

Accelerated drying of blanks from red oak wood (*Quercus rubra*)

ЕЛЕНА ПИНЧЕВСКАЯ, АНДРЕЙ СПИРОЧКИН, ВАСИЛИЙ БОРЯЧИНСКИЙ

Кафедра технологий и дизайна изделий из древесины Национального университета биоресурсов и природопользования Украины – НУБиП Украины

Abstract: *Accelerated drying of blanks from red oak wood (*Quercus rubra*).* The results of theoretical and experimental researches of accelerated drying of parquet blanks from red oak wood with application of oscillating schedules with high temperatures are presented. A rational schedule for accelerated drying of blanks with a thickness of 30 mm is proposed, which helps reduce the process by 1.4-2.0 times while maintaining the integrity of the wood and does not reduce its strength.

Key words: red oak, parquet blank, accelerated drying, schedule parameters

INTRODUCTION

Одной из наиболее популярных пород древесины в Украине является дуб обыкновенный (*Quercus robur*). Однако, сейчас наблюдается дефицит дубового сырья из-за проведенных в свое время массовых вырубок и экспорта в круглом виде. Кроме того, начиная с 70-х годов прошлого века, наблюдается процесс усыхания дубовых насаждений в Украине, основной причиной чего является ухудшение экологической ситуации. Поэтому увеличился спрос на быстрорастущий интродуцент – дуб красный (*Quercus rubra*), который используется для изготовления мебели, шпона и паркета.

При благоприятных условиях в насаждениях дуба красного уже в возрасте 30-40 лет наблюдаются экземпляры деревьев, из которых можно получить деловую древесину. Все насаждения дуба красного, независимо от условий произрастания, отмечаются чрезвычайно высокой устойчивостью к поражениям вредителями и фитозаболеваниями [1]. Благодаря быстрому росту и быстрому достижению количественной и технической спелости по сравнению с дубом обыкновенным, возраст рубок главного пользования для дуба красного может составлять 61-80 лет. Выход деловой древесины и качество получаемых сортиментов с высокой полнотой насаждения намного выше, чем у бука и дуба обыкновенного [1,2]. Древесина дуба красного имеет красноватый оттенок, ядровая, причем доля ядра на 2,6-10,6% является большей, чем у дуба обыкновенного того же возраста, что приводит к незначительному (на 4 %) превышению базисной (условной) плотности по сравнению с дубом обыкновенным [1].

Исследованные физико-механические свойства позволили определить, что временное сопротивление при сжатии вдоль волокон дуба красного составляет $62,1 \pm 0,60$ МПа, дуба обыкновенного – $53,2 \pm 0,80$ МПа; при статическом изгибе соответственно – $132 \pm 3,20$ МПа, $99 \pm 3,20$ МПа; тангенциальная твердость – $45,5 \pm 2,60$ МПа, $43,2 \pm 1,70$ МПа. Разница между показателями усушки в тангенциальном и радиальном направлениях у дуба красного больше, чем у дуба обыкновенного [2,3]. Это может быть причиной большого растрескивания и коробления древесины при сушке. Возможно, что древесина дуба красного требует более мягких режимов сушки, однако учитывая тот факт, что продолжительность сушки влияет на производительность предприятия и себестоимость продукции следует разработать ускоренные режимы сушки, которые не снижают качество высушиваемого материала.

Сегодня пилопродукцию из древесины дуба красного высушивают преимущественно в конвективных низкотемпературных камерах. Ускорить процесс сушки в конвективных камерах возможно несколькими способами: применяя режимы с

повышенными температурами, увеличивая циркуляцию воздуха в камере, применяя сушку перегретым паром, используя прерывистые режимы сушки и т.д [4–7]. Для предотвращения разрушения древесины при сушке при повышенных температурах и снижения ее прочности целесообразно уменьшить их воздействие на материал. Это можно реализовать, используя метод осциллирующего воздействия высокой температуры агента сушки на материал [8–10].

Целью работы является разработка осциллирующего режима сушки паркетных заготовок из дуба красного.

METHODS AND MATERIAL

Процесс сушки осциллирующими режимами характеризуется периодичностью поступления потока тепловой энергии. В связи с этим закономерности, описывающие процесс тепло- и массообмена должны отражать эту периодичность [11]. Подобная ситуация наблюдается в гелиосушках, где также присутствует циклическая смена температуры сушильного агента. Учитывая периодичность нагрева древесины в процессе сушки, по аналогии с влиянием солнечной радиации по синусоидальному закону [11] изменение температуры можно представить выражением:

$$t = t_{cp} + A_t \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_{\text{ц}}} \cdot \tau_{\text{тек}}\right), \quad (1)$$

где A_t – амплитуда осциллирования, °С;

$\tau_{\text{ц}}$ – продолжительность одного цикла (нагревание-охлаждение), час;

$\tau_{\text{тек}}$ – текущая продолжительность, час;

t_{cp} – средняя температура :

$$t_{cp} = \frac{t_{\text{наг}} + t_{\text{охл}}}{2}, \quad (2)$$

где $t_{\text{наг}}$ – температура нагревания, °С;

$t_{\text{охл}}$ – температура охлаждения, °С.

Динамика изменения физических и тепловых свойств древесины при сушке описывается критериальным уравнением, которое зависит от температуры и влажности среды и древесины [12]:

$$\frac{t_n - t_{\text{ц}}}{t_c - t_{\text{нач}}} = \frac{1}{2} Ki_m \varepsilon Ko Lu, \quad (3)$$

где ε – коэффициент фазового превращения влаги;

t_n – температура поверхности древесины, °С;

$t_{\text{ц}}$ – температура центра древесины, °С;

t_c – температура среды, °С;

$t_{\text{нач}}$ – начальная температура древесины, °С;

Ki_m – массообменный критерий Кирпичева;

Ko – критерий Коссовича;

Lu – критерий Лыкова.

С учетом уравнений (1–2) температуру древесины можно определить по уравнению:

$$t_n = t_{cp} + A_t \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau_{\text{ц}}} \cdot \tau_{\text{тек}}\right) + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_{\text{нач}}) \cdot Ki_m \varepsilon Ko Lu. \quad (4)$$

Для проведения расчетов по уравнению (4) необходимо иметь значения физических величин, в частности коэффициента влажпроводности древесины дуба красного, входящих в критерии Лыкова и Кирпичева, которые определяют

экспериментальным путем. Для определения значений коэффициентов влагопроводности древесины дуба красного при разных температурах использован метод контактного увлажнения [13].

Паркетные заготовки размерами 30 x 85 x 370 мм высушивали в лабораторной экспериментальной сушильной установке, которая позволяет автоматически поддерживать режимные параметры (температуру сухого, t_c , и смоченного, t_m , термометров) и обеспечивает скорость циркуляции воздуха 0,5–2 м / с. Заготовки имели среднюю начальную влажность $W_{нач} = 40 - 45\%$, их высушивали до конечной влажности $W_k = 8\%$.

Процесс осуществлялся по режиму циклического нагрева (включена система нагрева и вентиляции) и охлаждения (система нагрева и вентиляции выключена). Нагрев проводили при температуре среды $t_c = 100^\circ \text{C}$ до момента, когда температура центра заготовки достигала $t_{ц} = 85^\circ \text{C}$. После этого образцы охлаждали до температуры $t_{ц} = 55^\circ \text{C}$. Цикличность «нагрев-охлаждение» продолжалась до достижения заготовками текущей влажности $W_{тек} = 20\%$, после чего осциллирование прекращали и досушивали заготовки при постоянной температуре $t_c = 100^\circ \text{C}$ [Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.]. Степень насыщения воздуха в сушильной установке регулировали подачей пара. Перед началом сушки торцы заготовок покрывали краской для предотвращения быстрого испарения влаги и растрескивания. Температуру в центре и на поверхности каждой заготовки измеряли с помощью термопар. Текущую и конечную влажность образцов определяли влагомером ИВД-6м и весовым методом в соответствии с ДСТУ 4922: 2008 [Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.].

Параллельно с высушиванием осциллирующими режимами были проведены контрольные сушки с использованием применяющихся в промышленности нормативных режимов [Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.]– таблица 1.

Таблица 1. Параметры режима сушки контрольных образцов

Влажность древесины, %	Параметры режима	Значение параметров режима
> 35	$t, ^\circ\text{C}$	53
	φ	0,84
35-25	$t, ^\circ\text{C}$	56
	φ	0,76
25-15	$t, ^\circ\text{C}$	70
	φ	0,35
< 15	$t, ^\circ\text{C}$	70
	φ	0,35

Из высушенных разными режимами заготовок были вырезаны образцы размером 20x20x300 мм для определения предела прочности на статический изгиб в соответствии с ГОСТ 16483.0–89 [Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.].

RESULTS AND DISCUSSION

Значения коэффициента влагопроводности определяли при температурах 25, 40, 60, 80 ° С. Получена зависимость коэффициентов влагопроводности для различных направлений потока влаги от температуры (рисунок 1). Видно, что радиальное направление способствует скорейшему удалению влаги. Это связано с наличием сердцевинных лучей, анатомические элементы которых имеют продольное направление, что объясняет более быстрое высушивание тангенциальных пиломатериалов по сравнению с радиальными.

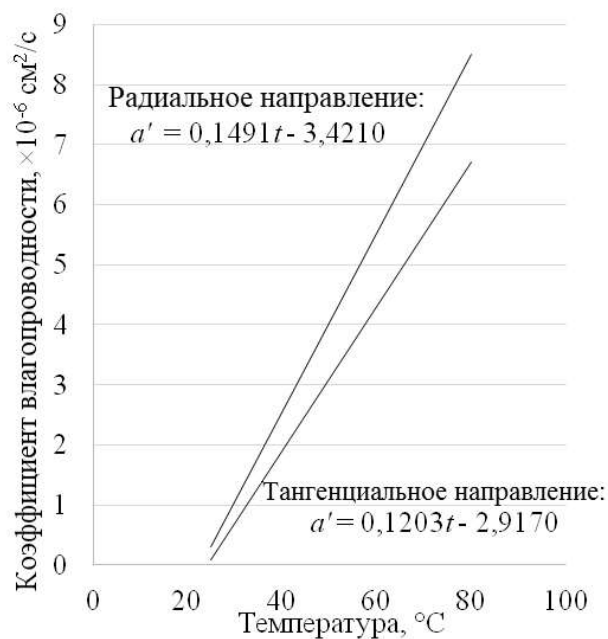


Рисунок 1. Зависимость коэффициента влагопроводности дуба красного от температуры

Определено количество циклов «нагрев-охлаждение» при сушке заготовок дуба красного толщиной 30 мм, которое составило 21 и 20 соответственно. Сравнивая полученные результаты продолжительности сушки по предложенному циклическому режиму со значениями продолжительности сушки по режиму, представленному в таблице 1, установлено сокращение процесса сушки в 1,4 – 2,0 раза – рисунок 2.

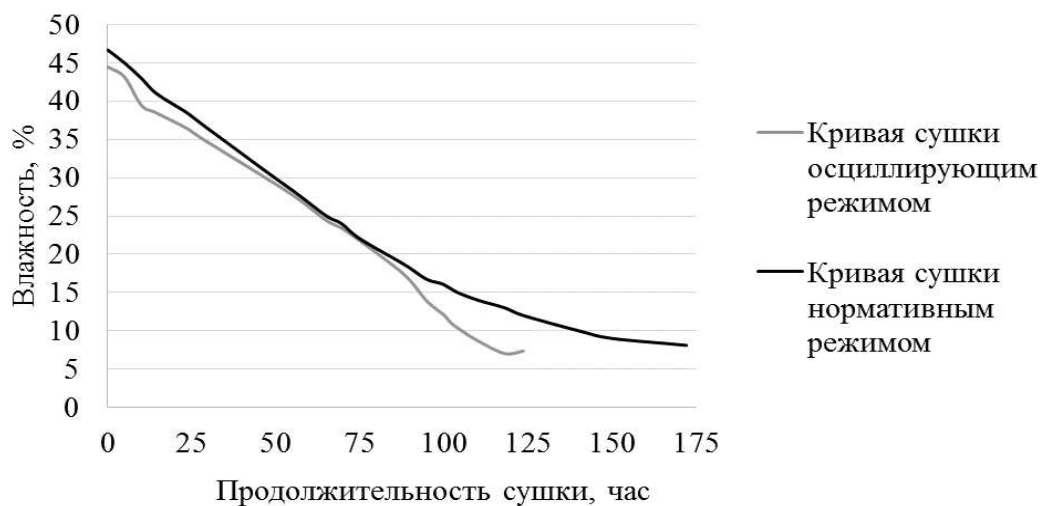


Рисунок 2. Кривые кинетики сушки заготовок толщиной 30 мм из древесины дуба красного разными режимами

При сушке оциллирующим режимом трещины, коробление не были обнаружены – рисунок 3. Текстура древесины проявилась четче, а цвет потемнел.

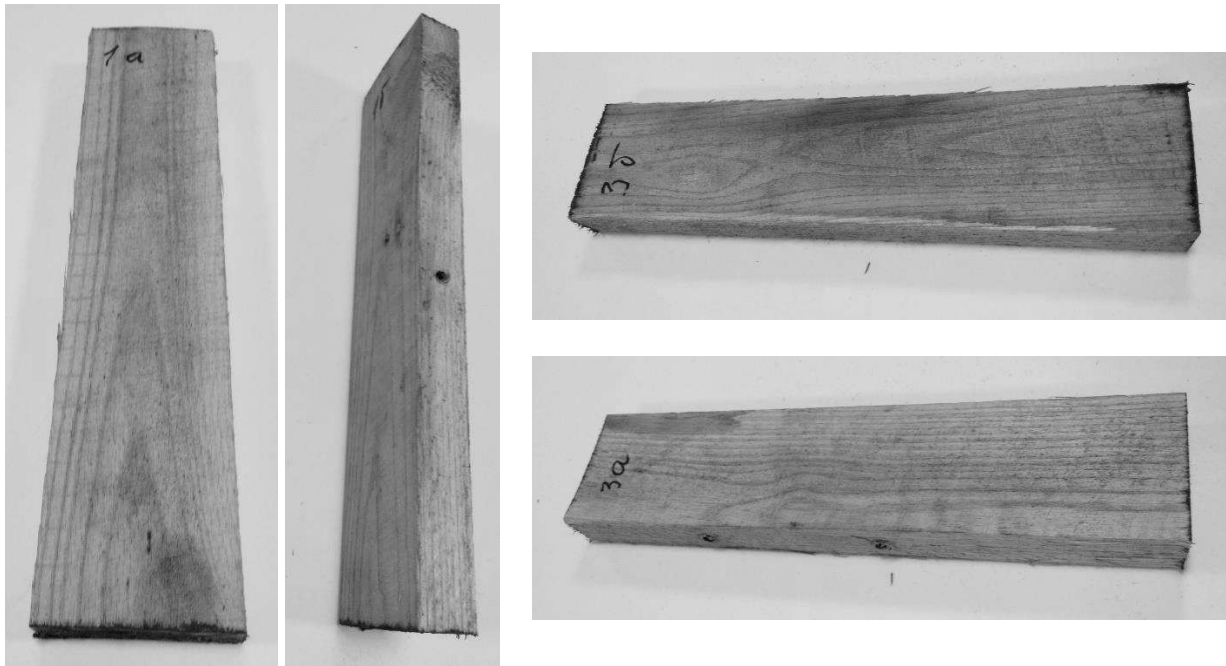


Рисунок 3. Заготовки из древесины дуба красного после сушки осциллирующим режимом

Определено, что характер изменения кинетики температуры древесины в период нагрева отличается от его изменения в период охлаждения. Сравнение теоретической кривой изменения температуры во времени с экспериментальной показало, что корреляция экспериментальных данных с расчетными является несущественной - $r \approx 0,55$. Поэтому применение уравнения 1 для описания изменения температуры во времени по синусоидальному закону является некорректным – рисунок 4.

Предложено аппроксимировать изменение температуры центра заготовок в период нагрева, $t_{ц.нагр}$, °С, полиномиальной зависимостью, а период охлаждения, $t_{ц.охл}$, °С, – экспоненциальной :

$$\begin{cases} t_{ц.нагр} = 29 \cdot \tau_{нагр} - 66 \cdot \tau_{нагр}^2 + 53, \\ t_{ц.охл} = 88 \cdot e^{-0,13 \cdot \tau_{охл}}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\tau_{нагр}$ – продолжительность периода нагрева, час;

$\tau_{охл}$ – продолжительность периода охлаждения, час.

Предложенная система уравнений проверена на адекватность для уровня значимости 5%.

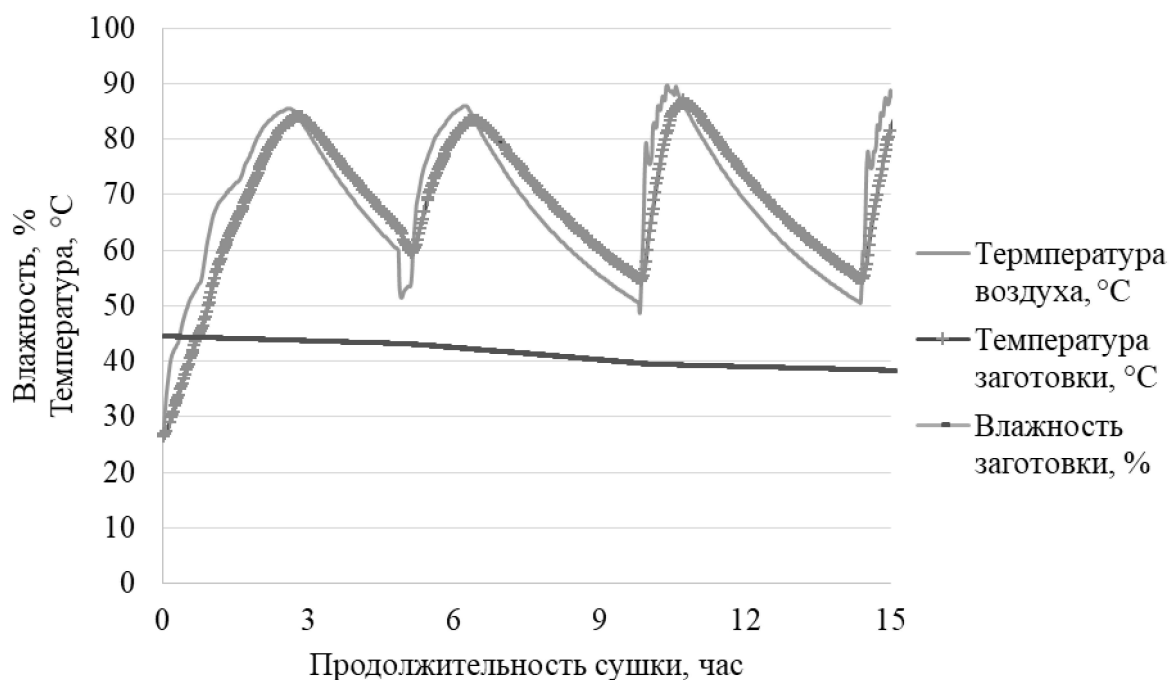


Рисунок 4. Фрагмент кинетики осциллирующей сушки заготовок из древесины дуба красного

Установлено, что продолжительность периода нагрева материала почти в 3 раза меньше времени охлаждения [18]. Полную продолжительность сушки $\tau_{\text{суш}}$, ч, по предложенному режиму можно определить по количеству циклов, состоящих из суммы периодов нагрева $\tau_{\text{нагр}}$, час, охлаждения $\tau_{\text{охл}}$, час, и периода непрерывного нагрева $\tau_{\text{непр}}$, час, (от влажности $W = 20\%$ до конечной влажности $W_k = 6-10\%$):

$$\tau_{\text{суш}} = n \cdot (\tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{охл}}) + \tau_{\text{непр}}, \quad (6)$$

где n – количество циклов осциллирования, шт.

В процессе осциллирующей сушки при нагревании древесина выдерживает «тепловой удар», результат кратковременного воздействия которого наблюдается в период охлаждения за счет ускоренного удаления влаги. Чтобы предотвратить удаление влаги во время действия «теплого удара» приводящего к растрескиванию древесины, необходимо поддерживать высокое значение степени насыщенности воздуха. Для определения величины степени насыщенности воздуха в периоды нагрева, $\varphi_{\text{нагр}}$, %, и охлаждения, $\varphi_{\text{охл}}$, предложено уравнение, которое также было проверено на адекватность по критериям Стьюдента и Фишера:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{нагр}} = 100^{1-(0,006+10^{-5}(120-t_c)^{1,46}) \cdot (t_c - n \cdot \tau_{\text{нагр}} + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_0) \cdot K_{i_m} \varepsilon K_o L u)^{1,074+10^{-17}(146-t_c)^{7,77}}} \\ \varphi_{\text{охл}} = 100^{1-(0,006+10^{-5}(120-t_c)^{1,46}) \cdot (t_c - n \cdot \tau_{\text{охл}} + \frac{1}{2} \cdot (t_c - t_0) \cdot K_{i_m} \varepsilon K_o L u)^{1,074+10^{-17}(146-t_c)^{7,77}}} \end{cases} \quad (7)$$

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны режимы ускоренной сушки заготовок из древесины дуба красного, проверенные в производственных условиях – таблица 2.

Таблица 2. Параметры режима сушки заготовок из древесины дуба красного толщиной 30 мм

Средняя влажность древесины, %	Режимные параметры	Значение режимных параметров
>30 %	Температура среды t_c , °С	100
	Температура заготовок $t_{нагр}$, °С	85
	Температура охлаждения $t_{охл}$, °С	55
	Степень насыщенности воздуха φ , %	95
30–25	Температура среды t_c , °С	100
	Температура заготовок $t_{нагр}$, °С	85
	Температура охлаждения $t_{охл}$, °С	55
	Степень насыщенности воздуха φ , %	50
25–20	Температура среды t_c , °С	100
	Температура заготовок $t_{нагр}$, °С	85
	Температура охлаждения $t_{охл}$, °С	55
	Степень насыщенности воздуха φ , %	35
20–15	Температура среды t_c , °С	100
	Степень насыщенности воздуха φ , %	35
<15 %	Температура среды t_c , °С	100
	Степень насыщенности воздуха φ , %	30

Из высушенных заготовок двумя режимами – осциллирующим и нормативным были изготовлены образцы для определения предела прочности на статический изгиб. Образцы дуба, высушенные нормативным режимом, разрушались сразу после достижения максимального значения предела прочности. Образцы, высушенные осциллирующим режимом, после достижения максимального значения предела прочности еще некоторое время сохраняли форму перед окончательным разрушением. Максимальная нагрузка при разрушении образцов фактической влажности составляла: для образцов, высушенных нормативным режимом – 3,1 кН; для образцов, высушенных предложенным осциллирующим режимом – 3,8 кН. Следовательно, кратковременное влияние повышенных температур сушильного агента не повлияло на механические свойства древесины дуба красного.

Таким образом, применение качественной ускоренной сушки заготовок из древесины дуба красного способствует повышению производительности сушильного хозяйства. Кроме того, этот способ является менее энергоемким по сравнению с нормативными режимами, поскольку воздействие повышенных температур ограничивается только периодом прогрева. Кроме того, в период охлаждения увлажняется поверхность материала, что способствует релаксации сушильных напряжений. Таким образом, необходимость в проведении промежуточных влагообработок отпадает.

REFERENCES

1. ІВЧЕНКО А. І. 2002: Дуб червоний (*Quercus rubra L.*) в лісових насадженнях Львівщини: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. с.-г. наук: спец. 06.03.03 «Лісознавство і лісівництво»; 18 с.
2. ПОЛЯКОВА О. Г., 1999: Біогеоценотичні особливості дуба червоного (*Quercus rubra L.*) в штучних насадженнях Київського Полісся: автореф. дис. канд. с.-г. наук : спец. 06.03.03 «Лісознавство і лісівництво»; 20 с.
3. МАЙБОРОДА В. А., 2016: Створення збалансованих лісових екосистем шляхом впровадження чистих та змішаних насаджень дуба червоного Теорія і практика природокористування № 1; 30–36.
4. КРЕЧЕТОВ, И.В., ЦАРЕВ Б.С., 1955: Интенсификация процесса сушки и усовершенствование лесосушильных камер; 24 с.
5. АНАНЬИН П. И., ПЕТРИ В. Н., 1963: Высокотемпературная сушка древесины; 127 с.
6. МИКИТ Э. А., УПМАНИС К. К., 1967: Интенсификация камерной сушки пиломатериалов; 99 с.
7. ПЕТРОВСКИЙ А. М., 1970: Дискретная циркуляция агента сушки, Механическая обработка древесины № 4; 8 – 9.
8. ЗАХАРЖЕВСКИЙ В. Г., 1948: Скоростная сушка древесины; 32 с.
9. БОРЯЧИНСЬКИЙ В.В., 2016: Щодо можливості застосування підвищених температур для сушіння заготовок із деревини дуба, Науковий електронний журнал «Лісове і садово-паркове господарство» №9_4.<http://nbup.gov.ua/UJRN/licgoc>.
10. УГОЛЕВ Б. Н., 1971: Контроль напряжений при сушке древесины; 176 с.
11. ТЕПНАДЗЕ М. У., 1986: Режимы и технология сушки пиломатериалов в гелиосушилках : автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.21.05 «Технология и оборудование деревообрабатывающих производств, древесиноведение» ;18 с.
12. ЛЫКОВ А. В., 1968: Теория сушки ; 472 с.
13. АЛПАТКИНА Р. П., 1970: Исследование влагопроводности древесины главных отечественных пород: дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.21.05 «Технология и оборудование деревообрабатывающих производств, древесиноведение» ; 210 с.
14. ПИНЧЕВСКАЯ Е.А., КРАСУХИНА Л.П., БОРЯЧИНСКИЙ В.В., 2016: Сушка дубовых заготовок повышенными температурами. *Annals of Warsaw University of Life Sciences.* №95; 321-326.
15. ДСТУ 4922: 2008, 2009: Лісоматеріали та пилопродукція. Методи визначення вологості, Державний стандарт України; 8 с.
16. ГОСТ 19773-84., 2009: Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия; 14 с
17. ГОСТ 16483.3-84., 1999: Древесина. Метод определения предела прочности при статистическом изгибе. Межгосударственный стандарт; 6 с.
18. ПИНЧЕВСЬКА О.Ю БОРЯЧИНСЬКИЙ В., РОМАСЕВИЧ Ю., 2018: Особливості кінетики інтенсифікованого сушіння заготовок з деревини дуба. Технічні науки та технології. № 1(11); 224-231

Corresponding author:

Olena Pinchevska
Department of Technology and Design of Wood Products
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, vul. Geroiv Oborony 15, 03041, Ukraine
email: OPinchevska@gmail.com
phone: (+38044) 527 81 67

Andriy Spirochkin
Department of Technology and Design of Wood Products
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, vul. Geroiv Oborony 15, 03041, Ukraine
email: a.spirochkin@gmail.com,
phone: (+38044) 527 81 67

Vasil Boryachinski
Department of Technology and Design of Wood Products
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, vul. Geroiv Oborony 15, 03041, Ukraine
email: boryachinskiy@gmail.com
phone: (+38044) 527 81 67