

Исследование влияния технологических факторов на свойства лущено-рубленого древесно-композиционного материала (ЛРДКМ) с карданолсодержащей эпоксидной матрицей

А.Ю. Тесленко^{1a}, О.Ф. Шишлов^{1b}, В.В. Глухих^{2c}

¹ ПАО «Уралхимпласт», ул. Северное Шоссе, 21, Нижний Тагил, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

^a a.teslenko@ucp.ru, ^b o.shishlov@ucp.ru, ^c gvictor@e1.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-2729-6393>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4656-5969>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6120-1867>

Статья поступила 08.11.2023, принята 05.02.2024

Работа посвящена получению лущено-рубленого древесно-композиционного материала (ЛРДКМ) с карданолсодержащей эпоксидной матрицей и изучению влияния технологических факторов на свойства ЛРДКМ. В работе использовались методы многофакторного планирования эксперимента с применением программного пакета Statgraphics. План-матрица эксперимента представляет собой трехфакторный ортогональный центрально-композиционный план Бокса – Уилсона. В качестве входных факторов были выбраны давление прессования (P), температура прессования (T) и время прессования (τ). За выходные факторы были приняты следующие свойства материала ЛРДКМ: плотность (D), водопоглощение (WA), теплопроводность (TC), разрушающее напряжение при сжатии (C), разрушающее напряжение при изгибе (B), разрушающее напряжение при сдвиге (S) и ударная вязкость (I). В общем виде приведена технология получения ЛРДКМ из древесного материала (березового шпона) и эпоксидной матрицы (ЭМ) с карданолсодержащим основанием Манниха. Свойства полученных образцов ЛРДКМ определяли в соответствии со следующими стандартами: ГОСТ 9621, ГОСТ 3916.1, ISO 8302:1991, ГОСТ 4651, ГОСТ Р 56805, ГОСТ 56799, ГОСТ 4647. Для получения экспериментально-статистических моделей свойств ЛРДКМ был проведен регрессионный анализ полученных значений свойств для каждого образца материала. В результате анализа были найдены адекватные уравнения регрессии, получены коэффициенты регрессионных уравнений в нормированном и натуральном виде, построены поверхности отклика, установлены характер и степень влияния независимых факторов на выходные функции. Найдены рациональные значения технологических факторов, обеспечивающие получение ЛРДКМ с максимальными значениями прочностных свойств и минимальным значением водопоглощения.

Ключевые слова: лущено-рубленый древесно-композиционный материал (ЛРДКМ); карданолсодержащая эпоксидная матрица; фенолкамин; трехфакторное планирование эксперимента; экспериментально-статистические модели свойств ЛРДКМ; решение оптимизационной задачи.

Research of the influence of technological factors on the properties of the shelled-chopped wood-composite material with a cardanol- containing epoxy matrix

A.Yu. Teslenko^{1a}, O.F. Shishlov^{1b}, V.V. Glukhikh^{2c}

¹ "Uralchimplast" JSC; 21, Severnoye Shosse St., Nizhny Tagil, Russia

² Ural State Forestry Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

^a a.teslenko@ucp.ru, ^b o.shishlov@ucp.ru, ^c gvictor@e1.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-2729-6393>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4656-5969>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6120-1867>

Received 08.11.2023, accepted 05.02.2024

The article is devoted to the production of a shelled-chopped wood composite material with a cardanol-containing epoxy matrix and the study of the influence of technological factors on the properties of the shelled-chopped wood composite material. The study uses methods of multi-factorial experiment planning with the help of the Statgraphics software package. The plan matrix of the experiment is a three-factor, orthogonal, centrally compositional Box-Wilson plan. Pressing pressure (P), pressing temperature (T) and pressing time (τ) are selected as input factors. The following properties of the shelled-chopped wood composite material are taken as output factors: density (D), water absorption (WA), thermal conductivity (TC), compressive stress (C), bending stress (B), shear stress (S) and toughness (I). In general, the technology for obtaining a shelled-chopped wood composite material from a wood material (birch veneer) and an epoxy matrix (EM) with a cardanol-containing Mannich base is presented. The properties of the obtained shelled-chopped wood composite material samples are determined in accordance with the following standards: GOST 9621, GOST 3916.1, ISO 8302:1991, GOST 4651, GOST R 56805, GOST 56799, GOST 4647. To obtain experimental and statistical models of the properties of the shelled-chopped wood composite material, a regression analysis of the obtained values of the properties for each sample of the material is car-

ried out. As a result of the analysis, adequate regression equations are found, coefficients of regression equations in normalized and natural form are obtained, response surfaces are constructed, the nature and degree of influence of independent factors on output functions are determined. Rational values of technological factors ensuring the production of the shelled-chopped wood composite material with maximum values of strength properties and minimum water absorption are found.

Keywords: shelled-chopped wood composite material; cardanol-containing epoxy matrix; phenalkamine; three-factor planning of the experiment; experimental and statistical models of the properties of shelled-chopped wood composite material; solving the optimization problem.

Введение. Эпоксидные смолы и композиционные материалы на их основе имеют широкий спектр применения, от простых и красивых бытовых вещей — дизайнерская, гибридная мебель, до наукоемких и высокотехнологичных [1].

Одним из направлений применения эпоксидных смол является производство древесно-композиционных материалов (ДКМ) [2–8].

Производство ДКМ представляет собой важное направление в структуре деревообрабатывающей промышленности и производстве синтетических смол. Возрастающие требования к эксплуатационным и экологическим характеристикам современных ДКМ формируют необходимость поиска и разработки новых связующих и современных подходов к изготовлению древесно-композиционных материалов [9–11].

Среди ДКМ, выпускаемых в настоящее время, стоит выделить группу структурно-ориентированных ДКМ (OSB, LVL, CLT, PSL и т. д.), они обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными ДКМ, в частности, более высокими прочностными свойствами и равномерным распределением этих свойств в объеме материала [12–15].

В качестве отвердителей эпоксидных смол в последнее время широкое распространение получили соответствующие принципам зеленой химии карданолсодержащие основания Манниха (феналкамины) [16; 17] (рис. 1).

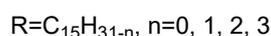
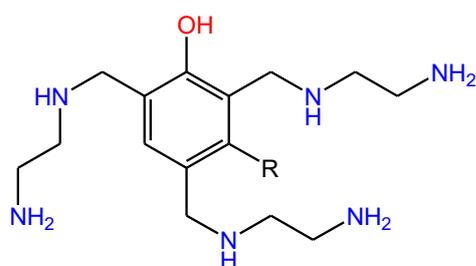


Рис. 1. Пример структурной формулы феналкамина

Феналкамины обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционно используемыми отвердителями (полиэтиленполиамины, аминофенолы и др.).

Благодаря наличию алкильного заместителя C_{15} и гидроксильной группы в бензольном кольце молекулы карданола феналкамины и эпоксидные системы на их основе обладают такими свойствами, как низкая вязкость (возможность использования систем, не содержащих растворители), низкая токсичность (3–4 класс опасности), высокая химическая стойкость, а также способность отверждать эпоксидные смолы при температурах ниже 0°C .

Целью настоящей работы является изучение влияния технологических факторов на свойства ЛРДКМ с карданолсодержащей эпоксидной матрицей и поиск рациональных технологических факторов, обеспечивающих получение конструкционного, инженерного материала.

Получение ЛРДКМ с карданолсодержащей эпоксидной матрицей. Опираясь на результаты и выводы, представленные в работе [18], в частности, положительное влияние карданолсодержащей эпоксидной матрицы на скалывание по клеевому слою, стоит отметить, что образцы материалов, полученные с использованием в качестве отвердителя эпоксидной смолы феналкамина, имеющего в своем строении фрагменты линейного этиленамина, показали хорошие результаты на скалывание даже после температурно-влажностной обработки образцов, нами было принято решение о использовании карданолсодержащего эпоксидного связующего для получения ЛРДКМ.

Для изготовления лабораторных образцов плит ЛРДКМ был выбран метод прямого горячего прессования в жесткой оснастке (форма оснастки представляет собой параллелепипед с внутренним габаритным размером $D \times Ш \times В = 250 \times 250 \times 100$ мм). ЛРДКМ изготавливали из армирующего элемента № 1 (АЭ1 рубленые ламели березового шпона с габаритным размером $D \times Ш \times В = 250 \times 20 \times 1,5$ мм) и связующего ЭМ1 (эпоксидная матрица № 1 = смола YD-128: феналкамин «Кардамин Д»; 100:50 м.ч.), расход связующего, равный 125 г/м^2 , был выбран таким образом, что после процесса изготовления материала содержание эпоксидной матрицы в образцах составляло 23,0–27,0 % масс.

Технология изготовления луцено-рубленого древесно-композиционного материала. Связующее шпателем наносили на листы березового шпона с двух сторон, затем листы нарубались на гильотине. АЭ1 с нанесенным связующим укладывали в холодную пресс-форму плоскопараллельно друг другу и дну формы с разбежкой швов. Затем пресс-форму помещали в предварительно разогретый до температуры 50°C пресс и начинали процесс трехстадийного прессования. На первой стадии в течение 2 мин набирали давление P_1 . После набора необходимого значения P_1 в течение 60 мин разогревали пресс-форму до необходимого значения T_1 . На второй стадии прессования при заданных значениях P_1 и T_1 проводили выдержку в течение времени t_1 . Третья стадия прессования — охлаждение пресс-формы с заготовкой при заданном значении P_1 до температуры 50°C — составляла 60 мин.

Для снятия остаточных напряжений в материале после его пьезо-термической обработки заготовки ЛРДКМ извлекали из пресс-формы и кондиционировали в течение суток при температуре $20\text{--}25^\circ\text{C}$ и относи-

тельной влажности воздуха 65 ± 5 %. После кондиционирования заготовки подвергали механической обработке — торцовке и шлифовке (зернистость шлиф-круга — P250). Полученные после механической обработки плиты ($D \times Ш \times В = 245 \times 245 \times 40$ мм) кондиционировали в течении трех суток при температуре $20-25$ °C и относительной влажности воздуха 65 ± 5 %.

Выбор независимых факторов и области их варьирования (табл. 1) были обусловлены выбранной техно-

логией изготовления материала. Для изучения влияния технологических (независимых) факторов на свойства ЛРДКМ средствами программного пакета *Statgraphics Centurion XV* (v. 15.1.02) был сформирован план-матрица эксперимента (табл. 2).

Матрица плана представляет собой трехфакторный, ортогональный, центрально-композиционный план Бокса – Уилсона с пятью опытами на нулевом уровне ($x_i = 0$).

Таблица 1. Области варьирования независимых факторов

Независимые факторы	Натуральные значения независимых факторов (P_i, T_i, τ_i) при их следующих нормализованных значениях				
	$x_i = -1,471$	$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = 1$	$x_i = 1,471$
Давление прессования на 1–3-й стадиях (P), МПа	2	4	8	12	14
Температура прессования на 2-й стадии (T), °C	50	58	75	92	100
Время прессования (τ) на 2-й стадии, мин	60	65	75	85	90

Таблица 2. Матрица плана с нормализованными и натуральными значениями независимых факторов

Номер опыта	Нормированные значения независимых факторов			Натуральные значения независимых факторов		
	x_1	x_2	x_3	P_i , МПа	T_i , °C	τ_i , мин
1	1,0	1,0	1,0	12	92	85
2	-1,0	1,0	1,0	4	92	85
3	1,0	-1,0	1,0	12	58	85
4	-1,0	-1,0	1,0	4	58	85
5	1,0	1,0	-1,0	12	92	65
6	-1,0	1,0	-1,0	4	92	65
7	1,0	-1,0	-1,0	12	58	65
8	-1,0	-1,0	-1,0	4	58	65
9	1,471	0,0	0,0	14	75	75
10	-1,471	0,0	0,0	2	75	75
11	0,0	1,471	0,0	8	100	75
12	0,0	-1,471	0,0	8	50	75
13	0,0	0,0	1,471	8	75	90
14	0,0	0,0	-1,471	8	75	60
15	0,0	0,0	0,0	8	75	75
16	0,0	0,0	0,0	8	75	75
17	0,0	0,0	0,0	8	75	75
18	0,0	0,0	0,0	8	75	75
19	0,0	0,0	0,0	8	75	75

За выходные (зависимые) факторы были приняты следующие свойства ЛРДКМ: D — плотность, $кг/м^3$; WA — водопоглощение за 24 ч, %; TC — теплопроводность, $Вт \cdot (м/К)$; C_1 — разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 1, МПа; C_2 — разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 2, МПа; C_3 — разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 3, МПа; B_1 — разрушающее напряжение при трехточечном изгибе вдоль оси 1, МПа; B_2 — разрушающее напряжение при трехточечном изгибе вдоль оси 2, МПа; B_3 — разрушающее напряжение при трехточечном изгибе вдоль оси 3, МПа; S_{12} — разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 1–2, МПа; S_{13} — разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 1–3, МПа; S_{23} — разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 2–3, МПа; I_1 — ударная вязкость вдоль оси 1, $кДж/м^2$; I_2 —

ударная вязкость вдоль оси 2, $кДж/м^2$; I_3 — ударная вязкость вдоль оси 3, $кДж/м^2$.

На рис. 2 представлен образец ЛРДКМ с указанием осей симметрии.

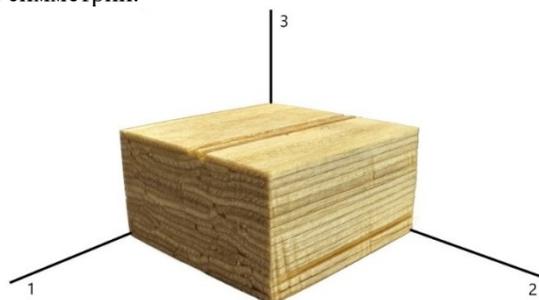


Рис. 2. Образец ЛРДКМ (опыт № 12) с указанием осей симметрии материала

Предварительно была выдвинута гипотеза о том, что ЛРДКМ, полученный по описанной выше технологии, будет относиться к группе ортотропных материалов.

В результате реализации плана эксперимента с двукратным повторением опытов (табл. 2) были получены образцы плит ЛРДКМ № 1–19 размером ДхШхВ = 245х245х40 мм.

Свойства полученных образцов плит ЛРДКМ № 1–19 определяли следующим образом.

Вначале определялись теплофизические свойства полученных плит по ГОСТ 3916.1, ISO 8302:1991 «Теплоизоляция. Определение термического сопротивления и соответствующих характеристик при стационарном тепловом режиме. Прибор с изолированным нагревательным элементом» на тепломере *Lambda-Meter EP500e*. Затем путем измерений массы и размеров плит ЛРДКМ № 1–19, в соответствии с п. 3.2 ГОСТ 9621 «Древесина слоистая клееная. Методы определения физических свойств», были найдены значения плотности данных образцов.

Для нахождения механических свойств материала вдоль осей симметрии 1, 2 и 3 (плоскостей симметрии

1–2; 1–3 и 2–3) из плит вырезалось по 5 образцов для испытаний вдоль каждой оси/плоскости симметрии. Образцы вырезались так, чтобы направление воздействия механического поля на образец было направлено вдоль оси симметрии (перпендикулярно плоскости симметрии).

Механические свойства ЛРДКМ № 1–19 определяли по ГОСТ 4651 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие», размер образцов ДхШхВ = 10х10х20 мм; ГОСТ Р 56805 «Композиты полимерные. Методы определения механических характеристик при изгибе», размер образцов ДхШхВ = 100х20х10 мм; ГОСТ 56799 «Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при сдвиге на образцах с V-образными надрезами», размер образцов ДхШхВ = 76х20х5 мм; ГОСТ 4647 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи, размер образцов ДхШхВ = 120х15х10 мм, без надреза, удар в ребро.

Найденные значения свойств для каждого опыта из плана эксперимента были усреднены, полученные значения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний ЛРДКМ № 1–19

Номер опыта	Свойства лущено-рубленого древесно-композиционного материала (ЛРДКМ)														
	D	WA	TC	C ₁	C ₂	C ₃	B ₁	B ₂	B ₃	S ₁₂	S ₁₃	S ₂₃	I ₁	I ₂	I ₃
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1 161	6,29	0,181	133,4	64,7	64,7	0,86	6,6	6,6	49,5	52,0	20,7	233	1 409	1 479
2	895	14,53	0,149	97,5	28,2	28,3	0,54	5,0	5,2	22,8	21,6	12,2	236	1 423	1 323
3	1 091	9,54	0,178	117,1	43,1	43,1	0,72	5,3	5,0	33,9	35,6	13,6	274	1 653	1 686
4	844	15,15	0,146	80,4	18,5	18,5	0,43	4,7	4,9	24,3	22,9	8,3	294	1 777	1 741
5	1 101	10,70	0,178	137,1	63,1	63,1	0,78	6,8	6,8	48,1	46,0	19,9	236	1 425	1 482
6	880	16,10	0,146	83,0	23,4	23,8	0,38	4,3	4,5	23,1	24,2	7,5	299	1 806	1 680
7	1 030	12,41	0,173	143,3	46,3	53,7	0,45	6,9	7,1	31,6	32,9	21,3	265	1 600	1 680
8	859	16,27	0,141	90,9	27,5	20,2	0,43	4,6	4,6	21,5	21,4	14,2	291	1 760	1 637
9	1 172	6,33	0,192	133,3	55,5	53,3	0,73	5,7	5,9	33,4	34,7	28,3	251	1 516	1 546
10	799	19,15	0,143	75,2	17,3	19,4	0,38	3,3	3,6	21,8	23,2	12,2	330	1 992	1 952
11	908	15,64	0,157	103,1	25,0	29,5	0,44	4,4	4,2	20,2	19,1	13,9	221	1 337	1 390
12	871	13,46	0,154	104,2	28,8	29,5	0,39	4,2	4,4	24,3	25,5	14,1	243	1 469	1 366
13	913	13,38	0,159	111,0	31,7	25,6	0,34	3,7	3,7	33,2	34,8	18,2	267	1 613	1 694
14	901	17,72	0,154	112,6	33,0	27,0	0,31	4,0	3,8	31,3	32,9	8,8	249	1 503	1 398
15	897	14,39	0,156	101,0	35,6	32,0	0,50	6,4	6,3	31,6	30,6	11,6	180	1 582	1 614
16	896	14,53	0,155	96,0	33,3	35,1	0,46	5,7	6,0	30,0	29,7	9,0	178	1 506	1 476
17	898	14,13	0,157	103,0	35,7	34,0	0,40	5,8	5,5	25,5	25,8	14,7	181	1 365	1 420
18	899	14,14	0,157	103,0	31,1	33,4	0,48	6,2	6,5	27,2	28,1	15,4	182	1 503	1 398
19	897	14,26	0,156	102,0	34,7	33,7	0,46	6,0	5,7	35,9	36,3	12,7	180	1 411	1 482

Исследование влияния технологических факторов на физико-механические свойства полученного ЛРДКМ. Для проверки гипотезы, выдвинутой ранее, полученные результаты эксперимента были статистически обработаны средствами программного пакета *Statgraphics*, предварительные расчеты показали, что средние прочностные свойства (C₂, B₂, I₂ и S₁₂) ЛРДКМ незначительно отличаются от средних прочностных

свойств (C₃, B₃, I₃ и S₁₃) с высокой степенью достоверности (P < 0,001).

Коэффициенты корреляции Пирсона между свойствами ЛРДКМ (C₂, B₂, I₂ и S₁₂) и (C₃, B₃, I₃ и S₁₃) для пар свойств положительны и значимо больше 0 (C₂/C₃ = 0,9712; B₂/B₃ = 0,9718; I₂/I₃ = 0,8928 и S₁₂/S₁₃ = 0,9527), а P-значение гораздо меньше 0,001. Для дальнейшего анализа решено было воспользоваться критерием Стьюдента для парных сравнений средних значе-

ний прочностных свойств ЛРДКМ (C_2/C_3 , B_2/B_3 , I_2/ I_3 и S_{12}/S_{13}).

В результате проведенного анализа можно сделать выводы о том, что:

- свойства (C , B , I) статистически неразличимы в осях 2 и 3;
 - свойство (S) статистически неразличимо в плоскостях 1–2 и 1–3;
- и, как следствие:
- плоскость 2–3 является изотропной.

При изучении полученных статистических данных был сделан вывод о том, что ЛРДКМ можно отнести к трансверсально изотропным материалам. Поэтому при дальнейшем анализе было принято решение использовать только значения свойств ЛРДКМ C_1 , C_2 , B_1 , B_2 , I_1 , I_2 , S_{12} и S_{23} .

Для нахождения экспериментально-статистических моделей свойств ЛРДКМ на основании изучения работ [19; 20] за основу была принята регрессионная модель линейного полинома 2-й степени для нормализованных значений входных факторов (1):

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

где y — выходные факторы (свойства ЛРДКМ — D , WA , TC , C , B , S , I); b_0 — нормированный свободный член уравнения регрессии; b_1 , b_2 , b_3 , b_{11} , b_{22} , b_{33} , b_{12} , b_{13} , b_{23} , — нормированные коэффициенты уравнения регрессии; x_1 , x_2 , x_3 — нормализованные значения входных факторов.

Средствами программного пакета *Statgraphics* был проведен регрессионный анализ полученных результатов эксперимента для свойств C_1 , C_2 , B_1 , B_2 , I_1 , I_2 , S_{12} и S_{23} ЛРДКМ.

По результатам анализа и исключения из регрессионных уравнений незначимых коэффициентов уравнения регрессии были получены адекватные уравнения регрессии (2–12) с нормированными значениями β -коэффициентов, удовлетворяющие следующим условиям их адекватности: R -значение $\leq 0,05$; нормированный $R^2 \geq 0,50$.

$$D = 920,069 + 117,915P + 21,6918T + 11,2464\tau + 40,3114P^2; \quad R^2 = 0,9849; \quad (2)$$

$$WA = 14,3714 - 3,40428P - 1,32657\tau - 1,21152P^2; \quad R^2 = 0,8503; \quad (3)$$

$$TC = 0,15614 + 0,0162293P + 0,00165576T + 0,00189442\tau + 0,00529998P^2; \quad R^2 = 0,9964; \quad (4)$$

$$C_1 = 103,136 + 21,46P - 4,2375P\tau + 5,9375T\tau + 5,47604\tau^2; \quad R^2 = 0,9503; \quad (5)$$

$$C_2 = 33,1933 + 14,8979P + 3,60132T + 3,754P^2 - 4,03881P\tau; \quad R^2 = 0,9025; \quad (6)$$

$$B_1 = 0,443456 + 0,133132P + 0,08714P^2; \quad R^2 = 0,5539; \quad (7)$$

$$B_2 = 5,87648 + 0,854167P - 0,842923P\tau - 0,300846T^2 - 0,508755\tau^2; \quad R^2 = 0,8887; \quad (8)$$

$$S_{12} = 29,9579 + 7,17554P + 4,0PT; \quad R^2 = 0,5816; \quad (9)$$

$$S_{23} = 12,7658 + 4,6222P + 2,76188P^2 + 2,3875T\tau; \quad R^2 = 0,7269; \quad (10)$$

$$I_1 = 180,2 - 18,5115P - 12,3586T + 44,8273P^2 + 14,8879P\tau + 17,799T^2 + 29,8116\tau^2; \quad R^2 = 0,9082; \quad (11)$$

$$I_2 = 1476,98 - 111,875P - 74,7191T + 128,75P^2; \quad R^2 = 0,6455. \quad (12)$$

Натуральные β -коэффициенты, позволяющие оценить относительный вклад каждого независимого фактора в предсказание свойств ЛРДКМ, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры полученных уравнений регрессии с натуральными значениями входных факторов

Зависимые факторы	Натуральные β -коэффициенты уравнений регрессии										R^2
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{11}	β_{22}	β_{33}	β_{12}	β_{13}	β_{23}	
D	342,95	29,48	1,28	1,12	2,52	0	0	0	0	0	0,9849
WA	31,88	-0,851	-0,078	0	-0,076	0	0	0	0	0	0,8503
TC	0,08	0,004	0,0001	0,0002	0,0003	0	0	0	0	0	0,9964
C_1	-380,71	5,37	0	0	0	0	0,055	0	-0,106	0,035	0,9503
C_2	33,08	3,72	0,21	0	0,235	0	0	0	-0,101	0	0,9025
B_1	-0,171	0,033	0	0	0,005	0	0	0	0	0	0,5539
B_2	51,29	0,214	0	0	0	-0,001	-0,005	0	-0,021	0	0,8887
S_{12}	-19,69	1,79	0	0	0	0	0	0,0588	0	0	0,5816
S_{23}	-86,52	1,16	0	0	0,173	0	0	0	0	0,014	0,7269
I_1	-2 154,22	-4,63	-0,727	0	2,80	0,062	0,298	0	0,372	0	0,9082
I_2	1 515,37	-27,97	-4,40	0	8,05	0	0	0	0	0	0,6455

Анализ полученных уравнений и натуральных β -коэффициентов (табл. 4) позволяет сделать следующие выводы.

Для трехфакторной нелинейной модели D наибольший вклад во влияние на плотность ЛРДКМ оказывает давление прессования, на 2-м месте находится температура прессования, наименьший вклад оказывает время прессования (рис. 3).

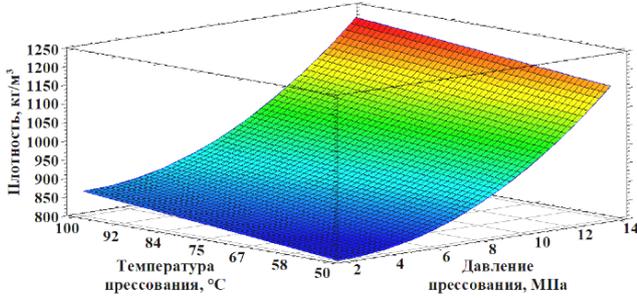


Рис. 3. Расчетная поверхность отклика функции $D = f(P, T, \tau)$, при $\tau = 75$ мин

Для двухфакторной нелинейной модели WA установлено, что водопоглощение ЛРДКМ зависит от времени и давления и не зависит от температуры прессования, а наибольший вклад во влияние оказывает давление прессования (рис. 4).

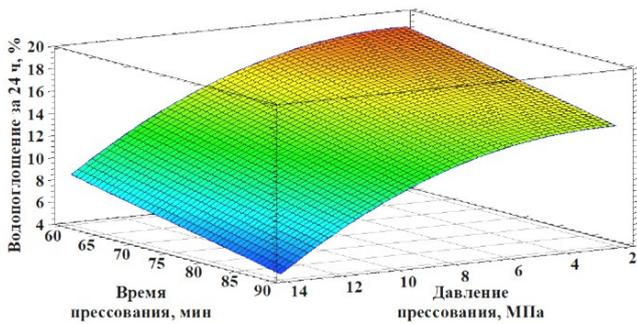


Рис. 4. Расчетная поверхность отклика функции $WA = f(P, \tau)$ при $T = 75$ °C

Для трехфакторной нелинейной модели TC наибольшее влияние на теплопроводность ЛРДКМ оказывает давление прессования, на 2-м месте находится время прессования, наименьшее влияние оказывает температура прессования (рис. 5).

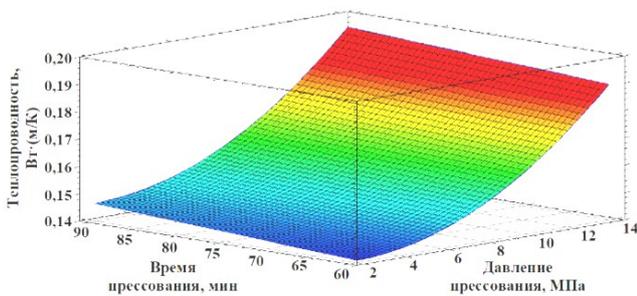


Рис. 5. Расчетная поверхность отклика функции $TC = f(P, T, \tau)$ при $T = 75$ °C

Для трехфакторной нелинейной модели S_1 наибольший вклад во влияние на разрушающее напряжение при сжатии ЛРДКМ вдоль оси 1 оказывает давление прессования, совместное влияние факторов P_1 и τ_1 находится на 2-м месте, а совместное влия-

ние факторов T_1 и τ_1 является наименьшим и имеет негативный характер (рис. 6).

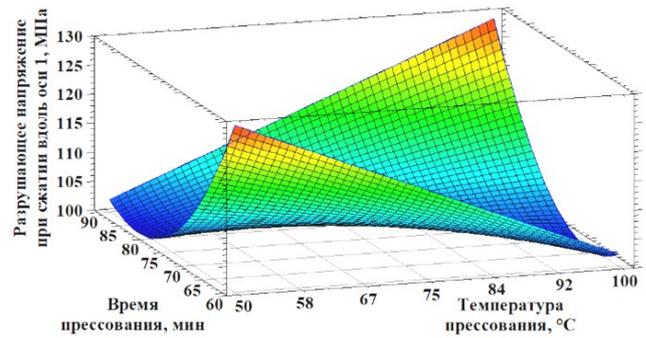


Рис. 6. Расчетная поверхность отклика функции $S_1 = f(P, T, \tau)$ при $P = 8$ МПа

Для трехфакторной нелинейной модели S_2 наибольший вклад во влияние на разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 2 оказывает давление прессования, также стоит отметить негативный вклад совместного влияния факторов P_1 и τ_1 , которое больше положительного влияния температуры прессования (рис. 7).

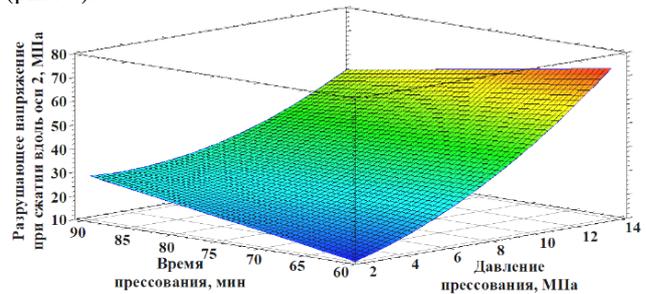


Рис. 7. Расчетная поверхность отклика функции $S_2 = f(P, T, \tau)$ при $T = 75$ °C

Модель V_1 является однофакторной нелинейной, и разрушающее напряжение при изгибе вдоль оси 1 ЛРДКМ зависит только от давления прессования.

Для трехфакторной нелинейной модели V_2 наибольший вклад во влияние на разрушающее напряжение при изгибе вдоль оси 2, оказывает давления прессования. Стоит отметить что температура и время прессования, а также совместное влияние P_1 и τ_1 имеют негативное влияние на свойство ЛРДКМ V_2 (рис. 8).

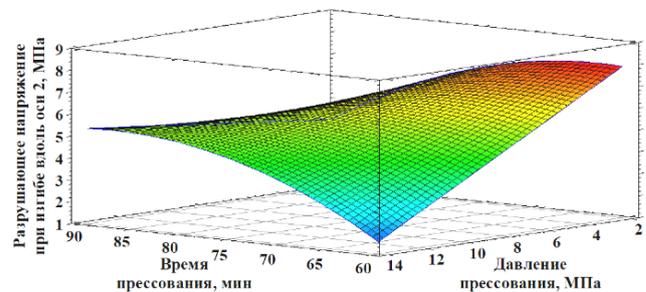


Рис. 8. Расчетная поверхность отклика функции $V_2 = f(P, T, \tau)$ при $T = 100$ °C

Для двухфакторной линейной зависимости S_{12} наибольший вклад во влияние на разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 1–2 оказывает давление прессования, также имеет место совместное влияние факторов P_1 и T_1 на свойство ЛРДКМ S_{12} (рис. 9).

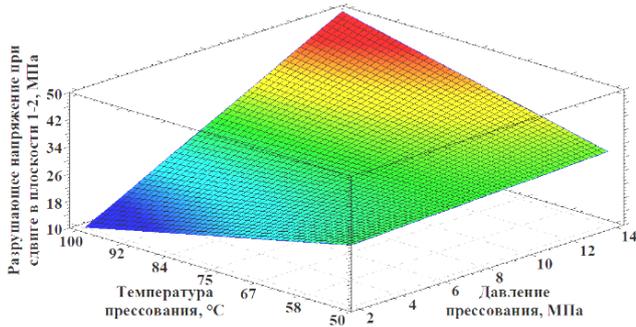


Рис. 9. Расчетная поверхность отклика функции $S_{12} = f(P, T)$ при $\tau = 75$ мин

Для трехфакторной нелинейной зависимости S_{23} наибольший вклад во влияние на разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 2–3 оказывает давление прессования, также стоит отметить наличие совместного влияния факторов T_i и τ_i на свойство ЛРДКМ S_{23} (рис. 10).

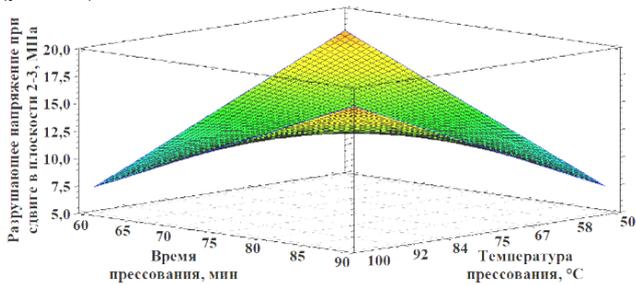


Рис. 10. Расчетная поверхность отклика функции $S_{23} = f(T, \tau)$ при $P = 8$ МПа

Для трехфакторной нелинейной модели I_1 наибольший вклад во влияние на ударную вязкость вдоль оси 1 оказывает давление прессования, на 2-м месте находится время прессования, в меньшей мере — температура прессования, влияние имеет негативный характер. Стоит отметить положительное совместное влияние факторов P_i и τ_i на свойство I_1 ЛРДКМ (рис. 11).

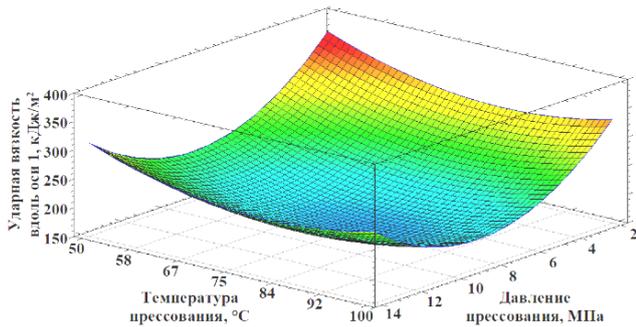


Рис. 11. Расчетная поверхность отклика функции $I_1 = f(P, T, \tau)$ при $\tau = 75$ мин

Для двухфакторной нелинейной модели I_2 наибольший вклад во влияние на ударную вязкость вдоль оси 2 оказывает давление прессования, в меньшей мере — время прессования, влияние имеет негативный характер (рис. 12).

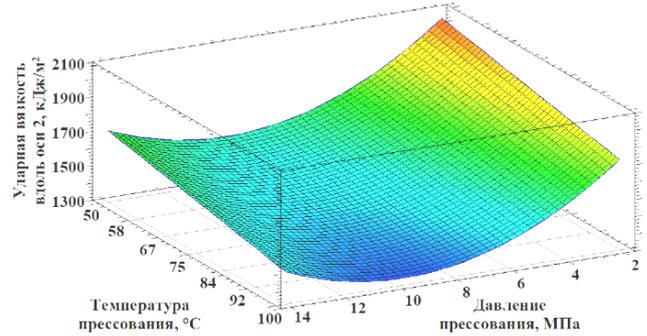


Рис. 12. Расчетная поверхность отклика функции $I_2 = f(P, T)$ при $\tau = 75$ мин

Нахождение рациональных технологических факторов с целью получения ЛРДКМ с заданными характеристиками. Для поиска рациональных значений технологических факторов (P, T, τ), обеспечивающих получение ЛРДКМ с максимальными значениями плотности, теплопроводности, прочностных свойств и с минимальным значением водопоглощения, средствами программного пакета *Statgraphics*, методом симплексов была проведена оптимизация композиционной функции (уравнения (13), (14) и (15)), а также были построены поверхности отклика целевой функции (рис. 13–15).

$$(G \circ F)(P, T, \tau) = G(F(P, T, \tau)) \quad (13)$$

$$F = (D, WA, TC, C_1, C_2, C_3, B_1, B_2, B_3, I_1, I_2, I_3, S_{12}, S_{13}, S_{23}) \quad (14)$$

$$y = D = f(P, T, \tau) \\ \vdots \\ y = S_{23} = f(P, T, \tau) \quad (15)$$

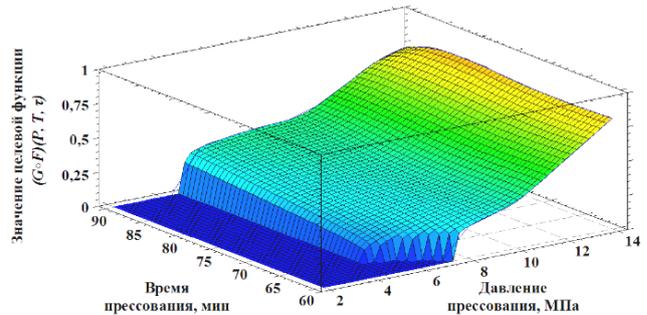


Рис. 13. Расчетная поверхность отклика целевой композиционной функции $(G \circ F)(P, T, \tau)$ при $T = 100$ °C

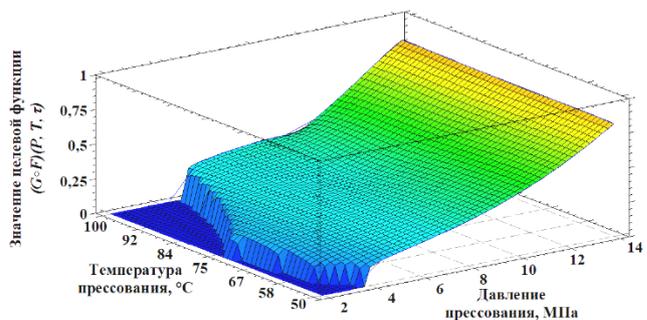


Рис. 14. Расчетная поверхность отклика целевой композиционной функции $(G \circ F)(P, T, \tau)$ при $\tau = 79$ мин

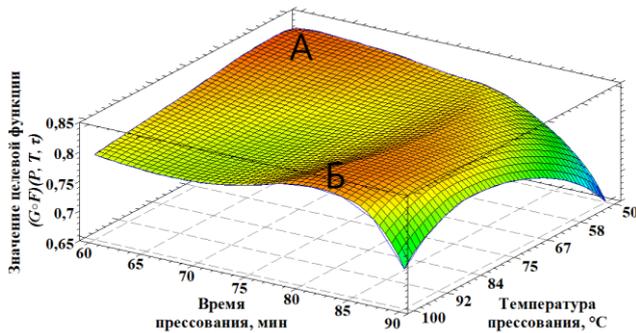


Рис. 15. Расчетная поверхность отклика целевой композиционной функции ($G \circ F$) (P, T, τ) при $P = 14$ МПа

Результаты оптимизации композиционной функции показали, что в изученной области факторного пространства при $x_1 = 1,471$ ($P = 14$ МПа) на поверхности отклика (рис. 14) можно наблюдать два экстремума, А и Б. Значения функции ($G \circ F$) (P, T, τ) для данных экстремумов соответственно равны 0,819206 и 0,828085. Координаты вершин экстремумов равны $A = (x_2 = -1,471; x_3 = -1,113)$ и $B = (x_2 = 1,442; x_3 = 0,396)$ что соот-

ветствует натуральным значениям факторов $T_A = 50$ °С, $\tau_A = 64$ мин и $T_B = 100$ °С, $\tau_B = 79$ мин.

На основании полученных значений функции ($G \circ F$) (P, T, τ) для экстремумов А и Б, можно отметить, что условиям поставленной задачи в большей мере соответствует вершина экстремума Б.

Форму поверхности отклика и наличие экстремума А, соизмеримого по высоте с экстремумом Б (рис. 15), можно объяснить присутствием шумового фактора, которым является тепловой эффект реакции отверждения ЭМ1. Данный фактор не учитывался при составлении плана эксперимента по причине того, что выбранная технология изготовления и оснастка оборудования не позволяют контролировать данный фактор.

Используя найденные значения факторов ($P = 14$ МПа, $T = 100$ °С, $\tau = 79$ мин), по общей технологии были изготовлены две плиты ЛРДКМ № 20, размером $D \times Ш \times В = 250 \times 250 \times 40$ мм. Данные табл. 5 показывают удовлетворительное соответствие между расчетными и фактическими значениями показателей свойств $D, W_A, T_C, C_1, C_2, B_1, B_2, S_{12}, S_{23}, I_1, I_2$ до 89,4 %.

Таблица 5. Показатели свойств ЛРДКМ № 20

Свойство	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Расхождение, % от расчета
$D, \text{кг/м}^3$	1 217	1 217	0,0
$W_A, \%$, за 24 ч	6,22	6,78	8,3
$T_C, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	0,195	0,192	1,5
$C_1, \text{МПа}$	136,5	147,9	7,7
$C_2, \text{МПа}$	66,1	66,9	1,2
$B_1, \text{МПа}$	0,83	0,84	1,2
$B_2, \text{МПа}$	5,9	6,5	9,2
$S_{12}, \text{МПа}$	49,0	49,2	0,4
$S_{23}, \text{МПа}$	26,9	27,8	3,2
$I_1, \text{кДж/м}^2$	283	253	10,6
$I_2, \text{кДж/м}^2$	1 483	1 338	9,8

Выводы. В результате проделанной работы показана возможность изготовления ЛРДКМ с карданолсодержащей эпоксидной матрицей; показано, что ЛРДКМ можно отнести к трансверсально изотропным материалам; получены закономерности влияния независимых факторов на зависимые переменные в виде полиномов 1-й и 2-й степени; найдены рациональные значения технологических факторов, позволяющие по существующей технологии изготовить ЛРДКМ с за-

данными характеристиками в пределах исследованной области факторного пространства; ЛРДКМ № 20, полученный в результате оптимизации композиционной функции, соответствует (до 89,4 %) заявленным характеристикам.

Анализируя полученные результаты, ЛРДКМ можно отнести к классу конструкционных инженерных материалов.

Литература

- Мишкин С.И. Исследование влияния содержания связующего в углепластиках на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2023. Т. 120, № 2. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1980 (дата обращения: 30.05.2023).
- Ярцев В.П., Кисилева О.А., Лотц Н.С. Эпоксидно-древесный композит: пат. Рос. Федерации RU2288929 (С1); заявл. 20.09.2005; опубл. 12.10.2006.
- Ярцев В.П., Кисилева О.А., Лотц Н.С. Защитное эпоксидно-древесное покрытие для пенополистирола: пат. Рос. Федерации RU2368633 (С2); заявл. 12.11.2007; опубл. 27.09.2009.
- Ярцев В.П., Кисилева О.А., Лотц Н.С. Эпоксидно-древесная композиция с отходами производства пенополистирола: пат. Рос. Федерации RU2326912 (С1); заявл. 09.01.2007; опубл. 20.06.2008.
- High-strength wood-plastic decorative sheet: пат. Китайской Народной Республики, CN106633493 (А); заявл. 15.11.2016; опубл. 10.05.2017.
- High-temperature resistant double-layer composite plastic-wood materials outer layer composition, outer layer and composite plastic-wood materials and preparation method: пат. Китайской Народной Республики, CN106967351 (А); заявл. 26.04.2017; опубл. 21.07.2017.
- Wear-resistant two-layer compound plastic-wood material outer layer composition, outer layer and composite plastic-wood

- materials and preparation method: пат. Китайской Народной Республики, CN107022213 (A); заявл. 26.04.2017; опубл. 08.08.2017.
8. Yi Liu. Epoxy-pine bonding interface // BioResources. 2014. V.10, № 1. P. 638-646. URL: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_10/BioRes_10_1_638_Liu_PGGZCV_Interfac_Props_Loblolly_Pine_Epoxy_Pyrol_BioOil_6419.pdf (дата обращения: 28.05.2023).
 9. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г.: утв. распоряжением Правительства РФ № 312-р от 01.02.2021 // Доступ из справ.- правовой системы «Гарант».
 10. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции // Доступ из справ.- правовой системы «Гарант».
 11. СП 452.1325800.2019. Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций // Доступ из справ.- правовой системы «Гарант».
 12. Gregory Lawrence Johnson, Jian Hua Li. Manufactured wood product: пат. Соединенных Штатов Америки US8268430 (B2); заявл. 22.09.2008; опубл. 18.09.2018.
 13. Parker David. Composite wood product and method for making the wood product: пат. Соединенных Штатов Америки US8075717 (B2); заявл. 10.11.2004; опубл. 13.12.2011.
 14. Culnane Jeff. A structural wood composite from short-rotation planetoids // Ecos. 1982. V. 32. P. 29-30. URL: <http://www.ecomagazine.com/nid/206/issue/5859.html> (дата обращения: 30.05.2023).
 15. McCafferty Phil. Reinventing wood // Popular Science. 1990. V. 236, № 5. P. 96-99. URL: https://books.google.ru/books?id=wGzIqgNb52EC&dq=Scrimber:+A+New+Engineering+Timber+Product&pg=PA96&redir_esc=y#v=onepage&q=Scrimber%3A%20A%20New%20Engineering%20Timber%20Product&f=false (дата обращения: 30.05.2023).
 16. Пакен А.М., Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы / пер. с нем. П.М. Валецкий. Л.: Госхимиздат, 1962. 963 с.
 17. Cashew Nut Shell Liquid A Goldfield for Functional Materials. URL: <http://library.lol/main/09CAB0D5F0F0E7CEE49D6D6F1A90F649> (дата обращения: 28.05.2023).
 18. Тесленко А.Ю. Перспективные связующие для фанеры на основе эпоксидных систем с карданолсодержащими основаниями Манниха // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1. С. 85-90.
 19. Шишлов О.Ф. Влияние технологических факторов на свойства древесных слоистых пластиков с карданолсодержащим полиуретановым связующим // Вестн. Казанского технологического ун-та. 2014. Т. 17, № 6. С. 179-183.
 20. Шишлов О.Ф. Влияние технологических факторов на свойства бакелизованной фанеры с карданолсодержащим бакелитовым лаком // Вестн. Казанского технологического ун-та. 2014. Т. 17, № 4. С. 44-47.
 4. YArcev V.P., Kisileva O.A., Lotc N.S. Epoxy-wood composition with waste from the production of expanded polystyrene: пат. Ros. Federacii RU2326912 (C1); заявл. 09.01.2007; опубл. 20.06.2008.
 5. High-strength wood-plastic decorative sheet: пат. Kitajskoj Narodnoj Respubliki, CN106633493 (A); заявл. 15.11.2016; опубл. 10.05.2017.
 6. High-temperature resistant double-layer composite plastic-wood materials outer layer composition, outer layer and composite plastic-wood materials and preparation method: пат. Kitajskoj Narodnoj Respubliki, CN106967351 (A); заявл. 26.04.2017; опубл. 21.07.2017.
 7. Wear-resistant two-layer compound plastic-wood material outer layer composition, outer layer and composite plastic-wood materials and preparation method: пат. Kitajskoj Narodnoj Respubliki, CN107022213 (A); заявл. 26.04.2017; опубл. 08.08.2017.
 8. Yi Liu. Epoxy-pine bonding interface // BioResources. 2014. V.10, № 1. P. 638-646. URL: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_10/BioRes_10_1_638_Liu_PGGZCV_Interfac_Props_Loblolly_Pine_Epoxy_Pyrol_BioOil_6419.pdf (дата обращения: 28.05.2023).
 9. Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030.: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF № 312-r от 01.02.2021 // Dostup iz sprav.- pravovoj sistemy «Garant».
 10. SP 64.13330.2017. Wooden structures // Dostup iz sprav.- pravovoj sistemy «Garant».
 11. SP 452.1325800.2019. Residential multi-apartment buildings using wooden structures // Dostup iz sprav.- pravovoj sistemy «Garant».
 12. Gregory Lawrence Johnson, Jian Hua Li. Manufactured wood product: пат. Soedinennyh SHtatov Ameriki US8268430 (B2); заявл. 22.09.2008; опубл. 18.09.2018.
 13. Parker David. Composite wood product and method for making the wood product: пат. Soedinennyh SHtatov Ameriki US8075717 (B2); заявл. 10.11.2004; опубл. 13.12.2011.
 14. Culnane Jeff. A structural wood composite from short-rotation planetoids // Ecos. 1982. V. 32. P. 29-30. URL: <http://www.ecomagazine.com/nid/206/issue/5859.html> (дата обращения: 30.05.2023).
 15. McCafferty Phil. Reinventing wood // Popular Science. 1990. V. 236, № 5. P. 96-99. URL: https://books.google.ru/books?id=wGzIqgNb52EC&dq=Scrimber:+A+New+Engineering+Timber+Product&pg=PA96&redir_esc=y#v=onepage&q=Scrimber%3A%20A%20New%20Engineering%20Timber%20Product&f=false (дата обращения: 30.05.2023).
 16. Paken A.M. Epoxy compounds and epoxy resins / per. s nem. P.M. Valeckij. L.: Goskhimizdat, 1962. 963 p.
 17. Cashew Nut Shell Liquid A Goldfield for Functional Materials. URL: <http://library.lol/main/09CAB0D5F0F0E7CEE49D6D6F1A90F649> (дата обращения: 28.05.2023).
 18. Teslenko A.YU. Promising binders for plywood based on epoxy systems with cardanol-containing Mannich bases // Systems Methods Technologies. 2020. № 1. P. 85-90.
 19. SHishlov O.F. The influence of technological factors on the properties of wood laminated plastics with a cardanol-containing polyurethane binder // Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. V. 17, № 6. P. 179-183.
 20. SHishlov O.F. The influence of technological factors on the properties of bakelized plywood with cardanol-containing bakelite varnish // Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. V. 17, № 4. P. 44-47.

References

1. Mishkin S.I. Investigation of the influence of the binder content in carbon fiber plastics on their mechanical properties // Trudy VIAM. 2023. V. 120, № 2. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1980 (дата обращения: 30.05.2023).
2. YArcev V.P., Kisileva O.A., Lotc N.S. Epoxy-wood composite: пат. Ros. Federacii RU2288929 (C1); заявл. 20.09.2005; опубл. 12.10.2006.
3. YArcev V.P., Kisileva O.A., Lotc N.S. Protective epoxy-wood coating for expanded polystyrene: пат. Ros. Federacii RU2368633 (C2); заявл. 12.11.2007; опубл. 27.09.2009.