

Леса России и хозяйство в них. 2025. № 2 (93). С. 125–132.

Forests of Russia and economy in them. 2025. № 2 (93). P. 125–132.

Научная статья

УДК 674.047

DOI: 10.51318/FRET.2025.93.2.015

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ БЕССТУПЕНЧАТЫМИ РЕЖИМАМИ

А. Г. Гороховский¹, Е. Е. Шишкина², А. С. Агафонов³,
Т. С. Овчинникова⁴, И. В. Соколов⁵

^{1–5} Уральский государственный лесотехнический университет Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Артем Сергеевич Агафонов,
agafonovas@m.usfeu.ru

Аннотация. Ученые-сушильщики все чаще обращают свое внимание на вопросы сушки древесины различных лиственных пород. Это связано как с отраслевыми потребностями лесоперерабатывающей промышленности (истощение запасов хвойной древесины), так и с отсутствием эффективных технологий переработки лиственной древесины. Среди прочих лиственных пород береза привлекает особое внимание из-за огромных запасов и физико-механических показателей. В последние годы довольно широкое применение получили так называемые бесступенчатые режимы сушки различных пород древесины, но для березы данный тип режимов не применялся. Проведенные в УГЛТУ теоретические исследования сушки березовых пиломатериалов бесступенчатыми режимами позволили надеяться на благоприятные результаты испытаний данной технологии в условиях реального производства, которые и были проведены в условиях производства в Свердловской области. Были использованы лесосушильные камеры MGR-50 (Режевской леспромхоз г. Реж) и УРАЛ-30 (ООО «НИКРЕС» г. Первоуральск). Благодаря проведенным экспериментам получены удачные результаты промышленной проверки. Во-первых, достигнуто реальное снижение продолжительности сушки и брака при ее проведении. Во-вторых, бесступенчатый режим позволяет повышать качество сушки за счет гарантированного соблюдения допуска на конечную влажность древесины с большим запасом. Нормативные режимы сушки предприятий позволяют получить конечные внутренние напряжения при сушке не выше II категории качества, хотя для снижения величины напряжений применяется влаготеплообработка. В то же время при применении бесступенчатых режимов влаготеплообработка не применяется, но внутренние напряжения при сушке существенно меньше и соответствуют в основном I категории качества.

Ключевые слова: технология сушки, бесступенчатые режимы, древесина березы

Для цитирования: Производственные испытания технологии сушки древесины березы бесступенчатыми режимами / А. Г. Гороховский, Е. Е. Шишкина, А. С. Агафонов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 2 (93). С. 125–132.

Original article

PRODUCTION TESTS OF BIRCH WOOD DRYING TECHNOLOGY WITH STEPLESS MODES

Alexander G. Gorokhovskiy¹, Elena E. Shishkina², Artem S. Agafonov³,
Tatiana S. Ovchinnikova⁴, Ilya V. Sokolov⁵

¹⁻⁵ Ural State Forest University, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Artem S. Agafonov,
agafonovas@m.usfeu.ru

Abstract. Drying scientists increasingly turn their attention to the issues of drying wood of various hardwoods. This is due to both the industry needs of wood processing industry (depletion of softwood stocks) so the lack of effective technologies for recycling hardwood. Among other hardwoods birch attracts special attention due to its huge reserves of wood and physical and mechanical properties. In recent years, so-called stepless drying modes of various wood have become been widely used, but this type of mode has not been used for birch. Theoretical studies of drying birch lumber by stepless modes carried out at USFEU allowed us to hope for favorable test results of this technology in real production conditions. These experiments were carried out under production conditions in the Sverdlovsk region. The wood drying chambers MGR-50 (Rezhevsky forestry enterprise, Rezh) and URAL-30 (LLC NIKRES, Pervouralsk) were used. Due to the conducted experiments, successful results of industrial testing were obtained. Firstly, a real reduction in drying time and rejection during its implementation has been achieved. Secondly, the stepless drying mode allows you to improve drying quality due to guaranteed compliance with the tolerance to the final moisture wood moisture tolerance with a large margin. Standard drying modes of enterprises make it possible to obtain final internal stresses during drying not higher the II quality category, although moisture and heat treatment is used to reduce the magnitude of stresses. At the same time, when using stepless modes, moisture and heat treatment is not used, but the internal stresses during drying are significantly less and correspond mainly to the I quality category.

Keywords: drying technology, stepless drying mode, birch wood

For citation: Production tests of birch wood drying technology with stepless modes / A.G. Gorokhovskiy, E.E. Shishkina, A.S. Agafonov [et al.] // Forests of Russia and economy in them. 2025. № 2(93). P. 125–132.

Введение

Исследователи неоднократно обращались к проблеме сушки древесины березы (Красухина, 1988; Сушка материалов..., 1968; Петри, 1963). И для этого есть несколько причин.

С одной стороны, запасы древесины березы в России поистине огромны – около 10 % всех запасов древесины в стране. В то же время заготовка ее постоянно падает вследствие недостаточно эффективной технологии ее переработки.

С другой стороны, береза является трудносохнущей породой, требующей для ее сушки приме-

нения специальных режимов. Появившиеся в последние годы так называемые бесступенчатые режимы для сушки березы не применялись, хотя и отлично показали себя при сушке древесины других пород (Шишкина, 2016; Савина, 2020; Старова, 2018).

В УГЛТУ проведены исследования сушки древесины березы бесступенчатыми режимами (Агафонов, 2024) в два этапа:

– вычислительный эксперимент с последующей оптимизацией (Гороховский и др., 2024) (теоретические исследования);

– промышленные испытания в условиях реального производства (экспериментальные исследования).

Вопросы проведения вычислительного эксперимента уже рассмотрены в работе Гороховского и др. (2024), при этом использованы подходы некоторых зарубежных авторов (Mass Diffusivity..., 2018; Optimization and Simulation..., 2011; One-Dimensional Numerical..., 2015; Moises, Pereira, 2014; Nakagawa et al., 2018; Obataya, Higashihara, 2017). Второму вопросу данной работы и посвящена настоящая статья.

**Цель, методика
и объекты исследования**

Целью промышленных испытаний разработанной технологии сушки березовых пиломатериалов бесступенчатыми режимами было подтверждение ее высокой эффективности.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие задачи.

1. Подтвердить реальное снижение продолжительности сушки по сравнению с таковой при нормативных режимах.

2. Определить порядок величины снижения брака в процессе сушки бесступенчатыми режимами.

3. Определить качественные показатели пиломатериалов, высушенных существующими и бесступенчатыми режимами.

4. Определить экономическую эффективность бесступенчатых режимов.

Опытные сушки проводились на двух типах камер: MGR-50 и УРАЛ-30, технические характеристики которых приведены в работе Агафонова (2024). Выбор камер обусловлен следующими соображениями:

– данные типы камер достаточно широко распространены в Урало-Сибирском регионе;

– камеры представляют различные сегменты типов лесосушильных камер. Если MGR-50 современная, полностью автоматизированная камера, обеспечивающая высококачественную сушку, то УРАЛ-30 – это уже достаточно устаревшая камера со средним качеством сушки.

Характеристика условий проведения эксперимента приведена в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Условия проведения промышленных экспериментов
Conditions for conducting industrial experiments

№	Параметр Parameter		Значения параметра для камер Parameter values for cameras	
			MGR-50	УРАЛ-30 URAL-30
1	Порода древесины Wood		Береза Birch	Береза Birch
2	Размеры пиломатериалов Type Dimensions of sawn timber	Толщина, мм Thickness, mm	50	50
		Ширина, мм Width, mm	110–130	150
		Длина, м Length, m	5,0	5,0
3	Вид пиломатериалов Type of sawn timber		Обрезные Edged	Обрезные Edged
4	Начальная влажность древесины, % Initial humidity of wood, %		30–40	>50
5	Конечная влажность древесины, % Final humidity of wood, %		8,0; 10,0	10

Окончание табл. 1

The end of table 1

№	Параметр Parameter	Значения параметра для камер Parameter values for cameras	
		MGR-50	УРАЛ-30 URAL-30
6	Структура режима: предприятия экспериментальный Mode structure: businessespe experimental	По НТД бесступенчатый To NTD stepless	По НТД бесступенчатый To NTD stepless
7	Контроль влажности (ГОСТ 16588–91) Humidity control (GOST 16588–91)	Электронный влагомер Electronic moisture meter	Электронный влагомер Electronic moisture meter
8	Контроль остаточных напряжений Residual stress control	PTM 1985 RTM 1985	PTM 1985 RTM 1985
9	Температура теплоносителя на входе в штабель, °C Temperature of the coolant at the inlet to the stack, °C	95	95
10	ВТО в нормативном режиме WTO in the normative regime	Есть There is	Есть There is

Результаты исследований

и их обсуждение

Результаты опытных сушек в лесосушильных камерах MGR-50 и УРАЛ-30 соответственно приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Table 2

Характеристика опытных сушек в камере MGR-5 Characteristics of experimental dryers in камере the MGR-5 chamber

№ п/п № p/p	Режим сушки Drying mode	Требуемая влажность и допуск, % Required humidity and tolerance, %	Результаты сушки Drying results			Соблюдение допуска Compliance with the security clearance	ВТО OBE tolerance	Внутренние напряжения Internal stresses
			Конечная влажность, % Final humidity, %	Среднее квадратиче- ское отклонение Meane square deviation	Фактиче- ский допуск на влаж- ность Actual humidity tolerance			
1	Согласно нормативно- технической документации на сушильную камеру According to BAT per drying chamber	8±2	8,3	1,28	±2,56	Not observed	+	II
2	Бесступенчатый УГЛТУ Stepless USFEU	8±2	8,1	0,95	±1,9	Соблюдается Observed	–	I–II

Окончание табл. 2

The end of table 2

№ п/п № р/р	Режим сушки Drying mode	Требуемая влажность и допуск, % Required humidity and tolerance, %	Результаты сушки Drying results			Соблюдение допуска Compliance with the security clearance	ВТО OBE tolerance	Внутренние напряжения Internal stresses
			Конечная влажность, % Final humidity, %	Среднее квадратиче- ское отклонение Meane square deviation	Фактиче- ский допуск на влаж- ность Actual humidity tolerance			
3	Бесступенчатый УГЛУТУ Stepless USFEU	8±2	8,2	0,66	±1,32	Соблюдается Observed	–	I
4	Бесступенчатый УГЛУТУ Stepless USFEU	8±2	8,2	0,76	±1,52	Соблюдается Observed	–	I
5	Согласно нормативно- технической документации на сушильную камеру According to BAT for drying chamber	10±2	10,1	0,63	±1,26	Соблюдается Observed	+	II
6	Бесступенчатый УГЛУТУ Stepless USFEU	10±2	9,7	0,5	±1,0	Соблюдается Observed	–	I
7	Бесступенчатый УГЛУТУ Stepless USFEU	10±2	9,6	0,42	±0,85	Соблюдается Observed	–	I

Таблица 3

Table 3

Характеристика опытных сушек в камере УРАЛ-30
Characteristics of experimental dryers in the URAL-30 chamber

Режим 6-B Mode 6-B			Бесступен- чатый режим УГЛУТУ Stepless mode USFEU		№ сушки Drying number	Продолжи- тельность сушки, ч Drying time, hour	Требуемая конечная влажность, % Required final humidity, %	Средняя конечная влажность (по сушкам) Average final humidity (by drying)	Средние условные внутренние напряжения Average conditional internal stresses
Параметры Parameters	t_c	W_p	t_c	W_p					
Начальные Initial data	57	14	63	16	1	177	10±3	9,8±2,7	II
Конечные Endpoints	77	4,5	6	6	2	152			
Нормативная продолжительность сушки 187 ч Standard drying time 187 h			–		3	159			
					4	148			
					5	151			
					τ_{cp} , ч	154			

Анализ полученных результатов показывает, что задачи, поставленные перед проведением исследования, выполнены.

1. Подтверждено реальное снижение продолжительности сушки бесступенчатым режимом по сравнению с таковой при режиме 6-В на 18,5 %.

2. Проведенные выборки высушенных досок показали снижение брака на 6–6,5 % для бесступенчатых режимов.

3. Качество сушки в случае применения бесступенчатых режимов выше (меньше внутренние напряжения и допуск на конечную влажность древесины при сушке).

4. Анализ технико-экономических показателей камер в случае применения бесступенчатых

режимов (Агафонов, 2024) показал существенное повышение эффективности процесса сушки.

Выводы

1. Производственные испытания разработанной технологии сушки березовых пиломатериалов бесступенчатыми режимами подтвердили ее высокую эффективность.

2. Расчет показывает, что при годовом объеме сушки березовых пиломатериалов порядка 2200 м³ (годовая производительность камеры MGR-50 на пиломатериале толщиной более 50 мм) условная экономия от снижения себестоимости составляет около 4 млн руб.

Список источников

- Агафонов А. С. Совершенствование технологии сушки древесины лиственных пород : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Агафонов Артем Сергеевич. Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. 120 с.
- Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е., Агафонов А. С. Оптимизация процесса сушки древесины березы // Деревообрабатывающая промышленность. 2024. № 1. С. 10–14.
- Красухина Л. П. О рациональных режимах сушки березовых пиломатериалов в камерах периодического действия // Деревообрабатывающая промышленность. 1988. № 6. С. 5–7.
- Петри Л. Ф. Высокотемпературная сушка березовой, осиновой и липовой древесины среди перегретого пара при атмосферном давлении // ИВУЗ. Лесной журнал. 1963. № 2. С. 108–112.
- Савина В. В. Повышение эффективности и качества сушки пиломатериалов твердолиственных пород : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Савина Виктория Викторовна. Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. 140 с.
- Старова Е. В. Технология сушки пиломатериалов режимами оптимизированной структуры : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Старова Елена Владимировна. Екатеринбург : УГЛТУ, 2018. 163 с.
- Шишкина Е. Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине : дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.05 / Шишкина Елена Евгеньевна. Екатеринбург : УГЛТУ, 2016. 336 с.
- Сушка пиломатериалов из древесины березы, пораженной ложным ядром / К. Г. Юсупов, Г. Р. Урванов, Н. П. Князева, Ф. В. Леушина // Сборник трудов СверНИИПДрев. 1968. Вып. 3. С. 100–105.
- Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying / S. Azzouz, K. Ben Dhib, R. Bahar [et al.] // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. Vol. 76. Iss. 2. P. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9
- Moises S. A., Pereira S. L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries // Journal of Data Analysis and Information Processing. 2014. Vol. 2. № 1. P. 12–18. DOI: 10.4236/jdaip.2014.21003
- Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics // Drying Technology. 2018. Vol. 36. Iss. 15. P. 1920–1929. DOI: 10.1080/07373937.2018.1463538
- Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying // Wood Science and Technology. 2017. Vol. 51. Iss. 4. P. 739–749. DOI: 10.1007/s00226-017-0918-5

- One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions / *W. P. da Silva, C. M. D. P. S. e Silva, A. F. Rodrigues, R. M. F. de Figueiredo* // Journal of Wood Science. 2015. Vol. 61. Iss. 4. P. 364–371. DOI: 10.1007/s10086-015-1479-6
- Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models : Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature / *W. P. da Silva, L. D. da Silva, C. M. D. P. S. e Silva, P. L. Nascimento* // Wood Science and Technology. 2011. Vol. 45. Iss. 4. P. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x

References

- Agafonov A. S.* Improving the technology of drying hardwood: dis. ... candidate of technical sciences : 05.21.05 / Agafonov Artem Sergeevich. Yekaterinburg : USFTU, 2024. 120 p.
- Drying of sawn timber from birch wood affected by false core / *K. G. Yusupov, G. R. Urvanov, N. P. Knyazeva, F. V. Leushina* // Collection of works of SverNIIPDrev. 1968. Issue 3. P. 100–105. (In Russ.)
- Gorokhovskiy A. G., Shishkina E. E., Agafonov A. S.* Optimization of the drying process of birch wood // Woodworking industry. 2024. № 1. P. 10–14. (In Russ.)
- Krasukhina L. P.* On rational drying modes of birch sawn timber in periodic chambers // Woodworking industry. 1988. № 6. P. 5–7. (In Russ.)
- Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying / *S. Azzouz, K. Ben Dhib, R. Bahar [et al.]* // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. Vol. 76. Iss. 2. P. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9
- Moises S. A., Pereira S. L.* Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries // Journal of Data Analysis and Information Processing. 2014. Vol. 2. № 1. P. 12–18. DOI: 10.4236/jdaip.2014.21003
- Nakagawa K., Tamura A., Adachi S.* Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics // Drying Technology. 2018. Vol. 36. Iss. 15. P. 1920–1929. DOI: 10.1080/07373937.2018.1463538
- Obataya E., Higashihara T.* Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying // Wood Science and Technology. 2017. Vol. 51. Iss. 4. P. 739–749. DOI: 10.1007/s00226-017-0918-5
- One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions / *W. P. da Silva, C. M. D. P. S. e Silva, A. F. Rodrigues, R. M. F. de Figueiredo* // Journal of Wood Science. 2015. Vol. 61. Iss. 4. P. 364–371. DOI: 10.1007/s10086-015-1479-6
- Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models : Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature / *W. P. da Silva, L. D. da Silva, C. M. D. P. S. e Silva, P. L. Nascimento* // Wood Science and Technology. 2011. Vol. 45. Iss. 4. P. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x
- Petri L. F.* High-temperature drying of birch, aspen and linden wood among superheated steam at atmospheric pressure // IVUZ. Forest Journal. 1963. № 2. P. 108–112. (In Russ.)
- Savina V. V.* Improving the efficiency and quality of drying hardwood sawn timber : dis. ... Cand. Sci. (Engineering) Sciences : 05.21.05 / Savina Victoria Viktorovna. Yekaterinburg : USFTU, 2020. 140 p.
- Shishkina E. E.* Energy-saving technology of convective drying of sawn timber based on controlled moisture transfer in wood : dis. ... Doctor of Engineering Sciences : 05.21.05 / Shishkina Elena Evgenievna. Yekaterinburg : USLTU, 2016. 336 p.
- Starova E. V.* Technology of drying lumber using optimized structure modes: dis. ... candidate of technical sciences : 05.21.05 / Starova Elena Vladimirovna. Yekaterinburg : USFTU, 2018. 163 p.

Информация об авторах

*А. Г. Гороховский – доктор технических наук, профессор,
<https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>;*

*Е. Е. Шишкина – доктор технических наук; профессор,
<https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>;*

*А. С. Агафонов – кандидат технических наук, доцент,
<https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>;*

Т. С. Овчинникова – аспирант;

И. В. Соколов – аспирант.

Information about the authors

*A. G. Gorokhovsky – Doctor of Technical Sciences, Professor,
<https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>;*

*E. E. Shishkina – Doctor of Technical Sciences, Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>;*

*A. S. Agafonov – Candidate of Technical Sciences; Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-0955-9068>;*

T. S. Ovchinnikova – postgraduate student;

I. V. Sokolov – postgraduate student.

Статья поступила в редакцию 15.01.2025; принята к публикации 24.02.2025.

The article was submitted 15.01.2025; accepted for publication 24.02.2025.
