

УДК 674.817-41

**В. В. Ширяев, О. К. Леонович**

Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СКЛЕИВАНИЯ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ НАПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Работа посвящена оптимизации режимов склеивания при нанесении защитно-декоративного покрытия на древесно-волоконистый сухого способа прессования плитный материал.

В результате научно-исследовательской деятельности была выявлена проблема прогиба изготавливаемого напольного покрытия на основе древесно-волоконистых плит сухого способа формования при операции ламинирования меламиновыми пленками. В этой связи были проведены исследования в производственной лаборатории ОАО «Мостовдрев» на предмет влияния некоторых технологических факторов на конечную продукцию – «ламинат».

Экспериментальные исследования осуществлялись в соответствии с рекомендациями по математическому планированию. Было изучено влияние следующих факторов: температуры на плите со стороны пленки, температуры плиты на стороне, обратной облицовываемой, времени выдержки. Представлены результаты проведения эксперимента по *B*-плану, в итоге статистической обработки которых получена регрессионная зависимость функции отклика. Также на основе полученной модели построены и проанализированы поверхности отклика.

Проведенные исследования позволяют оптимизировать режимы производственного процесса ламинирования плит и, соответственно, установить стартовые параметры температур и времени выдержки при запуске линии ламинирования.

**Ключевые слова:** напольное покрытие, ламинирование, температура, прогиб, оптимизация, математическое планирование.

**V. V. Shiryayev, O. K. Leonovich**

Belarusian State Technological University

**APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING TO DETERMINE  
OPTIMAL MODES STICKING IN THE MANUFACTURE OF FLOORING**

The work is dedicated to the optimization of the substrate bonding modes protective and decorative coatings on wood fiber dry method of compression slab material.

As a result of research work has revealed a problem of deflection izgotav Lebanon-based flooring fiberboard dry molding method, in step lamination Melamine foil. In this regard it has been carried out research into the production laboratory of ОАО “Mostovdrev” for influence nekotoryh technological factors on the final product – “laminat”.

Experimental studies have been conducted in accordance with the recommendations of the mathematical planning. It investigated the effect of the following factors: the temperature at the plate by a film, plate temperature on the reverse side of the HDF, the holding time. The results of the experiment on the *B*-plan, as a result of statistical processing of which was obtained regression dependence of the response function. Also based on the received model constructed and analyzed the response surface.

Studies modes allow you to optimize the production process of lamination plates and, accordingly, set the initial parameters of temperature and residence time at start laminating line

**Keywords:** flooring, laminate, temperature, deflection, optimization, mathematical planning.

**Введение.** В настоящее время использование ненатуральных материалов во всех сферах жизни человека растет в геометрической прогрессии. Это связано с тем, что материалы такого рода легки в обработке, практичны в использовании и в несколько раз дешевле натуральных, таких как камень, стекло, дерево. К примеру, одним из основных материалов современного деревообрабатывающего производства являются различные виды древесных плит: ДСП, ЛДСП, ДВП, МДФ, а также пластмассы

и силиконы. В процессе изготовления плит используются так называемая технологическая древесина и вторичное сырье, что снижает его стоимость по сравнению с натуральным деревом – изделия из МДФ/ХДФ часто стоят на 30–50% дешевле, чем аналогичные изделия из цельного дерева. В свою очередь, использование вторичного сырья, так называемое «безотходное производство», сокращает потребление натуральной древесины. Как следствие – экономия природных ресурсов. Использование

специальных соединений при производстве древесных плит позволяет сделать исходный материал более прочным, защитить его от вредных микроорганизмов, значительно облегчить его обработку, а готовое изделие сделать более практичным в эксплуатации. К примеру, при изготовлении плит МДФ исключено использование вредных для здоровья эпоксидных смол и фенола, что выгодно отличает их в пользу новых более экологически чистых материалов от родственных им ДСтП, которые уже морально устарели.

Современное производство МДФ/ХДФ характеризуется следующими тенденциями:

- увеличивается единичная мощность производственных линий до 250–300 тыс. м<sup>3</sup> в год;
- стремительно расширяется использование МДФ для производства столярно-строительных изделий (ламинированный паркет, стеновые панели, погонажные и профильные изделия);
- растет потребность в МДФ большой толщины (от 30 до 60 мм) в качестве заменителя массивной древесины в традиционных сферах ее использования;
- значительный интерес проявляется к легким древесно-волоконистым плитам (LDF) плотностью 600–650 кг/м<sup>3</sup> – продукции конкурентоспособной с древесно-стружечными плитами в традиционной сфере применения – нефасадных элементах мебели.

Целью являлось проведение экспериментальных исследований процесса ламинирования напольных покрытий из МДФ для оптимизации технологических процессов изготовления древесно-волоконистых плит.

**Основная часть.** Научно-исследовательская работа была проведена по заказу концерна «Беллесбумпром» на одном из ведущих предприятий деревообрабатывающей отрасли Республики Беларусь ОАО «Мостовдрев».

Производство плит методом непрерывного сухого прессования в прессах проходного типа на данном предприятии осуществляется в соответствии с СТБ EN622-5-2009 по технологии, включающей следующие операции:

- подготовка древесного сырья (окорка);
- подача в производство и изготовление щепы;
- сортирование щепы;
- приготовление связующего;
- подготовка волокна;
- пропитка и сушка волокна;
- формирование ковра;
- прессование древесно-волоконистого ковра на непрерывном ленточном прессе;
- обрезка продольных кромок и форматирование по длине;
- транспортировка, контроль и отбраковка плит;

- конвективное охлаждение плит;
- пакетирование и выдержка древесно-волоконистых плит перед шлифованием;
- шлифование древесно-волоконистых плит;
- ламинирование плит;
- сортировка, складирование и упаковка готовых плит [1].

В процессе пуско-наладочных работ была выявлена проблема прогиба материала на операции ламинирования плит. Данный факт послужил причиной для необходимости проведения экспериментальных исследований процесса ламинирования плит МДФ.

Задачей такого рода исследований является получение в явном виде математических зависимостей оценочных показателей от независимых входных переменных. Подобные уравнения, по структуре близкие к функционально-аналитическим, называют функциональными или регрессивными, а также уравнениями регрессии.

Анализ известных работ, посвященных экспериментальным исследованиям процесса ламинирования древесно-волоконистых плит сухого способа прессования, показывает, что на оценочные данные оказывает влияние большое количество переменных факторов.

Математическое планирование эксперимента применяется для повышения эффективности проведения исследований. Учитывая существующие рекомендации для получения регрессионных моделей, с помощью которых описывают характеристики процесса ламинирования МДФ, наиболее удобно использовать *B*-планы второго порядка типа *B<sub>k</sub>*. *B*-планы являются композиционными и достаточно простыми в применении. В общем случае (число варьируемых факторов равно *k*) модель (1) имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k b_{ij} X_i X_j, \quad (1)$$

где  $b_0$  – свободный член;  $b_i$  – линейные коэффициенты регрессии,  $i = 1, 2, \dots, k$ ;  $b_{ii}$  – квадратичные коэффициенты регрессии,  $i = 1, 2, \dots, k$ ;  $b_{ij}$  – коэффициенты при парных взаимодействиях,  $i \neq j$ .

Исследования прогиба при ламинировании плит МДФ меламиновыми пленками осуществлялись с использованием плана *B<sub>3</sub>* математического планирования эксперимента. Варьируемые факторы: температура на плите со стороны пленки  $T_1 = X_1$  (от 180°C до 200°C с интервалом варьирования 10°C), температура плиты на обратной стороне МДФ  $T_2 = X_2$  (от 190°C до 220°C с интервалом варьирования 15°C); время выдержки  $B = X_3$  (от 22 до 27 с с интервалом варьирования 2,5 с).

В данной работе функции отклика представлены в виде квадратичных трехфакторных регрессионных моделей. Для статистической обработки показателей технологического процесса ламинирования древесно-волоконистых плит была использована методика, описанная в научной литературе [2].

План эксперимента в нормированных значениях переменных факторов представлен в табл. 1. Результаты проведения эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 1

## План проведения эксперимента

№ опыта	$X_0$	$X_1(T_1, ^\circ\text{C})$	$X_2(T_2, ^\circ\text{C})$	$X_3(B, \text{с})$	Выходные параметры $Y_i$
1	+1	+1	+1	+1	$Y_1$
2	+1	-1	+1	+1	$Y_2$
3	+1	+1	-1	+1	$Y_3$
4	+1	-1	-1	+1	$Y_4$
5	+1	+1	+1	-1	$Y_5$
6	+1	-1	+1	-1	$Y_6$
7	+1	+1	-1	-1	$Y_7$
8	+1	-1	-1	-1	$Y_8$
9	+1	+1	0	0	$Y_9$
10	+1	-1	0	0	$Y_{10}$
11	+1	0	+1	0	$Y_{11}$
12	+1	0	-1	0	$Y_{12}$
13	+1	0	0	+1	$Y_{13}$
14	+1	0	0	-1	$Y_{14}$

Таблица 2

## Результаты эксперимента

№ опыта	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$B, \text{с}$	$\sigma$
1	200	220	27,00	1,723
2	180	220	27,00	0,490
3	200	190	27,00	1,370
4	180	190	27,00	0,587
5	200	220	22,00	1,987
6	180	220	22,00	1,010
7	200	190	22,00	1,203
8	180	190	22,00	0,513
9	200	205	24,50	1,563
10	180	205	24,50	0,487
11	190	220	24,50	1,517
12	190	190	24,50	0,820
13	190	205	27,00	0,910
14	190	205	22,00	0,957

В результате проведенных расчетов были получены коэффициенты уравнения регрессии влияния указанных выше факторов на прогиб при ламинировании плит МДФ, которые представлены в табл. 3. Сравнивая полученные коэффициенты со значением  $t_{\text{табл}}S(b_i)$ , определили их значимость, в результате чего выявили, что коэффициент  $b_7$  незначим.

Таблица 3

## Коэффициенты уравнения регрессии

$b_0$	1,008303
$b_1$	0,476
$b_2$	0,223333
$b_3$	-0,059
$b_4$	0,092083
$b_5$	-0,12792
$b_6$	0,04375
$b_7$	0,017026
$b_8$	0,16036
$b_9$	-0,07464

В нормированных значениях регрессионная математическая модель имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma = & 1,008303 + 0,476X_1 + 0,223333X_2 - \\ & - 0,059X_3 + 0,092083X_1X_2 - \\ & - 0,12792X_1X_3 + 0,04375X_2X_3 + \\ & + 0,16036X_2^2 - 0,07464X_3^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Для представления этого уравнения в нормализованном виде используются следующие формулы (3)–(5):

$$X_1 = \frac{T_1 - 190}{10}; \quad (3)$$

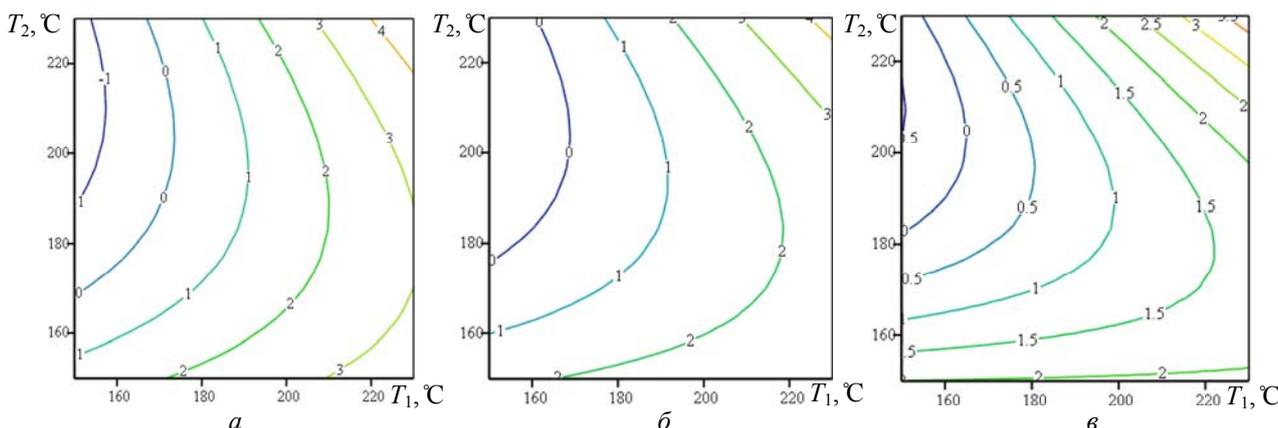
$$X_2 = \frac{T_2 - 205}{15}; \quad (4)$$

$$X_3 = \frac{B - 24,5}{2,5}, \quad (5)$$

где  $T_1$  – температура на плите со стороны пленки,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_2$  – температура плиты на обратной стороне МДФ,  $^\circ\text{C}$ ;  $B$  – время выдержки, с.

Модель влияния температуры на пленке ( $T_1, ^\circ\text{C}$ ), температуры плиты ( $T_2, ^\circ\text{C}$ ) и времени выдержки ( $B, \text{с}$ ) на прогиб имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma = & 1,008303 + 0,476\left(\frac{T_1 - 190}{10}\right) + \\ & + 0,223333\left(\frac{T_2 - 205}{15}\right) - 0,059\left(\frac{B - 24,5}{2,5}\right) + \\ & + 0,092083\left(\frac{T_1 - 190}{10}\right)\left(\frac{T_2 - 205}{15}\right) - \\ & - 0,12792\left(\frac{T_1 - 190}{10}\right)\left(\frac{B - 24,5}{2,5}\right) + \\ & + 0,04375\left(\frac{T_2 - 205}{15}\right)\left(\frac{B - 24,5}{2,5}\right) + \\ & + 0,16036\left(\frac{T_2 - 205}{15}\right)^2 - 0,07464\left(\frac{B - 24,5}{2,5}\right)^2. \end{aligned} \quad (6)$$



Прогиб плиты при выдержке:  
 а – V = 22 с; б – V = 24,5 с; в – V = 27 с

Проверка уравнения регрессии с помощью критерия Фишера подтвердила адекватность данной модели.

На основе модели построены поверхности отклика при фиксированном значении времени выдержки (рисунок).

Таблица 4

**Оптимальные режимы процесса ламинирования**

Температура на плите со стороны пленки $T_1$ , °C	Температура плиты на обратной стороне МДФ $T_2$ , °C	Время выдержки V, с
170	200	22,0
170	190	24,5
170	190	27,0

Проанализировав данные графические зависимости, определили оптимальные режимы при ламинировании древесно-волоконистых плит меламиновыми пленками (табл. 4) с учетом необходимых условий для формирования устойчивого полимерного покрытия.

**Заключение.** Разработанный метод позволяет определить оптимальные параметры температур в зависимости от времени прессования, которые впоследствии являются стартовыми при запуске большого пресса для ламинирования напольных покрытий.

Для данных условий, т. е. плиты основы ХДФ с односторонним ламинированием, составлена математическая модель, по которой возможно, меняя определенные параметры (температуру и продолжительность выдержки), получить оптимальные условия прессования.

Установлено, что при использовании в качестве одностороннего покрытия древесноволокнистой плиты сухого способа производства высокой плотности типа ХДФ пленки пропитанной меламиновыми смолами, оптимальная температура на плите со стороны пленки составляет 170°C, а на обратной стороне плиты – 190°C при продолжительности прессования 24,5 с.

Материалы, изложенные в статье, могут быть использованы для определения ориентировочных технологических режимов при производстве напольных покрытий.

**Литература**

1. Волынский В. Н. Технология древесных плит и композитных материалов. СПб.: Лань, 2010. 236 с.
2. Пижурин А. А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. 305 с.

**References**

1. Volynskiy V. N. *Tekhnologiya drevesnykh plit i kompozitnykh materialov* [The technology of wood-based panels and composite materials]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010. 236 p.
2. Pizhurin A. A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Basic research in the wood-working]. Moscow, GOU VPO MGUL Publ., 2005. 305 p.

**Информация об авторах**

**Ширяев Виталий Васильевич** – соискатель, младший научный сотрудник кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический уни-

верситет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shiryaevvv@belstu.by

**Леонович Олег Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств, заведующий научно-исследовательской лабораторией огнезащиты строительных конструкций и материалов. Белорусский государственный технологический университет (22006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: OKL2001@mail.ru

#### **Information about the authors**

**Shiryayev Vitaliy Vasil'yevich** – external doctorate student, Junior Researcher, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shiryaevvv@belstu.by

**Leonovich Oleg Konstantinovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology, Head of Research Accredited Laboratory of Bilding Desins and Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: OKL2001@mail.ru

*Поступила 15.02.2016*