

# АНИЗОТРОПНЫЕ УПРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСНЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2022 г. Тугба Йылмаз Айдын<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Университет прикладных наук Испарты,  
Испарта, Турция

\*e-mail: tugbayilmaz@isparta.edu.tr

Поступила в редакцию 26.02.2022; после доработки 27.05.2022

Принято к публикации 27.05.2022

О влиянии температуры и продолжительности воздействия на 12 констант упругости турецкой красной сосны до сих пор не сообщалось. В данной работе с помощью методов неразрушающего контроля исследовали влияние температуры (110, 160 и 210 °С) и длительности обработки (2, 5 и 8 ч) на модули Юнга, модули сдвига, коэффициенты Пуассона. Ультразвук (поперечная волна — 1 МГц, а продольная — 2,25 МГц) проходил по оси и под углом 45 ° к оси в образцах размерами около 20×20×20 мм. Скорости ультразвуковой волны (СУЗ) рассчитывали для определения диагональных и недиагональных элементов матрицы жесткости. Матрица податливости, которая использовалась для расчета упругих констант, была получена путем обратного преобразования матрицы жесткости. Согласно полученным результатам, последовательного увеличения или уменьшения упругих констант с увеличением продолжительности воздействия и величины самой температуры, как правило, не наблюдалось. Только  $E_L$  при 110 и 160 °С,  $G_{TL}$  при 110 °С, а также  $\nu RL$  и  $\nu LR$  при 210 °С показали последовательное уменьшение. Однако, согласно литературе, при обработке при низких температурах наблюдали некоторые улучшения, которые противоречат результатам данного исследования, особенно для значений модуля упругости. Например, при обработке 210 °С — 2 ч величины модулей увеличились, за исключением  $G_{TR}$ . То же самое верно и для 210 °С — 5ч, за исключением  $E_L$  и  $G_{TR}$ . Согласно результатам дисперсионного анализа, различия между средними значениями всех свойств статистически значимы, за исключением  $\nu LT$  и  $\nu RT$  ( $P > 0,05$ ). При сравнении с заявленными значениями имеются значительные различия между  $V_{LL}$  и  $E_L$ , в то время как для плотности все совпадает. Среднее значение  $V_{LL}$  немодифицированных образцов было примерно на 28,8 % ниже, чем заявленная скорость, и считается, что это может быть одной из причин низкого среднего динамического значения  $E_L$  (5792 МПа) немодифицированных образцов, чем заявленное статическое значение 9200 МПа, хотя в литературе говорится, что динамические значения обычно выше, чем статические.

*Ключевые слова:* красная сосна, ультразвук, константы упругости, термообработка.

DOI: 10.31857/S0130308222070028, EDN: BOBIDP

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Турецкая красная сосна является одним из местных видов в Средиземноморском регионе. Это один из основных видов деревьев, используемых при восстановлении лесов в данном регионе [1]. Кроме того, она является одним из основных источников древесины и древесных продуктов в Турции не только в производстве конструкционных строительных материалов, но и для производства целлюлозы, бумаги и т.д. Когда материал рассматривается как строительный, на первый план должны выходить физико-механические свойства. Однако, если рассматривать древесину как строительный материал, то порода, направление волокон, нагрузка (тип и продолжительность), содержание влаги, температура и наличие дефектов [2] являются одними из основных факторов, влияющих на механические свойства древесины. Действительно, в некоторых из них вызываются необратимые деформации, которые являются критическими для использования в качестве конструкционного материала. Например, при воздействии температуры на древесину наблюдаются как обратимые, так и необратимые эффекты. Но особенно высокие температуры и длительное воздействие оказывают негативное влияние на физические и механические свойства. Более того, механические свойства имеют тенденцию к снижению при повышении температуры, а чувствительность древесины к температуре высока во влажных условиях, когда повышение температуры вызывает снижение содержания влаги в древесине [2]. Поэтому для получения оптимальных свойств, подразумевая эстетический вид, несущую способность, срок службы и т.д., необходимы оптимальные параметры термообработки.

Взаимодействие с окружающей средой является основным механизмом для образования деградации в древесине или изделиях на ее основе. Взаимодействие между древесиной (или изделиями из древесины) и окружающей средой может быть ограничено или исключено различными способами, например, нанесением поверхностных покрытий или модификациями, такими как термическая обработка. Окраска древесины является одним из широко используемых, самых старых и

дешевых способов формирования консервирующего слоя, защищающего от внешних факторов. Однако покраска требует регулярного обслуживания в течение жизненного цикла древесины или деревянного изделия из-за образования трещин, впитывания влаги и потускнения поверхности. В частности, термообработка является одним из методов модификации древесины. Благодаря полученным улучшениям, термообработка древесины становится одним из основных и широко используемых коммерческих методов модификации.

К текущему моменту термообработке подвергалось большое разнообразие пород и определялись их свойства. Однако упругие свойства термообработанной турецкой красной сосны были оценены в ограниченном контексте следующим образом: температура (120, 150, 180 и 210 °C) и продолжительность (2, 5 и 8 ч) повлияли на продольный модуль Юнга ( $E_L$ ) при испытании на сжатие (ИС) с использованием экстензометра контактного типа [3, 4], при ультразвуковом (УЗ) контроле [4] — на модуль упругости (МУ) при изгибе [3], а температура (130, 180 и 230 °C) и продолжительность (2 и 8 ч) повлияли на МУ при изгибе [5]. Кроме того, работа Akyildiz и Ateş [6] — одно из немногих исследований, посвященных физическим свойствам термообработанной турецкой красной сосны. Авторы оценили влияние термообработки (130, 180 и 230 °C в течение 2 и 8 ч) на равновесную влажность (РВ), а значение РВ (14,8%) снизилось до 7,8 и 7,3 %, когда образцы подвергались воздействию 230 °C в течение 8 ч соответственно. Авторы заявили, что из-за высокого содержания смолы влияние термической обработки на турецкую красную сосну отличается в сравнении с другими видами древесины.

Помимо влияния термической обработки на константы упругости в следующих исследованиях касались некоторых физико-механических свойств турецкой красной сосны. Анатомические (количество лучей и ширина трахеид, ранней и поздней древесины), химические (соотношения лигнина, холоцеллюлозы и альфа-целлюлозы и т. д.) и волокнистые (длина и ширина волокон, ширина просвета и толщина клеточной стенки) свойства для четырех различных зон сообщались Ateş et al. [7]. Aydın [8] оценил образование смолы и провел ее анализ. Baysal и др. [9] выяснили свойства горения. Бекташ и др. [10] оценили влияние местообитания на прочность на сжатие (ПС), коэффициент прочности на разрыв (КПР) и прочность при растяжении (ПР). Göker et al. [11] оценили влияние углов спиральных зерен на плотность, усадку, точку насыщения волокна и максимальное содержание влаги (МСВ). Göker et al. [12] оценили влияние углов спиральных зерен на МУ при изгибе (6822—9806 МПа). Güntekin et al. [13] определили статический и динамический МУ с использованием трех различных классов бревен путем испытания на изгиб в трех точках и измерения волны напряжения соответственно. Güntekin et al. [14] с помощью линейного моделирования и искусственной нейронной сети предсказал МУ при изгибе пиломатериалов разных классов. Güntekin et al. [15] определили модули Юнга (МЮ) и коэффициенты Пуассона (КП) и модули сдвига (МС) для немодифицированной турецкой красной сосны (плотность 0,53 г/см<sup>3</sup> и 12,5 % МСВ). Aydın и Ciritcioğlu [16] определили модули сдвига с использованием ультразвука (1 МГц) с использованием многогранных образцов. Günay и Sönmez [17] определили модуль сдвига ( $G_{12}$ ), модуль Юнга ( $E_{33}$ ) и коэффициент Пуассона ( $\nu_{31}$ ) турецкой сосны. Однако авторы не упомянули, была ли это сосна турецкая или нет.

Shukla and Kamdem [18] сравнили различия физических (при сушке) и механических свойств (КПР, МУ и ПР) сосны красной для трех разных зон произрастания. МУ варьировался от 5,43 до 5,94 ГПа для сосны, произрастающей в Оскоде (Мичиган) и Манитобе (Массачусетс), и 9,5 и 11,2 ГПа для Канады и США соответственно в целом [19]. Эти значения сопоставимы со значениями, указанными вышеупомянутыми исследователями для турецкой красной сосны. Кроме того, ниже приведены некоторые исследования, проведенные для сосны красной. Gao et al. [20] рассмотрели влияние температурного диапазона (от -40 до 40) на скорость ультразвуковой волн (СУЗ) частоты 22 кГц, а также статические и динамические МУ. Newton [21] оценил взаимосвязь между скоростью волны продольного напряжения и динамической МУ и плотностью. Özşahin et al. [22] использовали метод анализа иерархии и многокритериальную оптимизацию на основе методов анализа относительных значений для отбора хвойных пород.

Так же имеется недавняя работа по определению упругих констант хвойных деревьев (Сосна лучистая) с использованием ультразвука (УЗ) [23]. Однако упругие свойства термообработанной турецкой красной сосны определялись в ограниченном количестве исследований, а полноупругие свойства не оценивались до сих пор. Кроме того, все физические, механические и химические характеристики сосны красной турецкой в значительной степени зависят от температуры [5]. Поэтому в этом исследовании была предпринята попытка выяснить влияние уровней продолжительности воздействия при трех различных значениях температуры на полные упругие свойства турецкой красной сосны с помощью неразрушающего контроля и оценки с использованием УЗ.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании изучали калабрийскую сосну или турецкую красную сосну. Бревна высотой до 1,5 м использовались для распиловки и подготовки реек. Заболонные участки досок использовались для подготовки кубических образцов. Как видно на рис. 1, для измерений были подготовлены образцы не менее  $20 \times 20 \times 20$  мм (по оси и с отклонением от оси на  $45^\circ$ ). Образцы последовательно готовились из реек, и каждая группа для конкретной температуры имела свои контрольные образцы для выяснения возможных изменений. Таким образом, средние показатели групп, подвергнутых температурной обработке, сравнивались внутри и между группами.

Сушильный шкаф (Nuve FN 500, Анкара, Турция) использовался для температурной обработки кубических образцов при трех различных уровнях температуры (110, 160 и 210 °C) и продолжительности воздействия (2, 5 и 8 ч). Некоторые образцы разломались на части, особенно при восьмичасовой выдержке при температуре 210 °C. Разломанные образцы были заменены последовательно вырезанными устойчивыми образцами. После температурной обработки для кондиционирования образцов применяли камеру влажности Memmert (Mettler+Co. KG, Швабах, Германия) при температуре  $20 \pm 1$  °C и относительной влажности 65 %. Затем рассчитывали плотность в соответствии со стандартом TS 2472 [24].

Ортотропные упругие параметры как функция температурной обработки определяли динамически с помощью распространения ультразвуковых волн в кубических образцах. Продольные 2,25 МГц и поперечные 1 МГц ультразвуковые волны распространялись и измерялось время пролета (ВП) для расчета СУЗ. Диагональные ( $C_{ii}$ ) и недиагональные ( $C_{ij}$  и  $C_{ji}$ ) элементы матрицы жесткости  $[C]$  (1) были рассчитаны по формулам, представленным в табл. 1. Следовательно, как представлено в [25], двенадцать упругих констант, зависящих от температуры, были определены с помощью матрицы соответствия  $[S]$  (2), которая является обратной матрицей жесткости.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $C_{ii}$  и  $C_{ij}$  — диагональные и недиагональные элементы матрицы жесткости соответственно.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{21}}{E_R} & -\frac{\nu_{31}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{32}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_L} & -\frac{\nu_{23}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $E_i$  и  $G_{ij}$  — модули Юнга и модули сдвига в главном направлении, а  $\nu_{ij}$  — коэффициент Пуассона.

Таблица 1

## Компоненты СУЗ и соответствующие уравнения для расчета элементов матрицы жесткости [26, 27]

Распространение-Поляризация	Тип волны		Уравнение для диагональных и недиагональных элементов
Ось ( <i>L</i> , <i>R</i> и <i>T</i> )	$V_{LL}$	Продольная	$C_{11} = C_{LL} = \rho V_{LL}^2$
	$V_{RR}$		$C_{22} = C_{RR} = \rho V_{RR}^2$
	$V_{TT}$		$C_{33} = C_{TT} = \rho V_{TT}^2$
	$V_{TR/RT}$	Поперечная (поперечная)	$C_{44} = C_{RT} = (\rho V_{RT}^2 + \rho V_{TR}^2)/2$
	$V_{LT/TL}$		$C_{55} = C_{LT} = (\rho V_{LT}^2 + \rho V_{TL}^2)/2$
	$V_{LR/RL}$		$C_{66} = C_{RL} = (\rho V_{RL}^2 + \rho V_{LR}^2)/2$
От оси ( <i>RT</i> 45°)	$V_{RT/RT}$	Квазипоперечная (Поперечная)	$(C_{23} + C_{44})n_2n_3 = \pm \sqrt{[(C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]}$
От оси ( <i>LT</i> 45°)	$V_{LT/TL}$		$(C_{13} + C_{55})n_1n_3 = \pm \sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{55}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{55}n_1^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]}$
От оси ( <i>LR</i> 45°)	$V_{LR/RL}$		$(C_{12} + C_{66})n_1n_2 = \pm \sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]}$

Примечание:  $\rho$ , кг/м — плотность древесины;  $V_{ii}$  — скорость продольной волны по направлению оси, м/с;  $V_{ij}$  — скорость поперечной волны по направлению оси с поляризации вдоль перпендикулярных осей, м/с;  $V_{ij45^\circ}$  — скорость квазипоперечной волны, измеряемая при смещении по плоскости на угол 45° [28], где  $V_\alpha$  — скорость квазипоперечной волны  $\alpha$  в плоскости *LR*,  $n_1 = \cos\alpha$ ,  $n_2 = \sin\alpha$ ,  $n_3 = 0$  для  $C_{23}$ ;  $V_\alpha$  — скорость квазипоперечной волны  $\alpha$  в плоскости *LT* и  $n_1 = \cos\alpha$ ,  $n_3 = \sin\alpha$ ,  $n_2 = 0$  для  $C_{13}$ ;  $V_\alpha$  — скорость квазипоперечной волны  $\alpha$  в плоскости *RT* и  $n^2 = \cos\alpha$ ,  $n_3 = \sin\alpha$ ,  $n_1 = 0$  для  $C_{12}$  [27].



Рис. 1. Изменение цвета образцов, подвергнутых трем различным температурам и временам выдержки.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения плотностей и СУЗ представлены в табл. 2. Плотности немодифицированных образцов варьировались от 0,49 до 0,51 г/см<sup>3</sup>. Согласно исследованиям, плотность (гр/см<sup>3</sup>) немодифицированной древесины турецкой красной сосны составляла 0,49—0,53 [11], 0,54 [3], 0,49—0,50 [4], 0,56 (12,7 % МС) [16], 0,5—0,62 (18—36 % МС) [13, 14] и 0,51 [10]. Как видно из таблицы, результаты данного исследования находились в диапазоне указанных значений. Ожидаемо, что плотность снижалась с повышением температуры, но длительная обработка при более высоких температурах вызывала ее интенсивное снижение. Более того, максимальное снижение (20,4 %) наблюдалось при 210 °С в течение 8 ч обработки, что примерно в два раза выше, чем по данным [4] для той же температуры и продолжительности.

Атеş и др. [5] сообщили, что плотность (0,53 г/см<sup>3</sup>) уменьшилась примерно на 15 % при обработке образцов при 230 °С (8 ч). Снижение плотности не превысило 5 % при 130 °С, в то время как при 180 °С относительное снижение составило более 5 %. Как и в данном исследовании, наблюдается, что при увеличении продолжительности воздействия влияние температуры становится более выраженным.

В отличие от плотности в плане тенденции к снижению с увеличением времени и температуры обработки, скорости продольной и поперечной УЗ волн продемонстрировали нестабильное поведение. Как видно из табл. 2, в группах наблюдалось как их уменьшение, так и их увеличение при увеличении продолжительности обработки. Такое поведение очевидно, особенно для  $V_{TT}$  (от 24,4 до -2,1 %) и  $V_{RT}$  (от 3,9 до -4,7 %). Наиболее выраженное положительное и отрицательное влияние температуры и продолжительности на СУЗ наблюдалось для  $V_{TT}$  (24,4 % @160 °С—2 ч) и  $V_{RT}$  (-17 % @210 °С—8 ч) соответственно. Наименьшее положительное и отрицательное влияние температуры и продолжительности на СУЗ наблюдалось для  $V_{LL}$  (0,1 % @110 °С—2 ч) и  $V_{RR}$  (-0,2 % @110 °С—2 ч) соответственно. Таким образом, более высокая температура и длительная экспозиция вызывали интенсивное влияние на СУЗ, но не линейно в положительную или отрицательную сторону. Yılmaz Aydın и Aydın [4] сообщили, что из продольных и поперечных СУЗ только  $V_{LL}$  термообработанной турецкой красной сосны имеет значения от 4847 (210 °С—8 ч) до 5520 (120 °С—5 ч) м/с. Действительно,  $V_{LL}$  значительно увеличилась (7,1 %) при обработке при 120 °С в течение 2 ч.

Таблица 2

Средние значения и коэффициенты вариации для плотности и СУЗ

Группы	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	СУЗ, м/с								
		$V_{LL}$	$V_{RR}$	$V_{TT}$	$V_{LR}$	$V_{LT}$	$V_{RT}$	$V_{LR45}$	$V_{LT45}$	$V_{RT45}$
110°С—С	491 [4]	3808 [4]	1908 [6]	1160 [6]	1296 [2]	1238 [2]	635 [18]	1432 [3]	1096 [3]	760 [9]
110°С—2 ч	484 [6] (-1.4)	3811 [3] (0.1)	1903 [7] (-0.2)	1292 [8] (11.4)	1299 [3] (0.3)	1230 [2] (-0.7)	694 [15] (9.3)	1421 [5] (-0.7)	1129 [4] (3)	762 [12] (0.3)
110°С—5 ч	480 [2] (-2.2)	3750 [4] (-1.5)	1914 [5] (0.3)	1208 [6] (4.2)	1320 [5] (1.9)	1232 [1] (-0.5)	609 [11] (-4)	1403 [7] (-2)	1101 [3] (0.5)	765 [6] (0.8)
110°С—8 ч	475 [4] (-3.2)	3670 [2] (-3.6)	1944 [5] (1.9)	1258 [8] (8.5)	1304 [2] (0.6)	1230 [2] (0.7)	605 [10] (-4.7)	1385 [5] (-3.2)	1111 [4] (1.4)	737 [8] (3)
160°С—С	505 [5]	3597 [8]	1890 [9]	1352 [10]	1353 [3]	1272 [4]	642 [23]	1367 [5]	1159 [5]	816 [10]
160°С—2 ч	486 [5] (-3.8)	3539 [6] (-1.6)	1952 [7] (3.3)	1682 [7] (24.4)	1337 [4] (-1.2)	1246 [2] (-2)	744 [16] (15.8)	1384 [6] (1.2)	1215 [5] (4.8)	831 [8] (1.9)
160°С—5 ч	450 [5] (-10.8)	3573 [7] (-0.7)	1977 [5] (4.6)	1324 [8] (-2.1)	1360 [5] (0.5)	1260 [3] (-1)	714 [18] (11.2)	1375 [4] (0.6)	1124 [4] (-3)	784 [7] (-3.9)
160°С—8 ч	455 [6] (-10.0)	3508 [8] (-2.5)	1955 [6] (3.4)	1437 [15] (6.3)	1385 [4] (2.4)	1279 [4] (0.5)	761 [14] (18.5)	1343 [8] (-1.7)	1126 [4] (-2.8)	787 [10] (-3.5)
210°С—С	505 [7]	3622 [4]	1801 [7]	1228 [8]	1309 [4]	1209 [3]	730 [14]	1320 [5]	1070 [5]	705 [5]
210°С—2 ч	489 [8] (-3.0)	3683 [5] (1.7)	1918 [9] (6.5)	1265 [13] (3)	1380 [7] (5.4)	1261 [6] (4.3)	726 [17] (-0.6)	1416 [7] (7.3)	1105 [7] (3.3)	746 [7] (5.8)
210°С—5 ч	465 [10] (-7.9)	3584 [9] (-1)	2030 [9] (12.7)	1345 [10] (9.6)	1398 [5] (6.8)	1301 [4] (7.6)	693 [18] (-5)	1484 [6] (12.5)	1154 [6] (7.8)	765 [8] (8.6)
210°С—8 ч	402 [10] (-20.4)	3444 [4] (-4.9)	1780 [12] (-1.2)	1314 [6] (7)	1345 [3] (2.7)	1268 [4] (4.9)	606 [22] (-17)	1377 [7] (4.4)	1113 [3] (4.1)	759 [6] (7.8)

Примечание: [ ] — коэффициент вариации, () — % отличия от контрольного значения.

Напротив, наибольшее снижение составило 7,8 % при обработке при 210 °С в течение 8 ч. Как видно из таблицы, наибольшее увеличение и уменьшение  $V_{LL}$  составило 1,7 % (210 °С—2 ч) и 4,9 % (210 °С—8 ч) соответственно. Более того, такого заметного положительного влияния продолжительности воздействия при относительно низких температурах (110 или 150 °С) в данном исследовании

не наблюдалось. Действительно, при сравнении скоростей  $V_{LL}$  в данном исследовании значительно ниже, чем сообщаемые значения. Например, среднее значение в данном исследовании примерно на 28,8 % ниже, чем заявленные значения. Эти значительные различия могут быть связаны с различием в насаждениях и условиях выращивания. Однако такие большие различия не наблюдались для скоростей поперечных волн. Например, зарегистрированные значения для  $V_{LR}$ ,  $V_{LT}$  и  $V_{RT}$  составляют 1408, 1306 и 666 м/с соответственно [16], а различия между целыми контрольными значениями данного исследования составляют -6,3, -5,1 и 0,4 % соответственно. Таким образом, скорости поперечных волн через ось сопоставимы, в то время как вне оси ( $V_{ij45^\circ}$ ) недоступны из-за отсутствия зарегистрированных значений. Как видно из таблицы, влияние продолжительности воздействия на скорость смещенной от оси поперечные УЗ волны является умеренным при температурах 110 и 160 °С, а при 210 °С — интенсивным. Максимальный положительный и отрицательный эффект (12,5 %) наблюдался для  $V_{LR45^\circ}$  при 210 °С в течение 5 ч и  $V_{RT45^\circ}$  при 160 °С в течение 5 ч соответственно. Однако, как и при распространении продольных и поперечных волн вдоль оси, линейного отрицательного или положительного влияния не наблюдалось, за исключением  $V_{LR45}$  и  $V_{RT45}$  — для температурного уровня 110 °С с увеличением продолжительности.

Средние значения модулей упругости представлены в табл. 3.  $E_L$ ,  $E_R$  и  $E_T$  варьировались от 4165 МПа (210 °С—8 ч) до 6356 МПа (110 °С—С), 956 МПа (210 °С—8 ч) до 1415 МПа (110 °С—С) и 512 МПа (210 °С—8 ч) до 858 МПа (160 °С—2 ч) соответственно. Зарегистрированные значения модулей Юнга (12,5 % МС), определенные методом ИС, составляют 9200, 975 и 672 МПа соответственно [15]. Guntekin et al. [3] сообщили о средних значениях 10111 МПа (2 ч), 13022 МПа (8 ч) и 17093 МПа (5 ч)  $E_L$  для контрольных образцов и 11145 МПа (210 °С—8 ч) — 20104 МПа (120 °С—5 ч) для условной выборки, рассчитанных методом ИС. Авторы также сообщили о влиянии термообработки на средние значения МУ при изгибе: 8181 МПа (2 ч), 10519 МПа (8 ч) и 12365 МПа (5 ч) для контрольных образцов и от 8034 МПа (180 °С—2 ч) до 13584 МПа (120 °С—5 ч) для условной выборки. Yılmaz Aydın и Aydın [4] сообщили о средних значениях 13263 МПа и 8566 МПа для контрольных образцов, полученных методом УЗ и ИС соответственно. Авторы также сообщили о влиянии термообработки на динамические и статические значения  $E_L$  в диапазоне 10843 МПа (210 °С—8 ч) и 15009 МПа (120 °С—С), 7359 МПа (210 °С—8 ч) и 9622 МПа (150 °С—5 ч) соответственно. Кроме того, при сравнении самых высоких и самых низких значений в данного исследования они значительно ниже.

Таблица 3

Средние значения и коэффициенты вариации, отличия для модулей

Группы	Модуль Юнга, МПа			Модуль сдвига, МПа		
	$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{TR}$	$G_{TL}$	$G_{LR}$
110°С—С	6356 [5]	1415 [18]	540 [16]	203 [35]	752 [2]	824 [5]
110°С—2 ч	6122 [10] (-3.7)	1266 [25] (-10.5)	583 [20] (8)	239 [31] (17.5)	733 [8] (-2.5)	819 [10] (-0.6)
110°С—5 ч	5780 [5] (-9.1)	1331 [17] (-5.9)	557 [12] (3.1)	181 [23] (-11.1)	729 [3] (-3.1)	837 [9] (1.6)
110°С—8 ч	5432 [7] (-14.5)	1222 [16] (-13.6)	542 [14] (0.3)	175 [20] (-13.6)	719 [5] (-4.4)	808 [4] (-2)
160°С—С	5520 [13]	1339 [24]	721 [21]	219 [47]	818 [8]	926 [9]
160°С—2 ч	4912 [18] (-11)	1201 [17] (-10.3)	858 [17] (19)	275 [31] (25.5)	754 [4] (-7.8)	869 [9] (-6.2)
160°С—5 ч	4768 [16] (-13.6)	1217 [14] (-9.1)	577 [13] (-20)	237 [37] (8.1)	715 [6] (-12.6)	833 [9] (-10.1)
160°С—8 ч	4504 [22] (-18.4)	1140 [14] (-14.9)	631 [23] (-12.5)	269 [28] (22.8)	744 [9] (-9.1)	871 [6] (-6)
210°С—С	5500 [5]	1114 [19]	531 [11]	272 [25]	740 [11]	867 [11]
210°С—2 ч	5639 [9] (2.5)	1271 [18] (14.1)	565 [28] (6.4)	264 [33] (-2.9)	785 [20] (6.1)	940 [20] (8.4)
210°С—5 ч	5398 [27] (-1.9)	1310 [17] (17.6)	584 [27] (10.1)	236 [42] (-13)	787 [12] (6.3)	915 [17] (5.5)
210°С—8 ч	4165 [11] (-24.3)	956 [15] (-14.2)	512 [20] (-3.6)	156 [45] (-42.5)	649 [14] (-12.3)	728 [12] (-16.1)

Примечание: [ ] — коэффициент вариации, () — % отличия от контрольного значения.

При умеренной обработке МУ, по-видимому, увеличивается, в то время как интенсивная обработка приводит к уменьшению [29]. Однако за исключением некоторых случаев (например,

$E_T$  @110 °С), ни значения модулей Юнга и сдвига в целом не увеличились, даже если образцы были обработаны при 110 и 160 °С. Напротив, умеренная продолжительность (особенно 2 ч) при высокой температуре (210 °С) обеспечила некоторое увеличение, но не самое высокое среди всех.

По данным Esteves и Pereira [29], влияние термообработки на МУ незначительно по сравнению с другими прочностными свойствами. То же самое особенно верно для значений модулей, когда учитывалось высокое снижение (42,5 %) в  $G_{TR}$ .

Как известно из литературы, упругие технические параметры, предсказанные по US, обычно выше, чем статически определенные, но  $E_L$  и  $E_T$  в данном исследовании примерно на 37 и 11 % ниже, а  $E_R$  примерно на 32 % выше, чем статические значения, указанные в [15]. Плотность и СУЗ являются двумя основными определяющими факторами для расчета динамических упругих свойств. Как уже упоминалось ранее, плотность образцов находится в соответствии с приведенными значениями. Однако предполагается, что примерно на 29 % более низкие значения СУЗ в данной работе являются существенным фактором для значительного расхождения расчетных значений  $E_L$  от заявленных значений  $E_L$  или МУ при изгибе. Кроме того, как видно из табл. 3, в этих исследованиях также сообщалось о подобном нестабильном поведении при воздействии температуры и продолжительности воздействия.

Зарегистрированные значения МУ для пиломатериалов из турецкой красной сосны классов 1, 2 и 3 (среднее значение 27 % МСВ) варьировались от 7299 до 10760 МПа и от 7169 до 11377 МПа, полученные при испытании на изгиб и волной сжатия соответственно [13], а средние значения МУ при изгибе пиломатериалов классов 1, 2 и 3 составляли 11555, 9974 и 8372 МПа соответственно [14]. При сравнении с  $E_L$  данного исследования даже значения немодифицированных образцов заметно ниже. Однако следует учитывать, что способы получения данных, такие как инструменты и средства для измерений, могут играть решающую роль.

Как видно из табл. 3, модули сдвига ( $G_{LR}$ ,  $G_{TL}$  и  $G_{TR}$ ) варьируются от 728 МПа (210 °С—8 ч) до 940 МПа (210 °С—2 ч), 649 МПа (210 °С—8 ч) до 818 МПа (160 °С—С) и 156 МПа (210 °С—8 ч) до 275 МПа (160 °С—2 ч) соответственно. Зарегистрированные значения динамических модулей (около 12,5 % МСВ), рассчитанные по УЗ, составляют 1108 МПа [16] и 1150 МПа [15] для  $G_{LR}$ , 952 МПа [16] и 850 МПа [15] для  $G_{LT}$ , 248 МПа [16] и 235 МПа [15] для  $G_{RT}$  соответственно. Средние значения модулей для контрольных образцов примерно на 21,3 и 24,1 %, 19,3 и 9,7 %, 6,7 и 1,6 % ниже, чем значения, указанные в [16] и [15] соответственно.

Как и в случае с модулями Юнга, стабильное положительное и отрицательное влияние продолжительности на модули сдвига не наблюдалось ни внутри, ни между температурными диапазонами, за исключением 110 °С для  $G_{TL}$  и 210 °С для  $G_{TR}$ . Как на  $G_{TL}$ , так и на  $G_{TR}$  при температурах 110 и 210 °С увеличение продолжительности оказывало отрицательное влияние. Более того, среди значений модуля упругости  $G_{TR}$  является наиболее подверженным влиянию температуры и продолжительности упругим параметром, примерно на 42,5 % (210 °С—8 ч) уменьшение и 25,5 % (160 °С—2 ч) увеличение.

Средние значения коэффициентов Пуассона представлены в табл. 4. Средние значения  $\nu RL$ ,  $\nu TL$ ,  $\nu LR$ ,  $\nu TR$ ,  $\nu LT$  и  $\nu RT$  для контрольных образцов составляют 0,117, 0,047, 0,507, 0,270, 0,467 и 0,580 соответственно. Описанные коэффициенты Пуассона турецкой красной сосны изменяются в конкретном диапазоне [15], а различия между коэффициентами колеблются от -29,7 до 65 %. Как видно из таблицы, вместо линейных изменений (за исключением  $\nu RL$  и  $\nu LR$ ) при увеличении продолжительности воздействия в пределах температурных уровней наблюдалось аналогичное флуктуационное поведение. Такие неравномерные реакции на влияние температуры и продолжительности выдержки затрудняют сделать четкие выводы, как и для модулей упругости. Однако среди упругих констант, в отличие от модулей Юнга и сдвига, наибольшая разница (увеличение на 109,4 %) для коэффициентов Пуассона была рассчитана для  $\nu TL$  при 160 °С—2 ч вместо интенсивной обработки. С другой стороны, наибольшее уменьшение (45,2 %) было определено для  $\nu LR$ , который несколько линейно изменялся под влиянием обработки, как для  $\nu RL$ . Однако проводить сравнение с противоположным поведением непросто из-за сложной полярно-ортотропной природы древесины, даже образцы были подготовлены с минимальной кольцевой кривизной, углом наклона фибрилл и т.д.

Результаты дисперсионного анализа для средних значений свойств представлены в табл. 5. Даже колебания значений очевидны, за исключением некоторых свойств, влияние температуры и продолжительности воздействия на упругие константы было значительным, кроме  $\nu LT$  и  $\nu RT$  ( $P > 0,05$ ), как видно из таблицы. Кроме того, существуют статистически значимые различия в средних значениях и результаты многогранного теста Дункана (табл. 6—8) показали, какие средние значения различны.

Таблица 4

## Средние значения и коэффициенты вариации коэффициента Пуассона

Группы	Коэффициент Пуассона					
	$\nu_{RL}$	$\nu_{TL}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{TR}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{RT}$
110°C–C	0.11 [31]	0.04 [39]	0.47 [22]	0.22 [35]	0.45 [35]	0.57 [31]
110°C–2 ч	0.09 [61] (–17.9)	0.05 [68] (28.3)	0.43 [59] (–8.6)	0.30 [39] (37.1)	0.51 [65] (12.4)	0.62 [33] (9.7)
110°C–5 ч	0.12 [39] (11.7)	0.04 [46] (3.9)	0.54 [43] (13.9)	0.24 [30] (8.5)	0.42 [52] (–6.5)	0.56 [25] (–1.9)
110°C–8 ч	0.13 [32] (18.6)	0.04 [58] (1.4)	0.57 [31] (20.5)	0.31 [25] (38.3)	0.37 [55] (–18.2)	0.68 [18] (19.3)
160°C–C	0.13 [39]	0.05 [49]	0.53 [43]	0.27 [37]	0.41 [44]	0.51 [35]
160°C–2 ч	0.09 [42] (–30.7)	0.11 [44] (109.4)	0.37 [44] (–30.6)	0.42 [25] (52)	0.60 [27] (47.8)	0.59 [25] (15.9)
160°C–5 ч	0.14 [36] (9.3)	0.05 [39] (4)	0.54 [32] (2.8)	0.29 [25] (6.6)	0.45 [36] (9.9)	0.61 [20] (19.8)
160°C–8 ч	0.13 [42] (4.7)	0.08 [40] (49.3)	0.50 [26] (–5.8)	0.33 [30] (22.2)	0.55 [31] (35.9)	0.60 [20] (19.1)
210°C–C	0.11 [56]	0.05 [44]	0.52 [47]	0.32 [22]	0.54 [37]	0.66 [11]
210°C–2 ч	0.09 [66] (–12.7)	0.06 [53] (10.2)	0.41 [57] (–20.4)	0.30 [23] (–7.4)	0.58 [40] (6.3)	0.67 [13] (1.9)
210°C–5 ч	0.08 [50] (–23.4)	0.05 [34] (2.6)	0.30 [38] (–41.7)	0.32 [17] (0.2)	0.49 [32] (–9.3)	0.74 [18] (12.3)
210°C–8 ч	0.07 [50] (–37.1)	0.08 [48] (51.4)	0.28 [47] (–45.2)	0.30 [19] (–6.1)	0.62 [32] (14.2)	0.58 [28] (–11.3)
[15] СТ– 12.5% МС	0.082 (–29.7)*	0.077 (65)	0.48 (–5.3)	0.37 (37)	0.49 (5)	0.66 (13.8)

Примечание: [ ] — коэффициент вариации, ( ) — % отличия от контрольного значения и \* — % отличия среднего от контрольного значения.

Таблица 5

## Результаты дисперсионного анализа для плотности, СУЗ, и упругих констант

Свойство		F	Sig.
Плотность		8.300	0.000
Продольная СУЗ	$V_{LL}$	2.785	0.003
	$V_{RR}$	2.076	0.028
	$V_{TT}$	10.810	0.000
Поперечная СУЗ	$V_{LR}$	3.447	0.000
	$V_{LT}$	3.582	0.000
	$V_{RT}$	2.297	0.014
Квазипоперечная СУЗ	$V_{LR45^\circ}$	2.531	0.007
	$V_{LT45}$	4.615	0.000
	$V_{RT45}$	2.535	0.007
Модули Юнга	$E_L$	7.202	0.000
	$E_R$	2.561	0.006
	$E_T$	6.259	0.000
Модули сдвига	$G_{TR}$	2.498	0.008
	$G_{TL}$	3.012	0.002
	$G_{LR}$	3.288	0.001
Коэффициенты Пуассона	$\nu_{RL}$	2.182	0.020
	$\nu_{TL}$	5.000	0.000
	$\nu_{LR}$	2.337	0.013
	$\nu_{TR}$	3.098	0.001
	$\nu_{LT}$	1.454	0.160
	$\nu_{RT}$	1.752	0.072

## Группы гомогенности Дункана (ГГД) для плотности и СУЗ

Группы	Плотность	ГГД	Группы	$V_{LL}$	ГГД	Группы	$V_{RR}$	ГГД	Группы	$V_{TT}$	ГГД	Группы	$V_{LR}$	ГГД
210°C-8ч	402	a	210°C-8ч	3444	a	210°C-8ч	1780	a	110°C-C	1160	a	110°C-C	1296	a
160°C-5ч	450	b	160°C-8ч	3508	ab	210°C-C	1801	bc	110°C-5ч	1208	ab	110°C-2ч	1299	ab
160°C-8ч	455	bc	160°C-2ч	3539	abc	160°C-C	1890	abc	210°C-C	1228	abc	110°C-8ч	1304	ab
210°C-5ч	465	bcd	160°C-5ч	3573	abc	110°C-2ч	1903	abc	110°C-8ч	1258	abc	210°C-C	1309	ab
110°C-8ч	475	bcde	210°C-5ч	3584	abc	110°C-C	1908	abc	210°C-2ч	1265	abc	110°C-5ч	1320	abc
110°C-5ч	480	bcde	160°C-C	3597	abcd	110°C-5ч	1914	abc	110°C-2ч	1292	bc	160°C-2ч	1337	abcd
110°C-2ч	484	cde	210°C-C	3622	abcd	210°C-2ч	1918	abc	210°C-8ч	1314	bcd	210°C-8ч	1345	abcd
160°C-2ч	486	cde	110°C-8ч	3670	bcd	110°C-8ч	1944	bc	160°C-5ч	1324	bcd	160°C-C	1353	abcd
210°C-2ч	489	de	210°C-2ч	3683	bcd	160°C-2ч	1952	bc	210°C-5ч	1345	cd	160°C-5ч	1360	bcd
110°C-C	491	de	110°C-5ч	3750	cd	160°C-8ч	1955	bc	160°C-C	1352	cd	210°C-2ч	1380	cd
210°C-C	505	e	110°C-C	3808	d	160°C-5ч	1977	c	160°C-8ч	1437	d	160°C-8ч	1385	d
160°C-C	505	e	110°C-2ч	3811	d	210°C-5ч	2030	c	160°C-2ч	1682	e	210°C-5ч	1398	d
Sig. a:1, b:0.06, c:0.05, d:0.109, e:0.07			a: 0.12, b: 0.13, c: 0.07, d:0.06			a: 0.08, b: 0.06, c: 0.09			a: 0.11, b: 0.09, c: 0.07, d:0.06, e:1			a: 0.07, b: 0.06, c: 0.06, d:0.05		
Группы	$V_{LT}$	ГГД	Группы	$V_{RT}$	ГГД	Группы	$V_{LR45^\circ}$	ГГД	Группы	$V_{LT45^\circ}$	ГГД	Группы	$V_{RT45^\circ}$	ГГД
210°C-C	1209	a	110°C-8ч	605	a	210°C-C	1320	a	210°C-C	1070	a	210°C-C	705	a
110°C-2ч	1230	ab	210°C-8ч	606	a	160°C-8ч	1343	ab	110°C-C	1096	ab	110°C-8ч	737	ab
110°C-8ч	1230	ab	110°C-5ч	609	a	160°C-C	1367	ab	110°C-5ч	1101	abc	210°C-2ч	746	ab
110°C-5ч	1232	ab	110°C-C	635	ab	160°C-5ч	1375	ab	210°C-2ч	1105	abcd	210°C-8ч	759	abc
110°C-C	1238	abc	160°C-C	642	abc	210°C-8ч	1377	ab	110°C-8ч	1111	abcd	110°C-C	760	abc
160°C-2ч	1246	abc	210°C-5ч	693	abc	160°C-2ч	1384	ab	210°C-8ч	1113	abcd	110°C-2ч	762	abc
160°C-5ч	1260	bcd	110°C-2ч	694	abc	110°C-8ч	1385	ab	160°C-5ч	1124	abcd	110°C-5ч	765	abcd
210°C-2ч	1261	bcd	160°C-5ч	714	abc	110°C-5ч	1403	abc	160°C-8ч	1126	abcd	210°C-5ч	765	abcd
210°C-8ч	1268	bcd	210°C-2ч	726	abc	210°C-2ч	1416	bc	110°C-2ч	1129	bcd	160°C-5ч	784	bcd
160°C-C	1272	bcd	210°C-C	730	abc	110°C-2ч	1421	bc	210°C-5ч	1154	cd	160°C-8ч	787	bcd
160°C-8ч	1279	cd	160°C-2ч	744	bc	110°C-C	1432	bc	160°C-C	1159	d	160°C-C	816	cd
210°C-5ч	1301	d	160°C-8ч	761	c	210°C-5ч	1484	c	160°C-2ч	1215	e	160°C-2ч	831	d
Sig. a: 0.1, b: 0.07, c: 0.07, d:0.06			a: 0.05, b: 0.09, c: 0.06			a:0.07, b:0.05,c:0.06			a: 0.05, b: 0.26, c: 0.07, d:0.06, e:1			a: 0.09, b: 0.16, c: 0.11, d:0.06		

Таблица 7

## Группы гомогенности Дункана для модулей

Группы	$E_L$	ГД	Группы	$E_R$	ГД	Группы	$E_T$	ГД
210°C–8ч	4165	a	210°C–8ч	956	a	210°C–8ч	512	a
160°C–8ч	4504	ab	210°C–C	1114	ab	210°C–C	531	a
160°C–5ч	4768	abc	160°C–8ч	1140	ab	110°C–C	540	a
160°C–2ч	4912	bcd	160°C–2ч	1201	bc	110°C–8ч	542	a
210°C–5ч	5398	cde	160°C–5ч	1217	bc	110°C–5ч	557	a
110°C–8ч	5432	cde	110°C–8ч	1222	bc	210°C–2ч	565	a
210°C–C	5500	cde	110°C–2ч	1266	bc	160°C–5ч	577	a
160°C–C	5520	cde	210°C–2ч	1271	bc	110°C–2ч	583	a
210°C–2ч	5639	def	210°C–5ч	1310	bc	210°C–5ч	584	a
110°C–5ч	5780	ef	110°C–5ч	1331	bc	160°C–8ч	631	ab
110°C–2ч	6122	ef	160°C–C	1339	bc	160°C–C	721	b
110°C–C	6356	f	110°C–C	1415	c	160°C–2ч	858	c
Sig. a:0.1, b:0.26, c:0.05, d:0.06, e:0.07, f:0.06			a:0.11, b:0.08, c:0.1			a:0.07, b:0.11, c:1		
Группы	$G_{TR}$	ГД	Группы	$G_{TL}$	ГД	Группы	$G_{LR}$	ГД
210°C–8ч	156	a	210°C–8ч	649	a	210°C–8ч	728	a
110°C–8ч	175	a	160°C–5ч	715	ab	110°C–8ч	808	ab
110°C–5ч	181	a	110°C–8ч	719	ab	110°C–2ч	819	abc
110°C–C	203	ab	110°C–5ч	729	b	110°C–C	824	abcd
160°C–C	219	ab	110°C–2ч	733	b	160°C–5ч	833	bcd
210°C–5ч	236	ab	210°C–C	740	bc	110°C–5ч	837	bcde
160°C–5ч	237	ab	160°C–8ч	744	bc	210°C–C	867	bcde
110°C–2ч	239	ab	110°C–C	752	bc	160°C–2ч	869	bcde
210°C–2ч	264	b	160°C–2ч	754	bc	160°C–8ч	871	bcde
160°C–8ч	269	b	210°C–2ч	785	bc	210°C–5ч	915	cde
210°C–C	272	b	210°C–5ч	787	bc	160°C–C	926	de
160°C–2ч	275	b	160°C–C	818	c	210°C–2ч	940	e
Sig. a:0.05, b:0.1			a:0.06, b:0.09, c:0.05			a:0.06, b:0.25, c:0.08, d:0.06, e:0.05		

Взаимозависимости между тремя параметрами из представленных (условия обработки, плотность, СУЗ, упругие модули, коэффициент Пуассона) показаны в виде трехмерного графика на рис. 2–4.

Из-за множества факторов, таких как различные используемые средства, отсутствие стандартов и т.д., полученные упругие константы могут сильно различаться. Сложности, возникающие при измерениях и расчетах, также могут играть решающую роль. Также, позиционирование (распространение и поляризация, особенно для поперечных волн) и приложенное давление на преобразователи [30] могут вызвать дифракцию при использовании без зажимного инструмента для достижения стандартизированных приложений. Однако двумя основными факторами, влияющими на свойства древесины, являются МСВ и температура. Более того, МСВ древесины значительно снижается при термической обработке, что может оказать значительное влияние на измерения распространения ультразвуковых волн [31], а распространение волн становится сложным явлением из-за полярной ортотропной структуры [32]. Действительно, динамически определенные значения имеют значительные различия между механически определенными. И можно предположить, что при интерпретации динамических результатов следует учитывать совместное влияние температурной обработки, зависящей от продолжительности, и свойств распространения.

Как сообщили Ramage et al. [33], анатомические и химические свойства древесины изменяются под воздействием термической модификации. К химическим изменениям относятся образова-

Группы гомогенности Дункана для коэффициента Пуассона

Группы	$\nu_{RL}$	ГД	Группы	$\nu_{TL}$	ГД	Группы	$\nu_{LR}$	ГД
210°C–8ч	0,07	a	110°C–8ч	0,04	a	210°C–8ч	0,3	a
210°C–5ч	0,08	ab	110°C–С	0,04	a	210°C–5ч	0,3	ab
110°C–2ч	0,09	abc	110°C–5ч	0,04	a	160°C–2ч	0,4	abc
160°C–2ч	0,09	abc	110°C–2ч	0,05	ab	210°C–2ч	0,4	abc
210°C–2ч	0,09	abc	160°C–С	0,05	abc	110°C–2ч	0,4	abc
210°C–С	0,11	abc	210°C–С	0,05	abc	110°C–С	0,5	abc
110°C–С	0,11	abc	210°C–5ч	0,05	abc	160°C–8ч	0,5	bc
110°C–5ч	0,12	bc	160°C–5ч	0,05	abc	210°C–С	0,5	c
110°C–8ч	0,13	bc	210°C–2ч	0,06	abc	160°C–С	0,5	c
160°C–С	0,13	bc	160°C–8ч	0,08	bc	110°C–5ч	0,5	c
160°C–8ч	0,13	c	210°C–8ч	0,08	c	160°C–5ч	0,5	c
160°C–5ч	0,14	c	160°C–2ч	0,11	d	110°C–8ч	0,6	c
Sig. a:0.13, b:0.08, c:0.05			a:0.19, b:0.05, c:0.08, d:1			a:0.07, b:0.05, c:0.06		
Группы	$\nu_{TR}$	ГД	Группы	$\nu_{LT}$	ГД	Группы	$\nu_{RT}$	ГД
110°C–С	0,22	a	110°C–8ч	0,37	a	160°C–С	0,5	a
110°C–5ч	0,24	ab	160°C–С	0,41	ab	110°C–5ч	0,6	ab
160°C–С	0,27	abc	110°C–5ч	0,42	ab	110°C–С	0,6	abc
160°C–5ч	0,29	abc	160°C–5ч	0,45	ab	210°C–8ч	0,6	abc
210°C–2ч	0,3	abc	110°C–С	0,45	ab	160°C–2ч	0,6	abc
110°C–2ч	0,3	abc	210°C–5ч	0,49	ab	160°C–8ч	0,6	abc
210°C–8ч	0,3	abc	110°C–2ч	0,51	ab	160°C–5ч	0,6	abc
110°C–8ч	0,31	abc	210°C–С	0,54	ab	110°C–2ч	0,6	abc
210°C–С	0,32	bc	160°C–8ч	0,55	ab	210°C–С	0,7	abc
210°C–5ч	0,32	bc	210°C–2ч	0,58	ab	210°C–2ч	0,7	bc
160°C–8ч	0,33	c	160°C–2ч	0,6	b	110°C–8ч	0,7	bc
160°C–2ч	0,42	d	210°C–8ч	0,62	b	210°C–5ч	0,7	c
Sig. a:0.07, b:0.07, c:0.2, d:1			a:0.07, b:0.06			a:0.06, b:0.14, c:0.05		

ние уксусной кислоты, деградация гемицеллюлозы, образование новых связей лигнина и повышение кристалличности целлюлозы. Деградация гемицеллюлозы приводит к низкой гигроскопичности, устойчивости к грибкам и высокой стабильности размеров. Кроме того, новые связи лигнина также вызывают высокую стабильность размеров. Все это отвечает за долговечность древесины. К анатомическим изменениям относятся появление радиальных трещин и увеличение пористости. Однако угол наклона фибрилл не изменяется. Если рассматривать механические свойства термообработанной древесины, то деградация гемицеллюлозы и радиальные трещины являются причиной низких пределов прочности при изгибе и растяжении. Напротив, новые связи лигнина, увеличение кристалличности целлюлозы и неизменный угол наклона фибрилл ответственны за увеличение ПС и жесткости в продольном направлении. Также, исчерпывающие данные об изменениях в древесине при термообработке были представлены Esteves и Pereira [29], и авторы заявили, что вещество становится менее эластичным, а микрофибриллы целлюлозы теряют свои способности к расширению при укрупнении молекул. Эти изменения в структуре древесины обуславливают стабильность размеров.

Стабильность является одним из основных требований при обработке древесины, а термическая обработка при соответствующей температуре и продолжительности обеспечивает стабильность древесного материала без каких-либо потерь в механических и химических свойствах [5]. Green [2] заявил, что длительное воздействие высоких температур может привести к невозможности восстановления механических свойств. Согласно результатам данного исследования,

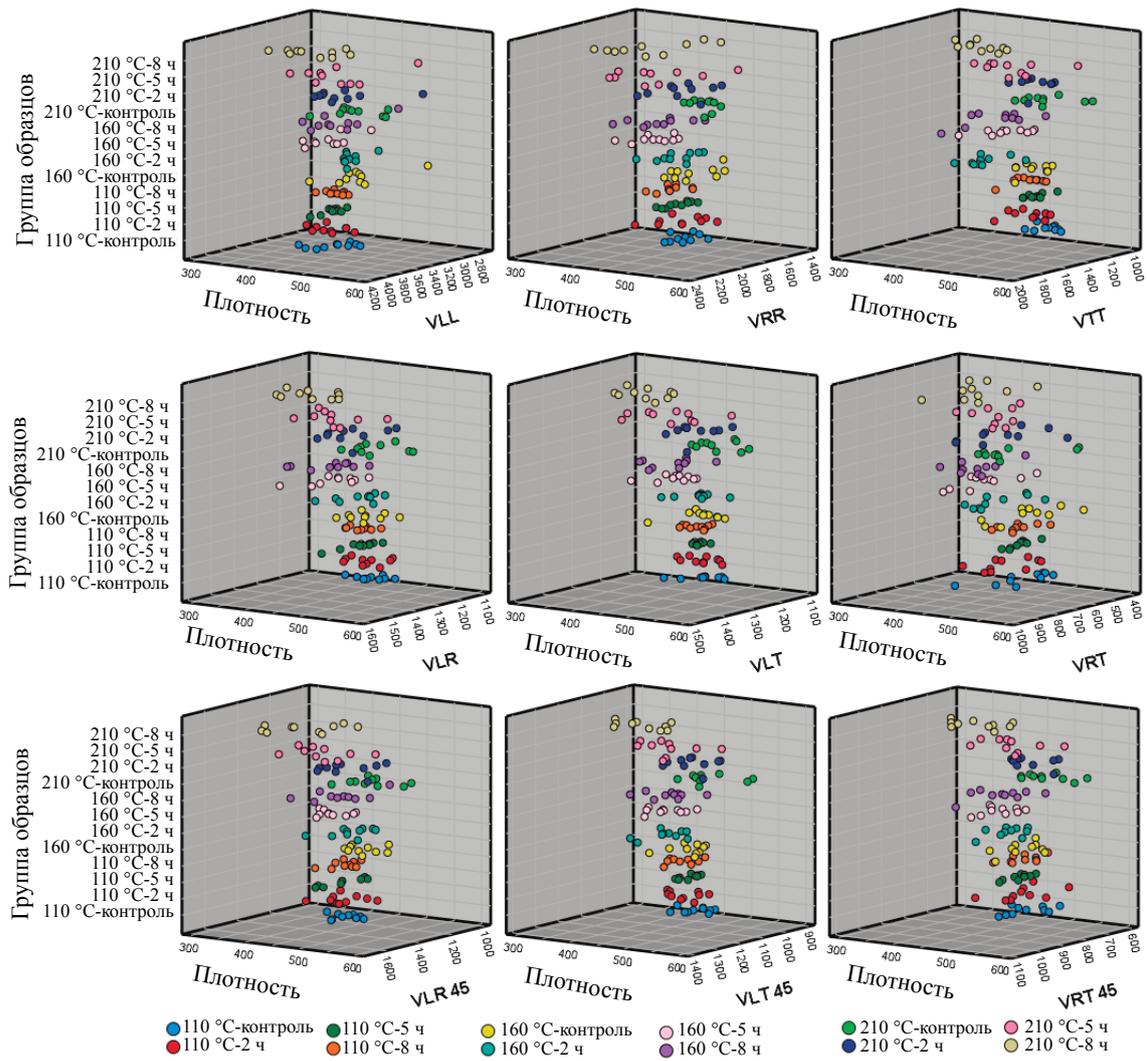


Рис. 2. 3D-точечный график для температуры в зависимости от плотности и СУЗ.

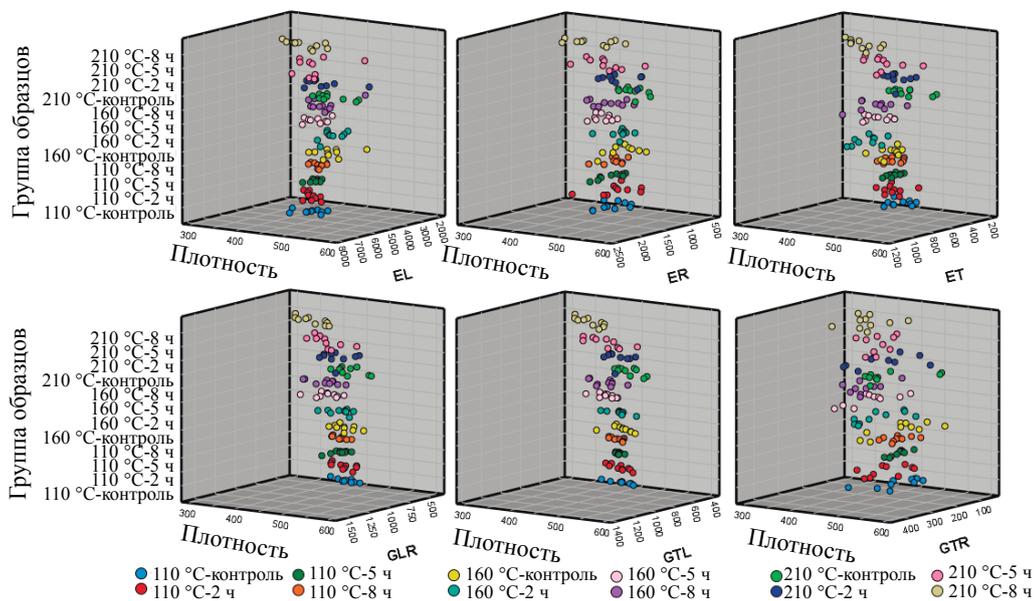


Рис. 3. 3D-точечный график для температуры в зависимости от плотности и упругих модулей.

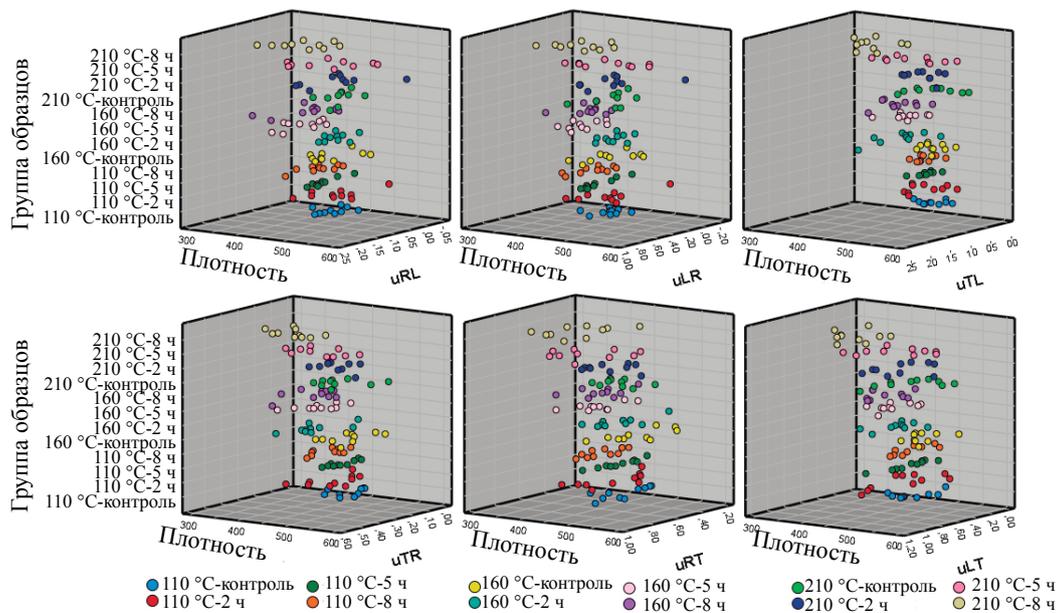


Рис. 4. 3D-точечный график для температуры в зависимости от плотности и коэффициентов Пуассона.

двухчасовая обработка при температуре 210 °С обеспечила некоторое увеличение всех модулей Юнга, но не самого высокого. Такая низкая продолжительность обработки при высоких температурах также обеспечила значительное увеличение модулей сдвига и коэффициента Пуассона, но не для всех из них. Тем не менее, 8 из 12 упругих констант (3 из 3 модулей Юнга, 2 из 3 модулей сдвига и 3 из 6 коэффициентов Пуассона) были несколько улучшены в условиях обработки 210 °С—2 ч. Но когда учитываются коэффициенты Пуассона, то 5 из 6 были несколько улучшены при 160 °С—5 ч обработки. Поэтому трудно сказать, что определенные условия обработки обеспечивают лучшие упруго-технические параметры в целом. Напротив, как уже упоминалось, длительное применение при более высоких температурах не подходит для обеспечения улучшения упругих констант.

Даже обеспечивая некоторые заметные различия в результатах, ультразвуковые испытания и оценка являются применимым методом для определения всех упругих констант немодифицированной или модифицированной древесины. Поскольку проводятся испытания на отдельных образцах нестандартной формы, то недорогой (инструменты или оборудование) и простой в эксплуатации метод [34] имеет выдающиеся характеристики для неразрушающего контроля и оценки.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимодействие с окружающей средой — одна из сложных областей исследований в науке и технологии древесины, и древесина как конструкционный материал должна быть защищена от разрушительного воздействия факторов окружающей среды. Термообработка является одним из инновационных методов защиты древесины путем улучшения некоторых ее свойств. В данном исследовании влияние термообработки на полные упругие константы турецкой красной сосны было определено с помощью распространения ультразвука. Результаты показали, что термообработка оказывает значительное влияние на средние значения, однако в целом наблюдались колебания с увеличением продолжительности обработки, за некоторыми исключениями, такими как последовательное снижение  $E_L$  при 110 и 160 °С,  $G_{TL}$  при 110 °С, а также  $R_L$  и  $L_R$  при 210 °С. Напротив, не наблюдалось последовательного увеличения с увеличением продолжительности обработки.

В представленных значениях для турецкой красной сосны, значительное увеличение было получено при увеличении продолжительности воздействия при низких температурах, таких как 120 и 150 °С. В данном исследовании при низких температурах  $E_L$ ,  $E_R$ ,  $G_{TL}$  и частично  $G_{LR}$  не увеличивались, а уменьшались. Примечательно, что небольшое увеличение  $E_L$  было получено только при обработке 210 °С—2 ч. Более того, почти такое же поведение наблюдалось и для  $E_R$ . Однако трудно объяснить причины такого противоположного поведения.

В данном исследовании для получения всех членов матрицы жесткости использовали измерения на образцах, которые проводили как по оси, так и со смещением оси на 45°. Дальнейшее исследование, например, проведение измерений над многогранным образцом для получения всех членов матрицы жесткости с помощью только одного образца, должно предоставить ценные данные для проведения сравнения для оценки этих колебаний и изменений.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Это исследование не получило какого-либо специального гранта от финансирующих агентств в государственном, коммерческом или некоммерческом секторах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boydak M., Caliskan S.* Effects of heat shock on seed germination of Turkish red pine (*Pinus brutia*) // *Bosque (Valdivia)*. 2016. V. 37. No. 37. P. 327—33. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002016000200011>
2. *Green, D.W.* Wood: Strength and stiffness // *Encycl. Mater. Sci. Technol.* 2001. P. 9732—6. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01766-6>
3. *Güntekin E., Aydın T.Y., Üner B.* Physical, mechanical and bonding performance of Calabrian Pine (*Pinus brutia* Ten.) as influenced by heat treatment // *Drv. Ind.* 2017. V. 68. No. 2. P. 99—108. <https://doi.org/10.5552/drind.2017.1533>
4. *Yılmaz Aydın T., Aydın M.* Young Modulus determination of Turkish red pine wood by destructive and nondestructive test methods / *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Nondestruct. Test. Eval. Wood Symp. Madison*, 2017.
5. *Ates S., Akyildiz M.H., Ozdemir H.* Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood // *BioResources*. 2009. V. 4. No. 3. P. 1032—43. <https://doi.org/10.15376/biores.4.3.1032-1043>
6. *Akyildiz M., Ates S.* Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in Turkey // *Agric. Biol. Sci.* 2008. V. 4. N. 6. P. 660—5.
7. *Abuamoud M.M.M., Ateş S., Durmaz E.* Comparison of some anatomical, chemical and fibrous characteristics of Turkish Pine (*Pinus Brutia* Ten.) sampled from different regions // *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Derg.* 2018. V. 18. No. 1. P. 75—82. <https://doi.org/10.17475/kastorman.364592>
8. *Aydın İ.* Resin production and turpentine analysis by acid paste and borehole methods in red pine (*Pinus brutia* Ten.) and maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Turkey. Karadeniz Technical University, 2017.
9. *Baysal E., Yalınkilic M.K., Çolak M., Göktaş O.* Combustion properties of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood treated with vegetable tanning extracts and boron compounds // *Turkish J. Agric For.* 2003. V. 27. No.4. P. 245—52. <https://doi.org/10.3906/tar-0302-4>
10. *Bektas I., Hakkı Alma M., As N., Gundogan R.* Relationship between site index and several mechanical properties of Turkish calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) // *For Prod. J.* 2003. V. 53. No. 2. P. 27—31.
11. *Göker Y., As N., Akbulut T., Dündar T.* Effects of the spiral grain on some physical properties of calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood // *Turkish J. Agric For.* 2000. V. 24. No. 1. P. 51—6. <https://doi.org/10.3906/tar-98156>
12. *Göker Y., As N., Akbulut T., Dündar T.* The effects of spiral grain on some mechanical properties of calabrian pine (*Pinus Brutia* Ten.) wood // *Turkish J. Agric For.* 2000. V. 24. No. 1. P. 45—50. <https://doi.org/10.3906/tar-98144>
13. *Guntekin E., Emiroglu Z.G., Yılmaz T.* Prediction of bending properties for turkish red pine (*Pinus brutia* ten.) Lumber using stress wave method // *BioResources*. 2013. V. 8. No. 1. P. 231—7. <https://doi.org/10.15376/biores.8.1.231-237>
14. *Güntekin E., Cengiz Y., Aydoğan T., Yılmaz Aydın T., Özdamar İ.* Prediction of elasticity for Turkish red pine (*Pinus Brutia* Ten.) lumber using linear modeling and artificial neural networks (ANN) // *Suleyman Demirel Univ. J. Nat. Appl. Sci.* 2014. V. 18. No. 2. P. 64—8.
15. *Güntekin E., Yılmaz Aydın T., Aydın M.* Elastic constants of Calabrian pine and cedar // *Proc. Int. For. Symp. Kastamonu Üniversitesi*. 2016. P. 645—9.
16. *Aydın M., Ciritcioglu H.* Shear moduli prediction of Calabria pine (*Pinus brutia* Ten.) using ultrasonic wave propagation // *Düzce Univ. J. Sci. Technol.* 2018. V. 6. No.1. P.176—87.
17. *Günay E., Sönmez M.* Mechanical behavior of wood under torsional and tensile loadings // *Gazi. Uni. J. Sci.* 2003. V. 16. No. 4. P. 733—49.
18. *Shukla S.R., Kamdem D.P.* Physical and mechanical properties of red pine (*Pinus resinosa* AIT.) from three provenances // *Wood Fiber Sci.* 2008. V. 40. No. 1. P. 103—10.
19. Forest Products Laboratory / *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. USDA — Gen Tech Rep. 2010. <https://doi.org/General Technical Report FPL-GTR-190>
20. *Gao S., Wang X., Wang L.* Modeling temperature effect on dynamic modulus of elasticity of red pine (*Pinus resinosa*) in frozen and non-frozen states // *Holzforschung*. 2015. V. 69. No. 2. P. 233—40. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0048>
21. *Newton P.F.* Predictive relationships between acoustic velocity and wood quality attributes for red pine logs // *For Sci.* 2017. V. 63. No. 5. P. 504—17. <https://doi.org/10.5849/FS-2016-049>

22. Özşahin Ş., Singer H., Temiz A., Yıldırım İ. Selection of softwood species for structural and non-structural timber construction by using the analytic hierarchy process (AHP) and the multiobjective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) // *Balt. For.* 2019. V. 25. No. 2. P. 281—8. <https://doi.org/10.46490/vol25iss2pp281>
23. Baradit E., Fuentealba C., Yáñez M. Elastic constants of Chilean pinus radiata using ultrasound // *Maderas Cienc y Tecnol.* 2021. V. 23. P. 1—10. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2021000100427>
24. TS 2472. Wood — Determination of Density for Physical and Mechanical Tests. Ankara, 2005.
25. Yılmaz Aydın T., Küçükköse A. Ultrasonic testing and evaluation of moisture dependent elastic properties of fir wood // *Mater. Test.* 2020. V. 62. No. 10. P. 1059—64.
26. Ozyhar T., Hering S., Sanabria S.J., Niemz P. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves // *Wood Sci. Technol.* 2013. V. 47. No. 2. P. 329—41. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
27. Gonçalves R., Trinca A.J., Pellis B.P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens // *Wood Sci. Technol.* 2014. V. 48. No. 2. P. 269—87. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0598-8>
28. Vázquez C., Gonçalves R., Bertoldo C., Baño V., Vega A., Crespo J. et al. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods // *Wood Sci. Technol.* 2015. V. 49. No. 3. P. 607—22. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0719-7>
29. Esteves B.M., Pereira H.M. Wood modification by heat treatment / A review. *Bioresources.* 2009. V. 4. No. 1. P. 370—404.
30. Aydın M., Yılmaz Aydın T. Moisture dependent elastic properties of naturally aged black pine wood // *Constr. Build. Mater.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120752>
31. Aydın T.Y. Ultrasonic evaluation of time and temperature-dependent orthotropic compression properties of oak wood // *J. Mater. Res. Technol.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.006>
32. Tallavo F., Pandey M.D., Cascante G. Probabilistic characterization of ultrasonic wave propagation in wood poles // *Can. J. Civ. Eng.* 2012. V. 39. No. 4. P. 484—93. <https://doi.org/10.1139/l2012-019>
33. Ramage M.H., Burrige H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction // *Renew Sustain Energy Rev.* 2017. V. 68. P. 333—59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
34. Pagnotta L. Recent progress in identification methods for the elastic characterization of materials // *Int. J. Mech.* 2008. V. 2. No. 4. P. 129—40.
-