



*A. S. Чуйков, С. А. Прохорчик*

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Республика Беларусь*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННЫХ И ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМОРАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ

При моделировании процесса отверждения водно-дисперсионных и полиуретановых лакокрасочных материалов при терморadiационном нагреве за основу взят В-план второго порядка. Определены переменные факторы, сформирован план эксперимента и проведены соответствующие исследования. По результатам экспериментов найдены коэффициенты уравнений регрессии второго порядка, проведена проверка их значимости по критерию Стьюдента. Достоверность полученных зависимостей проверена при помощи критерия Фишера. Построив поверхности отклика и проанализировав полученные результаты, установлено, что основное влияние на время отверждения лакокрасочных материалов оказывает высота расположения излучателя над поверхностью образца. Изменение толщины наносимого слоя лакокрасочного материала оказывало незначительное влияние на время отверждения лакокрасочного покрытия. Установлено, что слишком быстрый рост температуры на поверхности образцов вызывал ухудшение качества. На изделиях наблюдалось появление таких дефектов поверхности, как "пузыри", "кратеры" и "проколы". В связи с этим, в дальнейших исследованиях решено оценить влияние положения излучателя на качество поверхности. Установлено, что полученные уравнения регрессии имеют практическую значимость для предприятий, занимающихся отделкой столярно-строительных изделий из древесины, а также мебельных деталей.

**Ключевые слова:** В-план; уравнение регрессии; время отверждения; дефекты поверхности.

**Введение.** Использование технологии терморadiационного отверждения в отделочных цехах деревообрабатывающих предприятий является перспективным направлением. Данная технология позволяет значительно сократить время отверждения лакокрасочного покрытия (ЛКП) по сравнению с традиционной конвективной сушкой (Prokhorchik, 2014).

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время не существует никаких рекомендаций по режиму сушки водно-дисперсионных акриловых и полиуретановых материалов, нанесенных на поверхность столярно-строительных изделий и мебели из древесины. На основании этого возникла необходимость в разработке оптимальных режимов инфракрасной (ИК) сушки. Для исследования данного процесса отверждения полиуретановых и водно-дисперсионных акриловых ЛКМ был применен способ, описанный в более ранних исследованиях (Prokhorchik & Chuykov, 2017). Используя полученные данные, можно установить и математически описать процессы, протекающие при высыхании лакокрасочных материалов (ЛКМ).

Стоит также отметить, что данные процессы, как правило, не удается описать линейными регрессионными закономерностями. Для повышения точности описания необходимо использовать математические модели более высокого порядка, то есть применения ортого-

нального композиционного планирования эксперимента. Этот метод может быть применен с учетом результатов полного факторного эксперимента и проведения опытов в дополнительных точках, соответствующих ортогональному плану. Получаемая в результате математическая модель второго порядка позволяет описать более сложные изменения функции отклика и спрогнозировать поведение выходной величины (в нашем случае времени отверждения ЛКМ).

Цель исследований заключалась в получении математических зависимостей влияния переменных факторов на выходную величину для дальнейшего определения оптимальных режимов отверждения водно-дисперсионных акриловых и полиуретановых ЛКМ.

Основная часть. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- выбор методики планирования эксперимента;
- определение и выбор переменных факторов;
- создание матрицы планирования эксперимента;
- проведение испытаний согласно матрице планирования;
- нахождение уравнений регрессии;
- проверка адекватности полученных зависимостей;
- построение поверхностей отклика функций.

Процесс инфракрасной сушки проходил при температуре окружающей среды  $T=20^{\pm 2}$  °С и относительной влажности воздуха  $W=65^{\pm 5}$  %. Образец из древесины

### Інформація про авторів:

**Чуйков Олексій Сергійович**, магістр техн. наук, асистент. Email: offlex88@mail.ru

**Прохорчик Сергій Олександрович**, канд. техн. наук, доцент, декан заочного факультету. Email: prohor@tut.by

**Цитування за ДСТУ:** Чуйков А. С., Прохорчик С. А. Моделирование процесса отверждения водно-дисперсионных и полиуретановых лакокрасочных материалов при терморadiационном нагреве. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(5). С. 89–92.

**Citation APA:** Chuykov, A. S., & Prokhorchik, S. A. (2017). Simulation of the curing process of water-dispersion and polyurethane paint and varnish materials under thermoradiation heating. Scientific Bulletin of UNFU, 27(5), 89–92. <https://doi.org/10.15421/40270518>

сосны с нанесенным лакокрасочным покрытием определенной толщины помещали на аналитические весы. Над его поверхностью на определенной высоте был установлен инфракрасный галогеновый излучатель мощностью 1000 Вт. После включения ИК-генератора каждую минуту фиксировали массу образца. Испытания прекращали, когда масса образца начинала монотонно (с постоянным значением) убывать.

В этом случае время высыхания  $t$  было принято за выходной переменной фактор, на величину которого будут влиять расстояние от излучателя до образца ( $H$ ) и толщина предварительно нанесенной пленки ЛКМ ( $h$ ).

Изменение массы образца ( $m$ ) также было отнесено к выходным переменным факторам, так как этот параметр тоже будет зависеть от изменения величин  $H$  и  $h$ . Однако стоит отметить, что изменение массы образца является неинформативным и поэтому при расчете математической модели не учитывалось.

Учитывая существующие рекомендации авторов (Gaidadin & Efremova, 2008; Pizhurin & Pizhurin, 2005; Pizhurin & Pizhurin, 2004) для получения регрессионных моделей, с помощью которых описывают характеристики процесса терморadiационного отверждения водно-дисперсионных лакокрасочных материалов на поверхности древесины, наиболее удобно использовать планы второго порядка типа  $B_k$ .

При планировании эксперимента использован  $B$ -план второго порядка. В соответствии с методикой каждый фактор варьировался на трех уровнях, то есть принимал в каждом опыте одно из трех значений:  $X_{min}$ ,  $X_{max}$  или  $X_{cp} = (X_{min} + X_{max})/2$ . Таким образом, предельные значения факторов для водно-дисперсионных акриловых

лакокрасочных материалов, согласно эксперименту составили:

$$200 \leq X_1 \leq 300 \text{ мкм}; 300 \leq X_2 \leq 1000 \text{ мм.}$$

Для полиуретановых ЛКМ:

$$100 \leq X_1 \leq 200 \text{ мкм}; 300 \leq X_2 \leq 1000 \text{ мм,}$$

где:  $X_1$  – толщина нанесенного слоя ЛКМ, мкм;  $X_2$  – расстояние между излучателем и образцом, мм.

В ходе проведения эксперимента было замечено, что время высыхания первого и второго слоя водно-дисперсионных акриловых ЛКМ не отличается друг от друга. Поэтому расчет математической модели был проведен только для 1-го слоя.

У полиуретановых ЛКМ время отверждения первого и последующих слоев значительно отличается. В связи с этим была необходимость построения регрессионной модели для каждого слоя. План эксперимента в нормированных значениях переменных факторов представлен в табл. 1. Результаты экспериментов можно наблюдать в табл. 2.

Табл. 1. План проведения эксперимента

№ опыта	Фактор в условных единицах					
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	+1	0	0	0	0	0
6	+1	+1	0	0	0	0
7	+1	-1	0	0	0	0
8	+1	0	+1	0	0	0
9	+1	0	-1	0	0	0

Табл. 2. Результаты экспериментов

№ опыта	Водно-дисперсионные акриловые ЛКМ			1-й слой полиуретановых ЛКМ			2-й слой полиуретановых ЛКМ		
	$X_1$ , мкм	$X_2$ , мм	$Y_{cp}$ , мин	$X_1$ , мкм	$X_2$ , мм	$Y_{cp}$ , мин	$X_1$ , мкм	$X_2$ , мм	$Y_{cp}$ , мин
1	200	300	7,3	100	300	9,5	100	300	35,0
2	300	300	9,4	200	300	12,0	200	300	40,0
3	200	1000	15,6	100	1000	11,0	100	1000	75,0
4	300	1000	17,6	200	1000	19,5	200	1000	84,0
5	250	650	9,5	150	650	14,5	150	650	59,0
6	300	650	9,3	200	650	18,0	200	650	64,0
7	200	650	7,7	100	650	11,0	100	650	51,0
8	250	1000	16,4	150	1000	15,5	150	1000	79,0
9	250	300	8,4	150	300	10,5	150	300	38,0

В табл. 2 приведены величины среднего значения серии опытов ( $Y_{cp}$ ). В результате расчетов получены уравнения регрессии второго порядка в кодированных обозначениях, учитывающих влияние каждого фактора на время отверждения ЛКМ. Оценка значимости коэффициентов данной регрессии осуществлялась по  $t$ -критерию Стьюдента. После отсеивания малозначимых коэффициентов уравнения приобрели следующий вид:

- для водно-дисперсионных акриловых ЛКМ

$$y = 0,95 \cdot X_1 + 4,08 \cdot X_2 + 3,62 \cdot X_2^2 + 9,01;$$

- для 1-го слоя полиуретановых материалов

$$y = 3,00 \cdot X_1 + 2,33 \cdot X_2 - 1,50 \cdot X_2^2 + 1,50 \cdot X_1 \cdot X_2 + 14,51;$$

- для 2-го слоя полиуретановых материалов

$$y = 4,50 \cdot X_1 + 20,83 \cdot X_2 + 1,00 \cdot X_1 \cdot X_2 + 58,33.$$

В дальнейшем была проведена проверка на адекватность полученных уравнений регрессии с использованием критерия Фишера.

Расчетный критерий Фишера для серии опытов получился равен:

$$F_{расч} = F_{расч} = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{y\}} = \frac{0,619222}{0,843333} = 0,734 ;$$

$$F_{расч} = F_{расч} = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{y\}} = \frac{0,625169}{0,188889} = 3,310 ;$$

$$F_{расч} = F_{расч} = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{y\}} = \frac{8,6000}{4,2222} = 2,0368.$$

Полученное значение  $F^{расч}$  сравнивалось с табличным ( $F^{табл} = 3,55$ ). Поскольку условие  $F^{расч} \leq F^{табл}$  выполняется, то достоверность полученных уравнений не отвергалась.

Модель влияния толщины наносимого слоя ЛКМ ( $h$ , мкм) и расстояния между инфракрасным излучателем и образцом ( $H$ , мм) на продолжительность отверждения лакокрасочного покрытия ( $t$ , мин) имеет вид:

- для водно-дисперсионных акриловых ЛКМ

$$t = 0,95 \cdot \frac{h - 250}{50} + 4,08 \cdot \frac{H - 650}{350} + 3,62 \cdot \left( \frac{H - 650}{350} \right)^2 + 9,01 ;$$

- для 1-го слоя полиуретановых материалов

$$t = 3,00 \cdot \frac{h-150}{50} + 2,33 \cdot \frac{H-650}{350} - 1,50 \cdot \left( \frac{H-650}{350} \right)^2 + 1,50 \cdot \frac{h-150}{50} \cdot \frac{H-650}{350} + 14,51;$$

• для 2-го слоя полиуретановых материалов

$$t = 4,5 \cdot \frac{h-150}{50} + 20,83 \cdot \frac{H-650}{350} + 1,0 \cdot \frac{h-150}{50} \cdot \frac{H-650}{350} + 58,33.$$

Анализ полученных результатов показывает, что основное влияние на время отверждения лакокрасочных материалов оказывает высота расположения излучателя над поверхностью образца ( $H$ ).

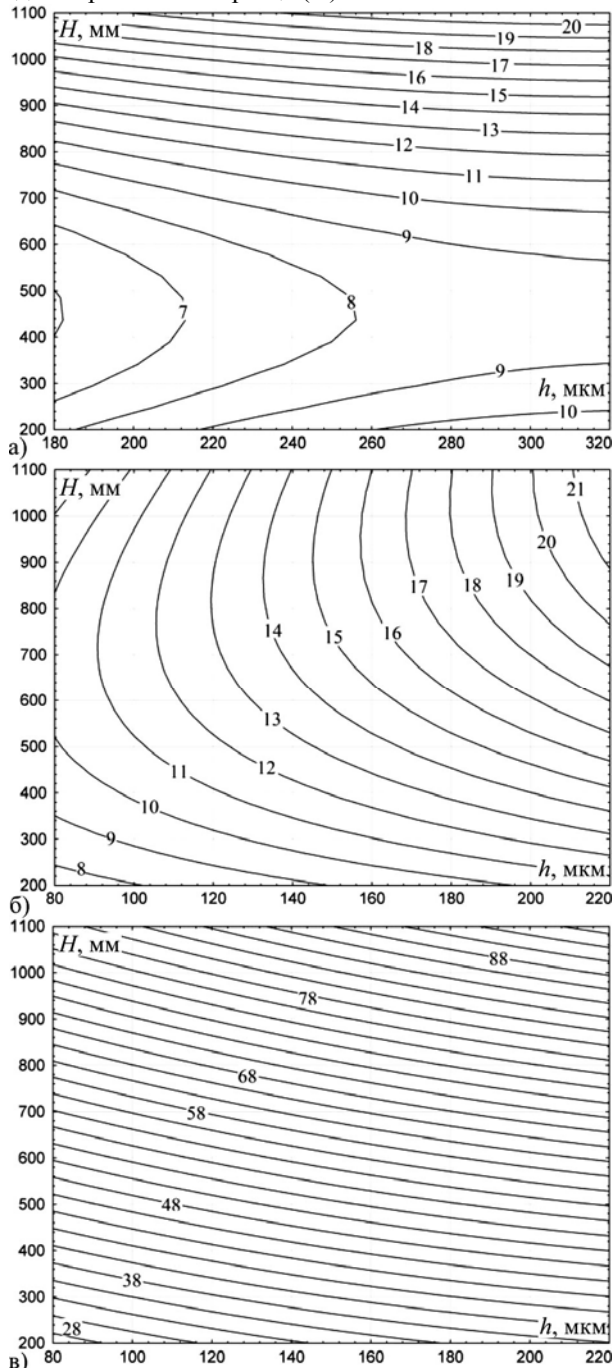


Рис. 1. Поверхности отклика времени отверждения ВД-АК ЛКМ (а), 1-го слоя УР ЛКМ (б), 2-го слоя УР ЛКМ (в)

По полученным моделям построены поверхности отклика (рис. 1), которые наглядно отображают зависимость времени отверждения лакокрасочных материалов в зависимости от положения излучателя и толщины нанесенного слоя.

Как видно из построенных поверхностей отклика, при увеличении толщины ( $h$ ) наносимого слоя ЛКМ время отверждения незначительно увеличивается (например, если расстояние между излучателем и образцом установить 300 мм, то для ВД-АК ЛКМ при увеличении толщины слоя с 200 мкм до 300 мкм время отверждения составит 7 и 9 минут соответственно).

Однако, увеличение расстояния ( $H$ ) между излучателем и образцом будет оказывать большее влияние на время высыхания лакокрасочных покрытий, чем толщина наносимого слоя (например, при толщине покрытия 200 мкм, для ВД-АК ЛКМ увеличение расстояния между излучателем и образцом с 300 мм до 1000 мм влечет изменение времени отверждения с 7-ми до 15-ти минут соответственно).

При проведении эксперимента также замечено, что при небольшом расстоянии между излучателем и образцом (300 мм), на поверхности покрытия образовывались дефекты в виде "кратеров", "пробития" смолы (для хвойных пород) и "проколов". Это связано, на наш взгляд, с тем, что слишком быстрый рост температуры на поверхности изделия влечет за собой, во-первых, размягчение смолы и ее дальнейший выход на поверхность, а во-вторых, слишком быстрый процесс испарения растворителей и разбавителей, что и вызывает появление таких дефектов, как "пузырьки", "кратеры" и "проколы".

**Вывод.** В ходе исследований смоделирован процесс ускоренного отверждения полиуретановых и водно-дисперсионных лакокрасочных материалов, нанесенных на древесину сосны при терморadiационном воздействии.

Произведена оценка степени влияния основных факторов (расстояние между излучающей поверхностью и образцом, а также толщина наносимого слоя) на время отверждения ЛКМ, и установлено, что изменение расстояния между генератором излучения и образцом оказывает большее влияние на время отверждения ЛКМ, чем изменение толщины наносимого слоя.

Ввиду образования дефектов поверхности целесообразно дальнейшие исследования связать с установлением минимальных граничных расстояний для различных пород древесины, а также с установлением влияния мощности ИК излучателя на время отверждения полиуретановых и водно-дисперсионных акриловых ЛКМ.

Подводя итог, можно отметить, что полученные модели имеют практическое значение и могут служить для выбора режимов отверждения полиуретановых ЛКМ на поверхностях мебельных заготовок и водно-дисперсионных акриловых ЛКМ, нанесенных на поверхности столярно-строительных изделий. В процессе проведения экспериментов выявлены виды дефектов на древесине сосны, образующихся при термическом воздействии. Для разработки более универсальной модели необходимо дополнительно оценить влияние переменных факторов на качество поверхности.

#### Список использованных источников

- Gaidadin, A. N., & Efremova, S. A. (2008). *Ispolzovanie metoda kompozitsionnogo planirovaniia eksperimenta dlia opisaniia tekhnologicheskikh protsessov* [Using the method of composite experiment planning for the description of technological processes]. Volgograd: VolGTU. [in Russian].
- Pizhurin, A. A., & Pizhurin, A. A. (2004). *Modelirovanie i optimizatsiia protsessov derevoobrabotki* [Modeling and optimization of woodworking processes]. Moscow: GOU VPO MGUL. [in Russian].



Pizhurin, A. A., & Pizhurin, A. A. (2005). *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobratke* [Basics of scientific research in woodworking]. Moscow: GOU VPO MGUL. [in Russian].

Prokhorchik, S. A., & Chuikov, A. S. (2017). Intensifikatsiia otverzheniia vodno-dispersionnykh lakokrasochnykh materialov na drevesine termoradiatsionnym sposobom [Intensification of curing water-dispersed paint-oriented materials on wood by thermoradiation method]. *Trudy BGTU. Forest and woodworking industry*, 2(184), 183–186. [in Russian].

Prokhorchik, S. A. (2014). *Tekhnologiya zashchitno-decorativnykh pokrytiy drevesiny i drevesnykh materialov* [Technology of protective and decorative coatings of wood and wood materials]. Minsk: BGTU Publ. [in Russian].

Rabinovich, G. D., & Slobodkin, L. S. (1966). *Termoradiatsionnaya i konvektivnaya sushka lakokrasochnykh pokrytiy* [Thermoradiation and convective drying of paint and varnish coatings]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ. [in Russian].

**A. С. Чуйков, С. А. Прохорчик**

*Білоруський державний технологічний університет, м. Мінськ, Республіка Білорусь*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАТВЕРДІННЯ ВОДНО-ДИСПЕРСІЙНИХ І ПОЛІУРЕТАНОВИХ ЛАКОФАРБОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ**

Під час моделювання процесу затвердіння водно-дисперсійних і поліуретанових лакофарбових матеріалів за терморадіаційного нагрівання за основу взято В-план другого порядку. Визначено змінні фактори, сформовано план експерименту і проведено відповідні дослідження. За результатами експериментів визначено коефіцієнти рівнянь регресії другого порядку, проведено перевірку їх значущості за критерієм Ст'юдента. Достовірність отриманих залежностей перевірено за допомогою критерію Фішера. Побудувавши поверхні відгуку і проаналізувавши отримані результати, встановлено, що основний вплив на час затвердіння лакофарбових матеріалів має висота розташування випромінювача над поверхнею зразка. Зміна товщини шару нанесеного лакофарбового матеріалу неістотно впливає на час затвердіння лакофарбового покриття. Виявлено, що занадто швидке зростання температури на поверхні зразків спричинив погіршення якості. На виробках з'явилися такі дефекти поверхні, як "бульбашки", "кратери" і "проколи". З огляду на це, у подальших дослідженнях вирішено оцінити вплив положення випромінювача на якість поверхні. Встановлено, що отримані рівняння регресії мають практичну значущість для підприємств, що обробляють столярно-будівельні вироби з деревини, а також меблеві деталі.

**Ключові слова:** В-план; рівняння регресії; час затвердіння; дефекти поверхні.

**A. S. Chuikov, S. A. Prokhorchik**

*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*

## **SIMULATION OF THE CURING PROCESS OF WATER-DISPERSION AND POLYURETHANE PAINT AND VARNISH MATERIALS UNDER THERMORADIATION HEATING**

The development of curing modes for paint and varnish materials by thermoradiation heating is closely related to the mathematical description of ongoing processes. When modeling the curing process of water-dispersion and polyurethane paint and varnish materials under infrared heating, the B-plan of the second order was taken as the basis. The authors identified variable factors. We also formed an experiment plan. According to this plan, studies were carried out to determine the influence of the distance between the emitter and the sample, as well as the thickness of the applied layer, during the curing of the paintwork materials on the wood. When creating a mathematical model of the proceeding processes, in the beginning, the coefficients of the second-order regression equations were found, and their significance was checked by the Student's criterion. Minor coefficients were not taken into account when forming the regression equations. Further, the reliability of the obtained dependencies was verified using the Fisher criterion. Regression equations were used to construct the response surfaces, which clearly show the change in the curing time of paintwork materials, depending on the position of the emitter and the thickness of the applied layer. Analyzing the results obtained, the authors found that the main influence on the curing time of paintwork materials is the height of the location of the radiator over the surface of the sample. The change in the thickness of the applied layer of the paintwork material did not have a significant effect on the curing time of the paint coating. It was found that too rapid growth of temperature on the surface of the samples caused a deterioration in quality – on the products, surface defects such as "bubbles", "craters" and "punctures" appeared. In this connection, in further studies, the authors decided to evaluate the influence of the position of the radiator on the quality of the surface. Summing up, it can be noted that the regression equations obtained are of practical importance for enterprises engaged in finishing woodworking and building products made of wood, as well as furniture parts.

**Keywords:** B-plan; regression equation; curing time; surface defects.