

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ
ИЗ ОТХОДОВ ПРЯДЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

**INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND FACTORS
OF THE PRODUCTION PROCESS ON PERFORMANCE INDICATORS
THERMAL INSULATION BOARDS FROM VEGETABLE FIBERS SPIN WASTE**

И.В. СУСОЕВА, Т.Н. ВАХНИНА, А.А. ТИТУНИН

I.V. SUSOEVA, T.N. VAKHNINA, A.A. TITUNIN

(Костромской государственный университет)

(Kostroma State University)

E-mail: i.susoeva@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования показателей композиционных теплоизоляционных плит из отходов прядения льна и фенолоформальдегидного связующего. Наполнителем композита являются мелкодисперсные невозвратные отходы прядения льняных волокон. Композиты изготавливались методом сушки по технологии древесноволокнистых плит мокрого способа производства. Недостатком наполнителя является высокая горючесть, без применения огнезащитных средств материал имеет группу горючести Г4. Для снижения горючести в композит добавлен алюмохромфосфат. В качестве метода исследования использован регрессионный анализ, в частности – В-план второго порядка. Разработаны регрессионные математические модели второго порядка эксплуатационных показателей теплоизоляционных плит. Построены поверхности отклика для показателя – потеря массы плит при огневом воздействии. Анализ математических моделей позволил оценить характер влияния факторов на эксплуатационные показатели композиционных материалов и разработать рекомендации для изготовления плит с группой горючести Г2. Коэффициент теплопроводности материала имеет значения 0,068...0,07 Вт/(м·К).

The article presents the results of a study of the indicators of composite thermal insulation boards from flax spinning waste and phenol-formaldehyde binder. The filler of the composite is fine non-returnable waste of spinning flax fibers. The composites were made by drying using the technology of wood-fiber boards of the wet production method. The disadvantage of the filler is high flammability, without the use of flame retardants, the material has a flammability group G4. Alumo-chromophosphate was added to the composite to reduce flammability. Regression analysis,

in particular, the second-order B-plan, was used as a research method. Regression mathematical models of the second order of performance indicators of thermal insulation boards have been developed. Response surfaces are constructed for the indicator of the mass loss of boards during fire exposure. The analysis of mathematical models made it possible to assess the nature of the influence of factors on the performance of composite materials and to develop recommendations for the manufacture of boards with a combustibility group G2. The thermal conductivity coefficient of the material has values of 0.068...0.07 W/(m • K).

Ключевые слова: растительные отходы, лен, хлопок, композиционные плиты, регрессионная модель, предел прочности, статический изгиб, коэффициент теплопроводности, потеря массы при горении.

Keywords: plant waste, flax, cotton, composite boards, regression model, tensile strength, static bending, thermal conductivity coefficient, mass loss during combustion.

Теплоизоляционные плитные материалы из растительных наполнителей потенциально являются эффективным материалом для деревянного домостроения. Они имеют возобновляемый сырьевой потенциал, низкую теплопроводность, обусловленную структурой и свойствами растительного наполнителя. Сдерживает рост применения в строительстве целлюлозосодержащих плитных материалов повышенная горючесть. Снизить горючесть материала можно различными способами, включая поверхностную обработку материала огнезащитными средствами, соединение в композите растительного наполнителя и неорганической матрицы, применение различных замедлителей горения.

Вопросами повышения огнезащитности древесных плит занимались А. А. Леонович [1], А. Б. Сивенков [2], М.Ю. Демина [3], В. М. Балакин, Т. М. Шуртов и др. [4...9].

Растительные волокна и отходы их производства являются важным сырьем для производства композитов. По мнению Yasemin Seki с соавторами, одним из основных их преимуществ в настоящее время является биоразлагаемость [10]. К существенным недостаткам растительных отходов относятся низкая водостойкость и высокая горючесть. Для использования в строительстве композитов из целлюлозосодержащих наполнителей необходимо обеспечить их соответствие нормативным требованиям

безопасности, т.е., в первую очередь, снизить горючесть материала.

Многие исследователи используют для снижения горючести композитов неорганические материалы. Mouad Chakkoou с соавторами предлагают для улучшения водостойкости и огнестойкости композитов из растительных волокон использовать наночастицы глины [11]. Suheyla Kocaman с коллегами использовали для снижения горючести композита из хлопкового волокна и фенольного связующего добавку гидроксида алюминия и борной кислоты [12]. Ulku Soydal в разработке композита на основе хлопковых отходов, новолачного фенольного связующего и эпоксидной смолы использовал для повышения огнестойкости наноглину [13]. Наноглина также используется в работах для улучшения показателей композитов из гибридного связующего и волокон бамбука, кенафа и др. [14].

В исследовании авторов, выполненном на кафедре ЛДП КГУ, для снижения горючести теплоизоляционных композитов из отходов прядения льняных волокон и фенолоформальдегидного связующего (ФФС) использовалась добавка алюмохромфосфата (АХФ). Композиты изготавливались мокрым способом методом сушки по технологии производства древесноволокнистых плит [15]. Эксперимент выполнен по В-плану второго порядка, диапазоны варьирования факторов представлены в табл. 1. План эксперимента и результаты статисти-

ческой обработки данных представлены в табл. 2. Выходные величины: Y_1 – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Y_2 – прочность при статическом изгибе, МПа; Y_3

– степень повреждения по массе при огневом воздействии, %.

Таблица 1

Наименование фактора	Обозначение фактора		Уровни варьирования			Интервал варьирования Δ_i
	натуральное	кодированное	-1	0	+1	
Доля добавки связующего, %	$R_{св}$	X1	0	20	40	20
Температура сушки, °С	$T_{суш}$	X2	80	120	160	40
Доля добавки АХФ, %	ДАХФ	X3	0	15	30	15

Таблица 2

№	X_1	X_2	X_3	Средние арифметические и дисперсии выходных величин					
				$\bar{Y}_1, \bar{\lambda},$ Вт/м·К	Дисперсия $S^2, \text{Вт/м}\cdot\text{К}^2$	$\bar{\sigma}_{и}, \bar{Y}_2,$ МПа	$S^2,$ МПа ²	$\Delta\bar{m}, \bar{Y}_3,$ %	$S^2,$ % ²
1	+	+	+	0,070	$6 \cdot 10^{-5}$	0,66	$2 \cdot 10^{-3}$	47,2	2,47
2	-	+	+	0,067	$2 \cdot 10^{-5}$	0,47	$2 \cdot 10^{-3}$	68,6	2,9
3	+	-	+	0,073	$6 \cdot 10^{-5}$	0,58	$2 \cdot 10^{-3}$	48,5	1,2
4	-	-	+	0,069	$2 \cdot 10^{-5}$	0,34	$3 \cdot 10^{-3}$	67,4	2,8
5	+	+	-	0,068	$7 \cdot 10^{-5}$	0,50	$3 \cdot 10^{-3}$	70,9	2,8
6	-	+	-	0,060	$3 \cdot 10^{-5}$	0,26	$3 \cdot 10^{-3}$	76,7	1,6
7	+	-	-	0,069	$8 \cdot 10^{-5}$	0,37	$2 \cdot 10^{-3}$	69,7	2,07
8	-	-	-	0,062	$3 \cdot 10^{-5}$	0,19	$3 \cdot 10^{-3}$	82,0	1,03
9	+	0	0	0,073	$4 \cdot 10^{-5}$	0,33	$5 \cdot 10^{-3}$	69,3	2,8
10	-	0	0	0,064	$2 \cdot 10^{-5}$	0,42	$1 \cdot 10^{-3}$	76,1	2,08
11	0	+	0	0,069	$2 \cdot 10^{-5}$	0,34	$3 \cdot 10^{-3}$	69,1	1,98
12	0	-	0	0,072	$3 \cdot 10^{-5}$	0,41	$3 \cdot 10^{-3}$	68,0	1,08
13	0	0	+	0,071	$5 \cdot 10^{-5}$	0,42	$2 \cdot 10^{-3}$	47,9	2,2
14	0	0	-	0,068	$2 \cdot 10^{-5}$	0,34	$2 \cdot 10^{-3}$	73,8	2,6

Коэффициент теплопроводности плит определялся с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ-4 в соответствии с ГОСТ 7076–99, "Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме". Испытания на горючесть проводились в

установке, керамический короб, по ГОСТ Р 53292–2009.

По результатам обработки экспериментальных данных разработаны регрессионные математические модели показателей композита:

- коэффициент теплопроводности:

$$Y_1 = 0,071 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 + 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3, \quad (1)$$

- прочность при статическом изгибе:

$$Y_2 = 0,363 + 0,076X_1 + 0,036X_2 + 0,083X_3 + 0,022X_1^2 + 0,022X_2^2 + 0,027X_3^2 + 0,001X_1X_2 + 0,001X_1X_3 + 0,004X_2X_3, \quad (2)$$

- степень повреждения по массе при огневом воздействии:

$$Y_3 = 67,87 - 6,52X_1 - 0,31X_2 - 9,35X_3 + 4,85X_1^2 - 0,69X_2^2 - 7,00X_3^2 - 0,50X_1X_2 - 2,78X_1X_3 + 0,50X_2X_3. \quad (3)$$

С увеличением доли добавки связующего коэффициент теплопроводности материала растет, таким же образом влияет и доля добавки алюмохромфосфата. Объясняется это различиями в теплопроводности материалов – растительного наполнителя и связующих, поликонденсационного (ФФС) и неорганического (АХФ). Однако рост показателя находится в пределах значений для теплоизоляционного материала – 0,06...0,073 Вт/(м·К). С ростом массовой доли добавки связующего и АХФ увеличивается прочность материала при статическом изгибе и снижается потеря массы при огневом воздействии.

Графики зависимости (поверхности отклика) потери массы при горении от варьируемых технологических факторов представлены на рис. 1 (а – поверхность отклика при $X_2 = +1$; б – поверхность отклика при $X_2 = -1$). Потеря массы при горении уменьшается при увеличении всех факторов. При максимальной доле добавки АХФ (в рамках диапазона варьирования фактора) потеря массы композита при огневом воздействии не превышает 50 %.

Параметры горючести рекомендуемых к производству композитов и контрольных образцов, изготовленных при температуре сушки 120 °С, доле добавки ФФС

(Д_{ФФС}) 20 %, без добавки АХФ, представлены в табл. 3.

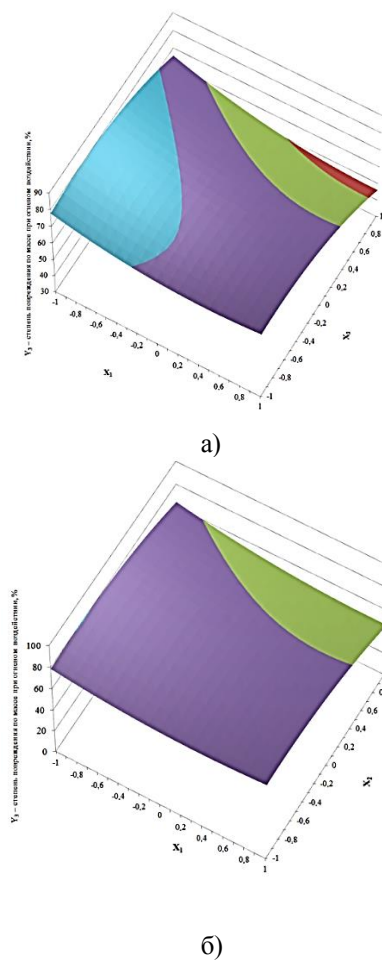


Рис. 1

Таблица 3

Значения технологических факторов процесса изготовления композита		Параметры горючести		Группа горючести
Композит, доля добавки связующего, добавка АХФ	Температура сушки композита, °С	Потеря массы при огневом воздействии* Δm, %	Температура дымовых газов, °С	
Контрольный, Д _{ФФС} = 20 %; Д _{АХФ} = 0 %	120 °С	$\frac{70,2}{70,9}$	475	Г4
Контрольный, Д _{ФФС} = 30 %; Д _{АХФ} = 0 %	160 °С	$\frac{68,1}{68,4}$	465	Г4
Рекомендуемый, Д _{ФФС} = 30 %; Д _{АХФ} = 30 %	160 °С	$\frac{49,35}{49,8}$	230	Г2

Без добавки АХФ композит имеет параметры горючести, соответствующие группе горючести Г4. Эффективность снижения горючести при добавке АХФ обусловлена

его термическими свойствами. По данным О.А. Клинова, при нагреве АХФ в интервале 300...340 °С удаляется кристаллизационная вода, при нагреве до 400 °С начина-

ется кристаллизация алюмофосфатов, при 500...800 °С выделяются кристаллы пирофосфата алюминия, а после 800 °С – метафосфата и ортофосфата алюминия [16]. Кристаллизация продуктов термической деструкции замедляет процесс выделения дымовых газов и потерю массы за счет уменьшения выделения продуктов деструкции в газовую среду.

ВЫВОДЫ

Таким образом, для производства теплоизоляционных плит на фенолоформальдегидном связующем из невозвратных отходов прядения льна можно рекомендовать сочетание технологических факторов процесса производства: долю добавки фенолоформальдегидного связующего 30 %, добавки АХФ – 30 %. При данном сочетании факторов теплоизоляционные композиты из мелкодисперсных отходов прядения льна отвечают требованиям, предъявляемым к материалам группы горючести Г2, при этом коэффициент теплопроводности материала имеет значения 0,068...0,07 Вт/(м·К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Леонович А.А.* Теория и практика изготовления огнезащитных древесных плит. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1978.
2. *Сивенков А.Б.* Снижение пожарной опасности материалов на основе целлюлозы: Дис...канд. техн. наук. – М.: АГПС МЧС России, 2002.
3. *Демина М.Ю.* Технология изготовления огнезащитных древесностружечных плит: Дис...канд. техн. наук. – СПб.: СПбГЛТУ, 2004.
4. *Балакин В.М., Литвинец Ю.И., Выдрина Т.С., Рыбкина Ю.В.* Пути создания огнестойких ДСтП с высокими физико-механическими свойствами // Вклад ученых и специалистов в развитие химико-лесного комплекса. – Екатеринбург, 1993. С. 151...152.
5. *Шутов Т.М., Ардиан М.А., Бугнева Е.А., Стригуцкая Т.А., Куликов Ю.А., Михнюк Б.М.* Технология получения трудногорючих древесностружечных плит // Технология и оборудование заготовки и переработки древесины. – Минск, 1993. Вып.1. С. 89...93.
6. *Сусоева И.В., Вахнина Т.Н., Титунин А.А.* Исследование свойств лигноцеллюлозных волокон и отходов их переработки // Изв.вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, №6. С.221...226.

7. *Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А.* Технология теплоизоляционных материалов. – М.: Стройиздат, 1980.

8. *Yao F, Wu Q, Lei Y.* Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis // *Polymer Degradation and Stability.* – 2008. Vol. 93(1). P. 90...98.

9. *Говырин Б.А., Маслакова Е.А., Каплунова О.Е.* Влияние огнезащитных добавок на физико-механические свойства плит, используемых в домостроении // Механическая обработка древесины. – 1980. Вып. 11. С. 16...19.

10. *Seki Y., Selli F., Erdoğ an Ümit Halis, Atagür M., Seydibeyođ lu M. Özgür.* A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers // *Cellulose.* – 2022. Vol. 29. P. 4877...4918.

11. *Chakkour M., Moussa M.O., Khay I., Balli M., Zineb T.B.* Towards widespread properties of cellulosic fibers composites: A comprehensive review // *Journal of reinforced plastics and composites.* – 2022. Vol. 0(0). P.1...42.

12. *Kocaman S., Soydal U., Ahmetli G.* Influence of cotton waste and flame-retardant additives on the mechanical, thermal, and flammability properties of phenolic novolac epoxy composites // *Cellulose.* – 2021. Vol. 28(5). P. 7765...7780.

13. *Soydal U.* Cotton waste and nanoclay-based phenolic novolac epoxy composites and evaluation of their properties // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2022. Vol. 139(45). P.172...178.

14. *Chee S.S., Jawaida M., Sultana M.T.H., Althman O.Y., Abdullaha L.C.* Effects of nanoclay on physical and dimensional stability of Bamboo/Kenaf/nanoclay reinforced epoxy hybrid nanocomposites // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2020. Vol. 9(3). P. 1...10.

15. *Сусоева И.В.* Научные основы управления физико-химическими процессами структурообразования теплоизоляционного материала из многокомпонентного целлюлозосодержащего наполнителя: Дис...докт. техн. наук. – Иваново: ИВГПУ, 2021.

16. *Клинов О.А.* Жаростойкий газобетон на основе алюмосиликофосфатного связующего с добавкой огнеупорного волокна: Дис...канд. техн. наук. – Челябинск: Юж.-Ур. гос. ун-т, 2008.

REFERENCES

1. Leonovich A.A. Theory and practice of manufacturing fireproof wood boards. - L.: Leningrad University, 1978.
2. Sivenkov A.B. Reducing the fire hazard of cellulose-based materials: Dis. ... cand. tech. sciences. – M.: AGPS EMERCOM of Russia, 2002.
3. Demina M.Yu. Technology for the manufacture of fire-unprotected particle boards: Dis...cand. tech. Sciences. - St. Petersburg: SPbGLTU, 2004.
4. Balakin V.M., Litvinets Yu.I., Vydrina T.S., Rybkina Yu.V. Ways to create fire-resistant chipboards with high physical and mechanical properties // *Contribution*

of scientists and specialists to the development of the chemical-forestry complex. Yekaterinburg. - 1993. P.151 ... 152.

5. Shutov T.M., Ardshan M.A., Bugneva E.A., Strigutskaya T.A., Kulikov Yu.A., Mikhnyuk B.M. Technology for obtaining slow-burning wood chipboards // *Technology and equipment for harvesting and wood processing*. Minsk. - 1993. Issue 1.P. 89...93.

6. Susoeva I.V., Vakhnina T.N., Titunin A.A. Investigation of lignocellulose fibers and their waste processing // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2016, № 6 (366). P. 221...226.

7. Gorlov Yu.P., Merkin A.P., Ustenko A.A. Technology of thermal insulation materials. - M.: Stroyizdat, 1980.

8. Yao F, Wu Q, Lei Y. Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis // *Polymer Degradation and Stability*. - 2008. Vol. 93(1).P. 90...98.

9. Govyrin B.A., Maslakova E.A., Kaplunova O.E. Influence of flame retardant additives on the physical and mechanical properties of boards used in building construction. // *Mechanical processing of wood*. - 1980. Issue. 11. P. 16...19.

10. Seki Y., Selli F., Erdoğan Ümit Halis, Atagür M., Seydibeyoğlu M. Özgür. A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers // *Cellulose*. - 2022. Vol. 29.P. 4877...4918.

11. Chakkour M., Moussa M.O., Khay I., Balli M., Zineb T.B. Towards widespread properties of cellulosic fibers composites: A comprehensive review // *Journal of*

reinforced plastics and composites. - 2022. Vol. 0(0). P.1...42.

12. Kocaman S., Soydal U., Ahmetli G. Influence of cotton waste and flame-retardant additives on the mechanical, thermal, and flammability properties of phenolic novolac epoxy composites // *Cellulose*. - 2021. Vol. 28(5).P. 7765...7780.

13. Soydal U. Cotton waste and nanoclay-based phenolic novolac epoxy composites and evaluation of their properties // *Journal of Applied Polymer Science*. - 2022. Vol. 139(45). P. 172...178.

14. Chee S.S., Jawaida M., Sultana M.T.H., Alotthmanc O.Y., Abdullaha L.C. Effects of nanoclay on physical and dimensional stability of Bamboo/Kenaf/nanoclay reinforced epoxy hybrid nanocomposites // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2020. Vol. 9(3).P. 1...10.

15. Susoeva I.V. Scientific bases of management of physical and chemical processes of structure formation of heat-insulating material from a multi-component cellulose-containing filler: Diss....doc. tech. sciences. - Ivanovo: IVGPU., 2021.

16. Klinov O.A. Heat-resistant aerated concrete based on aluminosilicate phosphate binder with the addition of refractory fiber: Dis....cand. tech. sciences. - Chelyabinsk: Yuzh.-Ur. state un-t, 2008.

Рекомендована кафедрой лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств КГУ. Поступила 09.11.22.