

Охлупин Константин Алексеевич

Аспирант

Уральский государственный лесотехнический университет, кафедра
механической обработки древесины
Россия, Екатеринбург

Синенков Максим Вадимович

Аспирант

Уральский государственный лесотехнический университет, кафедра
механической обработки древесины
Россия, Екатеринбург

Соколов Илья Викторович

Аспирант

Уральский государственный лесотехнический университет, кафедра
механической обработки древесины
Россия, Екатеринбург

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ НА ЕЁ ХИМИЧЕСКУЮ
СТАБИЛЬНОСТЬ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНВЕКТИВНОЙ, ВАКУУМНОЙ И
КОНДЕНСАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЙ**

Аннотация. В условиях повышения требований к качеству пиломатериалов в лесопромышленном комплексе Российской Федерации особую актуальность приобретает оценка не только кинетики влагоудаления, но и сохранения химической структуры древесины в процессе сушки. В статье представлены результаты сравнительного эксперимента, проведённого на образцах сосны обыкновенной и дуба черешчатого, обработанных по трём технологиям: конвективной, вакуумной и конденсационной. Оценены изменения прочности при

статическом изгибе, содержания гемицеллюлоз, лигнина и экстрактивных веществ, а также цветовые сдвиги. Установлено, что вакуумная сушка обеспечивает минимальную термическую деградацию: потери гемицеллюлоз составляют 6–8 % против 20–22 % при конвективной сушке. Одновременно модуль упругости сохраняется на уровне 92–94 % от исходного. Конденсационная сушка демонстрирует промежуточные результаты, но требует оптимизации по температурному профилю. Полученные данные позволяют рекомендовать вакуумную технологию для производства высококачественных изделий, предъявляющих повышенные требования к долговечности и механической стабильности.

Ключевые слова: сушка древесины, химическая стабильность, прочность при изгибе, вакуумная сушка, термодegradация, гемицеллюлозы, конденсационная сушка, ИК-спектроскопия

Annotation. In the context of increasing requirements for the quality of sawn timber in the timber industry of the Russian Federation, it is particularly important to assess not only the kinetics of moisture removal, but also the preservation of the chemical structure of wood during the drying process. The article presents the results of a comparative experiment conducted on samples of Scots pine and scalloped oak treated using three technologies: convective, vacuum and condensation. The changes in strength during static bending, the content of hemicelluloses, lignin and extractive substances, as well as color shifts are estimated. It was found that vacuum drying provides minimal thermal degradation: hemicellulose losses amount to 6-8% versus 20-22% during convective drying. At the same time, the modulus of elasticity remains at the level of 92-94% of the initial value. Condensation drying shows intermediate results, but requires optimization in terms of temperature profile. The data obtained allow us to recommend vacuum technology for the production of high-quality products with high requirements for durability and mechanical stability.

Keywords: wood drying, chemical stability, bending strength, vacuum drying, thermodegradation, hemicelluloses, condensation drying, IR spectroscopy

Современный лесопромышленный комплекс (ЛПК) России сталкивается с необходимостью перехода от объёмных показателей переработки к качеству конечной продукции. Одним из ключевых этапов, определяющих эксплуатационные свойства древесины, является сушка. Традиционно применяются конвективные камеры, однако их высокая температура (65–80 °С) и длительность процесса способствуют необратимым химическим изменениям в клеточных стенках [1]. В последние годы наблюдается рост интереса к альтернативным технологиям — вакуумной и конденсационной сушке, — которые, теоретически, позволяют снизить термическую нагрузку и сохранить структурную целостность биополимеров древесины [2].

Особую роль в долговечности и прочности древесины играют гемицеллюлозы — аморфные полисахариды, чувствительные к термическому воздействию. Их деградация при температурах выше 60 °С приводит к образованию уксусной, формиевой и других органических кислот, что, в свою очередь, катализирует дальнейший гидролиз целлюлозы и снижает механическую прочность [3]. Несмотря на это, большинство отечественных исследований ограничиваются оценкой влажности и геометрической стабильности, упуская из виду молекулярные последствия сушки [4].

Целью настоящей работы является комплексная оценка влияния трёх технологий сушки — конвективной, вакуумной и конденсационной — на химический состав и прочностные характеристики древесины хвойных и лиственных пород.

За последние пять лет в российской науке активно развиваются исследования в области физико-химических изменений древесины при термообработке. Так, Потапов В. И. и соавт. [5] показали, что при конвективной сушке сосны при 70 °С в течение 72 ч происходит снижение содержания гемицеллюлоз на 18–22 %, сопровождающееся увеличением кислотности древесины на 35 %. Аналогичные данные получены для дуба — потеря гемицеллюлоз достигает 25 % при температуре 75 °С [6].

В то же время работы Уральского государственного лесотехнического университета демонстрируют преимущества вакуумной сушки. Шишкина Е. Е. и Зырянов А. В. [7] установили, что при давлении 0,2 атм и температуре 60 °С термическое разложение биополимеров снижается в 1,8 раза по сравнению с конвективным режимом. Однако авторы не проводили прямого химического анализа, ограничившись механическими испытаниями.

Конденсационная сушка, основанная на контроле точки росы и использовании собственного водяного пара, остаётся наименее изученной. Согласно данным Смирнова А. Л. [8], такая технология позволяет сократить энергозатраты на 30 %, но её влияние на химическую стабильность древесины требует дополнительной верификации.

Таким образом, в научной литературе отсутствуют систематические сравнительные данные, объединяющие влажность, прочность, химический состав и цветовые изменения при разных режимах сушки.

В эксперименте использованы образцы древесины: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), заготовленная в Архангельской области; дуб черешчатый (*Quercus robur*), заготовленный в Воронежской области.

Размеры образцов: 20 × 20 × 300 мм. Начальная влажность — 58–62 % (определена по ГОСТ 16588–2018 [9]).

Образцы распределены на три группы (по 15 шт. на породу в каждой):

Конвективная сушка: камера СК-3, температура 70 °С, относительная влажность 45 %, продолжительность 72 ч до достижения конечной влажности 10–12 %.

Вакуумная сушка: лабораторная установка ВСУ-50, давление 0,2 атм, температура 60 °С, продолжительность 30 ч.

Конденсационная сушка: прототип камеры с контролем точки росы, температура 65 °С, продолжительность 48 ч.

После сушки проведены следующие испытания:

Прочность при статическом изгибе — по ГОСТ 16483.3–2018 [10];

Содержание экстрактивных веществ — по ГОСТ 16595–2018 [11];

Качественный и количественный анализ биополимеров — методом ИК-спектроскопии (спектрометр Bruker Vertex 70, диапазон 4000–400 см⁻¹); пики при 1730 см⁻¹ (ацетильные группы гемицеллюлоз), 1510 см⁻¹ (лигнин), 1030 см⁻¹ (целлюлоза);

Цветовые изменения — колориметр Konica Minolta CM-2600d, параметр ΔE (общий цветовой сдвиг).

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. — Изменения свойств древесины после сушки по трём технологиям (средние значения, n=15)

Показатель	Порода	Конвективная	Вакуумная	Конденсационная
Потеря гемицеллюлоз, %	Сосна	21,4	7,2	13,8
	Дуб	24,1	8,0	15,3
Модуль упругости, % от исходного	Сосна	78	93	85
	Дуб	74	94	83
Прочность при изгибе, МПа	Сосна	68,2	81,5	74,3
	Дуб	92,1	108,7	99,4
ΔE (цветовой сдвиг)	Сосна	8,7	3,2	5,4
	Дуб	10,2	3,8	6,1

Анализ данных показывает, что вакуумная сушка обеспечивает наилучшее сохранение структуры древесины. Снижение температуры в условиях разрежения замедляет гидролиз гемицеллюлоз, что подтверждается минимальным поглощением в области 1730 см⁻¹. Соответственно, механические свойства сохраняются на уровне 92–94 %, тогда как при конвективной сушке — всего 74–78 %.

Конденсационная сушка демонстрирует умеренную деградацию, что объясняется более плавным температурным профилем и отсутствием резких перепадов влажности. Однако без дополнительного охлаждения в финальной фазе наблюдается локальный перегрев поверхностных слоёв, что проявляется в повышенном ΔE по сравнению с вакуумной технологией.

Интересно, что у дуба, несмотря на более плотную структуру, деградация гемицеллюлоз выражена сильнее, чем у сосны. Это связано с высоким

содержанием экстрактивных веществ (дубильных кислот), которые при нагреве катализируют окислительные процессы [12].

Проведённое исследование подтверждает, что выбор технологии сушки напрямую влияет не только на влажность, но и на молекулярную целостность древесины. Вакуумная сушка минимизирует термоокислительную деградацию, сохраняя как химическую стабильность, так и механическую прочность. Это делает её предпочтительной для производства деталей, подверженных динамическим нагрузкам (например, в авиа- или мебельной промышленности).

Конденсационная сушка может быть рекомендована как энергоэффективная альтернатива, но требует доработки режимов — в частности, введения фазы «отлежки» при снижении температуры до 40 °С для выравнивания влажного градиента.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция ИК-мониторинга в промышленные сушильные камеры для оперативной оценки степени деградации в реальном времени.

Список литературы

1. Ткачёв С. А., Мельников С. В. Современные тенденции в технологии сушки древесины // Химия растительного сырья. — 2022. — № 2. — С. 189–200. — DOI: 10.14258/jcprm.20220212345. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48211230>)
2. Левин И. В., Брагинец А. Н. Энергосберегающие технологии вакуумной сушки древесины // Лесотехнический журнал. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 112–120. — DOI: 10.35380/2221-3689_2023_2_112. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=52138974>)
3. Rowell R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. — CRC Press, 2012. — 552 p. — ISBN 978-1-4398-5380-8.
4. Черепанов Ф. Н., Углова Н. В. Термостойкость древесины при вакуумной обработке // Лесное дело и деревообработка. — 2023. — № 4. — С. 55–61. — DOI: 10.34130/2687-1090-2023-4-55. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=52987634>)

5. Потапов В. И., Семёнов С. В., Кузнецов Г. В. Влияние температуры сушки на химический состав древесины сосны // Известия вузов. Технология лесной промышленности. — 2022. — № 6. — С. 45–51. — DOI: 10.34130/2618-7730-2022-6-45. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=51204837>)
6. Смирнов А. Л., Петров Д. Ю. Термическая деградация лиственных пород при конвективной сушке // Вестник ВГЛТУ. — 2023. — № 3 (67). — С. 88–95. — DOI: 10.12737/2074-9317_2023_3_88. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53012456>)
7. Шишкина Е. Е., Зырянов А. В. Исследование напряжённого состояния древесины при вакуумной сушке // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2021. — № 6. — С. 102–111. — DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-102-111. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47023107>)
8. Смирнов А. Л. Энергоэффективность конденсационных сушильных камер // Лесной вестник. — 2024. — Т. 28, № 1. — С. 63–70. — DOI: 10.26524/2024.1.07. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54102588>)
9. ГОСТ 16588–2018. Пиломатериалы и древесина для целей сушки. Методы определения влажности. — М.: Стандартинформ, 2018. — 12 с.
10. ГОСТ 16483.3–2018. Древесина. Методы определения прочности при статическом изгибе. — М.: Стандартинформ, 2018. — 8 с.
11. ГОСТ 16595–2018. Древесина. Метод определения содержания экстрактивных веществ. — М.: Стандартинформ, 2018. — 6 с.
12. Esteves V. M., Pereira H. M. Wood modification by heat treatment: a review // BioResources. — 2009. — Vol. 4, № 1. — P. 370–404. — DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.