331	0,027	31	840

После проведенных расчетов по алгоритму метода были получены оценки коэффициентов в моделях, приведенные в табл.3.

Таблица 3 – Оценки коэффициентов в моделях, характеризующих степень влияния факторов и их взаимодействий на показатели

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+1	+1	+1	+1	0,181	0,020	16,8	1200
2	-1	+1	+1	+1	0,362	0,031	16,2	800
3	+1	-1	+1	+1	0,395	0,038	35,3	1080
4	-1	-1	+1	+1	0,519	0,076	31,3	760
5	+1	+1	-1	+1	0,154	0,023	39,6	1200
6	-1	+1	-1	+1	0,416	0,035	39	600
7	+1	-1	-1	+1	0,433	0,041	41,9	980

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	-1	-1	-1	+1	0,429	0,039	41	590
9	+1	+1	+1	-1	0,159	0,018	34	1240
10	-1	+1	+1	-1	0,428	0,044	32	810
11	+1	-1	+1	-1	0,444	0,048	37,7	1000
12	-1	-1	+1	-1	0,433	0,046	37	740
13	+1	+1	-1	-1	0,190	0,025	40,6	1190
14	-1	+1	-1	-1	0,388	0,039	39	630
15	+	-	-	-	0,419	0,053	40,9	900
16	-	-	-	-	0,530	0,078	40,4	650
17	-1,414	0	0	0	0,321	0,047	31,4	1200
18	+1,414	0	0	0	0,375	0,051	21,9	800
19	0	-1,414	0	0	0,322	0,046	18,4	960
20	0	+1,414	0	0	0,353	0,050	38	900
21	0	0	-1,414	0	0,421	0,056	15	1100
22	0	0	+1,414	0	0,519	0,076	31	980
23	0	0	0	-1,414	0,283	0,038	17,4	860
24	0	0	0	+1,414	0,480	0,063	36	820
25	0	0	0	0	0,331	0,027	31	840

Для проверки зависимости влияния факторов и их взаимодействий на показатели, а также адекватности полученных ошибок наблюдений  $S^2$  для каждого показателя в «нулевой» точке  $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0$  были проведены четыре повторных опыта. Их результаты приведены в табл.4.

Таблица 4 – Значения повторных опытов и дисперсий ошибок для показателей  $Y$ 

Показатель	Значение показателя в повторных опытах				Дисперсия ошибок наблюдений
	1	2	3	4	
$Y_1$	67	72	73	68	8,667
$Y_2$	0,11	0,10	0,15	0,12	0,00047
$Y_3$	28,9	32,2	32,9	30	3,487
$Y_4$	820	870	850	820	600

В результате при расчете по формуле оценки дисперсии ошибки наблюдения

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

где  $Y_i$  – значение показателя  $Y$  в  $i$ -ом повторном опыте, а  $\bar{Y}$  – среднее значение  $Y$  в «нулевой» точке, получили дисперсии ошибок наблюдений (табл.4).

«Пороги значимости» для оценок коэффициентов, характеризующих силу влияния факторов и их эффектов взаимодействия, находились как  $h_i = t_{кр}(\alpha; \varphi)$ , где  $S$  – среднее квадратическое отклонение ошибки наблюдения,  $h_i = t_{кр}(\alpha; \varphi) \cdot \sqrt{c_i}$ ,  $t_{кр}(\alpha; \varphi)$  – критическое значение распределения Стьюдента для уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы  $\varphi$ . В проведенных исследованиях  $\varphi = 3$ ;  $c_1 = 0,05$  для

$x_i$ ,  $c_2 = 0,125$  для  $x_i^2$ ,  $c_3 = 0,0625$  для  $x_i \cdot x_j$ ,  $i, j = 1 \dots 4$  [5]. В результате расчетов по формуле (3) полученные для показателей  $Y$  «пороги значимости» для оценок коэффициентов приведены в табл.5.

Таблица 5 – «Пороги значимости» для факторов и их взаимодействий

Показатели	Пороги значимости		
	$X_i$	$X_i^2$	$X_i X_j$
$Y_1$	2,095	3,312	2,342
$Y_2$	0,015	0,024	0,017
$Y_3$	1,329	2,101	1,485
$Y_4$	17,429	27,557	19,486

Исключив из моделей факторы и их взаимодействия, величина коэффициентов которых по модулю меньше указанных «порогов значимости», для уровня значимости  $\alpha = 0,5$  получили следующие зависимости:

$$\hat{Y}_1 = 83,52 + 3,736X_1 + 6,207X_2 + 14,08X_3 + 5,255X_4 - 11,2X_1^2 - 6,95X_2^2 - 7,2X_3^2 - 3,45X_4^2 + 2,5X_3X_4, \quad R = 0,914 \quad (4)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,041 - 0,052X_2 - 0,091X_3 - 0,016X_4 + 0,055X_1^2 + 0,075X_2^2 + 0,032X_3^2 + 0,057X_4^2 + 0,019X_2X_3 - 0,02X_3X_4, \quad (5)$$

$$\hat{Y}_3 = 23,332 - 3,796X_2 - 5,251X_3 - 3,345X_4 + 3,41X_1^2 + 4,185X_2^2 + 3,435X_4^2 - 2,325X_2X_3 - 1,683X_2X_4 - 2,7X_3X_4, \quad (6)$$

$$\hat{Y}_4 = 940 + 188,78X_1 + 52,742X_2 + 52,984X_3 + 33,25X_3^2 - 66,75X_4^2 + 48,125X_1X_2 - 24,375X_1X_3. \quad (7)$$

Проверка адекватности полученных моделей проводилась по критерию Фишера. Расчетное значение  $F$  статистики находилось по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ост}^2}{S^2}. \quad (8)$$

Для полученных моделей остаточная дисперсия

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (9)$$

где  $n=25$  – число опытов,  $m$  – число коэффициентов в модели.

Полученные остаточные дисперсии, расчетные и табличные значения статистики Фишера приведены в табл.6.

Таблица 6 – Расчетные и табличные значения статистики Фишера

Показатели	Значения $S_{ост}^2$ , $F_{расч.}$ , $F_{табл.}$		
	$S_{ост}^2$	$F_{расч.}$	$F_{табл.}$
$Y_1$	47,34	5,42	8,703
$Y_2$	0,0028	6,085	8,703
$Y_3$	22,335	6,406	8,703
$Y_4$	3229,52	5,383	0,683

Так как  $F_p$  для всех моделей меньше  $F_{табл.}$ , то обе модели адекватны с надежностью 0,95 истинной зависимости и могут быть использованы для технологического анализа процесса и прогноза значений показателей  $Y$ .

**Выводы.** Таким образом, основным фактором, определяющим пористость, теплопроводность, прочность и термостойкость теплоизоляционного пористого материала, является влажность сырьевой смеси перед термообработкой. Термостойкость в большей степени зависит от содержания глины в смеси. Очевидно, что именно эти факторы обеспечивают необходимую интенсивность тепломассо-обменных процессов в исходном материале, которая взаимосвязана с основным технологическим показателем – температурой внешнего теплоносителя.

Термодинамические параметры пара определяются температурой теплоносителя и продолжительностью термического контакта с теплоносителем. Таким образом, используя полученные данные, можно прогнозировать свойства пористого материала на стадии проектирования технологического оборудования или процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 27656 UA, МПК C04B14/00. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу / Кошлак Г.В., Павленко А.М.; заявник та патентовласник Дніпродзержинський державний технічний університет. – № 200707203; заявл. 26.06.07; опубл. 12.11.07, Бюл. №18.
2. Пат. 25862 UA, МПК C04B14/00. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу / Кошлак Г.В., Павленко А.М., Соколовська І.Є.; заявник та патентовласник Дніпродзержинський державний технічний університет. – № 200703899; заявл. 10.04.07; опубл. 27.08.07, Бюл. №13.
3. Пат. 25527 UA, МПК C04B14/00. Спосіб одержання пористого теплоізоляційного матеріалу / Кошлак Г.В., Павленко А.М.; заявник та патентовласник Дніпродзержинський державний технічний університет. – № 200703898; заявл. 10.04.07; опубл. 10.08.07, Бюл. №12.
4. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Хартман К., Лецкий Э, Шеффер В. – М.: Мир, 1977. – 552с.
5. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука, 1976. – 279с.

УДК 532.5.072.15

ЯКОВЛЕВА А.В.\*, аспирант  
ПАВЛЕНКО А.М., д.т.н., профессор

\*Запорожская государственная инженерная академия  
Днепродзержинский государственный технический университет

### ПОЛЕЗНАЯ ЛУЧИСТАЯ МОЩНОСТЬ U-ОБРАЗНОГО «ТЕМНОГО» ТРУБНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

**Введение.** Отопительный сезон в Украине продолжается около 6 месяцев. Это обстоятельство придает большое значение проблеме отопления. Затраты энергии на отопление достаточно велики, что стимулирует постоянный поиск их снижения. Широко сегодня применяемая система центрального отопления является чрезвычайно энергоемкой, инерционной, плохоуправляемой.