

ПРОЧИЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ / OTHER QUESTIONS RELATED TO CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2022.27.2>

ПОСТРОЕНИЕ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО И ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК

Научная статья

Ковалев Н.С.¹, Горохов Т.И.², Ерофеев А.В.³*

^{1, 2, 3} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

* Корреспондирующий автор (av.erofeev[at]yandex.ru)

Аннотация

В настоящее время в строительстве используется большой спектр материалов, большинство из которых являются композитными, т. е. состоящими из двух и более компонентов. В связи с этим встает вопрос о подборе оптимального состава композитного материала, который может быть выполнен с использованием математического планирования эксперимента. В работе для определения оптимального состава композитного материала на основе гипсового вяжущего с добавлением древесных опилок по критерию теплопроводности было выполнено математическое планирование эксперимента. Для измерения коэффициента теплопроводности и определения теплового сопротивления при стационарном тепловом режиме использовать измеритель теплопроводности ИТП-МГ4. Также в работе получено уравнение регрессии, построена поверхность отклика и выполнена проверка адекватности полученных коэффициентов регрессии.

Ключевые слова: теплопроводность, композит, экспериментальные испытания, математическое планирование, уравнения регрессии, адекватность, величина отклика.

CONSTRUCTION AND VERIFICATION OF THE ADEQUACY OF REGRESSION EQUATION OF THE THERMAL CONDUCTION COEFFICIENT FROM THE RATIO OF THE INITIAL COMPONENTS OF A COMPOSITE MATERIAL BASED ON GYPSUM BINDER AND SAWDUST

Research article

Kovalev N.S.¹, Gorokhov T.I.², Erofeev A.V.³*

^{1, 2, 3} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

* Corresponding author (av.erofeev[at]yandex.ru)

Abstract

Today, a wide range of materials are used in construction, most of which are composite, i.e., they consist of two or more components. In this regard, the question arises about the selection of the optimal composition of composite material, which can be performed with mathematical planning of the experiment. In order to determine the optimal composition of a composite material based on gypsum binder with a supplement of sawdust in accordance with the criterion of thermal conduction, mathematical planning of the experiment was conducted. In order to measure the coefficient of thermal conduction and to determine thermal resistance in a steady temperature condition, an ITP-MG4 thermal conductivity meter must be used. The regression equation is also obtained, the response surface is constructed and the adequacy of the obtained regression coefficients is verified.

Keywords: thermal conduction, composite, experimental tests, mathematical planning, regression equations, adequacy, response value.

Введение

В современном строительстве с каждым годом все чаще используют различные виды отделочных материалов [1]. Как правило, они представляют собой композитные материалы, под которыми понимаются материалы, изготавливаемые из двух и более компонентов, имеющих различные физические и химические свойства, но при соединении дающие новый материал с новыми свойствами. Одним из новых отделочных материалов является материал на основе гипсового вяжущего с добавлением древесных опилок (рис.1). Материал предназначен для внутренней отделки стен помещений, в том числе и наружных.



Рис. 1 – Отделочный материал на основе гипсового вяжущего с добавлением древесных опилок

Разработка любого композитного материала сопряжена с определением оптимального состава, который дает наилучшие характеристики. Немаловажную роль для рассматриваемого материала, в случае, когда он будет применяться для отделки наружных стен, является такой показатель как коэффициент теплопроводности [2]. Использование отделочного материала с более высоким коэффициентом термического сопротивления повышает энергетическую эффективность здания. Кроме того, применение данного материала при отделке помещений объектов капитального ремонта позволит сократить расходы на утепление наружных стен. Именно поэтому представляется актуальной задачей определение зависимости изменения коэффициента теплопроводности отделочного материала на основе гипсового вяжущего с добавлением древесных опилок от соотношения исходных компонентов.

Вопросы по рациональному использованию древесных отходов для получения материалов и изделий теплоизоляционного назначения, характеристике этих материалов и применяемому технологическому оборудованию рассматривались в работах ученых Абраменкова Н.И., Бужевича Г.А., Валуевой Е.Ф., Егорова А.Д., Запруднова В.И., Косимова О.Б., Кучерявого В.И., Мельниковой Л.В., Мурзина В.С., Прусса Б.Н., Разинькова Е.М., Рахимова Р.З., Савина В.И., Удербаяева С.С., Уитнея Ч., Федорова С.В., Хакимова Ш.А., Ходжаева Ш.А., Чепелева С.Р., Шамаева В.А., Щербакова А.С. и др. Однако, исследования наиболее близкого по своей структуре материала было отражено при разработке гипсостружечных плит. Однако, некоторые особенности технологических режимов изготовления древесно-гипсовых плит и их эксплуатационные показатели сейчас изучены недостаточно.

Методы и принципы исследования

Для измерения коэффициента теплопроводности и определения теплового сопротивления при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076–99 [3] использовался измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 (рис. 2), принцип работы которого основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым граням образца. Конструктивно прибор состоит из нагревателя - преобразователя, выполненного в виде стационарной установки и электронного блока [4]. Стационарная установка прибора в свою очередь состоит из блока управления холодильником и нагревателем, выполненного на элементах Пельтье (охлаждение осуществляется вентилятором), устройства преобразования первичных сигналов датчиков, платиновых датчиков температуры, тепломера, а также источника питания. Установка в верхней части имеет прижимной винт, снабженный динамометрическим устройством с трещоткой для создания постоянного усилия прижатия испытываемого образца и отсчетным устройством для измерения толщины образца.



Рис. 2 – Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4

Определение коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления проходило следующим образом. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 (рис. 2) подключается к сети переменного тока 220 В через сетевой шнур. После подключения ИТП-МГ4 к сети установка открывается и в нее помещается образец, толщина которого предварительно измеряется штангенциркулем. Открытие установки производится путем ослабления прижимного микрометрического винта с последующим поворотом против часовой стрелки эксцентрикового замка (происходит освобождение поводка коромысла) и поднятием поводка. Для окончательного открытия установки подвижная Г-образная стенка установки отводится на 90°, а коромысло с закрепленной на нем плитой нагревателя поднимается. После помещения образца в установку коромысло опускается. При этом зазор между образцом и плитой нагревателя устанавливается путем вращения микрометрического винта в интервале от 2 до 5 мм. Далее поводок поднимается, а Г-образная стенка закрывается. Закрепление поводка осуществляется путем его опускания в паз эксцентрикового замка с последующим его поворотом по часовой стрелке.

После включения питания электронного блока на дисплей вводятся фактическая толщина образца и устанавливаются требуемые температуры холодильника и нагревателя, которые выбираются в соответствии с рекомендациями руководства по эксплуатации измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 в зависимости от прогнозируемой теплопроводности материала. В дальнейшем программное устройство прибора устанавливает на поверхностях образца заданные температуры и поддерживает их до тех пор, пока тепловой поток, проходящий через образец, не стабилизируется. Наблюдение за тепловым потоком осуществляется автоматически. Вычисление значений коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления также происходит автоматически через 30 минут после начала испытания.

Основные результаты

Для определения оптимального состава композитного материала по критерию теплопроводности было выполнено математическое планирование эксперимента [5], целью которого является нахождение уравнения регрессии зависимости коэффициента теплопроводности от соотношения исходных компонентов, а также проверка ее адекватности. В ходе проведения математического планирования эксперимента [6] были определены четыре точки плана эксперимента, каждой из которых соответствует определенное граничное соотношение компонентов: гипсового вяжущего, воды и древесных опилок. Процентные содержания исходных компонентов с учетом их кодировок (+1 и -1) были занесены в таблицу 1, в которую также были занесены данные экспериментальных исследований теплопроводности опытных образцов материала.

Для повышения точности данных измерения проводились согласно техническим рекомендациям, которые шли с прибором: каждый образец испытывался не менее трёх раз для того, чтобы проверить адекватность эксперимента [7], которая показывает способность предсказывать результаты эксперимента в некой области с требуемой точностью. После чего полученные результаты усреднялись.

Таблица 1 – Матрица планирования

№ опыта	План в кодированных переменных		План в отношениях		План в исходных переменных			Отклик y , теплопроводность λ , Вт/м ² ·К				Теплопроводность по формуле Некрасова λ_n , Вт/м ² ·К
	δ_1	δ_2	z_1	z_2	$x_1, \%$	$x_2, \%$	$x_3, \%$	y_1	y_2	y_3	\bar{y}	
1	-1	-1	0,78	0,22	38,89	50,00	11,11	0,215	0,210	0,212	0,212	0,40
2	-1	+1	0,78	0,44	35,00	45,00	20,00	0,187	0,185	0,172	0,181	0,32
3	+1	-1	1,00	0,22	45,00	45,00	10,00	0,229	0,224	0,227	0,227	0,40
4	+1	+1	1,00	0,44	40,91	40,91	18,18	0,236	0,235	0,237	0,236	0,35

Полученные экспериментальные данные сопоставлялись с теоретическими результатами теплопроводности, полученные по формуле Некрасова:

$$\lambda = 1,163 \cdot \sqrt{0,0196 + 0,22d^2} - 0,16 \tag{1}$$

где $d = \frac{\rho_m}{\rho_\omega} = \frac{\rho_m}{1000}$ – относительная плотность материала, кг/м³, здесь ρ_m – плотность материала, кг/м³; $\rho_\omega = 1000$ кг/м³ – плотность воды.

Анализируя результаты, представленные в таблице 2, стоит отметить, что коэффициент теплопроводности, полученный по формуле Некрасова, почти в 2 раза выше, чем экспериментально полученный. По-видимому, это связано с тем, что формула Некрасова является эмпирической формулой и позволяет определять только ориентировочные значения коэффициентов теплопроводности, что в свою очередь только доказывает необходимости нахождения уравнения регрессии, позволяющей на основе экспериментальных данных определять истинные значения коэффициента теплопроводности материала в зависимости от соотношения исходных компонентов.

Уравнение регрессии в общем виде может быть представлено следующим образом:

$$y = b_0 + b_1 \frac{x_1}{x_2} + b_2 \frac{x_3}{x_2} \tag{2}$$

где b_0, b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии.

В качестве аргументов x_1, x_2, x_3 приняты соответственно вода, гипс марки Г-16 (вяжущее вещество), опилки (мелкий наполнитель).

Тогда уравнение регрессии с учетом условий кодирования может быть представлено в виде:

$$y = b_0 + b_1 \delta_1 + b_2 \delta_2, \tag{3}$$

где

$$\delta_1 = \frac{z_1 - z_1^{(0)}}{p_{z1}} = \frac{x_1 - \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^0}{p_{z1}}, \delta_2 = \frac{z_2 - z_2^{(0)}}{p_{z2}} = \frac{x_3 - \left(\frac{x_3}{x_2}\right)^0}{p_{z2}} \tag{4}$$

где $\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^0, \left(\frac{x_3}{x_2}\right)^0$ – отношения относительных содержаний компонентов в исходной точке плана, а p_{z1}, p_{z2} – интервалы варьирования новой переменных z_1 и z_2 , равные $[z_1^{(0)} - z_1^{(H)}], [z_2^{(G)} - z_2^{(0)}]$ соответственно; $\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{(G)}, \left(\frac{x_3}{x_2}\right)^{(G)}$ – верхний уровень отношения компонентов, $\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{(H)}, \left(\frac{x_3}{x_2}\right)^{(H)}$ – нижний уровень отношения компонентов,

На основании данных таблицы 1 были найдены коэффициенты уравнения регрессии b_0, b_1 и b_2 :

$$b_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} = \frac{0,212 + 0,181 + 0,227 + 0,236}{4} = 0,214 \tag{5}$$

$$b_1 = \frac{-y_1 - y_2 + y_3 + y_4}{4} = \frac{-0,212 - 0,181 + 0,227 + 0,236}{4} = 0,017 \tag{6}$$

$$b_2 = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{4} = \frac{-0,212 + 0,181 - 0,227 + 0,236}{4} = -0,005 \tag{7}$$

$$y = 0,214 + 0,017\delta_1 - 0,005\delta_2 \quad (8)$$

После чего были найдены p_{z1} и p_{z2} :

$$p_{z1} = z_1^{(0)} - z_1^{(H)} = 0,89 - 0,78 = 0,11 \quad (9)$$

$$p_{z2} = z_2^{(e)} - z_2^{(0)} = 0,44 - 0,33 = 0,11 \quad (10)$$

где p_{z1} , p_{z2} – интервалы варьирования новой переменных.

Подставив полученные значения в формулу (4), получим:

$$\delta_1 = \frac{x_1 - 0,89}{0,11} = 9,09 \frac{x_1}{x_2} - 8,09, \delta_2 = \frac{x_3 - 0,33}{0,11} = 9,09 \frac{x_3}{x_2} - 3,00 \quad (11)$$

Следовательно, уравнение регрессии будет иметь следующий вид:

$$y = 0,091 + 0,155 \frac{x_1}{x_2} - 0,045 \frac{x_3}{x_2} \quad (12)$$

Далее проверяем воспроизводимость эксперимента. Результаты определения однородности оценок S_g^2 дисперсий представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Однородность оценок S_g^2 дисперсий

$s_1^2 = \left(\bar{y} - y_1\right)^2$	$s_2^2 = \left(\bar{y} - y_2\right)^2$	$s_3^2 = \left(\bar{y} - y_3\right)^2$	G
0,000007	0,000005	0,000000	0,561
0,000032	0,000013	0,000087	0,657
0,000005	0,000007	0,000000	0,561
0,000000	0,000001	0,000001	0,500

Критическое значение $G_{кр}$, для $\nu_{1вос} = m-1 = 2$ и $\nu_{2вос} = N = 4$ и уровня значимости $q_{вос} = 5 \%$, составляет 0,7679. В Расчетная величина G для экспериментальных данных не превышает критического значения $G_{кр}$, следовательно, гипотеза об однородности выборочных дисперсий отвечает результатам наблюдений.

$$s_{вос}^2\{y\} = 0,00002 \quad (13)$$

Проверим гипотезу о значимости коэффициентов уравнения регрессии b с помощью критерия Стьюдента:

$$s\{b\} = \sqrt{\frac{0,00002}{3 \cdot 4}} = 0,00129 \quad (14)$$

$$t = \frac{|b|}{0,00129} \quad (15)$$

По критерию Стьюдента при числе степеней свободы $\nu_{зн} = N(m-1) = 8$ и при заданном уровне значимости $q_{зн} (5 \%)$, $t_{кр} = 2,3060$. Коэффициенты регрессии представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии

	b	t
b_0	0,214	165,956
b_1	0,017	13,372
b_2	-0,005	4,199

Найденная величина параметра t превышает значение $t_{кр}$ для оценок b_0 , b_1 и b_2 , поэтому оценка всех коэффициентов является значимыми.

Проверим гипотезу об адекватности математического описания при $\nu_{1ад} = N-d = 1$, $\nu_{2ад} = \nu_{зн} = N(m-1) = 8$ и при заданном уровне значимости $q_{ад} (5 \%)$.

Таблица 4 – Оценка дисперсии воспроизводимости отклика

\bar{y}	δ_1	δ_2	$y = 0,214 + 0,017\delta_1 - 0,005\delta_2$	$ \bar{y} - y $	$ \bar{y} - y ^2$
0,212	-1	-1	0,202	0,010	0,00011
0,181	-1	1	0,192	-0,011	0,00011
0,227	1	-1	0,236	-0,009	0,00009
0,236	1	1	0,226	0,010	0,00010
Среднее значение					0,00010

$$F = 0,00129/0,0001 = 12,9000 \quad (16)$$

Вычисленное по результатам наблюдений значение критерия Фишера $F = 12,90$. Критическое значение $F_{кр} = 239$. Эмпирическое значение критерия F меньше критического $F_{кр}$, следовательно, гипотеза об адекватности не отвергается, и полученное нами математическое описание является адекватным. Из гипотезы о значимости следует что все коэффициенты b_1, b_2, b_3 значимы. δ_2

После проверки, было выполнено построение поверхности отклика (рисунок 3) по уравнению отклика (формула 12) и по данным таблицы 1.

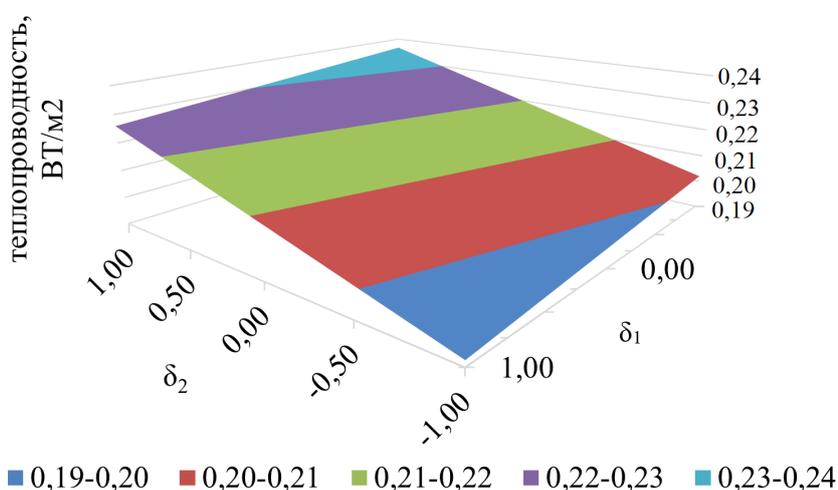


Рис. 3 – Поверхности отклика теплопроводности

Анализ полученного уравнения регрессии и поверхности отклика (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что оптимальный состав рассматриваемого композита с точки зрения теплозащитных характеристик материала соответствует кодировку (-1;+1), т. е. вода – 35%; гипсовое вяжущее – 45%; древесные опилки – 20%.

Заключение

На основе использования математического планирования эксперимента была получена уравнение регрессии, позволяющее установить математическую зависимость между коэффициентом теплопроводности отделочного материала на основе гипсового вяжущего с добавлением древесных опилок от соотношения исходных компонентов материала. В кодированных значениях оно описывается формулой 4. Проведение данного экспериментального испытания позволило вывести уравнения регрессии, используя математическое планирование. Проверка коэффициентов уравнения регрессии показала их адекватность. Анализ уравнения регрессии и поверхности отклика позволил получить оптимальный состав рассматриваемого композита с точки зрения теплозащитных характеристик.

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

Список литературы / References

1. Власов О.Е. Строительная теплофизика. Состояние и перспективы развития / О.Е. Власов. – М.: Гостроиздат, 1961. – 290 с.
2. Горчаков Г.И. Прогнозирование теплопроводности композиционных материалов различного строения / Г.И. Горчаков, И.И. Лифанов, А.А. Багаутдинов и др. // Строительные материалы. – 1992. – № 4. – С. 27–28.
3. ГОСТ 7076–99 Межгосударственный стандарт «Материалы и изделия строительные» – Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме ОКСТУ 5709
4. Общество с ограниченной ответственностью «Специальное конструкторское бюро Стройприбор» ОКП 42 7646 «Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4» Руководство по эксплуатации Э 12.102.010 РЭ – Челябинск

5. Макаричев Ю.А. М 30 Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.: ил.
6. Кузнецова Е.В. Э413 Математическое планирование эксперимента: Учебно-методическое пособие для студентов очного и заочного обучения специальностей «Технология обработки металлов давлением», «Динамика и прочность машин», «Компьютерная механика», «Компьютерная биомеханика» / Е.В. Кузнецова – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 35 с.
7. Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент / И.Ю. Соколовская // Методические указания для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 36 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vlasov O.E. Stroitel'naya teplofizika. Sostoyanie i perspektivy razvitiya [Construction thermophysics. State and prospects of development] / O.E. Vlasov. – М.: Goststroizdat, 1961. – 290 p. [in Russian]
2. Gorchakov G.I. Prognozirovaniye teploprovodnosti kompozitsionnykh materialov razlichnogo stroeniya [Prediction of thermal conduction of composite materials of various structures] / G.I. Gorchakov, I.I. Lifanov, A.A. Bagautdinov et al. // Stroitel'nye materialy [Building materials]. – 1992. – No. 4. – pp. 27–28. [in Russian]
3. GOST 7076–99 Mezhhgosudarstvennyj standart “Materialy i izdeliya stroitel'nye” – Metod opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo soprotivleniya pri stacionarnom teplovom rezhime OKS [Interstate standard “Materials and construction products” – Method for determining thermal conduction and thermal resistance in steady temperature condition CCO] 27.220 OKSTU 5709 [in Russian]
4. Limited Liability Company “Special'noe konstruktorskoe byuro Strojpribor” RCP 42 7646 “Thermal conductivity meter ИТР-МГ4” Operating Manual E 12.102.010 RE – Chelyabinsk [in Russian]
5. Makarichev Yu.A. M30 Metody planirovaniya eksperimenta i obrabotki dannykh [Methods of experiment planning and data processing]: study guide / Yu.A. Makarichev, Yu.N. Ivannikov – Samara: Samara State Technical University, 2016. – 131 p.: ill. [in Russian]
6. Kuznetsova E.V. E413 Matematicheskoe planirovaniye eksperimenta: Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov ochnogo i zaochnogo obucheniya special'nostej “Tekhnologiya obrabotki metallov davleniem”, “Dinamika i prochnost' mashin”, “Komp'yuternaya mekhanika”, “Komp'yuternaya biomekhanika” [Mathematical planning of the experiment: An educational and methodical manual for full-time and part-time students of the specialties “Technology of metal processing by pressure”, “Dynamics and strength of machines”, “Computer mechanics”, “Computer biomechanics”] / E.V. Kuznetsova. – Perm: Perm State Technical University. 2011. – 35 p. [in Russian]
7. Sokolovskaya I.Yu. Polnyj faktornyj eksperiment [Complete factorial experiment] / I.Yu. Sokolovskaya // Metodicheskie ukazaniya dlya samostoyatel'noj raboty studentov [Methodological guidelines for independent work of students]. – Novosibirsk: NGAVT, 2010. – 36 p. [in Russian]