



## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ШТАМПОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ МЯГКИХ ПОРОД

Владимир П. Ивановский<sup>1</sup> ✉, [nppkvalitet@mail.ru](mailto:nppkvalitet@mail.ru)

Николай В. Жужукин<sup>1</sup>, [n.zhuzhukin@yandex.ru](mailto:n.zhuzhukin@yandex.ru)

Кишваршо Н. Сафаров<sup>1</sup>, [shift\\_1991-91@mail.ru](mailto:shift_1991-91@mail.ru)

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Штампование древесины мягких пород до сих пор остается малоисследованным процессом бесстружечного деления. Исследования проводились на промышленно выпускаемом оборудовании. Многофакторные эксперименты проводились по стандартным методикам с числом замеров от 20 до 150 с использованием древесины мягких пород, включая хвойные. Для обоснования полученных коэффициентов уравнений регрессии применялась ЭВМ. Изучалась величина внешних факторов, таких как режим нагружения, длительность и введение пластификаторов. Разведывательные опыты позволили точно установить величину внешней нагрузки при прямом и косом смятии, а также оптимальную температуру деформирования. При этом исследования проводились с учетом различной влажности древесины. Для четырех факторов с двумя выходными величинами получены регрессионные модели. Незначимые коэффициенты были исключены, и далее исследовалось влияние влажности, температуры, размеров сечения и формы заготовки на качество поверхности штампованных деталей. В итоге построена зависимость величины деформаций в древесине от нагрузки и температуры. Решение задачи оптимизации позволило выявить следующие параметры процессов штампования древесины мягких пород: плотность в пределах 400 кг/м<sup>3</sup>, температура 156 градусов Цельсия.

**Ключевые слова:** stamping, soft rocks, external loading, factorial experiment

**Благодарности:** Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Ивановский В.П. Результаты экспериментальных исследований процесса разрезания древесины мягких пород дисковыми ножами / В. П. Ивановский, Н. В. Жужукин, К. Н. Сафаров // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 3 (43). – С. 86–98. – Библиогр.: с. 96–98 (16 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/7>.

**Поступила:** 06.07.2021 **Принята к публикации:** 02.09.2021 **Опубликована онлайн:** 01.10.2021

## RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS OF CUTTING SOFT WOOD WITH DISC KNIVES

Vladimir P. Ivanovskiy<sup>1</sup> ✉, nppkvalitet@mail.ru  
Nikolay V. Zhuzhukin<sup>1</sup>, n.zhuzhukin@yandex.ru  
Kishvarsho N. Safarov<sup>1</sup>, shift\_1991-91@mail.ru

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

### Abstract

Stamping of softwood is still a poorly researched process of chipless division. The research on commercially available equipment was carried out. Multivariate experiments were held according to standard methods with the number of measurements from 20 to 150 using softwood including conifers. A computer was used to substantiate the obtained coefficients of the regression equations. The magnitude of external factors such as loading mode, duration and the introduction of plasticizers were studied. Exploratory experiments made it possible to accurately establish the magnitude of the external load during direct and oblique collapse, as well as the optimal deformation temperature. Moreover, the studies were carried out taking into account the different moisture content of the wood. Regression models for four factors with two outputs were obtained. Insignificant coefficients were excluded and further research of the influence of humidity, temperature, section size and shape of the work piece on the surface quality of stamped parts were carried out. As a result, the dependence of the magnitude of deformations in wood on load and temperature was built. Solving the optimization problem made it possible to identify the following parameters of the processes of stamping softwood: density within 400 kg/m<sup>3</sup> and temperature 156 degrees Celsius.

**Keywords:** stamping, soft rocks, external loading, factorial experiment

**Acknowledgments:** The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Ivanovskiy V.P., Zhuzhukin N.V., Safarov K.N. (2021) Results of experimental studies of the process of cutting soft wood with disc knives. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 3 (43), pp. 86-98 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/7>.

**Received:** 06.07.2021 **Accepted for publication:** 02.09.2021 **Published online:** 01.10.2021

### Введение

Штампование древесины относят к второй разновидности процессов бесстружечного деления [1]. Режущий инструмент при этом обычно неприводной, т.е. данный процесс можно отнести и к процессам прессования древесины [1, 2, 3]. Для древесины мягких пород, как лиственных, так и хвойных, до настоящего времени не выявлен порог образования остаточных деформаций при силовом деформировании, не определены доминирующие внешние факторы процесса штампования, а также

их совместное влияние на течение процесса деформирования и тепловых процессов при резании [4-10].

По мнению большинства исследователей процесса штампования древесины [1-5], основными факторами, влияющими на качество штампованных изделий, являются следующие: направление резания относительно волокон древесины, порода древесины и влажность, линейные и угловые параметры штампов, температура, режим и скорость нагружения. Однако основным фактором следует считать величину внешней нагрузки [6-12]. По дан-

ным В.А. Шамаева и др., древесина мягких листовых пород сохраняет остаточные деформации с 4 МПа [9]. Целью работы явилось точное определение величин деформаций в древесине мягких пород от внешней нагрузки и температуры, так как данные исследований по этому вопросу различаются на 30-50 % [10-13].

Энергоемкость и качественные показатели штампования определяются в первую очередь видом резания относительно волокон [4-7]. Так, при торцовом сжатии минимальная энергоемкость, но худшее качество обработанных поверхностей [8-10]. В зависимости от породы и строения древесины существуют значительные различия физико-механических свойств для кольцесосудистых и рассеянно-сосудистых пород [11]. Такое различие существенно меняется с изменением влажности древесины при штамповании [11, 12]. Но особое влияние оказывает температура процесса штампования. Все исследователи считают целесообразной температуру ниже порога деструкции, т.е. ниже 200 °С [8-13]. Однако оптимальной температуры штампования древесины мягких пород не выявлено. Не установлено и влияние температуры штампования на величину внешней нагрузки.

### Материалы и методы

Проведение разведывательных опытов по штампованию древесины мягких пород проводилось для выявления величины общей нагрузки при сжатии до появления остаточных деформаций, а также величин основных влияющих факторов: влажности и температуры [4-6]. Для графического изображения результатов измерений применялась прямоугольная система координат с двумя переменными. Число измерений во всех случаях было больше 50.

Опыты по исследованию процесса штампования проводились на гидравлическом прессе ПГ-63. Влажность древесины контролировалась влагомером, а температура процесса штампования – бесконтактным тепловизором. По ГОСТ 15612-85 для контроля шероховатости штампованной поверхности использовался прибор ТСП-4М и индикаторный глубиномер ИН-10 с индикаторами часового типа ИЧ-10 с возможностью определения дефектов вырывов в присучковой зоне.

Влияющие факторы многофакторного эксперимента выбирались методом экспертных оценок с участием 90 пользователей.

Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии и адекватности проводилась с использованием критериев Стьюдента и Фишера, путем сравнения табличных значений с расчетными данными, полученными на ЭВМ. После отсеивания незначимых коэффициентов повторно проводилась проверка адекватности моделей, которая показала, что значения расчетного критерия Фишера больше табличных, т.е. обозначенные ниже математические модели адекватно описывают процесс штампования древесины мягких пород [14]. Затем решалась задача оптимизации. Вследствие небольшой размерности полученной задачи нелинейного программирования для ее решения был выбран метод сканирования. Для этого на ЭВМ рассчитывались уравнения регрессии в явном виде с разработкой алгоритмов и программы по расчету оптимальных параметров процесса штампования древесины мягких пород [15].

По окончании эксперимента проводилась серия опытов по повышению качества верхней поверхности штампованных изделий. Проверка адекватности реологической модели проводилась экспериментально, на испытательной машине по расчетным температурным коэффициентам деформативности. Данные, полученные на образцах осины и тополя, усреднялись и обрабатывались на ЭВМ.

### Результаты и обсуждение

Способность древесины деформироваться при торцовом сжатии и достаточная прочность изделий при таком нагружении создаёт возможность для её обработки давлением.

Процесс штампования сопровождается малой энергоемкостью, но вызывает необходимость более глубокого изучения деформативных свойств древесины.

### Режим и скорость нагружения

Сумма мгновенных упругих деформаций, развивающихся на каждой ступени, равна полной мгновенной упругой деформации, которая была бы получена под действием максимальной нагрузки. Таким образом, величины мгновенной упругой деформации при ступенчатом режиме нагружения и

при нагружении с непрерывно-возрастающей нагрузкой равны между собой. Общая эластичная деформация древесины при ступенчатом режиме больше деформации при непрерывно-возрастающей нагрузке на величину эластичных деформаций, которая составляет у древесины мягких пород до 25 % от общей деформации. Деформация ползучести увеличивается с увеличением длительности действия нагрузки. То есть для того, чтобы получить значительную деформацию, режим с постоянной длительно-действующей нагрузкой и ступенчатый более предпочтителен по сравнению с режимом при непрерывно возрастающей нагрузке. При ступенчатом режиме мгновенная упругая деформация развивается на каждой ступени нагружения равномерно по всему циклу, препятствуя разрушению древесины на границе между нагруженным и ненагруженным участком при местном смятии. Уменьшение скорости нагружения ведет к увеличению всех видов деформаций и, таким образом, общей деформации древесины.

### *Длительность нагружения*

В теории прочности считается, что разрушение материалов происходит не вследствие достижения критического напряжения, а в виде процесса, развивающегося во времени, т. е. зависит в большей степени от длительности действия нагрузки. Установлено, что при длительном действии нагрузки предел прочности древесины и полимеров снижается, а необратимые деформации увеличиваются. Интенсивный рост деформаций при длительном действии нагрузки продолжается 20 суток. Анализируя кривые диаграммы деформаций и реформаций древесины [85], можно сделать вывод о том, что под действием длительной нагрузки при сжатии древесины прочность её снижается, а общая деформация увеличивается. При величине нагрузки выше предела длительного сопротивления с течением времени остаточная деформация также будет увеличиваться, а деформации в древесине – расти до полного разрушения образца. Потеря прочности древесины при длительном нагружении пропорциональна длительности действия нагрузки. Поэтому при штамповании древесины целесообразно устанавливать длительность нагрузки, достаточную для развития мгновенных остаточных, эластичных

деформаций и деформаций ползучести. Время действия нагрузки при этом обычно 1-2 минуты.

### *Введение пластификаторов*

Пластификация материала изменяет его вязкость, гибкость молекул и подвижность молекулярных структур. Известны результаты исследований пластификации древесины аммиаком, мочевиной и др. [8-14]. Установлено, что введение пластификаторов в древесину увеличивает её пластичность и, таким образом, увеличивает деформативность. Пластификация может быть внутримолекулярной и межмолекулярной, в зависимости от влияния на молекулы целлюлозы, поверхностной и глубинной. С использованием пластификаторов пластические свойства древесины проявляются при меньших усилиях деформирования.

### *Температура и влажность*

Известно, что прочность древесины при нагревании уменьшается, а сила резания, в большей степени, снижается. Для практической реализации была составлена программа для различных температур и деформаций по вышеперечисленным породам древесины.

Разведывательные опыты по совершенствованию технологических процессов штампования древесины мягких пород показали, что во всех случаях при прямом сжатии для достижения одной и той же величины общей деформации необходима общая нагрузка, более значительная по величине, чем при косом сжатии (рис. 1). Величина внешней нагрузки при косом сжатии существенно зависит от угла смятия: увеличение угла ведёт к увеличению необходимой внешней нагрузки. Последующие экспериментальные исследования процесса образования рельефов на торцевой поверхности древесины позволят установить количественную зависимость выходных параметров процесса от переменных влияющих факторов.

Опыты по исследованию процесса штампования проводились на гидравлическом прессе ПГ-63. Число замеров выходных величин: напряжение сжатия  $\sigma_{сж}$ , МПа и процент брака в изделиях составляло во всех опытах более 20, в опыте № 25 – 150. Усредненные результаты эксперимента представлены в табл. 1 для древесины тополя осины и ольхи.

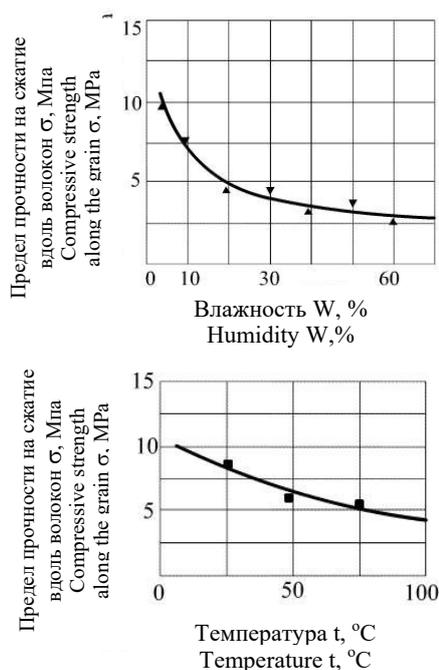


Рисунок 1. Влияние влажности и температуры на прочность осины

Figure 1. Influence of humidity and temperature on the strength of aspen

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's compositions

В результате получены следующие уравнения:

$$Y_1 = 566,5988 + 0,1424 \cdot X_1 - 0,0110 \cdot X_2 + 0,1038 \cdot X_3 - 0,0278 \cdot X_4 - 1 \cdot 10^4 \cdot X_1^2 + 3,4937 \cdot 10^{-15} \cdot X_2^2 + 9,98757 \cdot 10^{-15} \cdot X_3^2 + 3,08642 \cdot 10^{-4} \cdot X_4^2 + 4,3750 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_2 - 9,3750 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_3 - 7,6389 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_4 - 5,2083 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,8056 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 \cdot X_4 + 3,00926 \cdot 10^{-4} \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (1)$$

$$Y_2 = 24,4167 + 0,0692 \cdot X_1 - 0,3258 \cdot X_2 + 0,1056 \cdot X_3 - 0,3222 \cdot X_4 - 1,0417 \cdot 10^{-4} \cdot X_1^2 + 3,33333 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 - 7,4074 \cdot 10^{-4} \cdot X_3^2 + 9,05350 \cdot 10^{-4} \cdot X_4^2 + 3,7500 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,6667 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_3 + 3,33333 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_4 + 8,33333 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_3 + 2,77778 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 \cdot X_4 + 3,70370 \cdot 10^{-4} \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (2)$$

Далее проводим оценку значимости коэффициентов  $a_1/a_{14}$  с использованием критерия Стьюдента для уровня значимости  $q = 0,05$  и числа степеней свободы  $f = 10$ . Сравниваем табличное значение критерия Стьюдента  $T = 2,228$  с расчетными данными, полученными на ЭВМ, и оцениваем адекватность моделей по критерию Фишера:  $F_{\text{табл.}} = 2,85$ . Расчетные значения критерия Фишера:  $F_1 = 3,844$ ,  $F_2 = 5,773$ .

Полученные модели считаются адекватными, если  $F_{\text{расч.}} > F_{\text{табл.}}$ . Следовательно, данные мате-

матические модели (1 и 2) являются адекватными исследуемому процессу формообразования древесины мягких пород.

Но при проверке коэффициентов регрессионных уравнений  $Y_1$  и  $Y_2$  заметно, что  $a_6$  и  $a_7$  при  $X_2^2$  и  $X_3^2$  не являются значимыми. Поэтому, используя метод исключений, оставляем следующие значимые коэффициенты:  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}$ . Перерасчет уравнений регрессии показывает их следующий вид:

$$Y_1 = 566,5989 + 0,1424 \cdot X_1 - 0,110 \cdot X_2 + 0,1038 \cdot X_3 - 0,0278 \cdot X_4 - 1,00 \cdot 10^{-4} \cdot X_1^2 + 3,08642 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 + 4,375 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_2 - 9,375 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_3 - 7,6389 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_4 - 5,2083 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,80556 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 \cdot X_4 + 3,00926 \cdot 10^{-4} \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (3)$$

$$Y_2 = 24,4156 + 0,0730 \cdot X_1 - 0,2592 \cdot X_2 + 0,155 \cdot X_3 - 0,3208 \cdot X_4 - 1,0733 \cdot 10^{-4} \cdot X_1^2 + 8,8974 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 + 3,75 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,6667 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_3 + 3,33333 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \cdot X_4 + 8,33333 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_3 + 2,77778 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 \cdot X_4 + 3,7073 \cdot 10^{-4} \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (4)$$

Вторично оцениваем адекватность моделей:

$$F_1 = 5,382; \quad F_2 = 23,264; \quad F_{\text{табл.}} = 2,179.$$

Так как  $F_1, F_2 > F_{\text{табл.}}$ , то обе модели адекватны исследуемому процессу.

В результате получено следующее решение задачи:

$$\text{Значение целевой функции: } Y_1 = 412,408; \quad Y_2 = 12,43515.$$

Оптимальные значения: удельное давление – 6 МПа, температура – 156 °С, время выдержки – 10 с; 4) угол смятия – 45°.

Вследствие того, что два значения оптимума на практике вполне трудно реализуемы (плотность и температура), дополнительные исследования по качественным характеристикам деформированных элементов показали реальную температуру и итоговую плотность в технологическом процессе штампования древесины.

Дальнейшие исследования полученных уравнений регрессии на ЭВМ проводились при стабилизации факторов  $X_3$  и  $X_4$  на нулевом уровне и переменных значениях  $X_1, X_2$  [1-4]. Установлено, что качественные характеристики процессов формообразования древесины мягких пород определяются двумя главными факторами: удельным давлением (конечной плотностью древесины) и временем выдержки под давлением. Влияние температуры и времени выдержки под давлением на качество

декоративных элементов исследовалось дополнительно.

Качественно процент брака изделий в последней колонке табл. 2 определялся визуально, в зависимости от количества измерений в опыте, от 20 до 150, но не менее 20. Эксперимент проводился на заготовках из ольхи и осины прямоугольного сечения 12×5,5 с влажностью образцов  $W = 3,0-5,0$  и 7-8 %. Результаты проведенных исследований, определяющих влияние температуры и времени выдержки под давлением на качество поверхности, представлены на рис. 2. Анализ результатов экспе-

римента показывает, что при изменении температуры в пределах 125-250 °С и времени выдержки от 0 до 60 с избежать появления трещин вдоль волокон практически не удалось. Снижение количества трещин в элементах ( $\mu$ ) наблюдалось при температуре прессования 150-200 °С независимо от времени прессования. Наиболее качественные образцы получены при температуре прессования 150 °С и времени прессования 2,5-10 с. Аналогичные результаты были получены при прессовании заготовок из осины.

Таблица 1

Матрица планирования для четырёх факторов в явном виде и результаты реализации эксперимента

Table 1

Explicit planning matrix for four factors and results of experiment implementation

№ п/п No. p / p	Удельное давление, $\sigma_{сж}$ , $X_1$ , МПа Specific pressure, $\sigma_{сж}$ , $X_1$ , MPa	Температура процесса, $X_2$ , °С Process temperature, $X_2$ , °C	Время выдержки под давлением, $X_3$ , с Holding time under pressure, $X_3$ , sec	Угол смятия, $X_4$ , град Crumple angle, $X_4$ , hail	Плотность, $Y_1$ , $\rho$ , кг/см <sup>3</sup> Density, $Y_1$ , $\rho$ , kgf/cm <sup>3</sup>	% брака, $Y_2$ % of scrap, $Y_2$
1	2	3	4	5	6	7
1	50	30	30	0	482	28
2	150	30	30	0	684	16
3	50	90	90	0	625	12
4	50	30	30	90	693	23
5	150	90	90	0	494	15
6	150	30	30	90	525	20
7	50	90	90	90	515	25
8	150	90	90	90	722	20
9	50	30	30	0	701	22
10	150	30	30	0	534	21
11	50	90	90	0	502	24
12	50	30	30	90	541	26
13	150	90	90	0	744	13
14	15	50	90	90	704	18
15	5	150	90	90	525	16
16	20	150	30	45	733	25
17	20	100	60	45	441	14
18	20	100	60	45	806	11
19	10	0	60	45	593	17
20	10	200	60	45	580	23
21	10	100	0	45	577	15
22	10	100	120	45	589	13
23	10	100	60	-45	570	27
24	10	100	60	135	573	21
25	10	100	90	45	595	23

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

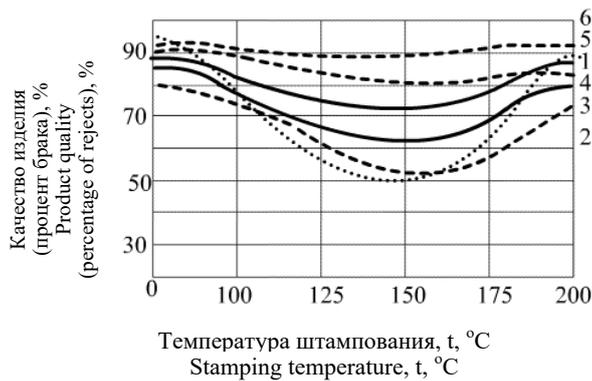


Рисунок 2. Зависимость качества штампованных изделий, изготовленных из древесины ольхи, от температуры и выдержки под давлением:

- 1 – продолжительность выдержки под давлением 0-2,5 с;
- 2 – продолжительность выдержки под давлением 2-5.0 с;
- 3 – продолжительность выдержки под давлением 10 с;
- 4 – продолжительность выдержки под давлением 20 с;
- 5 – продолжительность выдержки под давлением 30 с;
- 6 – продолжительность выдержки под давлением 60 с

Figure 2. Dependence of the quality of stamped products made of alder wood on temperature and holding under pressure: 1 – duration of holding under pressure 0-2.5 sec; 2 – exposure time under pressure 2-5.0 sec; 3 – exposure time under pressure 10 sec; 4 – duration of holding under pressure 20 sec; 5 – duration of holding under pressure 30 sec; 6 – holding time under pressure 60 sec

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's compositions

Под качеством изделий принимался процент брака, т.е. высокое качество изделий наблюдается при оптимальных температурах (рис. 2). Характер нижней плоскости готовых элементов зависит от исходной влажности заготовок. При влажности заготовок  $W = 3-4\%$  нижняя поверхность элемента остаётся плоской. До 10 % образцов имело незначительную стрелу прогиба радиусом не более 2-3 мм (рис. 3). При влажности 7-8 % эта поверхность стремится принять цилиндрическую форму с радиусом до 20-30 мм.

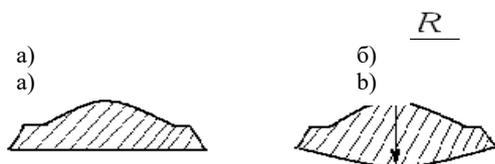


Рисунок 3. Характер нелицевой поверхности штампованного изделия: а)  $W = 3-4\%$ , б)  $W = 7-8\%$

Figure 3. The nature of the non-face surface of the stamped product: a)  $W = 3-4\%$ , b)  $W = 7-8\%$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's compositions

В ходе выполнения опытов было высказано мнение, что причинами образования трещин на поверхности древесины становится неравномерность распределения степени уплотнения древесины по объёму образца и низкая пластичность наружных слоёв древесины. В целях выравнивания степени уплотнения древесины в детали были проведены эксперименты по определению влияния размеров сечения и формы заготовок на качество поверхности деталей.

Эксперименты проводились с заготовками из ольхи при температуре 175 °С, времени прессования 10 с и влажности заготовки  $W = 7\%$ . Результаты представлены в табл. 2. Из табл. 2 следует, что количество трещин и их размеры снижаются по мере увеличения толщины образца, что свидетельствует о более полном (равномерном) распределению напряжений по его сечению. Анализ степени уплотнения древесины образца показал, что по мере увеличения его толщины разность степени «упрессовки» в результате неравномерного прессования уменьшается.

Так, если при толщине заготовки 5 мм степень уплотнения в верхней части профиля составила 0 %, а в нижней части 58 %, то при толщине заготовки 8 мм степень уплотнения соответственно составила 38 и 75 %.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что с повышением толщины заготовки улучшаются условия неравномерного штампования (рис. 4 и рис. 5) и, соответственно, улучшается качество поверхности, уменьшается количество трещин.

Когда прорисовано менее 50 % рельефа, то рельеф считали слабо прорисованным. Достаточно прорисован – 80...90 %. Однако повышение толщины заготовки приводит к расползанию образца по его нижней плоскости, т.е. к появлению облоя. Из проведённого опыта можно сделать вывод, что оптимальной толщиной заготовки является  $S = 7-8$  мм.

Таблица 2

Влияние размеров сечения и формы заготовок на качество поверхности штампованных изделий

Table 2

Influence of the cross-sectional dimensions and the shape of blanks on the surface quality of stamped products

Толщина заготовки, мм Thickness blanks, mm	Состояние лицевой поверхности Front surface condition			Примечание Note
	Количество и характер трещин, шт. Number and nature of cracks, pcs	Состояние рельефа Terrain state		
1	2	3	4	5
5,0	90	Кр.	Рельеф неполный, слабо прорисован	
6,0	90	Кр.	Рельеф недостаточно прорисован	
7,0	80	Ср.	Рельеф достаточно прорисован	
8,0	60	Ср.	Рельеф прорисован полностью	
8,5	60	Ср.	Рельеф прорисован полностью	Увеличение обля
9,0	49	Ср.	Рельеф прорисован полностью	Увеличение обля
10,0	47	Мелк.	Рельеф прорисован полностью	Увеличение обля

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Параллельные участки на рис. 4 означают неизменную степень уплотнения при штампования на горизонтальных участках штампованного элемента. Поскольку при толщине заготовки  $S = 7-8$  мм у готовых образцов наблюдается значительное количество трещин, появляющихся из-за разности уплотнения древесины образца по его сечению, появилась необходимость в изменении формы образ-

цов, которая так же, как и толщина, оказывает влияние на степень уплотнения. Количество ( $\mu$ ) и виды трещин при прессовании заготовок из древесины ольхи влажностью  $W = 5\%$  при температуре прессования  $175\text{ }^\circ\text{C}$  и времени прессования 10 с показаны в табл. 3.

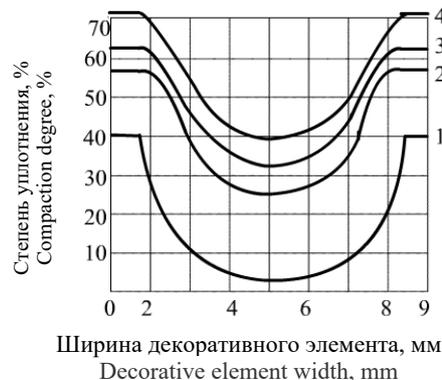


Рисунок 4. Распределение степени уплотнения образца декоративного элемента прямоугольного сечения в зависимости от толщины: 1-5 мм; 2-6 мм; 3-7 мм; 4-8 мм

Figure 4. Distribution of the degree of compaction of a sample of a decorative element of rectangular section depending on the thickness: 1-5 mm; 2-6 mm; 3-7 mm; 4-8 mm

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's compositions

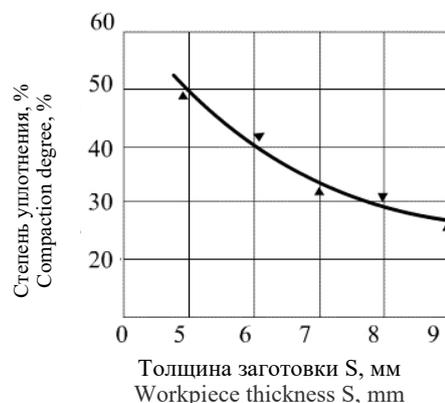


Рисунок 5. Зависимость разности степени уплотнения образца от толщины заготовки

Figure 5. Dependence of the difference in the degree of compaction of the sample on the thickness of the workpiece

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's compositions

Для каждой толщины заготовки при штампования необходима своя степень уплотнения, для

того чтобы обеспечить требуемое качество наружной поверхности штампованного изделия.

Данные табл. 3 показывают, что приближенные формы заготовок к трапецевидной или цилиндрической (вариант 5 и 6) снижает количество трещин, образующихся в результате разрыва древесины вдоль волокон, при этом появляются трещины из-за разрыва древесины поперёк волокон (вариант 6-8) вблизи основания выпуклой части профиля. Оптимальным вариантом является сечение заготовок с трапецевидной формой. Прделанные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что дальнейшее улучшение условий неравномерного штампования возможно при большей пластичности наружных слоёв древесины.

Размер трещин от 0,1 до 1 мм по расположению вдоль и перпендикулярно волокнам древесины. Для её повышения заготовки были подвергнуты обработке следующими веществами: вода, едкий натр, жидкий аммиак, карбамид. Наилучшие результаты были получены при обработке заготовок водой. Последующие эксперименты показали, что

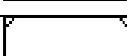
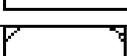
увлажнение наружных слоёв древесины заготовок способствует улучшению качества штампованных изделий у всех пород древесины. Однако оптимальные значения выдержки увлажнённых заготовок перед прессованием у различных пород древесины различные. Если для ольхи оптимальное значение выдержки находится в пределе до 1 минуты, то для осины время выдержки необходимо увеличить до нескольких минут. Опыты по увеличению влажности лицевой поверхности заготовок путём многократного нанесения холодной и горячей (кипящей) воды на холодные и предварительно нагретые заготовки успехов не имели. Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что наилучшие результаты даёт штампование древесины с предварительной однократной обработкой холодной водой. Одновременно по данным наблюдений было отмечено, что в процессе штампования заготовок, имеющих разную по сечению влажность (нижняя поверхность  $W = 4\%$ , а верхняя  $W$  до  $10\%$ ), состояние нижней поверхности после прессования улучшается.

Влияние формы заготовок на качество лицевой поверхности образцов

Таблица 3

Table 3

The influence of the shape of the blanks on the quality of the front surface of the samples

№ п/п No.	Форма сечения заготовок Sectional shape of blanks	Количество и характер трещин   Number and nature of cracks		
		%	размер трещин   crack size	Вид разрушения древесины Type of destruction of wood
1		80-90	$K_p$	(⊥)
2	 1 мм	70-75	$K_p$	(⊥)
3	 1,5 мм	50	$K_p$	(⊥)
4	 2 мм	40	$C_p$	(⊥)
5	 3 мм	5	Мелк	(⊥)
6		8-/30	Мелк	(⊥)/(-)
7		5-/30	Мелк	(⊥)/(-)
8		30	$C_p$	(-)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

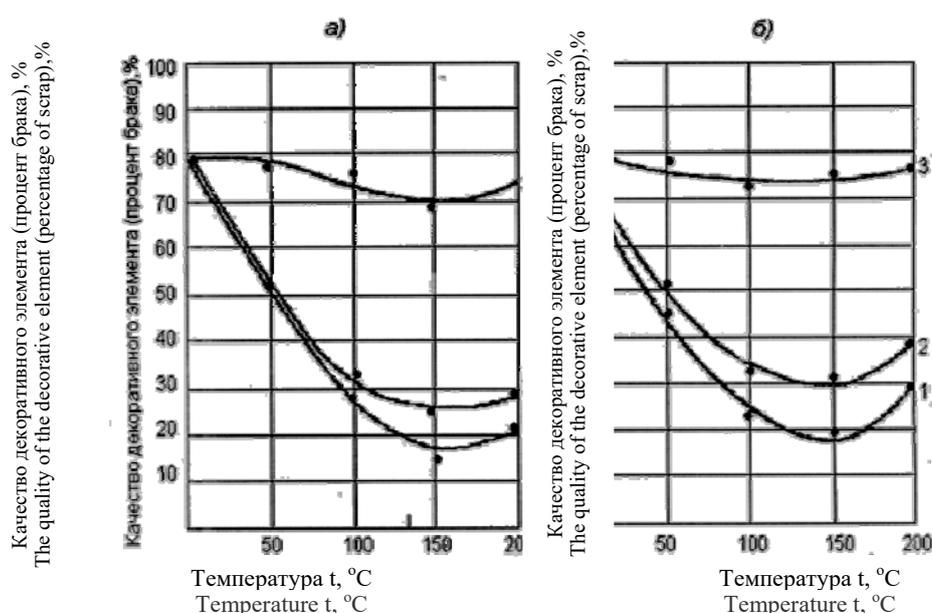


Рисунок 6. Изменение состояния штампованных изделий в зависимости от температуры прессования и времени выдержки для осины (а) и ольхи (б) при однократном увлажнении холодной водой: 1-10 с; 2-25 с; 3-40 с  
 Figure 6. Change in the state of stamped products depending on the pressing temperature and holding time for aspen (a) and alder (b) with a single moistening with cold water: 1-10 s; 2-25 s; 3-40 s

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's compositions

Исчезает покоробленность нижней полости декоративного элемента за счёт снижения напряжений в результате повышения пластичности наружных слоёв лицевой стороны заготовки.

Влияние температуры и времени выдержки под давлением на качество штампованных изделий, полученных из заготовок, предварительно увлажнённых холодной водой, исследовалось отдельно [10]. Влияние температуры и времени выдержки под давлением на качество штампованных изделий, полученных из заготовок, предварительно увлажнённых холодной водой, показано на рис. 6.

Процент брака можно ещё уменьшить с использованием, кроме отмеченных, других пластификаторов. Этот вопрос до конца не исследован. С использованием расчетных температурных коэффициентов деформативности [14] данные, полученные на образцах осины и тополя, усреднялись и обрабатывались на ЭВМ. По результатам опытов построена зависимость деформаций в мягколиственной древесине от действующих нагрузок и температуры (рис. 7). Процесс деформирования древесины исследовался при  $\sigma = \text{const}$  и  $\sigma = 0$ . Разница расчётных и экспериментальных значений темпе-

ратурных коэффициентов деформативности не превышает 5 %. Построенная зависимость реально отображает деформативное поведение древесины мягких пород при сжатии вдоль волокон.

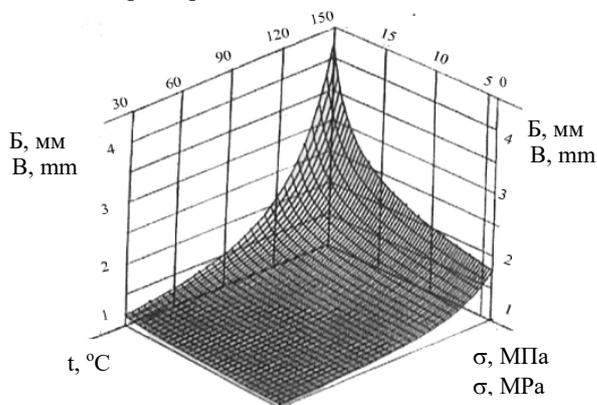


Рисунок 7. Зависимость деформаций в древесине мягких пород от нагрузки и температуры

Figure 7. Dependence of deformations in softwood on load and temperature

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's compositions

### Выводы (Заключение)

Решение задачи оптимизации позволило выявить следующие параметры процессов по деформированию древесины мягких пород: плотность в пределах  $400 \text{ кг/м}^3$ , температура процесса 156 градусов Цельсия. Из рассмотренных режимов нагружения древесины мягких пород при сжатии ее вдоль волокон оптимальным следует считать ступенчатый режим с подпрессовкой. Он дает возможность развить максимальные общие и остаточные деформации, равномерно распределяя мгновенные упругие деформации по всему циклу нагружения. Режим нагружения с непрерывно возрастающей нагрузкой является худшим, так как древесина в этом случае в большей степени проявляет упругие свойства и хрупкие, а пластичные – в меньшей. Режим с постоянной, длительно действующей нагрузкой менее предпочтителен, чем ступенчатый, так как в этом случае значительны упругие деформации в начале цикла нагружения. При высоких скоростях нагружения древесина мягких пород в большей степени проявляет свои упругие свойства, а при низких – пластические. При сжатии древесины целесообразно устанавливать длитель-

ность действия нагрузки до 1 минуты. В качестве поверхностных пластификаторов можно использовать воду, а также мочевиноформальдегидные и фенолоформальдегидные смолы, латексы и др., их применение может дать двойной эффект. В жидкой фазе они играют роль смазки и улучшают поверхностный слой древесины. При формовании с термодогревом (штамповании) необходим нагрев древесины или оснастки до температуры 80-100 °С, когда наблюдается наибольшая деформативность древесины мягких пород.

Выявлены доминирующие внешние факторы, увеличивающие деформативность древесины в требуемых пределах проведения технологических процессов разрезания и штампования. Точный расчёт необходимых усилий деформирования позволил получить срезки и деформированные элементы требуемого качества с меньшими энергоёмкостью и трудоёмкостью. Управляя выявленными законами контактного взаимодействия, с учётом действующих управляемых и неуправляемых факторов, удалось перейти к обоснованию параметров инструментов для разрезания и штампования, а также уточнить и дополнить разработанные в теоретических исследованиях режимы резания.

### Список литературы

1. Патент № 2726557 РФ, МПК В27В 33/02. Режущий диск для мягколиственной древесины : № 2019107993 : заявл. 20.03.2019 : опубл. 14.07.2020 / Ивановский Владимир Павлович, Платонов Алексей Дмитриевич, Волганкин Александр Михайлович, Недиков Роман Анатольевич ; патентообладатель(и): Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. 2020. eLIBRARY. Бюл. № 20.
2. Lulu X., Ye X., Baokang D. (et al.) In-situ anchoring of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZIF-67 dodecahedrons in highly compressible wood aerogel with excellent microwave absorption properties. *Materials & Design*, 182: 108006, ISSN 0264-1275, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108006>.
3. Zhe Q., Zefang X., Likun G. (et al.) (2019) Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 172: 43-48, ISSN 0266-3538, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>.
4. Safin R.R., Khasanshin R.R., Timerbaeva A.L., Safina A.V. (2015) Study of the physical and energy properties of fuel granules based on a thermomodified wood raw material. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 88(4): 958-961. DOI: 10.1007/s10891-015-1270-y.
5. Christian Brischke and Lone Ross Gobakken (2020) Protecting wood infrastructure and mass timber buildings. *Wood Material Science & Engineering*, 15:6, 325, DOI: 10.1080/17480272.2020.1799242.
6. Rahayu I., Darmawan W., Zaini L., Prihatini E. (2019) Characteristics of fast-growing wood impregnated with nanoparticles. *Journal of Forestry Research*; 31:1-9. DOI: 10.1007/s11676-019-00902-3.

7. Fomin A.A. Vibrational Motion of a Complex Mill under the Action of the Cutting Force. *Russian Engineering Research*. 2013;33(1): 57-60.
8. Grün K. Lexikon tropických Drevin – Prace yud Sv1. Praha, 1971. 332 s.
9. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F., Saprykina N.A. (2016) The development of equipment for the disposal of solid organic waste and optimization of its operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 142(1), 012095. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012095.
10. Шамаев В. А., Паринов Д. А., Полилов А. (2018) Исследование подшипников скольжения из модифицированной древесины для высоконагруженных узлов трения. *Журнал машиностроения и надежности*. 47: 168-172. DOI: 10.3103 / S1052618818020115.
11. Shamaev V., Parinov D., Medvedev I. (2018) Wood Modification by Pressing. *Engineering Studies*, Issue 3 (2), Volume 10. *Taylor & Francis*, 2018. pp. 708-718.
12. Shamaev V., Parinov D., Medvedev I. (2018) Study Of Modified Wood As A Bearing Material For Machine-Building. *International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*, *Advances in Engineering Research*, volume 158, pp. 478-482.
13. Shamaev V., Medvedev I., Parinov D., Shakirova O., Anisimov M. (2018) Investigation of modified wood as a material power transmission pole produced by self-pressing method. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, volume 60, № 2, 2018, pp. 25-32. DOI: 10.17423/afx.2018.60.2.02.
14. Brient J. A., Manning M. J., Freeman M. H. (2020) Copper naphthenate – protecting America’s infrastructure for over 100 years and its potential for expanded use in Canada and Europe, *Wood Material Science & Engineering*, 15:6, 368-376, DOI: 10.1080/17480272.2020.1837948.
15. Свиридов Л. Т. Основы научных исследований : учеб. пособие. Воронеж : ВГЛТА, 2003. 314 с.
16. Свидетельство 2009611214 РФ. Программа для расчета режимов резания древесины / Е. С. Хухрянская, А. В. Ивановский ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ВГЛТА». № 2008616255 ; заявл. 29.12.2008 ; опубл. 26.02.2009.

### References

1. Patent No. 2726557 RF, IPC B27B 33/02. Cutting disc for softwood: no.2019107993: app. 20.03.2019: publ. 07/14/2020 / Ivanovsky Vladimir Pavlovich, Platonov Alexey Dmitrievich, Volgankin Alexander Mikhailovich, Nedikov Roman Anatolyevich; Patent holder (s): Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov. 2020. eLIBRARY. Bul. No. 20.
2. Lulu X., Ye X., Baokang D. (et al.) In-situ anchoring of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZIF-67 dodecahedrons in highly compressible wood aerogel with excellent microwave absorption properties. *Materials & Design*, 182: 108006, ISSN 0264-1275, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108006>.
3. Zhe Q., Zefang X., Likun G. (et al.) (2019) Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 172: 43-48, ISSN 0266-3538, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>.
4. Safin R.R., Khasanshin R.R., Timerbaeva A.L., Safina A.V. (2015) Study of the physical and energy properties of fuel granules based on a thermomodified wood raw material. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 88(4): 958-961. DOI: 10.1007/s10891-015-1270-y.
5. Christian Brischke and Lone Ross Gobakken (2020) Protecting wood infrastructure and mass timber buildings. *Wood Material Science & Engineering*, 15:6, 325, DOI: 10.1080/17480272.2020.1799242.
6. Rahayu I., Darmawan W., Zaini L., Prihatini E. (2019) Characteristics of fast-growing wood impregnated with nanoparticles. *Journal of Forestry Research*; 31:1-9. DOI: 10.1007/s11676-019-00902-3.
7. Fomin A.A. Vibrational Motion of a Complex Mill under the Action of the Cutting Force. *Russian Engineering Research*. 2013;33(1): 57-60.

8. Grün K. Lexikon tropických Drevin – Prace yud Sv1. Praha, 1971. 332 s.
9. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F., Saprykina N.A. (2016) The development of equipment for the disposal of solid organic waste and optimization of its operation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 142(1), 012095. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012095.
10. Shamaev V.A., Parinov D.A., Polilov, A. (2018) Investigation of sliding bearings made of modified wood for highly loaded friction units. Journal of Mechanical Engineering and Reliability. 47.168-172. 10.3103 / S1052618818020115.
11. Shamaev V., Parinov D., Medvedev I. (2018) Wood Modification by Pressing. Engineering Studies, Issue 3 (2), Volume 10. Taylor & Francis, 2018. pp. 708-718.
12. Shamaev V., Parinov D., Medvedev I. (2018) Study Of Modified Wood As A Bearing Material For Machine-Building. International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018), Advances in Engineering Research, volume 158, pp. 478-482.
13. Shamaev V., Medvedev I., Parinov D., Shakirova O., Anisimov M. (2018) Investigation of modified wood as a material power transmission pole produced by self-pressing method. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, volume 60, No. 2, 2018, pp. 25-32. DOI: 10.17423 / afx.2018.60.2.02.
14. Brient J. A., Manning M. J., Freeman M. H. (2020) Copper naphthenate – protecting America’s infrastructure for over 100 years and its potential for expanded use in Canada and Europe, *Wood Material Science & Engineering*, 15:6, 368-376, DOI: 10.1080/17480272.2020.1837948.
15. Sviridov L. T. Fundamentals of scientific research: textbook. Voronezh: VGLTA, 2003. 314 p. (in Russian).
16. Certificate 2009611214 RF. The program for calculating the cutting modes of wood / E. S. Khukhryanskaya, A. V. Ivanovsky; applicant and patentee GOU VPO "VGLTA". No. 2008616255; app. 12/29/2008; publ. 02/26/2009.

### Сведения об авторах

✉ *Ивановский Владимир Павлович* – кандидат техн. наук, доцент кафедры древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087 e-mail: nppkvalitet@mail.ru.

*Жужукин Николай Викторович* – магистрант лесопромышленного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: n.zhuzhukin@yandex.ru.

*Сафаров Кишваршо Нурахмадович* – магистрант лесопромышленного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: shift\_1991-91@mail.ru.

### Information about the authors

✉ *Ivanovsky Vladimir Pavlovich* – Candidate of Engineering sciences, associate professor of the Department of wood science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: nppkvalitet@mail.ru.

*Zhuzhukin Nikolay Viktorovich* – Master's student of the Faculty of Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: n.zhuzhukin@yandex.ru.

*Safarov Kishvarsho nurakhmadovich* – Master's student of the Faculty of Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: shift\_1991-91@mail.ru.