

characterization / M.M. Aji, S. Narendren, M. K. Purkait, V. Katiyar // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2020. V.8. 103650.

10. Hilary L.N. Recycling of waste poly(vinyl chloride) fill materials to produce new polymer composites with propylene glycol plasticizer and waste sawdust of Albizia lebbbeck wood / L. N. Hilary, S. Sultana, Z. Islam, Md. K. U. Sarker, Md. J. Abedin, M. M. Haque // Current Research in Green and Sustainable Chemistry. – 2021. V.4. 100221.

© **Chirkov D.D.** – research engineer of the Department of PPI and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: den.chirkov12@yandex.ru; **Shkuro A.E.** - PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of PPI and Polymer Processing, USFEU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Glukhikh V.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of PPI and Polymer Processing, USFEU, e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; **Kulazhenko Y.M.** – PhD student of the Department of PPI and Polymer Processing, USFEU, e-mail: kulazhenkoyuliya@mail.ru; **Krivotogov P.S.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of PPI and Polymer Processing, USFEU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru.

УДК 674.07

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ РЕЦЕПТУРЫ ЛАКОКРАСОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

К.А. Башкирова, М.В. Газеев

Спланирован и проведен многофакторный эксперимент для трех варьируемых факторов, по результатам которого получены математические модели адекватно описывающий процесс формирования защитно-декоративных покрытий на древесине, позволившие решить задачу поиска оптимальной рецептуры лакокрасочной композиции на основе эпоксидной смолы. В результате решения задачи оптимизации, найден и приведен состав лакокрасочной композиции, а также этапы формирования лакокрасочного покрытия на образцах древесины с учетом высоких качественных показателей покрытия (выходные параметры эксперимента). Приведена методика решения задачи оптимизации компонентов рецептуры ЛКК методом симплексов. Проведен регрессионный анализ по каждому выходному параметру в программе STATISTICA 12, составлены уравнения регрессии для каждого выходного параметра, значения которого зависят от варьируемых факторов. Проведен их анализ и построены графические модели поверхности отклика. Решена задача поиска оптимальной рецептуры лакокрасочного материала на основе эпоксидной смолы методом условного центра масс в MS Excel.

Ключевые слова: Лакокрасочные материалы, лакокрасочная композиция, защитно-декоративные покрытия, эпоксидная смола, оптимизация, древесина.

Введение

Внешний вид изделий из древесины и древесных материалов во многом определяется качеством отделки. В настоящее время для отделки применяют различные лакокрасочные материалы, выбор которых зависит от многих требований, предъявляемых к формируемому защитно-декоративному покрытию и условиям его эксплуатации. Несмотря на наличие множества видов и типов лакокрасочных материалов (ЛКМ) для отделки изделий из древесины российских и зарубежных производителей, все еще существует потребность в новых ЛКМ и технологиях создания защитно-декоративных покрытий (ЗДП), которые бы удовлетворяли, как потребителя, так и производителя [7,11]. Для создания покрытия применяются различные ЛКМ, которые выбирают в зависимости от назначения изделия и требований, предъявляемых покрытию. Поскольку лакокрасочные покрытия (ЛКП) на основе эпоксидной смолы обладают достаточно высокими физико-механическими и декоративными свойствами, а также стремительно набирают популярность у потребителей в последнее время, считаем актуальным создание новой лакокрасочной композиции (ЛКК) на основе эпоксидной смолы. Эпоксидная смола имеет ряд

явных преимуществ перед другими ЛКМ: высокий показатель стойкости к царапанию; химическая стойкость; хорошая адгезия к подложке; низкая влагопроницаемость; отсутствие или незначительная ее усадка при эксплуатации изделий; высокие показатели твердости, эластичности, абразивостойкости, морозостойкости, теплостойкости и водостойкости. Благодаря своим преимуществам эпоксидная смола вызывает интерес у многих ученых, которые ведут в своих разработки в области полимерных композиционных материалов [10]. Стоит отметить, что эпоксиды подвержены пожелтению и разрушению (мелению) при воздействии ультрафиолета, что ограничивает область их применения.

На кафедре механической обработки древесины и производственной безопасности совместно с кафедрой химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов Уральского государственного лесотехнического университета ведется разработка новой лакокрасочной композиции (ЛКК) на основе эпоксидной смолы для отделки изделий из древесины и древесных материалов. Целью исследования является поиск оптимальной рецептуры ЛКК на основе эпоксидной смолы для формирования ЗДП на древесине.

Материалы и методы

Для разработки новой композиции на основе эпоксидной смолы был проведен многофакторный эксперимент по плану Бокса, для трех варьируемых факторов (отвердитель, ускоритель и ПАВ). Разрабатываемая ЛКК состоит из основы в виде эпоксидной смолы на основе бисфенола А (4,4 - диоксифенилпропана – 2,2) – (ЭСБА) [4].

Для используемой эпоксидной смолы выбран отвердитель аминного типа ОТ-2. Данный отвердитель в композиции с эпоксидной смолой обеспечивает повышенные физико-механические показатели, такие как стойкость покрытия к удару, высокую влагостойкость и стойкость к воздействию УФ-излучения [6].

Концентрацию отвердителя для введения в ЛКК определяли опытным путем, и она составила 50–60% от массы эпоксидной смолы.

С целью сокращения времени отверждения покрытия в разрабатываемую ЛКК вводили ускоритель аминного типа УС-1 в концентрации до 3% от массы эпоксидной смолы [9].

Для увеличения пластичности покрытия, а также нормализации показателя растекаемости ЛКК на поверхности подложки в разрабатываемый состав вводили неионогенное поверхностно-активное вещество (ПАВ) ОП-7, относящийся к группе оксиэтилированных спиртов. Допустимая концентрация ПАВ в составе до 1%.

Таблица кодирования варьируемых факторов эксперимента представлена в таблице

Таблица 1 - Таблица кодирования факторов

Параметр	Код	Натуральные значения		
		X1	X2	X3
Нижний уровень X-	-1	50	0	0
Основной уровень X	0	55	1,5	0,5
Верхний уровень X+	1	60	3	1
Шаг варьирования λ	-	5	1,5	0,5

Процесс формирования ЛКП на основе эпоксидной смолы состоит из следующих этапов [1]:

1. Приготовление рабочего состава ЛКМ, согласно плану эксперимента;
2. Подогрев состава в камере при 38–40 °С, в течение 5 минут;
3. Выдержка состава 2 минуты при комнатной температуре;
4. Нанесение первого слоя ЛКМ на основе эпоксидной смолы кистью;
5. Сушка слоя в конвективной сушильной камере при температуре 38–40 °С;
6. Промежуточное шлифование покрытия вручную шлифовальной губкой №220–280;
7. Удаление пыли безворсовыми салфетками вручную;
8. Приготовление рабочего состава на второй слой согласно плана эксперимента;
9. Подогрев состава в камере при 38–40 °С, в течение 5 минут;
10. Выдержка состава 2 минуты при комнатной температуре;
11. Нанесение второго слоя ЛКМ на основе эпоксидной смолы кистью;
12. Сушка слоя в камере при температуре 40°С;
13. Контроль качества.

Структурная схема формируемого ЗДП на образцах представлена на рисунке 1.

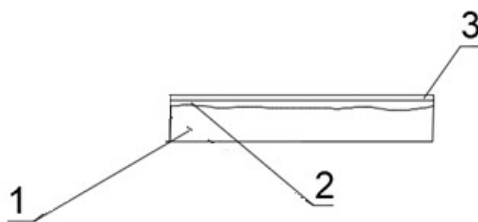


Рис. 1. Структурная схема защитно-декоративного покрытия на исследуемых образцах: 1- подложка (стальная пластинка, стекло, дерево), 2- первый слой ЛКМ на основе эпоксидной смолы, 3 – покрывной слой ЛКМ на основе эпоксидной смолы.

Выходные параметры:

1. Расход ЛКМ, г/м²;
2. Время высыхания, мин;
3. Толщина ЗДП (определение толщины ЗДП методом светового сечения на микроскопе МИС-11;
4. Блеск ЗДП (определение на фотоэлектрическом блескомере);
5. Прочность ЗДП на изгиб (Определение по шкале гибкости ШГ);
6. Твердость ЗДП на маятниковом приборе М-3;
7. Прочности ЗДП на удар на приборе У-1а;
8. Склерометрической твердость ЗДП на приборе Клемен-Кейля [5];
9. Адгезия ЗДП (методом решетчатых надрезов);
10. Теплостойкость ЗДП;
11. Влагопоглощение.

Оптимизация технологических процессов методом симплексов

Движение в m -мерном факторном пространстве в сторону экстремума поверхности отклика с использованием симплексов было предложено в 1962 г [8].

Под m -мерным симплексом понимается геометрическая фигура в m -мерном пространстве, имеющая $m+1$ вершин, соединенных прямыми отрезками (ребрами). В частности, одномерным симплексом является отрезок прямой, двумерным – плоский треугольник, трехмерным – тетраэдр и т.д.

Процедура поиска экстремума сводится к следующему. При числе независимых переменных, включенных в исследование, равном m , на первом этапе ставится серия экспериментов, состоящая из $m+1$ опытов. Условиям опытов в m -мерном факторном пространстве соответствуют $m+1$ точек, являющихся вершинами m -мерного симплекса. Точку, которой отвечает худшее значение отклика, соединяют с центром противоположной грани отрезком прямой. На продолжении этого отрезка находят новую точку, удаленную от центра грани на такое же расстояние, что и «худшая» точка.

Координаты новой точки являются условиями дополнительного опыта. Худшая точка отбрасывается, а оставшиеся и вновь найденная точки образуют новый симплекс, с которым повторяется описанная процедура. Направление последовательного перемещения симплекса в факторном пространстве достаточно близко к направлению градиента линейного приближения функции отклика.

Аналитически координаты новой точки вычисляются по формуле (1):

$$X_i^{**} = -\frac{2(\sum_{u=1}^{m+1} X_{iu} - X^*)}{m} - X_i^*, i = 1, 2 \dots m, \quad (1)$$

где X_i^{**} — i -я координата новой точки; X_i^* — i -я координата худшей точки.

Для практического пользования удобно заранее подсчитать числовые значения элементов матрицы A_m для различных m (таблицы 2 и 3) [8].

Таблица 2 – Симплекс-план $m=2$

X_{1u}	X_{2u}
0,8660	0,5000
-0,8660	0,5000
0	-1,0000

Таблица 3 – Симплекс-план m=3

X_{1u}	X_{2u}	X_{3u}
0,8165	0,4714	0,3333
-0,8165	0,4714	0,3333
0	-0,9428	0,3333
0	0	-1,0000

Иногда при использовании метода симплексов возникает необходимость в уменьшении размеров симплекса в ходе эксперимента (например, при желании более точно локализовать область оптимума). Для этой цели можно воспользоваться приемом стягивания симплекса либо вокруг его лучшей вершины, либо вокруг центра тяжести.

В первом случае координаты вершин уменьшенного симплекса рассчитываются по формуле 2:

$$X_{1u} = (1 - \beta)X_{is} + \beta X_{iu}, \tag{2}$$

где X_{iu} — координаты вершин уменьшаемого симплекса; X_{is} — координаты лучшей вершины симплекса, β — коэффициент сжатия ($0 < \beta < 1$).

Стягивание симплекса вокруг его центра тяжести осуществляется по формуле (3):

$$X_{1u} = (1 - \beta)X_{ic} + \beta X_{iu}, \tag{3}$$

где $X_{ic} = \frac{1}{m+1} \sum_{u=1}^{m+1} X_{iu}$ — координаты центра тяжести симплекса.

Адаптивность рассматриваемой симплексной процедуры можно повысить, если при отыскании координат новой точки учитывать вес остальных точек симплекса. Движение в факторном пространстве при этом сопровождается изменением формы симплекса, однако, объем его остается неизменным. При движении в сторону максимум функции отклика координаты новой точки определяется по формуле (4):

$$X_i^{**} = \frac{1}{\sum_{u=1}^{m+1} y_u - y^*} [2 \sum_{u=1}^{m+1} X_{iu} y_u - (\sum_{u=1}^{m+1} y_u + y^*) X_i^*], \tag{4}$$

При движении в сторону минимума – по формуле (5):

$$X_i^{**} = \frac{4}{m} \left(\sum_{u=1}^{m+1} X_{iu} + X_i^* \right) - \frac{1}{\sum_{u=1}^{m+1} y_u - y^*} \left[2 \sum_{u=1}^{m+1} X_{iu} y_u + \left(\sum_{u=1}^{m+1} y_u - 3y^* \right) X_i^* \right], \tag{5}$$

где y^* - значение отклика в худшей точке.

При оптимизации применением метода симплексов исследователь получает сравнительно мало информации о форме и свойствах поверхности отклика. Однако адаптивность и простота этого метода позволяют использовать его при решении задач. Он пригоден для автоматического поддержания нестационарного технологического процесса в оптимальном режиме. Следует отметить, что при использовании правильных симплексов нет необходимости в численной оценке параметра оптимизации – достаточно иметь возможность проранжировать его состояние вершинах симплекса; это дает исследователю и технологу относительную свободу в выборе критерия оптимальности [8].

Результаты

Статистическая обработка результатов эксперимента проводилась в программах MS Excel и STATISTICA 12.

Полученные результаты экспериментов были подвергнуты математической обработке для выявления грубых ошибок при наблюдениях. Все грубые ошибки должны быть найдены и исключены из рассмотрения в самом начале. Каждая грубая ошибка будет нарушать параметры нормального закона, т.е. однородность наблюдений. Исходя из этого, выявление грубых измерений сводится к проверке гипотезы об однородности наблюдений.

Ход регрессионного анализа эксперимента в программе STATISTICA 12 изображен на рисунках 2-19.

Регрессионный анализ

1. Проверяем Y_1 , Время высыхания первого слоя.

По данным корреляционной матрицы (рисунок 2) все факторы значимы в исследуемой модели.

Variable	Correlations (Spreadsheet1)							
	отвердитель	ускоритель	ПАВ	время 1й	V1**2	V2**2	V3**2	V4**2
отвердитель	1,000000	0,000000	0,000000	-0,209057	0,999705	0,000000	0,000000	-0,213672
ускоритель	0,000000	1,000000	-0,000000	-0,931254	-0,000000	0,966092	-0,000000	-0,924993
ПАВ	0,000000	-0,000000	1,000000	0,038010	0,000000	0,000000	0,966092	0,028490
время 1й	-0,209057	-0,931254	0,038010	1,000000	-0,212326	-0,880005	0,083935	0,997216
V1**2	0,999705	-0,000000	0,000000	-0,212326	1,000000	0,001881	0,001881	-0,216195
V2**2	0,000000	0,966092	0,000000	-0,880005	0,001881	1,000000	0,020000	-0,861634
V3**2	0,000000	-0,000000	0,966092	0,083935	0,001881	0,020000	1,000000	0,078829
V4**2	-0,213672	-0,924993	0,028490	0,997216	-0,216195	-0,861634	0,078829	1,000000

Рис.2. Время высыхания первого слоя. Корреляционная матрица

Получаем значения коэффициентов для уравнения регрессии (рисунок 3).

Regression Summary for Dependent Variable: время 1й (Spreadsheet1)						
R= ,99565620 R ² = ,99133127 Adjusted R ² = ,98390093						
F(6,7)=133,42 p<,00000 Std.Error of estimate: 2,9277						
N=14	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(7)	p-value
Intercept			-1163,50	224,4503	-5,18378	0,001276
ускоритель	-1,21633	0,146158	-21,33	2,5635	-8,32202	0,000071
V1**2	-9,41034	1,560904	-0,45	0,0746	-6,02878	0,000527
отвердитель	9,19851	1,560840	48,40	8,2127	5,89331	0,000604
V2**2	0,29508	0,146838	1,67	0,8294	2,00959	0,084417
V3**2	0,88525	0,146838	45,00	7,4642	6,02878	0,000527
ПАВ	-0,81722	0,146158	-43,00	7,6904	-5,59136	0,000823

Рис. 3. Время высыхания первого слоя. Таблица результатов регрессионного анализа

Производим проверку адекватности полученной модели (рисунок 4). Поскольку критерий Фишера (F) 133,42 полученной модели намного больше табличного, что указывает на значимость коэффициента детерминации (R²), который составляет более 90% при уровне значимости (p-value) менее 0,05 - считаем полученную математическую модель адекватной [3, 8].

Analysis of Variance; DV: время 1й (Spreadsheet1)					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-value
Regress.	6826,813	5	1365,363	115,4453	0,000000
Residual	94,615	8	11,827		
Total	6921,429				

Рис. 4. Время высыхания первого слоя. Проверка адекватности модели.

Аналогичным образом проверяем остальные выходные параметры и составляем уравнения регрессии (таблица 4).

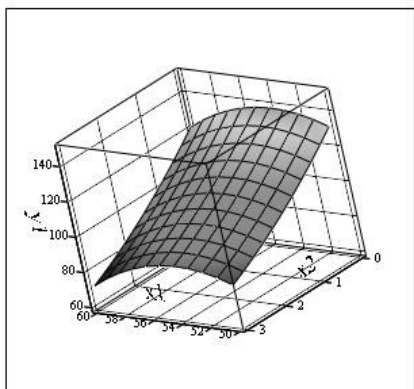
Проверка толщины ЛКП y_{11} и блеска ЛКП y_{10} – показала невозможность составления адекватной модели по данным показателям. Адгезия y_7 , Теплостойкость y_8 , Влагопоглощение y_9 – параметры, по которым проверка не проводится, так как у всех составов они имеют одинаковое значение.

Таблица 4 – Уравнения регрессии

y	Название отклика	Уравнение регрессии
y ₁	Время высыхания 1го слоя	$y_1 = -1163,50 + 48,40x_1 - 21,33x_2 - 43x_3 - 0,45x_1^2 + 1,67x_2^2 + 45x_3^2 \rightarrow \min$
y ₂	Время высыхания 2го слоя	$y_2 = -383,39 + 19,65x_1 - 24,92x_2 - 0,192x_1^2 + 3,42x_2^2 \rightarrow \min$
y ₃	Гибкость	$y_3 = -156,25 + 5,69x_1 - 0,047x_1^2 + 0,451x_2^2 - 4,99x_2^2 \rightarrow \min$
y ₄	Твердость на М-3	$y_4 = -4,14 + 0,17x_1 + 0,011x_2 - 0,0015x_1^2 \rightarrow \max$
y ₅	Прочность на удар	$y_5 = 215,37 - 6,82x_1 + 11,35x_2 + 0,06x_1^2 - 0,13x_2^2 - 4,35x_2^2 \rightarrow \max$
y ₆	Склерометр твердость	$y_6 = -291,81 + 7,12x_1 + 62,78x_2 - 16,41x_2^2 \rightarrow \max$

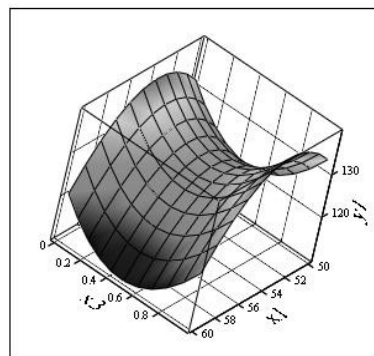
Анализ зависимости исследуемых параметров от переменных факторов

1. Ожидаемо, что количество отвердителя и ускорителя положительно сказывается на показатель времени отверждения ЛКП, ускоритель влияет на это показатель в большей степени. ПАВ увеличивает время отверждение, но незначительно. Поверхность отклика времени отверждения первого слоя представлены на рисунках 5-7.



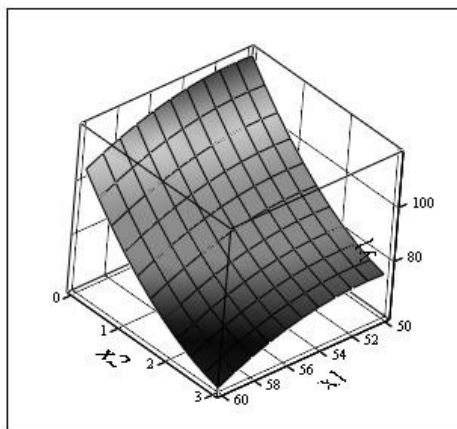
$$y_1 = -1163,50 + 48,40x_1 - 21,33x_2 - 0,45x_1^2 + 1,67x_2^2$$

Рис.5. Поверхность отклика y_1 -время отверждения первого слоя ЛКП, зависящая от количества отвердителя- x_1 и ускорителя x_2



$$y_1 = -1163,50 + 48,40x_1 - 21,33x_2 - 0,45x_1^2 + 45x_3^2$$

Рис.6. Поверхность отклика y_1 -время отверждения первого слоя ЛКП, зависящая от количества отвердителя- x_1 и ПАВ- x_3



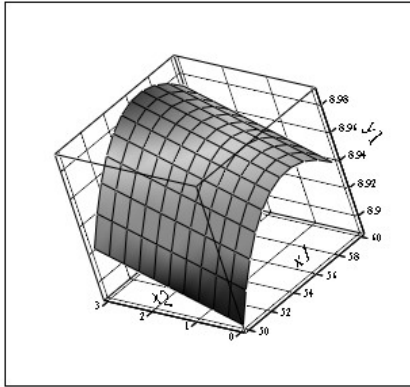
$$y_2 = -383,39 + 19,65x_1 - 24,92x_2 - 0,192x_1^2 + 3,42x_2^2$$

Рис. 7. Поверхность отклика y_2 -время отверждения второго слоя ЛКП, зависящая от количества отвердителя- x_1 и ускорителя- x_2

2. Выявлена зависимость прочности на изгиб от всех трех варьируемых показателей: чем выше концентрация отвердителя и ускорителя, тем более хрупкое покрытие, однако, ПАВ стабилизирует данный показатель.

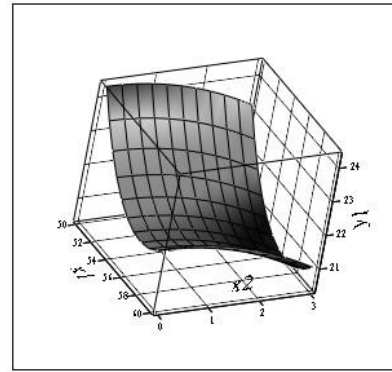
3. По отношению к показателю твердости на маятниковом приборе М-3 выявлена серьезная корреляция только концентрацией отвердителя в составе разрабатываемого ЛКМ: чем больше отвердителя, тем выше показатель твердости на М-3. Поверхность отклика в графическом виде представлена на рисунке 8.

4. Также в ходе экспериментов было выявлено, что ЛКМ в составе которого присутствует ПАВ, удовлетворяет показателю прочности на удар. Поверхность отклика представлена в графическом виде на рисунке 9.



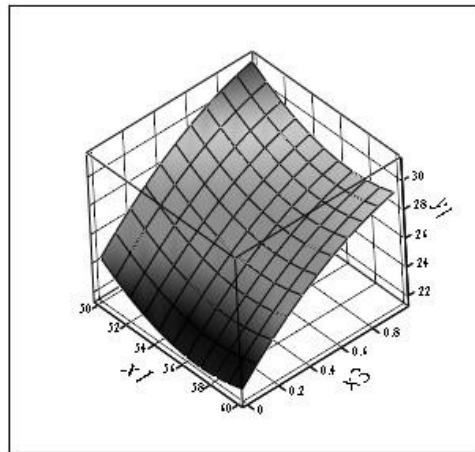
$$y_4 = -4,14 + 0,17x_1 + 0,011x_2 - 0,0015x_1^2$$

Рис. 8. Поверхность отклика y_4 -твердость ЛКП, зависящая от количества отвердителя- x_1 и ускорителя- x_2



$$y_5 = 215,37 - 6,82x_1 + 0,06x_1^2 - 0,13x_2^2$$

Рис.9. Поверхность отклика y_5 -прочность на удар ЛКП, зависящая от количества отвердителя- x_1 и ускорителя- x_2



$$y_5 = 215,37 - 6,82x_1 + 11,35x_3 + 0,06x_1^2 - 4,35x_3^2$$

Рис.10. Поверхность отклика y_5 -прочность на удар ЛКП, зависящая от количества отвердителя- x_1 и ПАВ- x_3

5. Чем больше отвердителя и ускорителя в составе ЛКМ, тем более он устойчив к царапанию.

6. Все варианты рецептур ЛКК имеют удовлетворительные показатели адгезии, влагопоглощения, теплостойкости.

7. Все исследуемые покрытия по показателю степени блеска относятся к глянцевым покрытиям (10-70 % по фотоэлектрическому блескомеру)

8. На толщину покрытия не влияют варьируемые факторы, большее влияние имеют: нанесение и соотношение поздней и ранней древесины на образце.

С помощью MS Excel и методики, описанной в предыдущей главе, находим оптимальную рецептуру ЛКК в полученных уравнениях регрессий [2,3,8], для этого выставляем приоритеты среди полученных выходных параметров:

1. Время высыхания.
2. Твердость ЛКП по маятниковому прибору М-3.
3. Прочность к изгибу на шкале гибкости.
4. Склерометрическая твердость.
5. Прочность к удару.

Вычисление оптимума приведено в таблицах 5-10. Таким образом, оптимальная рецептура ЛКМ состоит из: Смола – 100%; Отвердитель – 52% от массы смолы; Ускоритель – 2% от массы смолы; ПАВ – 1% от массы смолы.

Таблица 5 – Вычисление массы экстремальной точки m_1

y1	x1	x2	x3	y
	50	3	1	84,5
	50	3	0	82,5
	50	1,5	1	105
	55	3	0	88,3
	50	0	1	134
	60	1,5	0	92,3
	Масса экстремальной точки m_1			
-	-	-	6,94	

Таблица 6 – Вычисление массы экстремальной точки m_2

y2	x1	x2	x3	y
	50	3	1	75,1
	50	3	0	75,1
	50	1,5	1	89,4
	55	3	0	72,6
	50	0	1	119
	60	1,5	0	74,7
	Масса экстремальной точки m_2			
-	-	-	6,74	

Таблица 7 – Вычисление массы экстремальной точки m_3

y3	x1	x2	x3	y
	50	3	1	9,81
	50	3	0	14,8
	50	1,5	1	6,77
	55	3	0	6,77
	50	0	1	5,76
	60	1,5	0	16,96
	Масса экстремальной точки m_3			
-	-	-	8,99	

Таблица 8 – Вычисление массы экстремальной точки m_4

y4	x1	x2	x3	y
	50	3	1	0,64
	50	3	0	0,64
	50	1,5	1	0,63
	55	3	0	0,7
	50	0	1	0,61
	60	1,5	0	0,67
	Масса экстремальной точки m_4			
-	-	-	5,56	

Таблица 9 – Вычисление массы экстремальной точки m_5

y5	x1	x2	x3	y
	50	3	1	30,13
	50	3	0	23,13
	50	1,5	1	31
	55	3	0	20,53
	50	0	1	31,3
	60	1,5	0	21,8
	Масса экстремальной точки m_5			
-	-	-	5,04	

Таблица 10 – Вычисление массы экстремальной точки m_6

у6	x1	x2	x3	y
	50	3	1	119,44
	50	3	0	119,44
	50	1,5	1	136,04
	55	3	0	156,5
	50	0	1	119,44
	60	1,5	0	210,15
	Масса экстремальной точки m_6			
-	-	-	-	4,09

В таблице 11 приведены компромиссные значения варьируемых факторов эксперимента и значения исследуемых выходных параметров для оптимальной рецептуры ЛКК при формировании ЗДП.

Таблица 11 – Компромиссные значения управляемых факторов и выходных параметров ЛКК

x ₁ ,%	x ₂ ,%	x ₃ ,%	y ₁ ,мин	y ₂ ,мин	y ₃ , мм	y ₄ , усл.ед.	y ₅ , см	y ₆ , Н
52	2	1	103	83,1	9,36	0,67	29,38	1,55

Заключение

В результате решения задачи оптимизации получена рецептура ЛКК на основе эпоксидной смолы для формирования ЗДП на древесине и изделиях из нее:

Эпоксидная смола на основе бисфенола А – 100%:

- Отвердитель ОТ-2 аминного типа – 52% от массы смолы;
- Ускоритель УС-1 аминного типа – 2% от массы смолы;
- ПАВ ОП-7, принадлежащий к группе оксиэтилированным спиртов – 1% от массы смолы.

Приведенное соотношение массовых частей компонентов ЛКК, позволяет получить качественные ЗДП с показателями, удовлетворяющими выходные параметры с учетом их приоритета (1. Время высыхания, 2. Твердость ЛКП по маятниковому прибору М-3, 3. Прочность к изгибу на шкале гибкости, 4. Склерометрическая твердость, 5. Прочность к удару.).

Разработанная ЛКК на основе эпоксидной смолы имеет сокращенное время пленкообразования покрытия 80-100 минут, в отличие от аналогичных материалов, что является более технологичным и приводит к сокращению производственного цикла формирования ЗДП.

Полученная ЛКК обеспечивает получение ЗДП с высокими качественными показателями: адгезионной прочностью, склерометрической твердостью, стойкостью к изгибу, что позволяет использовать данные покрытия на изделиях из древесины различных форм, а благодаря гидрофобности и теплостойкости покрытия – изделиях с таким покрытием, можно применять при различных условиях эксплуатации.

Литература

1. Bashkirova KA, Gazeev MV, Sviridov AV (2022) Features of planning an experiment to develop a new paint and varnish composition for the formation of protective and decorative coatings on wood products. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 949. doi:10.1088/1755-1315/949/1/012065
2. Антакова, В.Н. Основы научных исследований в деревообработке «полный и дробный факторные эксперименты» Методические указания для лабораторных и курсовых работ, НИР студентов специальности 2602.00 / В.Н. Антакова, М.В. Морий. – Екатеринбург : УГЛТУ, 1998. – 39 с.
3. Глухих, В.В. Прикладные научные исследования / В.В. Глухих. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2016. – 240 с.
4. ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия. – М.; Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1984
5. Карякина, М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Карякина. – М : Химия, 1988. – 272 с.
6. Мошинский, Л.Я. Эпоксидные смолы и отвердители, / Л.Я. Мошинский. – Тель-Авив : Аркадия пресс Лтд, 1995. – 370 с.

7. Онегин, В.И. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов : Учеб. для вузов по спец. "Технология деревообработки" / В.И. Онегин, Е.В. Жуков. – М: Экология, 1993. – 301 с.

8. Пен, Р.З. Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве / Р.З. Пен, Э.М. Менчер. – СПб: УГЛТУ, Лесная промышленность. – 273 с.

9. Рудаков О. Б. и др. Контроль отверждения эпоксидной смолы по содержанию свободного бисфенола А методом ТСХ //Аналитика и контроль. 2017.№ 2. – 2017. – Т. 21. – №. 2. – С. 135-143.

10.Еренков О. Ю., Исаев С. П. Влияние электрофизической модификации эпоксидного олигомера на прочность стеклопластика //Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2019. – Т. 1. – №. 1. – С. 76-80.

11.Цой, Ю.И. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов / Ю.И. Цой. – СПб : СПбЛТА, 2002. – 81 с.

©**Башкирова К.А.** –аспирант кафедры механической обработки древесины и производственной безопасности, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: karinagumbert90@gmail.com; **Газеев М.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры механической обработки древесины и производственной безопасности, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: gazeev_m@list.ru.

UDC 674.07

SOLUTION OF THE PROBLEM OF SEARCHING THE OPTIMUM FORMULA OF A NEW PAINT AND COATING COMPOSITION BASED ON EPOXY RESIN FOR THE FORMATION OF PROTECTIVE AND DECORATIVE COATINGS ON WOOD

K.A. Bashkirova, M.V. Gazeev

A multifactorial experiment was planned and carried out for three variable factors, as a result of which mathematical models were obtained that adequately describe the process of forming protective and decorative coatings on wood, which made it possible to solve the problem of finding the optimal formulation of a paint composition based on epoxy resin. As a result of solving the optimization problem, the composition of the paint composition was found and presented, as well as the stages of forming the paint coating on wood samples, taking into account the high quality indicators of the coating (output parameters of the experiment). A technique for solving the problem of optimizing the components of a composition formulation by the simplex method is presented. A regression analysis was carried out for each output parameter in the STATISTICA 12 program, regression equations were compiled for each output parameter, the value of which depends on variable factors. Their analysis was carried out and graphical models of the response surface were constructed. The problem of finding the optimal formulation of a paint-and-lacquer material based on epoxy resin is solved by the conditional center of mass method in MS Excel.

Keywords: *Paintwork materials, paintwork composition, protective and decorative coatings, epoxy resin, optimization, wood.*

References

1. Bashkirova KA, Gazeev MV, Sviridov AV (2022) Features of planning an experiment to develop a new paint and varnish composition for the formation of protective and decorative coatings on wood products. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 949. doi:10.1088/1755-1315/949/1/012065.

2. Antakova, V.N., Morius. [Fundamentals of scientific research in woodworking "full and fractional factorial experiments"] Guidelines for laboratory and term papers, research work for students of the specialty 2602.00: UGLTU, 1998. - 39 p. (In Russ.).

3. Glukhikh, V.V. [Applied scientific research]. Yekaterinburg: UGLTU, 2016. - 240 p.(In Russ.)

4. State Standart 10587 -1984. Epoxy-diane resins are not cured. Technical conditions. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 18 p (In Russian)

5. Karyakina, M.I. [Testing of paint and varnish materials and coatings] Chemistry, 1988. - 272 p. (In Russ.)

6. Moshinsky, L.Ya. [Epoxy resins and hardeners]-Tel Aviv: Arcadia press Ltd, 1995. - 370 p. (In Russ.)

7. Onegin, V.I. [Technology of protective and decorative coatings for wood and wood materials: Proc. For universities on special "Technology of woodworking"]. Ecology, 1993. - 301 p. (In Russ.)
8. Pen, R.Z. [Statistical methods in pulp and paper production]. St. Petersburg: UGLTU, Forest Industry. – 273 p. (In Russ.)
9. Rudakov O. B. [Control of curing of epoxy resin by the content of free bisphenol] A by TLC. 2017. No. 2. - 2017. - T. 21. - No. 2. – pp. 135-143. (In Russ.)
10. Erenkov O. Yu., Isaev S. P. Influence of electrophysical modification of epoxy oligomer on the strength of fiberglass // Far East: problems of development of the architectural and construction complex. - 2019. - Vol. 1. - No. 1. - S. 76-80. (In Russ.)
11. Tsoi, Yu.I. [Technology of protective and decorative coatings of wood and wood materials]. St. Petersburg: 2002. - 81 p. (In Russ.).

© **Bashkirova K.A.** – postgraduate student of the Department of Mechanical woodworking and Industrial Safety, Ural State Forest Engineering University (USTEU), e-mail: karinagumbert90@gmail.com; **Gazeev M.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Mechanical woodworking and Industrial Safety, USTEU, e-mail: gazeev_m@list.ru.

УДК 691.11

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АЦЕТИЛИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

А.А. Прокопьев, Р.В. Салимгараева, Р.Р. Сафин

Проведен обзор результатов исследований процесса ацетилирования древесины. Рассмотрены преимущественно способы ацетилирования уксусным ангидридом, в том числе с интенсификацией процесса путем повышения температуры протекания реакции (в том числе в условиях вакуума), объемного нагрева в СВЧ среде, а также с использованием катализаторов. По результатам литературного анализа было выявлено, что данный способ обработки древесины позволяет уменьшить влагопоглощение, снизить разбухание и повысить устойчивость к гниению, что является довольно перспективным методом предобработки древесного наполнителя в композиционных материалах.

Ключевые слова: ацетилирование, уксусный ангидрид, древесина, композиционный материал.

Введение

В современном мире большое внимание уделяется не только эффективности используемых ресурсов в производстве материалов, но так же их экологичности, возобновляемости и экономической целесообразности. К таким материалам в первую очередь относится древесина - она возобновляема, имеет широкий спектр применения и легко поддается обработке. Ввиду вышеперечисленных качеств древесина широко используется в качестве наполнителя в композиционных материалах. Однако у нее есть недостатки, для устранения которых используют различные способы предварительной обработки.

На сегодняшний день известно много способов предварительной обработки древесины как наполнителя для композиционных материалов [1]. Одним из таких способов является выдержка в естественных условиях. Данный способ известен еще как «естественное окисление», при котором происходит частичная нейтрализация редуцирующих сахаров в древесинном веществе и вымывание их под воздействием осадков. Следующий способ - обработка древесного наполнителя горячей водой. Данная технология обеспечивает нормальное твердение изделий. Так же актуальна высокотемпературная обработка древесного наполнителя паром. При этом процессе интенсивно разлагаются углеводы, а лигнин подвергается конденсации с образованием побочных высокомолекулярных соединений плохо растворимых в воде [2-4].

Одним из наиболее перспективных направлений улучшения физико-механических свойств древесины является ацетилирование. Данный способ заключается во введении ацетильных групп в состав химических компонентов материала. В качестве реагентов в основном используются уксусный ангидрид, ацетилхлорид, кетен и др. Интенсификация процесса достигается путем повышения температуры протекания реакции (в том числе в условиях вакуума), объемного нагрева в СВЧ среде, а так же с