

Определение теплопроводности композиционного материала математико-статистическим методом планирования эксперимента Джумаев Д.С.¹, Ходжамуродов С.К.², Тагойбеков Ш.С.³

¹Джумаев Джамшиед Сатторович / Jumaev Jamshed Sattorovich – соискатель,

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии, Академия наук Республики Таджикистан;

²Ходжамуродов Сафар Кавракович / Khojatiurodov Safar Kavrakovich – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

кафедра производства строительных материалов, технологии и организации строительства,

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими;

³Тагойбеков Шарофиддин Сафарбекович / Tagoibekov Sharofiddin Safarbekovich – соискатель,

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии, Академия наук Республики Таджикистан,

г. Душанбе, Республика Таджикистан

Аннотация: в статье приведены результаты проведенных исследований теплопроводности органически-связанного композиционного материала на основе растительно-вяжущей композиции (РВК) на основе математико-статистического метода планирования эксперимента. Получено регрессионное уравнение определения величины коэффициента теплопроводности гипсо-грунто-гуза-паитового теплоизоляционного материала (ГГГТМ) в сухом состоянии при различных расчетных соотношениях его компонентов.

Ключевые слова: теплопроводность, гуза-пая (стебли хлопчатника), растительно-вяжущая композиция, составляющие компоненты.

В данном контексте рассмотрим исследование теплопроводности гипсо-грунто-гуза-паитового теплоизоляционного материала (ГГГТМ).

Проведенные исследования Б.Н. Кауфманом и Каммерером [1, 2], а также и другими исследователями [3-7 и др.], касающейся теплопроводности материалов органического происхождения, указывают на то, что величина коэффициента теплопроводности органических связанных материалов волокнистого строения зависят от нижеследующих основных факторов:

- вид вяжущего вещества;
- разновидность органического заполнителя в виде растительного сырья;
- основные характеристики пористой структуры, к которым относятся величины размера волокон, а также и величины размера между ними воздушной прослойки.

Также к числу факторов, влияющие на теплопроводность исследуемых материалов можно назвать и известные факторы, которые влияют величину «предельного значения коэффициентов теплопроводностей материалов», к которым можно отнести условие изготовления смеси, характера обработки образцов и т.п.

Представляется актуальным установить на основе проведенных экспериментальных исследований характер влияния параметров состава самого материала на коэффициент его теплопроводности. При этом следует учесть тот факт, чтобы предел изменения параметров состава материала должны был идентичен основным параметрам реального теплоизоляционного и теплоизоляционно-конструкционного материала.

В связи с этим, учитывая такую постановку задачи, при варьировании основных параметров состава, проведены экспериментальные исследования теплопроводности ГГГТМ.

Вяжущими веществами для ГГГТМ являлись - лессовидный суглинок месторождения г.Душанбе с учетом его гранулометрического состава (см. табл. 1.1 главы 1), а также и строительный гипс марки Г-4, который выпускается Душанбинским заводом строительных материалов.

В качестве заполнителя использованы стебли хлопчатника. Биостойкость стелей хлопчатника обеспечена использованием хлорида кальция, согласно ГОСТ 450-77.

Согласно ГОСТ 7076-78, были проведены исследования теплопроводности на различных образцов из ГГГТМ с формой призмы размерами 250x250x50 мм, на приборе для определения теплопроводности испытуемых материалов – приборе «Бокка». А также и для определения прочностных характеристик были испытаны изготовленные кубики размерами 150x150x150 мм. Следует отметить, что все исследуемые образцы с определенным составом были изготовлены одновременно. Теплопроводность исследуемых образцов определялась на третий день после их распалубки и последующего их высушивания до постоянного (т.е. сухого) веса при температуре 60°C. А в дальнейшем испытания прочности образцов проводились после хранения в естественных условиях.

Далее статистической обработке подвергались результаты испытаний образцы материалов ГГГТМ по величине теплопроводности. Также в последующем использован математико-статистический метод планирования эксперимента с целью установления зависимости теплопроводности от величины соотношения вяжущих и заполнителя в структурном составе ГГГТМ [34].

Нижеследующие величины были приняты как независимые входные переменные показатели - варьируемых факторов состава исследуемого материала:

- величина, равное соотношению массы гипса к массе лёссовидного суглинка - Z_1 ;

- величина, равное соотношению массы измельченной гуза-паи (дробленки) к общей (суммарной) массе гипса и грунта (лёссовидного суглинка) - Z_2 ;

- величина водо-вяжущего отношения - Z_3 .

Коэффициент теплопроводности ГГГТМ в сухом состоянии (λ_0) - Y является входным параметром.

Проведенные предварительные эксперименты определили диапазонов варьирования, так называемых «входных параметров», которые оказывают наибольшее и существенное влияние на теплопроводность ГГГТМ – на «входные параметры». А после установления диапазона варьирования факторов, определялись их численные значения, что относится к «основному уровню» и «шаг варьирования» (табл. 1).

Таблица 1. Величины диапазона «варьируемых факторов»

№ пп.	Варьируемые факторы	Основной уровень	Шаг варьирования	Нижний уровень	Верхний уровень	Обозначение
1.	$(G_{гр}/G_{гп})$	1,08	0,78	0,30	1,86	Z_1
2.	$G_{др}/(G_{гп}+G_{гп})$	0,30	0,12	0,18	0,42	Z_2
3.	$B/(G_{гп}+G_{гп})$	0,60	0,10	0,50	0,70	Z_3

$G_{гр}$, $G_{гп}$, $G_{др}$ и B - масса грунта, гипса, дробленки в кг и объема воды в л.

Исходя из того, что изменения теплопроводности ГГГТМ происходит в значительном диапазоне, для реализации была принята трехуровневый нелинейный план для $k=3$ (табл. 2).

Таблица 2. Трёхуровневый, трехфакторный план проведения эксперимента: $k=3$ ($N=N_1+N_d+n_0$)

№№ пп.	Матрица планирования, (X_i)			Квадраты переменных, (X_i^2)			Взаимодействие ($X_i X_j$)			Коэфф. тепло-проводности ГГГТМ в сухом состоянии, λ_0 , Вт/(м·К)
	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	
N_1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,161
	2	-	+	+	+	+	-	-	+	0,130
	3	+	-	+	+	+	+	+	-	0,191
	4	-	-	+	+	+	+	-	-	0,257
	5	+	+	-	+	+	+	+	-	0,112
	6	-	+	-	+	+	+	-	+	0,153
	7	+	-	-	+	+	+	-	-	0,187
	8	-	-	-	+	+	+	+	+	0,226
N_d	9	+	0	0	+	0	0	0	0	0,168
	10	-	0	0	+	0	0	0	0	0,219
	11	0	+	0	0	+	0	0	0	0,141
	12	0	-	0	0	+	0	0	0	0,223
	13	0	0	+	0	0	+	0	0	0,188
	14	0	0	-	0	0	+	0	0	0,170
n_0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0,181
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0,175
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0,184
Σ										3,066

Основными предпосылками для решения типичной задачи регрессионного анализа являются:

1. Выходной параметр Y как результат наблюдения является независимой нормально распределенной случайной величины.

2. Величина дисперсии Y с учетом многократного повторного наблюдений в любой точке $/X_i/$ будет идентичным дисперсию в другой точке $/X_j/$.

3. Ошибки измерения при определении Y во многом превышает ошибку измерения независимых переменных X_1 , X_2 и X_3 .

При соблюдении вышеуказанных условий, уравнение регрессии выходного параметра теплопроводности материала описывается следующим образом [3, 4, 6]:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (1)$$

Что касается коэффициентов уравнения (1), то они определяются по нижеследующей последовательности.

Расчет состава ГГГТМ производится с использованием варьируемых факторов и с учетом интервалов их изменения. С целью выполнения расчета, для каждого опыта составим специальную таблицу для определения натуральных значений переменных, исходя из кодовой записи, принятой при составлении плана проведения эксперимента (табл. 3).

На основании выбранного плана экспериментов, при проведении опытных замесов, результаты опыта в нулевой точке, где все факторы находятся на основном уровне. Следует отметить, что именно в основном уровне результаты равномерно распределены между всеми другими опытами с учетом их дублирования через каждые 3-5 состава замесов. Таким образом, принимался реализации трехуровневого нелинейного плана в следующем порядке опытов: 1, 2, 3, 4, 5, 15, 6, 7, 8, 9, 10, 16, 11, 12, 13, 14, 17.

После этого, в таблицу заносятся результаты определения коэффициентов теплопроводности материала ГГГТМ (табл. 4).

Таблица 3. Определение натуральных значений переменных в каждом отдельном опыте

№ опыта	План эксперимента			Натуральные значения переменных		
	X_1	X_2	X_3	Z_1	Z_2	Z_3
1.	+1	+1	+1	1,86	0,42	0,70
2.	-1	+1	+1	0,30	0,42	0,70
3.	+1	-1	+1	1,86	0,20	0,70
4.	-1	-1	+1	0,30	0,20	0,70
5.	+1	+1	-1	1,86	0,42	0,50
6.	-1	+1	-1	0,30	0,42	0,50
7.	+1	-1	-1	1,86	0,20	0,50
8.	-1	-1	-1	0,30	0,20	0,50
9.	+1	0	0	1,86	0,30	0,60
10.	-1	0	0	0,30	0,30	0,60
11.	0	+1	0	1,08	0,42	0,60
12.	0	-1	0	1,08	0,20	0,60
13.	0	0	+1	1,08	0,30	0,70
14.	0	0	-1	1,08	0,30	0,50
15.	0	0	0	1,08	0,30	0,60
16.	0	0	0	1,08	0,30	0,60
17.	0	0	0	1,08	0,30	0,60

Используя планов второго порядка, с учетом числа факторов, где в нашем случае $k = 3$, по нижеследующим формулам производится расчет коэффициентов уравнения теплопроводности (1):

$$b_0 = 0,1831[0Y] - 0,0704 \sum_1^k [i\bar{i}y] \quad (2)$$

$$b_i = 0,1[iy] \quad (3)$$

$$b_0 = 0,0704[0Y] + 0,5[i\bar{i}y] - 0,1266 \sum_1^k [i\bar{i}y] \quad (4)$$

$$b_{ij} = 0,125 [ijy], \quad (5)$$

где $[0Y] = \sum_1^N Y_u$; $[i\bar{i}y] = \sum_1^N x_{iu}^2 y_u$; $i \neq j$; $[iy] = \sum_1^N x_{iu} y_u$; $[i\bar{i}y] = \sum_1^N x_{iu} x_{ju} y_u$;

N - общее число опытов, предусмотренных в плане проведения экспериментов, с учетом нулевых точек.

$$[0Y] = \sum_1^N Y_u = 0,66; [1Y] = \sum_1^N X_{1u} Y_u = -0,166; [2Y] = \sum_1^N X_{2u} Y_u = -0,387;$$

$$[3Y] = \sum_1^N X_{3u} Y_u = 0,079; [11Y] = \sum_1^N X_{1u}^2 Y_u = 1,804; [22Y] = \sum_1^N X_{2u}^2 Y_u = 1,781;$$

$$[33Y] = \sum_1^N X_{3u}^2 Y_u = 1,775; \sum [i\bar{i}y] = [11y] + [22y] + [33y] = 5,360;$$

$$[12Y] = \sum_1^N X_{1u} X_{2u} Y_u = 0,095; [13Y] = \sum_1^N X_{1u} X_{3u} Y_u = 0,045;$$

$$[23Y] = \sum_1^N X_{2u} X_{3u} Y_u = 0,009;$$

Вначале производится вычисление суммы по данным табл. 4.

Далее, подставим полученные промежуточные значения сумм в формулах (2)...(5) и получаем: $b_0 \approx 0,184$; $b_1 \approx -0,017$; $b_2 \approx -0,039$; $b_3 \approx 0,008$; $b_{11} \approx 0,006$; $b_{22} \approx 0,005$; $b_{33} \approx -0,008$; $b_{12} \approx 0,012$; $b_{13} \approx 0,006$; $b_{23} \approx -0,001$.

В последующем производится статистическая проверка значимости полученных коэффициентов и определяется пригодность полученного уравнения для описания исследуемой зависимости, в соответствии с работой [6].

Таким образом, по результатам опытов в основной (нулевой) точке можно определить следующее:

- среднеарифметическое значение, в нулевой точке, параметра Y_0

$$\bar{Y}_0 = \sum_1^{n_0} \frac{Y_{0u}}{n_0} = \frac{(0,181 + 0,175 + 0,184)}{3} = 0,180;$$

- значение дисперсии в нулевой точке $S_0^2 = S_{\bar{Y}}^2$

$$S_0^2 = S_{\bar{Y}}^2 = \sum_1^{n_0} \frac{(\bar{Y}_0 - Y_{0u})^2}{(n_0 - 1)} = \frac{(0,180 - 0,181)^2 + (0,180 - 0,175)^2 + (0,180 - 0,184)^2}{(3 - 1)} = 21 \cdot 10^{-6},$$

$$S_0 = S_{\bar{Y}} = \sqrt{21 \cdot 10^{-6}} = 4,583 \cdot 10^{-3}.$$

Таблица 4. Результаты проведенных на основе плана опытов по определению коэффициента теплопроводности материала ГГТМ планируемых составов

№ опыта	У	\dot{Y}_p	Δ	Δ^2	$\lambda_0, c (X_i)$			Квадрат переменных $\lambda_0, c (X_i^2)$			Взаимодействия переменных $\lambda_0, c (X_i X_j)$		
	и $\lambda_0, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	\dot{Y}_p $\lambda_0, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$Y_u - \dot{Y}_p$	$(Y_u - \dot{Y}_p)^2$	$X_1 Y_u$	$X_2 Y_u$	$X_3 Y_u$	$X_1^2 Y_u$	$X_2^2 Y_u$	$X_3^2 Y_u$	$X_1 X_2 Y_u$	$X_1 X_3 Y_u$	$X_2 X_3 Y_u$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,161	0,152	0,009	$81 \cdot 10^{-6}$	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161
2	0,130	0,150	0,020	$400 \cdot 10^{-6}$	-0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	-0,130	-0,130	0,130
3	0,191	0,186	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$	0,191	-0,191	0,191	0,191	0,191	0,191	-0,191	0,191	-0,191
4	0,257	0,252	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$	-0,257	-0,257	0,257	0,257	0,257	0,257	0,257	-0,257	-0,257
5	0,112	0,124	0,012	$144 \cdot 10^{-6}$	0,112	0,112	-0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	-0,112	-0,112
6	0,153	0,146	0,007	$49 \cdot 10^{-6}$	-0,153	-0,153	-0,153	0,153	0,153	0,153	-0,153	0,153	-0,153
7	0,187	0,178	0,009	$81 \cdot 10^{-6}$	0,187	-0,187	-0,187	0,187	0,187	0,187	-0,187	-0,187	0,187
8	0,226	0,248	0,022	$484 \cdot 10^{-6}$	-0,226	-0,226	-0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226
9	0,168	0,173	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$	0,168	-	-	0,168	-	-	-	-	-
10	0,219	0,207	0,012	$144 \cdot 10^{-6}$	-0,219	-	-	0,219	-	-	-	-	-
11	0,141	0,145	-0,004	$16 \cdot 10^{-6}$	-	0,141	-	-	0,141	-	-	-	-
12	0,223	0,223	-	-	-	0,223	-	-	0,223	-	-	-	-
13	0,188	0,188	0,004	$16 \cdot 10^{-6}$	-	-	0,188	-	-	0,188	-	-	-

3	18 8	4											
1 4	0, 17 0	0,16 8	0,002	$4 \cdot 10^{-6}$	-	-	0,170	-	-	0,170	-	-	-
1 5	0, 18 1	0,18 4	0,003	$9 \cdot 10^{-6}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 6	0, 17 5	0,18 4	0,009	81×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 7	0, 18 4	0,18 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\Sigma = 3,066$	3,08 8	$\Sigma \Delta^2 = 1,584 \cdot 10^{-3}$	$\Sigma = 0,166$	- 0,387	0,079	1,804	1,781	1,775	0,095	0,045	-0,009	

Вычисляются ошибки при определении коэффициентов уравнения по нижеприведенным формулам (при $k = 3$), приведенным в [6]:

$$S^2\{b_0\} = 0,1831 S_{\bar{y}}^2; \quad S\{b_0\} = 0,4279 S_{\bar{y}}; \quad (6)$$

$$S^2\{b_i\} = 0,1 S_{\bar{y}}^2; \quad S\{b_i\} = 0,3162 S_{\bar{y}}; \quad (7)$$

$$S^2\{b_{ii}\} = 0,3732 S_{\bar{y}}^2; \quad S\{b_{ii}\} = 0,6109 S_{\bar{y}}; \quad (8)$$

$$S^2\{b_{ij}\} = 0,125 S_{\bar{y}}^2; \quad S\{b_{ij}\} = 0,3536 S_{\bar{y}}. \quad (9)$$

Таким образом, получаем:

$$S\{b_0\} = 0,4279 \cdot 4,583 \cdot 10^{-3} = 1,961 \cdot 10^{-3}; \quad S\{b_i\} = 0,3162 \cdot 4,583 \cdot 10^{-3} = 1,449 \cdot 10^{-3};$$

$$S\{b_{ii}\} = 0,6109 \cdot 4,583 \cdot 10^{-3} = 1,800 \cdot 10^{-3}; \quad S\{b_{ij}\} = 0,3536 \cdot 4,583 \cdot 10^{-3} = 1,621 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем расчетную значению критерии Стьюдента:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \quad (10)$$

и сравнивая t_p с t_T по табл. 5 при числе степеней свободы $f = N - 1 = 16$, можно установить значимости коэффициентов уравнения:

для $b_0 = [0,184] / 1,961 \cdot 10^{-3} = 93,830 > t_T = 2,12$;

для $b_1 = [-0,017] / 1,449 \cdot 10^{-3} = 11,732 > t_T = 2,12$;

для $b_2 = [-0,039] / 1,449 \cdot 10^{-3} = 26,915 > t_T = 2,12$;

для $b_3 = [0,008] / 1,449 \cdot 10^{-3} = 5,521 > t_T = 2,12$;

для $b_{11} = [0,006] / 2,800 \cdot 10^{-3} = 2,143 > t_T = 2,12$;

для $b_{22} = [0,005] / 2,800 \cdot 10^{-3} = 1,786 < t_T = 2,12$;

для $b_{33} = [0,008] / 2,800 \cdot 10^{-3} = 2,857 > t_T = 2,12$;

для $b_{12} = [0,012] / 1,621 \cdot 10^{-3} = 7,403 > t_T = 2,12$;

для $b_{13} = [0,006] / 1,621 \cdot 10^{-3} = 3,701 > t_T = 2,12$;

для $b_{23} = [0,001] / 1,621 \cdot 10^{-3} = 0,617 < t_T = 2,12$.

Из сравнения можно определить, что коэффициентами b_{22} и b_{23} можно пренебречь, т.к. они являются незначимыми.

Таблица 5. Значения критерии Фишера

Число степеней свободы $f_{\bar{y}} = n_0 - 1$	Значения F – критерия при f_{a0}								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5

Таким образом, на основании проведенного эксперимента и расчетов, уравнение теплопроводности ГГТМ описывается следующим образом:

$$\bar{Y} = \lambda_0 = 0,183 - 0,017X_1 - 0,004X_2 + 0,008X_3 + 0,006X_1^2 - 0,008X_3^2 + 0,012X_1X_2 + 0,006X_1X_3 \quad (11)$$

Теперь следует провести проверку пригодности выведенного, уточненного уравнения. Для этого следует вычислить дисперсию адекватности, т. е. остаточную дисперсию, по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^{N_1} (Y_u - \hat{Y}_u)^2}{N - m}, \quad (12)$$

где Y_u – величина исследуемого свойства теплопроводности материала ГГТМ в u -м опыте;
 \hat{Y}_u – значение Y_u , вычисленное с использованием уточненного уравнения;
 m – число определенных значимых коэффициентов с учетом b_0 .

При вычислении значения дисперсии адекватности S_{ad}^2 вспомогательные данные вводятся в табл. 6.

Таблица 6. Значения критерии Стьюдента

Число степеней свободы $f_{\bar{y}} = n_0 - 1$	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
Значения критерии Стьюдента t_T	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,31	2,23	2,18	2,15	2,12

В последующем определяется дисперсия адекватности по следующей формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum \Delta^2}{f_{ad}} = \frac{1,584 \cdot 10^{-3}}{9} = 176 \cdot 10^{-6}$$

В нашем случае $N=17$; $n_0=3$, $m=8$; $f=N-m=17-8=9$; $f_{\bar{y}}=n_0-1=3-1=2$.

Учитывая тот факт, что $S_{ad}^2 > S_{\bar{y}}^2$, определяем расчетное значение коэффициента Фишера F_p ,

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\bar{y}}^2} = \frac{176 \cdot 10^{-6}}{21 \cdot 10^{-6}} = 8,381$$

Данное значение сравнивается с F_T – для степеней свободы, при которых были определены

$$S_{ad}^2 \text{ и } S_{\bar{y}}^2, \text{ т.е. } f_{ad} = N - m; f_{\bar{y}} = n_0 - 1.$$

Согласно табл. 6 определяем:

При $f_{ad} = 9$ и $f_{\bar{y}} = 2$ по интерполяцию находим - $F_T = 19,35$.

Таким образом, определим, что: $F_p = 8,31 < F_T = 19,35$.

Это свидетельствует о том, что приведенную уточненную уравнению теплопроводности материала ГГТМ (11) можно считать пригодной для выражения искомой зависимости в намеченных пределах изменения основных факторов.

Теперь, в уточненное уравнение (11) поставил натуральные значения факторов:

$$X_1 = (Z_1 - Z_1^0) / \Delta Z_1 = (Z_1 - 1,10) / 0,8;$$

$$X_2 = (Z_2 - Z_2^0) / \Delta Z_2 = (Z_2 - 0,32) / 0,12;$$

$$X_3 = (Z_3 - Z_3^0) / \Delta Z_3 = (Z_3 - 0,50) / 0,10$$

и проведя алгебраические преобразования, окончательно получим:

$$\lambda_0 = 0,081 - 0,126Z_1 - 0,462Z_2 + 0,960Z_3 + 0,009Z_1^2 - 0,798Z_3^2 + 0,124Z_1Z_2 + 0,076Z_1Z_3 \quad (13)$$

Уравнение (13) является регрессионное уравнение определения величины коэффициента теплопроводности материала ГГТМ в сухом состоянии при различных расчетных соотношениях его компонентов.

Литература

1. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов / Б.Н. Кауфман. –М.: Госстройиздат, 1955. – 159 с.;

2. *Кауфман Б.Н. и др.* Цементный фибролит / Б.Н. Кауфман, Л.М. Шмидт, Д.А. Сокоболов и др. -М., 1961. - 259 с.
3. *Кобулиев З.В.* Энерго- и ресурсосберегающие материалы на основе минерального и растительного сырья: Монография / З.В. Кобулиев, С.Э. Якубов. – Душанбе: Ирфон, 2006. -206 с.
4. *Микульский В.Г.* Строительные материалы (материаловедение): Учеб. изд. / В.Г. Микульский, Г.И. Горчаков, В.В. Козлов и др. –М.: Изд-во АСВ, 2004. –536 с.
5. *Минас А.И.* Специфические свойства арболита / А.И. Минас, И.Х. Наназшвили // Бетон и железобетон. - 1978. -№6. - С.19-20.
6. *Румшицкий Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента: Справочное руководство / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
7. Справочник по производству и применению арболита / Под ред. И.Х. Наназшвили. – М.: Стройиздат, 1987. – 208 с.