

УДК 674.07

М. В. Газеев

Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСКОРЕННОЙ СУШКИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДРЕВЕСИНЕ

В настоящее время сфера применения аэроионизации активно расширяется: жилые, общественные и производственные помещения, сельское хозяйство, медицина, где предполагается благоприятное воздействие отрицательных аэроионов на живые организмы. На кафедре механической обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета разработан аэроионизационный способ ускоренной сушки лакокрасочных покрытий на древесине. Применение способов ускоренной сушки (отверждения) лакокрасочных покрытий на древесине позволяет сократить производственный цикл изготовления изделий из нее.

В статье в соответствии с методикой спланирован и проведен полный факторный эксперимент по плану Коно с целью определения влияния режимных параметров на сокращение времени сушки лакокрасочных покрытий на древесине при электроэффлювиальной аэроионизации. Получены математические модели второго порядка в кодированном и натуральном выражениях, адекватно отражающие влияние расхода лака и расстояния (от электроэффлювиального излучателя до образцов) на время отверждения лакокрасочного покрытия, образованного водно-дисперсионным акриловым лаком на древесине. Результаты эксперимента показывают, что электроэффлювиальная аэроионизация позволяет интенсифицировать процесс сушки лакокрасочных покрытий на древесине. Уменьшение расстояния от излучателя до образцов, а также снижение расхода лака способствуют ускорению сушки.

Ключевые слова: электроэффлювиальная аэроионизация, сушка лакокрасочных покрытий, отверждение, водно-дисперсионный лак, древесина.

M. V. Gazeev

Ural State Forest Engineering University (Russian Federation)

THE RESEARCH OF REGIME PARAMETERS OF THE ACCELERATED DRYING LACQUER COATING ON WOOD

Now scope of aero ionization actively extends: inhabited, public and production places, agriculture, medicine where favorable impact of negative aero ions on live organisms is supposed. On department of mechanical woodworking of the Ural State Forestry Engineering university the aero ionization way of the accelerated drying of lacquer coatings on wood is developed. Application of ways of the accelerated drying of lacquer coatings on wood allows to reduce a production cycle of production of products from wood.

In article, according to a technique complete factorial experiment according to the plan of Kono, with the purpose to define influence of regime parameters on reduction of time of drying of lacquer coatings on wood at electroeffluvial aero ionization is planned and made. The mathematical models of the second order in the coded and natural expression which are adequately reflecting influence of an expense of a varnish and distance (from an electroeffluvial aeroionizer radiator to samples) for the period of an hardening of the lacquer coatings formed by a water-based lacquer on wood are received. Results of experiment show that electroeffluvial aero ionization allows to intensify process of drying of lacquer coatings on wood. Reduction of distance from a radiator to samples, and also decrease in an expense of a water-based lacquer promotes drying acceleration.

Key words: electroeffluvial aeroionization, drying of lacquer coatings, water-based lacquer, wood.

Введение. Сушка или отверждение лакокрасочных покрытий (ЛКП) на древесине может осуществляться в естественных либо искусственно созданных условиях. Искусственные условия позволяют ускорить процесс отверждения ЛКП за счет сообщения покрытию дополнительной энергии. Ускорять сушку ЛКП можно конвективным нагревом, ИК-излучением, СВЧ-полем, УФ-излучением,

пучком ускоренных электронов и другими способами [1].

На кафедре механической обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета разработан новый способ ускоренной сушки ЛКП на древесине при электроэффлювиальной аэроионизации и предложена его реализация посредством передвижных стеллажей, используемых на участках отделки

изделий из древесины [2, 3]. При электроэффлювиальной ионизации воздуха получают отрицательные активные формы кислорода (АФК) или аэроионы в электрическом поле аэроионизатора [3, 4, 5].

Для изучения влияния ионизированного воздуха на время сушки ЛКП на древесине был спланирован и проведен эксперимент. Планирование эксперимента позволяет оптимальным образом получать информацию о сложных технологических процессах и использовать эту информацию для исследования и оптимизации процессов.

Основная часть. Цель исследования – интенсификация процесса сушки лакокрасочных покрытий, образованных водно-дисперсионным акриловым лаком на древесине под воздействием аэроионизации.

Для достижения поставленной цели необходимо исследовать влияние АФК на процесс сушки ЛКП за счет изменения параметров режима сушки и формирования покрытия на древесине (табл. 1).

Для исследования процесса отверждения ЛКП на подложке из древесины при аэроионизации эксперимент проводили для двух переменных факторов:

- x_1 – расстояние между электроэффлювиальным излучателем установки и поверхностью образца с ЛКП, м;
- x_2 – расход ВД-АК лака «Акролак», г/м².

В качестве выходного параметра принято время отверждения ЛКП Y , мин. Исходные данные планирования эксперимента приведены в табл. 1. Методическая сетка проведения эксперимента по плану Коно Ко₂ представлена в табл. 2 [6]. В качестве постоянных факторов были взяты: напряжение на электроэффлювиальном излучателе $U = 12$ кВ, температура воздуха $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность воздуха $W = 65 \pm 5\%$, шероховатость подложки $R_{m\max} \leq 16$ мкм.

Таблица 1

Исходные данные для эксперимента

Характеристики плана	Код значения	Натуральные значения	
		x_1 , м	x_2 , г/м ²
Нижний уровень x_i	-1	0,2	80
Основной уровень x_i	0	0,5	120
Верхний уровень x_i	+1	0,8	160

Для измерения относительной влажности и температуры применялся цифровой комбинированный прибор контроля параметров воздушной среды «Метеометр МЭС-2». Формирование ЛКП осуществляли на образцах подложек из древесины сосны при помощи кисти. Расход ЛКМ контролировали электронными

весами ВЛТ-510-П. Ускоренную сушку покрытий осуществляли в электроэффлювиальном аэроионизационном устройстве (рис. 1). Для исследования использовали лак водно-дисперсионный акриловый «АКРА-ЛАК» (ООО «ОПЛИМ», г. Екатеринбург).

Таблица 2

Реализация эксперимента по плану Коно Ко₂

№	X_1	X_2	$Y_{\text{сред}}$	S^2	\hat{Y}	$(Y_{\text{ср}} - \hat{Y})^2$
1	1	1	37,82	0,37	38,03	0,027
2	-1	1	33,67	0,3	34,02	0,122
3	1	-1	13,67	0,3	13,65	0,0
4	-1	-1	11,7	0,31	11,87	0,027
5	1	0	27,4	0,28	27,25	0,022
6	-1	0	24,87	0,323	24,35	0,265
7	0	1	36,4	0,36	35,89	0,265
8	0	-1	12,76	0,06	12,62	0,022
9	0	0	25	0,25	25,6	0,44
			223,3	2,56		1,19

Как известно, в процессе отверждения сначала формируется поверхностная пленка геля, которая мешает быстрому удалению растворителя из внутреннего слоя ЛКП, что приводит к замедлению отверждения. К тому же, быстрая сушка, вызванная большой скоростью испарения растворителей из сохнущего ЛКП, может приводить к появлению дефектов, поэтому границы варьирования факторов, представленные в табл. 1, были определены опытным путем при выполнении пробных классических экспериментов. Напряжение, подаваемое на ЭИ установки, было принято 12 кВ ввиду достаточного для получения АФК.

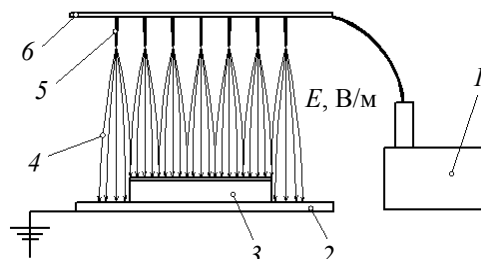


Рис. 1. Аэроионизационная электроэффлювиальная установка:

- 1 – высоковольтный блок;
- 2 – основание; 3 – образец с ЛКП;
- 4 – линии электрического поля; 5 – электроды;
- 6 – электроэффлювиальный излучатель (ЭИ)

В итоге статистической обработки результатов эксперимента получили, что построчные дисперсии являются однородными, поскольку выполняется условие по формуле

$$\frac{s_{\max}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2} = \frac{0,37}{2,567} = 0,14 < G_{0,05}(2; 9) = 0,48. \quad (1)$$

Оценка дисперсии воспроизводимости среднего значения рассчитывается по формуле

$$s^2\{\bar{y}\} = \frac{2,567}{18} = 0,14 \quad (2)$$

с числом степеней свободы

$$f_1 = N(\gamma - 1) = 9 \cdot (3 - 1) = 18. \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии определяли по следующим формулам:

$$b_0 = -\frac{1}{9} \sum_{u=1}^4 y_u + \frac{2}{9} \sum_{u=5}^8 y_u + \frac{5}{9} y_9; \quad (4)$$

$$b_i = \frac{1}{6} \sum_{u=1}^8 x_{iu} y_u; \quad (5)$$

$$b_{ii} = \frac{1}{6} \sum_{u=1}^4 y_u + \frac{1}{2} \sum_{u=5}^8 x_{iu}^2 y_u - \frac{1}{3} \sum_{u=5}^9 y_u; \quad (6)$$

$$b_{12} = \frac{1}{4} \sum_{u=1}^4 x_{1u} x_{2u} y_u, \quad (7)$$

где $b_0 = 25,66$; $b_1 = 1,45$; $b_2 = 11,63$; $b_{11} = 0,14$; $b_{22} = -1,41$; $b_{12} = 0,56$.

Оценки дисперсий коэффициентов регрессии определяли по формулам

$$s^2\{b_0\} = \frac{5}{9} s^2\{\bar{y}\}; \quad (8)$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{6} s^2\{\bar{y}\}; \quad (9)$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{2} s^2\{\bar{y}\}; \quad (10)$$

$$s^2\{b_{12}\} = \frac{1}{4} s^2\{\bar{y}\}; \quad (11)$$

$$\text{cov}\{b_0 b_{ii}\} = -\frac{1}{3} s^2\{\bar{y}\}. \quad (12)$$

В результат вычисления получили, что

$$s^2\{b_0\} = 0,079; \quad s^2\{b_1\} = s^2\{b_2\} = 0,024;$$

$$s^2\{b_{11}\} = s^2\{b_{22}\} = 0,071; \quad s^2\{b_{12}\} = 0,036;$$

$$\text{cov}\{b_0 b_{11}\} = \text{cov}\{b_0 b_{22}\} = -0,047.$$

Коэффициенты b_1 , b_2 и b_{12} значимо отличаются от нуля, так как выполняется условие по формуле

$$\frac{S_1^2}{S^2\{\bar{y}\}} = \frac{412,2}{0,14} = 2942,8 > F_{0,05}(2; 18) = 3,55. \quad (13)$$

Дисперсия отклика, связанная с линейными членами, вычислена по формуле

$$s_1^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (b_i \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u) = \frac{1}{2} \left[(1,45) \cdot (8,7) + (11,63) \cdot (69,8) \right] = 412,2. \quad (14)$$

Для оценки значимости группы коэффициентов при членах второго порядка вычислили долю обусловленной ими дисперсии функции отклика:

$$S_2^2 = \left[b_0 \sum_{u=1}^N \bar{y}_u + \sum_{i,j=1 \leq i < j \leq 2} (b_{ij} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u - \frac{1}{N} (\sum_{u=1}^N \bar{y}_u)^2) \right] \times \frac{2}{m(m+1)} = \frac{2}{6} \left[\begin{aligned} &25,66 \cdot 222,33 + \\ &+ 0,14 \cdot 149,17 - \\ &- 1,41 \cdot 146,07 + \\ &+ 0,56 \cdot 2,3 - \frac{222,33^2}{9} \end{aligned} \right] = 1,6.$$

Дисперсия, связанная с членами второго порядка b_{11} и b_{22} , признается значимой, так как выполняется условие

$$\frac{S_2^2}{S^2\{\bar{y}\}} = \frac{1,6}{0,14} = 11,43 > F_{0,05}(3; 18) = 3,16. \quad (15)$$

По результатам эксперимента получаем уравнение регрессии второго порядка в кодированных значениях:

$$Y = 25,66 - 1,45x_1 + 11,63x_2 + 0,56x_1x_2 + 0,14x_1^2 - 1,41x_2^2 \quad (16)$$

адекватно описывающее процесс отверждения лакокрасочного покрытия при аэроионизации, так как выполняется условие

$$F_{ад} = \frac{S_{ост}^2}{S^2\{\bar{y}\}} = \frac{1,19}{0,14} = 2,78 \leq F_{0,05}(3; 18) = 3,16; \quad (17)$$

$$S_{ост}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - (k + 1)} = \frac{2,96}{3} = 0,98; \quad (18)$$

$$f_2 = N - (k + 1) = 9 - (5 + 1) = 3, \quad f_1 = 18. \quad (19)$$

Уравнение регрессии второго порядка в натуральном выражении примет вид

$$Y = -21,147 - 2,32X_1 + 0,479X_2 + 0,0465X_1X_2 + 1,55X_1^2 - 0,00088X_2^2. \quad (20)$$

По уравнению регрессии с применением пакета Mathcad 15 построена графическая зависимость (рис. 2), которая показывает, что расход лака оказывает непосредственное влияние на время сушки ЛКП на древесине.

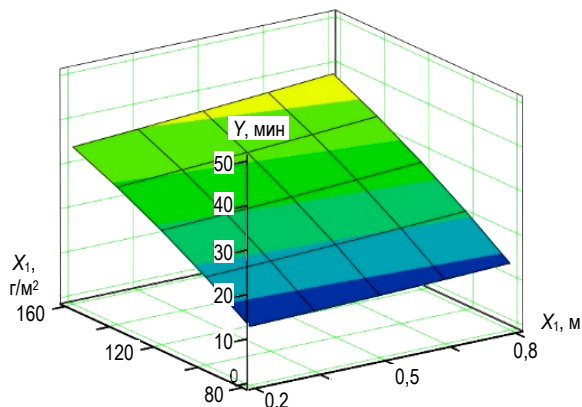


Рис. 2. Зависимость времени отверждения ЛКП Y от расхода лака X_2 и расстояния между излучателем и ЛКП X_1

Как видно из результатов эксперимента, аэроионизация оказывает влияние на время сушки ЛКП, образованных ВД-АК лаком на древесине. Время сокращается с 38 до 12 мин. Такую зависимость можно объяснить тем, что в тонком слое лака с расходом 80 г/м^2 более эффективно происходит испарение растворителя, а также проникновение АФК в слой покрытия и

участие в реакции полимеризации. Увеличение расхода лака до 160 г/м^2 приводит к тому, что время отверждения увеличивается и приближается к времени сушки в естественных условиях 60 мин.

Изменение расстояния между электроэфлювиальным излучателем и поверхностью ЛКП не оказывает сильного влияния на время отверждения в тонком слое ЛКП, при расходе лака в 80 г/м^2 время сокращается незначительно: с 14 до 12 мин. При увеличении расхода до 120 г/м^2 изменение расстояния уже оказывает существенное влияние, так как время сушки сокращается с 36 до 13 мин.

При увеличении расхода лака до 160 г/м^2 время сушки сокращается незначительно. Данное изменение можно объяснить тем, что подаваемое на излучатель напряжение $U = 12 \text{ кВ}$, что вызывает не высокую напряженность электрического поля, формируемого излучателем. Известно, что испарение жидкостей в электрическом поле коронного разряда происходит быстрее, к тому же в толстом слое растворителю сложнее поляризоваться под действием внешнего электрического поля и АФК формируемых ЭИ устройства.

Заключение. Из результатов исследований следует сделать вывод о необходимости дальнейшего исследования режимных параметров аэроионизационной сушки, влияющих на сокращение времени.

Литература

1. Рыбин Б. М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. М.: МГУЛ, 2007. 568 с.
2. Газеев М. В. Аэроионизационный способ интенсификации пленкообразования лакокрасочных покрытий на древесине и древесных материалах // Вестник московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2014. № 2. С. 117–121.
3. Стеллаж для сушки и отверждения лакокрасочных покрытий щитовых деталей на щитовых и погонажных изделиях из древесины и древесных материалов / Пат. 121709, Российская Федерация, МПК А47В, 51/00 / Ю. И. Ветошкин, М. В. Газеев, И. В. Жданова, Н. Н. Беспалов, Е. В. Тихонова; заявитель и патентообладатель Уральский гос. лесотех. ун-т. № 2012123580/12; заявл. 06.06.2012, опубл. 10.11.2012 г. // Бюл. № 31. 2012. 2 с.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики: в 5 т. М.: МФТИ, 2004. Т. 3. Электричество. 656 с.
5. Скипетров В. П., Беспалов Н. Н., Зорькина А. В. Феномен «живого» воздуха. Саранск: СВМО, 2003. 93 с.
6. Пен Р. З., Мельчер Э. М. Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесная пром-сть, 1973. 120 с.

References

1. Rybin B. M. *Tekhnologiya i oborudovanie zashchitno-dekorativnykh pokrytiy drevesiny i drevesnykh materialov* [Technology and equipment of protective and decorative coverings of wood and wood materials]. Moscow, MGUL Publ., 2007. 568 p.
2. Gazeev M. V. The aeroionization way of an intensification of filmformation of lacquer coatings on wood and wood materials. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta – Lesnoy Vestnik*. [Bulletin of the Moscow State University forest – the Forest messenger], 2014, no. 2, pp. 117–121 (In Russian).

3. Vetoshkin Yu. I., Gazeev M. V., Zhdanova I. V., Bespalov N. N., Tikhonova Ye. V. *Stellazh dlya sushki i otverzhdeniya lakokrasochnykh pokrytiy shchitovykh detaley na shchitovykh i pogonazhnykh izdeliyakh iz drevesiny i drevesnykh materialov* [The Rack for drying and an hardening of lacquer coatings of panel board details on panel board and the running of products from wood and wood materials]. Patent RF, no. 2012123580, 2012.

4. Sivukhin D. V. *Obshchiy kurs fiziki. V 5 t. T. 3. Elektrichestvo* [General course of physics: in 5 vol. Vol. 3. Electricity]. Moscow, MFTI Publ., 2004. 656 p.

5. Skipetrov V. P., Bespalov N. N., Zor'kina A. V. *Fenomen «zhivogo» vozdukha* [Phenomenon of “live” air]. Saransk, SVMO Publ., 2003. 93 p.

6. Pen P. Z., Melcher E. M. *Statisticheskie metody v tselyulozno-bumazhnom proizvodstve* [Statistical methods in pulp-and-paper production]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 120 p.

Информация об авторах

Газеев Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механической обработки древесины. Уральский государственный лесотехнический университет (620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, Российская Федерация). E-mail: gazeev_m@list.ru

Information about the authors

Gazeev Maksim Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Mechanical Woodworking. Ural State Forest Engineering University (37, Siberian tract str., 620100, Yekaterinburg, Russian Federation). E-mail: gazeev_m@list.ru

Поступила 16.02.2016