

УДК 674.048.5

Л. В. Игнатович¹, В. В. Тулейко², А. С. Чуйков¹, С. С. Утгоф¹¹Белорусский государственный технологический университет²ОАО «Речицадрев»**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ
МЯГКИХ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ
МАКСИМАЛЬНОГО ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Древесина мягких лиственных пород (березы, ольхи, осины и т. п.) имеет ряд недостатков, ограничивающих ее применение в покрытиях полов. Она легко растрескивается при высыхании, имеет невысокие показатели прочности, твердости и износостойкости. Для устранения этих недостатков применяется защитная обработка древесины – модифицирование синтетическими полимерами. Модифицированная древесина мягких лиственных пород может эффективно эксплуатироваться в покрытиях полов не только жилых, но и административных зданий и сооружений благодаря повышенной стабильности геометрических размеров, твердости и износостойкости.

При выборе того или иного способа модификации древесины для определенного назначения часто возникает ситуация, когда одни свойства рассматриваемого материала имеют более низкие значения, а другие – более высокие. При проведении исследований термохимического модифицирования древесины мягких лиственных пород с целью получения максимального обобщенного критерия оценки качества физико-механических свойств установлены оптимальное содержание компонентов карбамидоформальдегидной пропиточной смолы КФС-140 и параметры процесса пропитки, при которых комплексы физико-механических свойств модифицированной древесины имеют максимальные значения. В статье рассмотрен метод обобщенного критерия для оценки качества модифицированной древесины на основе оптимизации технологических параметров (состав пропиточной смолы и процесс пропитки), позволяющий разработать оптимальный состав и технологические параметры получения материала, обладающего комплексом требуемых физико-механических свойств.

Ключевые слова: смола, древесина, свойства, модифицирование, оценка качества, обобщенный критерий.

Для цитирования: Игнатович Л. В., Тулейко В. В., Чуйков А. С., Утгоф С. С. Оптимизация технологических параметров термохимического модифицирования древесины мягких лиственных пород с целью получения максимального обобщенного критерия оценки качества физико-механических свойств // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 260–267.

L. V. Ignatovich¹, V. V. Tuleiko², A. S. Chuikov¹, S. S. Utgof¹¹Belarusian State Technological University²JSC “Rechitsadrev”**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS THERMO-CHEMICAL
MODIFICATION OF SOFT DECIDUOUS WOOD ROCKS IN ORDER TO OBTAIN
THE MAXIMUM GENERALIZED CRITERION FOR ASSESSING THE QUALITY
OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES**

Soft deciduous wood - birch, alder, aspen, etc. has a number of disadvantages that limit its use in floor coverings. It cracks easily when dried, has low strength, hardness and wear resistance. To eliminate these disadvantages, a protective wood treatment is used - modification with synthetic polymers. Modified softwood can effectively work in floor coverings of not only residential, but also office buildings and structures due to increased stability of geometric dimensions, hardness and wear resistance.

When choosing one or another method of modifying wood for a specific purpose, a situation often arises when some properties of the material in question are lower, while others are higher. When carrying out studies of thermo-chemical modification of soft leaf wood in order to obtain the maximum generalized criterion for assessing the quality of physical and mechanical properties, the optimal content of the components of urea-formaldehyde impregnating resin KFS-140 and the parameters of the impregnation process, in which the complexes of physical and mechanical properties of modified wood have maximum values. The article considers the method of a generalized criterion for assessing the quality of modified

wood based on the optimization of technological parameters (the composition of the impregnating resin and the impregnation process), it is possible to develop the optimal composition and technological parameters for obtaining a material with a complex of required physical and mechanical properties.

Key words: resin, wood, properties, modification, quality assessment, generalized criterion.

For citation: Ignatovich L. V., Tuleyko V. V., Chuikov A. S., Utgof S. S. Optimization of technological parameters thermo-chemical modification of soft deciduous wood rocks in order to obtain the maximum generalized criterion for assessing the quality of physical and mechanical properties. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 2 (246), pp. 260–267 (In Russian).

Введение. Изменение свойств древесины с помощью модификации открывает для изделий из нее новые области применения – такие, в которых ранее архитекторы или дизайнеры использовали только сталь, синтетические материалы или бетон. Вместо этих материалов теперь все смелее используется химически модифицированная древесина. Технологии модификации способны изменить физико-химический состав обрабатываемых материалов. В результате они приобретают новые свойства, что позволяет использовать их в помещениях с переменной влажностью и температурой. Процесс основан на взаимодействии «активного» древесного вещества и реагента обработки с образованием прочной ковалентной связи. Реакция может проходить в присутствии катализатора или без него [1].

Основная часть. Модифицированная древесина является продуктом, в котором использован проникающий мономер или низковязкий олигомер, который затем переходит в твердое состояние (полимеризуется) под действием тепла, химических реагентов или ионизирующих излучений. Обычно сочетаются физические и химические методы [2].

Термохимическое модифицирование древесины включает пропитку смолами, мономерами или олигомерами, сушку и отверждение пропиточного состава. Для пропитки используют фенолформальдегидные, полиэфирные, карбамидные, фурановые, акриловые, кремнийорганические и другие смолы, мономеры и олигомеры. Важно, чтобы пропитывающий состав обладал достаточной жизнеспособностью и имел невысокую вязкость, а также следует особо подчеркнуть, что в процессе модифицирования надо избегать применения экологически вредных веществ. Большим спросом пользуется модифицированная древесина, которая не выделяет в течение срока службы и в конце жизненного цикла вредные вещества, угрожающие здоровью человека [1–6].

Модифицирование древесины, как известно, осуществляется с целью повышения качества исходного древесного материала [6]. Свойства модифицированной древесины существенно зависят как от вида модифицирующего состава и

породы, так и от технологических режимов получения древесно-полимерного материала.

При выборе того или иного вида модифицированной древесины для определенного назначения часто возникает ситуация, когда одни свойства рассматриваемого материала имеют более низкие значения, а другие свойства – более высокие значения по сравнению с другими или с иными видами модифицированной древесины. Подобная проблема встает также при сравнении свойств модифицированной древесины и других материалов (пластмассы, металлы и т. д.). По существу, возникает многокритериальная задача определения качества объектов, к которым относится и модифицированная древесина. Такая задача характеризуется набором частных критериев, она достаточно сложна и не всегда имеет решение.

Одним из наиболее известных методов анализа качества различных объектов является метод обобщенного критерия, который позволяет оценивать качество объекта по одному критерию [7, 8]. Выражение для обобщенного критерия представляет собой некоторую функцию

$$F(a_1, a_2, \dots, a_n, y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (1)$$

где y_1, y_2, \dots, y_n – отдельные частные критерии (свойства) объекта; a_1, a_2, \dots, a_n – весовые коэффициенты, учитывающие относительную влажность (ценность) частных критериев.

Значения y_i нормированы и представлены в безразмерном виде. Подобная процедура необходима, поскольку отдельные частные критерии, как правило, разнородны и несопоставимы друг с другом. Значения a_i могут быть определены по результатам экспертного опроса. Обычно эти коэффициенты нормируются:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1; \quad 0 \leq a_i \leq 1. \quad (2)$$

Таким образом, многокритериальная задача определения состава объекта, обладающего наилучшим качеством среди объектов рассматриваемой группы, сводится к задаче оптимизации с единственным критерием

$$F \rightarrow \max. \quad (3)$$

Существуют различные виды функций, используемые для описания обобщенного критерия [7, 8]. Ряд функций основывается на «жестком» («пессимистическом»), «компромиссном» или «оптимистическом» принципах оценки значений критериев. Наиболее распространен «компромиссный» принцип, который учитывает вклад каждого частного критерия в обобщенную оценку. При этом предполагается, что низкие значения одних критериев могут компенсироваться высокими значениями других. В частности, «компромиссный» принцип может быть реализован на основе средневзвешенной суммы в виде выражения (4) [7, 8]:

$$F = \sum_{a=1}^n a_i y_i. \quad (4)$$

Подобный подход может быть использован и в случае одного объекта для определения его оптимальных параметров, при которых обобщенный критерий качества объекта имеет максимальное значение.

При исследовании процессов модифицирования древесины возникает необходимость найти оптимальное содержание компонентов пропиточного состава, при которых комплекс физико-механических свойств модифицированной древесины, определяемый обобщенным критерием (4), реализуется наилучшим образом, т. е. при условии (3). В ряде случаев к искомым соотношениям компонентов добавляются технологические режимные параметры, также влияющие на свойства материала.

В настоящей работе изучался процесс модифицирования древесины ольхи и березы с использованием пропиточного состава на основе карбамидоформальдегидной малотоксичной пропиточной смолы КФС-140, используемой для пропитки декоративной бумаги (производство ОАО «Речицадрев», Республика Беларусь) [9]. Основные характеристики карбамидоформальдегидной пропиточной смолы марки КФС-140 показаны в табл. 1.

Модифицированная древесина из мягких лиственных пород предназначалась для изготовления паркетных изделий [10–12]. Как описывалось выше, один из перспективных способов улучшения свойств древесины: истираемости, статической твердости, водостойкости и стабильности формы, плотности, – ее термомеханическое модифицирование, позволяющее получить новый древесно-полимерный материал [13–16]. Пропиточный состав для термохимической модификации образцов должен быть нетоксичным, экономически доступным. Компоненты состава должны легко проникать в древесину, обеспечивая повышение ее основных

физико-механических свойств. Для модифицирования паркетной планки был выбран состав на основе карбамидоформальдегидной пропиточной смолы КФС-140, применяемой в производстве облицовочной текстурной пленки. Эта смола – продукт трехстадийной поликонденсации карбамида с формальдегидом. При изготовлении этой смолы не проводится вакуум-сушка, поэтому она имеет пониженное содержание сухих веществ ($50 \pm 2\%$) и низкую ($12-14$ с) условную вязкость по ВЗ-4 (табл. 2). Смола представляет собой однородную непрозрачную суспензию белого цвета без посторонних включений, смешиваемую с водой в соотношении 1 : 2. Проведенные эксперименты показали, что пропиточный состав на основе смолы КФС-140 и хлористого аммония в качестве отвердителя легко проникает в капиллярно-пористую структуру древесины и может успешно использоваться для модифицирования древесины мягких лиственных пород и березы. При этом по некоторым физико-механическим свойствам пропитанный материал в 1,5–4 раза лучше исходной натуральной древесины [9].

Таблица 1
Характеристики карбамидоформальдегидной пропиточной смолы КФС-140

| Наименование показателя | Норма для смолы марки КФС-140 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Внешний вид | Однородная прозрачная жидкость без посторонних включений |
| Массовая доля сухого остатка, % | 50 ± 2 |
| Массовая доля свободного формальдегида, %, не более | 0,15 |
| Условная вязкость при $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ по вискозиметру ВЗ-246 (или ВЗ-4) с соплом диаметром 4 мм, с | 12–14 |
| Концентрация водородных ионов, pH | 7,3–7,9 |
| Время желатинизации при 100°C , с | 25–50 |

Пропиточный состав включал в себя собственно смолу, отвердитель (хлористый аммоний) и стабилизатор (моноэтаноламин). Пропитку осуществляли в автоклаве методом «вакуум – избыточное давление». Постоянными технологическими параметрами являлись: остаточное давление воздуха в автоклаве при вакуумировании древесины перед пропиткой – 5 кПа, избыточное давление при пропитке – 0,8 МПа. За переменную величину принималась продолжительность пропитки под действием избыточного давления.

После пропитки осуществляли термообработку древесины по специальным режимам с целью достижения максимальной степени отверждения пропиточного состава в древесине. Качество получаемой модифицированной древесины в соответствии с ее назначением определялось по четырем физико-механическим свойствам: статической твердости, сопротивлению истиранию в радиальной плоскости, водопоглощению и линейному разбуханию в радиальной плоскости.

Задача исследований состояла в определении содержания компонентов пропиточного состава и технологического параметра – продолжительности пропитки под действием избыточного давления. Обобщенный критерий качества модифицированной древесины, определяемый выражением (4) и зависящий от значений отдельных физико-механических свойств y_i и степени их важности a_i с учетом выражения (2), при этом будет иметь максимальное значение в соответствии с условием (3).

Для решения данной задачи необходимо найти функциональную зависимость между свойствами модифицированной древесины и рассматриваемыми компонентными и технологическими параметрами. Такая зависимость может быть установлена путем использования методов планирования эксперимента. В данном случае использовалось симплекс-решетчатое планирование Шеффе [17, 18], позволяющее получить соответствующие уравнения регрессии второго порядка для свойства, зависящего от исследуемых параметров. Для i -того свойства

$$y_i = f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_k), \quad (5)$$

где x_j – j -й параметр; k – количество параметров.

Особенностью такого планирования является нормирование исследуемых параметров, выраженных в кодированных величинах:

$$\sum_{i=1}^k x_j = 1; \quad 0 \leq x_j \leq 1. \quad (6)$$

Число независимых переменных при этом составляет $(k - 1)$.

На основе полученных уравнений (5) с учетом выражения (6) можно построить диаграммы состав – свойство, позволяющие выполнить анализ изучаемой зависимости.

При составлении матрицы планирования эксперимента исследуемые параметры изменяли в следующих пределах: содержание смолы в составе x_1 от 95,5 до 99,5%, содержание отвердителя x_2 от 0,5 до 1,5%, содержание стабилизатора x_3 от 0 до 4%, продолжительность пропитки под действием избыточного давления x_4 от 0,5 до 2,0 ч. Указанные максимальные и минимальные

значения в кодированных величинах обозначаются 1 и 0 соответственно.

Определяемые физико-механические свойства модифицированной древесины (частные критерии) являются размерными величинами. Для их нормирования использована нормировка сравнения, при которой значение свойства определяется отношением значений данного свойства модифицированной и натуральной древесины (так называемый эффект модифицирования). При этом отношение составляется таким образом, чтобы его значение было больше 1. В этом случае улучшение свойств модифицированной древесины по сравнению с натуральной (например, увеличение статической твердости или уменьшение водопоглощения) приведет к увеличению соответствующего частного критерия (свойства), выраженного эффектом модифицирования.

В результате выполнения исследований в соответствии с матрицей планирования эксперимента и обработки данных были получены адекватные уравнения регрессии, описывающие зависимость между значениями указанных четырех свойств и переменными параметрами (уравнений (7–9)):

для древесины ольхи:

$$F_{\text{ФМ(0)}} = 2,05x_1 + 3,50x_2 + 2,24x_4 - 1,73x_1x_2 + 0,82x_1x_3 + 3,99x_1x_4 - 1,88x_2x_3 - 2,84x_2x_4 - 1,13x_3x_4; \quad (7)$$

для древесины березы:

$$x_4 \leq 0,2. \quad (8)$$

При этом показатель жизнеспособности равен

$$y_{\text{ж}} = x_1 + 1,5x_2 + 3x_3 + 1,2x_4 + x_1x_2 + 104x_1x_3 + 44,2x_2x_3 + 2x_2x_4 + 91x_3x_4; \quad (9)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1. \quad (10)$$

Изменение содержания компонентов пропиточного состава приводит к изменению его жизнеспособности. Это накладывает определенные ограничения на область поиска оптимальных значений исследуемых параметров. Функциональная зависимость жизнеспособности состава от указанных четырех параметров установлена на основе дополнительных экспериментов, выполненных в соответствии с аналогичной матрицей планирования эксперимента. При этом параметр x_4 , не влияющий на жизнеспособность состава, является фиктивным, что обусловлено нормированием параметров (6). Учитывать его необходимо только при анализе жизнеспособности в той же системе координат (параметров), что и рассматриваемые свойства.

Для составления обобщенного критерия качества модифицированной древесины (4) были использованы полученные уравнения регрессии отдельных свойств (5). В качестве первого приближения полагали, что все рассматриваемые свойства имеют одинаковую важность. Это означает, что все четыре весовых коэффициента одинаковы и равны $1/n$, т. е. $a_i = 0,25, i = 1, n$.

После подстановки уравнений отдельных физико-механических свойств (5) в уравнение (4) получено выражение обобщенного критерия качества модифицированной древесины, т. е. физико-механических свойств модифицированной древесины ольхи $F_{ФМ(О)}$ и березы $F_{ФМ(Б)}$ от содержания компонентов в составе x_1, x_2, x_3 и технологического параметра x_4 .

На основании выполненных исследований были получены уравнения регрессии.

В данных уравнениях значения x_j должны быть выражены в кодированных величинах.

При поиске областей максимального обобщенного критерия следует учитывать существование ряда ограничений. Например, каждое свойство модифицированной древесины не должно быть хуже, чем свойство натуральной, т. е.

$$y_i \geq 1, i = 1, 4. \quad (11)$$

Кроме того, необходимо, чтобы значение показателя жизнеспособности пропиточного состава было достаточно большим:

$$y_{\text{ж}} \geq 20 \text{ сут}, \quad (12)$$

а продолжительность пропитки с точки зрения технологии была малой, например

$$x_4 \leq 0,2. \quad (13)$$

Учет ограничений (11)–(13) усложняет определение оптимальных параметров с помощью диаграмм состав – свойство. Для реализации этой задачи целесообразно использовать соответствующие программы оптимизации. Были определены оптимальные значения исследуемых компонентных и технологического параметров, при которых критерий, обобщенный по (7) и (8), имел максимальное значение в области варьирования параметров с учетом ограничений (11)–(13). Результаты исследований приведены в табл. 2.

В ряде случаев необходимо оценивать модифицированную древесину не по физико-механическим свойствам, а только по механическим или физическим свойствам. Для решения такой задачи следует пользоваться подобным методом. В частности, в данных исследованиях были также определены обобщенные критерии для двух физических свойств – водопоглощения и линейного разбухания и для двух механических свойств – статической твердости и сопротивления истиранию. При этом аналогичным образом с помощью соответствующих уравнений регрессии были составлены выражения для обобщенных критериев и рассчитаны оптимальные параметры (табл. 2).

Анализ данных таблицы показывает, что значения обобщенных критериев физико-механических, физических и механических свойств максимальны при одинаковых значениях исследуемых параметров (состава пропиточной смолы и продолжительности пропитки).

Таблица 2

Оптимальные значения исследуемых параметров для получения максимального обобщенного критерия механических, физических и физико-механических свойств модифицированной древесины

| Исследуемые параметры | | | Частные критерии (физико-механические свойства, выраженные эффектом модифицирования) | | | | Обобщенный критерий свойств | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Содержание, % | | | Продолжительность пропитки z_4 , ч | Статическая твердость $y_{1(М)}$ | Сопротивление истиранию $y_{2(М)}$ | Линейное разбухание $y_{3(Ф)}$ | Водопоглощение $y_{4(Ф)}$ | Механические свойства F_M | Физические свойства $F_Ф$ | Физико-механические свойства $F_{ФМ}$ |
| смолы z_1 | отвердителя z_2 | стабилизатора z_3 | | | | | | | | |
| Ольха | | | | | | | | | | |
| 97,7 | 0,5 | 1,0 | 0,8 | 2,6 | 2,9 | – | – | 2,75 | – | – |
| 97,7 | 0,5 | 1,8 | 0,5 | – | – | 1,6 | 3,4 | – | 2,50 | – |
| 97,7 | 0,5 | 1,0 | 0,8 | 2,6 | 2,9 | 1,2 | 3,6 | – | – | 2,58 |
| Береза | | | | | | | | | | |
| 98,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,2 | 2,6 | – | – | 1,90 | – | – |
| 97,5 | 0,5 | 2,0 | 0,5 | – | – | 1,8 | 2,0 | – | 1,90 | – |
| 98,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,2 | 2,6 | 1,6 | 2,0 | – | – | 1,85 |

Заключение. Следует отметить, что применение метода обобщенного критерия для оценки качества модифицированной древесины позволяет разработать эффективный состав и технологические режимы получения материала, обладающего лучшим возможным комплексом требуемых качественных свойств (физико-механических, физических и механических). Кроме того, метод максимального обобщенного критерия оценки качества физико-механических

свойств позволяет оптимизировать технологические параметры термо-химического модифицирования древесины мягких лиственных пород и осуществить выбор лучшего показателя с точки зрения назначения полученного материала из группы рассматриваемых материалов. Если частные критерии (свойства) неравноценны по важности, следует использовать метод экспертной оценки для определения значений весовых коэффициентов.

Список литературы

1. Материалы. Термическая и химическая модификация древесины // ЛесПромИнформ. Журнал профессионалов ЛПК. № 7 (65). 2009 г. URL: <https://www.activestudy.info/modificirovannaya-drevesina> (дата обращения: 10.03.2021).
2. Модифицирование древесины. Коллекция Otherreferats. URL: <http://otherreferats.allbest.ru/manufature> (дата обращения: 10.03.2021).
3. Николай Скуратов. Пять способов модифицирования древесины. Май 2016. № 5 (97). URL: https://www.lesindustry.ru/issues/li_n97/Pyat_sposobov_modifitsirovaniya_drevesini_1291/ (дата обращения: 03.03.2021).
4. Модификация древесины // ЛесПромИнформ. URL: http://www.lesprominform.ru/modifikaciya_drevesiny (дата обращения: 20.01.2021).
5. Фомина О. А. Способы модифицирования древесины лиственных пород: отечественный и зарубежный опыт // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 78 (04). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/14.pdf> – свободный (дата обращения: 10.03.2021).
6. Николин М. Е., Шейкман Д. В., Кошелева Н. А. Улучшение эксплуатационных свойств мягколиственных пород древесины модифицированием // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург, 2012. Ч. 1. С. 260–262.
7. Оптимизация качества. Сложные продукты и процессы / Э. В. Калинина [и др.]. М., 1989. 256 с.
8. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М., 1980. 208 с.
9. Модифицирование древесины ольхи карбамидоформальдегидным полимером на основе смолы МФПС-2 / Л. В. Игнатович [и др.] // Деревообраб. пром-сть. 1988. № 10. С. 19–21.
10. Игнатович Л. В. Конструктивные особенности щитового паркета сложного рисунка из шпона // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 155–158.
11. Игнатович Л. В., Шетько С. В. Конструктивные и технологические особенности напольных покрытий: монография. Минск: БГТУ, 2011. 273 с.
12. Игнатович Л. В. Rational use of soft wood waste production of materials for construction application // Архитектура и строительные науки. 2015. № 1, 2. С. 25–27.
13. Гальперин А. С., Игнатович Л. В. Исследование жизнеспособности пропиточного состава на основе мочевиноформальдегидной смолы методом симплексного планирования // Модифицирование и защитная обработка древесины. Красноярск, 1989. С. 120–122.
14. Игнатович Л. В., Игнатович М. О. Теоретический анализ проницаемости древесины вдоль волокон при изготовлении торцового паркета // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2004. Вып. XII. С. 182–184.
15. Исследование особенностей структурных изменений уплотненной древесины ольхи для изготовления столярно-строительных изделий и конструктивных элементов мебели / С. В. Шетько [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1. С. 158–163.
16. Игнатович Л. В., Утгоф С. С. Особенности структурных изменений при термомеханическом модифицировании древесины сосны и ольхи // Труды БГТУ. 2016. № 2 (184): Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. С. 192–195.
17. Пижурин А. А., Розенблит М. С. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки. М., 1988. 296 с.
18. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М., 1985. 327 с.

References

1. Materials. Thermal and chemical modification of wood. *Lesprominform. Zhurnal professionalov LPK* [LesPromInform. Journal of timber industry professionals], 2009, no. 7 (65) (In Russian). Available at: <https://www.activestudy.info/modificirovannaya-drevesina> (accessed 10.03.2021).
2. *Modifitsirovaniye drevesiny. Kolleksiya Othereferats* [Modification of wood. Collection Otherreferats]. Available at: <http://otherreferats.allbest.ru/manufacture> (accessed: 10.03.2021).
3. Nikolay Skuratov. *Pyat' sposobov modifitsirovaniya drevesiny* [Five ways to modify wood]. May 2016, no. 5 (97) (In Russian). Available at: https://www.lesindustry.ru/issues/li_n97/Pyat_sposobov_modifitsirovaniya_drevesini_1291/ (accessed 03.03.2021).
4. *Modifikatsiya drevesiny. LesPromInform* [Modification of wood. LesPromInform]. Available at: http://www.lesprominform.ru/modifikatsiya_drevesiny (accessed 20.01.2021).
5. Fomina O. A. Methods for modifying wood of deciduous breeds: domestic and foreign experience. *Nauchnyy zhurnal KubSAU* [Scientific journal KubSAU], 2012, no. 78 (04) (In Russian). Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/14.pdf-free/> (accessed 10.03.2021).
6. Nikolin M. E., Sheikman D. V., Kosheleva N. A. Improvement of the operational properties of soft-leaved wood species by modification. *Nauchnoye tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov i konkursa po programme "Umnik"* [Scientific creativity of youth – the forestry complex of Russia: materials of the VIII All-Russia. scientific and technical conf. undergraduate and graduate students and competition for the program "Clever"]. Ekaterinburg, 2012, part 1, pp. 260–262 (In Russian).
7. Kalinina E. V., Lapiga A. G., Polyakov V. V., Khurgin Ya. I., Vagenknecht M., Peshel M., Hartaman K. *Optimizatsiya kachestva. Slozhnyye produkty i protsessy* [Quality Optimization. Complex products and processes]. Moscow, 1989. 256 p.
8. Wenttsel E. S. *Issledovaniye operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: tasks, principles, methodology], Moscow, 1980. 208 p.
9. Ignatovich L. V., Shutov G. M., Gal'perin A. S., Lezhen V. I. Modification of alder wood with a carbamide-formaldehyde polymer based on resin MFPS-2. *Derevoobratyvuayshchaya promyshlennost'* [Woodworking Industry], 1988, no. 10, pp. 19–21 (In Russian).
10. Ignatovich L. V. Constructive features of a panelboard parquet with a complex veneer pattern // *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 155–158 (In Russian).
11. Ignatovich L. V., Shet'ko S. V. *Konstruktivnyye i tekhnologicheskiye osobennosti napol'nykh pokrytiy* [Constructive and technological features of floor coverings]. Minsk, BGTU Publ., 2011. 273 p.
12. Ignatovich L. V. Rational use of soft wood waste production of materials for construction application. *Arkhitektura i stroitel'nyye nauki* [Architecture and building sciences], 2015, no. 1, 2, pp. 25–27 (In Russian).
13. Halperin A. S., Ignatovich L. V. Study of the viability of the impregnating composition based on urea-formaldehyde resin by the method of simplex planning. *Modifitsirovaniye i zashchitnaya obrabotka drevesiny* [Modification and protective treatment of wood]. Krasnoyarsk, 1989, pp. 120–122 (In Russian).
14. Ignatovich L. V., Ignatovich M. O. Theoretical analysis of wood permeability along fibers in the manufacture of end parquet. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series XII, Forestry and Woodworking Industry, 2004, pp. 182–184 (In Russian).
15. Shetko S. V., Ignatovich L. V., Prokhorchik S. A., Chuikov A. S. Study of the peculiarities of structural changes in compacted alder wood for the manufacture of joinery and construction products and structural elements of furniture. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2020, no. 1, pp. 158–163 (In Russian).
16. Ignatovich L. V., Utgof S. S. Features of structural changes during thermomechanical modification of pine and alder wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2 (184): Forestry and Woodworking Industry, pp. 192–195 (In Russian).
17. Pizhurin A. A., Rosenblit M. S. *Osnovy modelirovaniya i optimizatsii protsessov derevoobrabotki* [Basics of modeling and optimization of wood processing processes]. Moscow, 1988. 296 p.
18. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii* [Methods of experiment optimization in chemical technology]. Moscow, 1985. 327 p.

Информация об авторах

Игнатович Людмила Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ignatovich@belstu.by, lignatovich6@gmail.com

Тулейко Валерий Валентинович – кандидат технических наук, генеральный директор ОАО «Речицадрев» (247500, Речица, ул. 10 лет Октября, 17/19, Гомельская область, Республика Беларусь). E-mail: info.rechitsadrev@wood.by

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: offlex88@mail.ru, offlex88@belstu.by

Утгоф Светлана Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: utgof@belstu.by

Information about the authors

Ignatovich Lyudmila Vladimirovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovich@belstu.by, lignatovich6@gmail.com

Tuleyko Valery Valentinovich – PhD (Engineering), General Director of JSC “Rechitsadrev” (17/19 str. 10 years of October, 247500, Rechitsa, Gomel region, Republic of Belarus.). E-mail: info.rechitsadrev@wood.by

Chuiikov Aleksey Sergeevich – PhD (Engineering), Head of the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: offlex88@mail.ru, offlex88@belstu.by

Utgof Svetlana Sergeevna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: utgof@belstu.by

Поступила 15.03.2021