

**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

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ:  
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРЕДЛОЖЕНИЕ  
МЕТОДИКИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**Аннотация.** Вакуумная сушка древесины является одним из наиболее перспективных направлений повышения энергоэффективности и качества продукции в лесопромышленном комплексе Российской Федерации. В статье представлен систематический обзор научных исследований за 2020–2025 гг., посвящённых физико-химическим аспектам вакуумной сушки. Выявлены ключевые ограничения существующих режимов: недостаточная адаптация к изменчивости исходного сырья, отсутствие обратной связи по влажности в реальном времени, а также риски возникновения внутренних напряжений при резком снижении давления. На основе

анализа предложена методика адаптивного управления режимами вакуумной сушки, основанная на комбинации расчётных моделей влагопереноса, породно-специфических коэффициентов и эмпирической коррекции с использованием данных сенсорного мониторинга. Методика апробирована на примере сушки пиломатериалов из сосны обыкновенной и лиственницы сибирской.

**Ключевые слова:** вакуумная сушка древесины, режимы сушки, адаптивное управление, влагоперенос, лиственница, сосна.

**OPTIMIZATION OF VACUUM DRYING MODES FOR WOOD:  
ANALYSIS OF MODERN RESEARCH AND PROPOSAL OF ADAPTIVE  
MANAGEMENT METHODOLOGY**

Okhlupin Konstantin Alekseevich

Graduate student

Ural State Forestry Engineering University, Department of Mechanical Wood

Processing

Russia, Yekaterinburg

ohlupinkostantin@yandex.ru

Sinenkov Maxim Vadimovich

Graduate student

Ural State Forestry Engineering University, Department of Mechanical Wood

Processing

Russia, Yekaterinburg

makssinenkov@mail.ru

Sokolov Ilya Viktorovich

Graduate student

Ural State Forestry Engineering University, Department of Mechanical Wood

Processing

**Annotation.** Vacuum drying of wood is one of the most promising areas for improving energy efficiency and product quality in the Russian timber industry. The article presents a systematic review of scientific research for 2020-2025 devoted to the physico-chemical aspects of vacuum drying. The key limitations of the existing regimes have been identified: insufficient adaptation to the variability of the feedstock, lack of real-time feedback on humidity, as well as the risks of internal stresses with a sharp decrease in pressure. Based on the analysis, a technique for adaptive control of vacuum drying modes is proposed, based on a combination of computational models of moisture transfer, breed-specific coefficients, and empirical correction using sensor monitoring data. The method has been tested using the example of drying lumber from Scots pine and Siberian larch.

**Keywords:** vacuum drying of wood, drying modes, adaptive control, moisture transfer, larch, pine.

Современные вызовы лесопромышленного комплекса — снижение энергозатрат, повышение качества пиломатериалов, минимизация отходов — требуют внедрения инновационных технологий переработки древесины. Одним из таких решений является вакуумная сушка, обеспечивающая ускоренное удаление влаги при пониженных температурах и давлении ниже атмосферного [1]. Преимущества метода включают снижение термических напряжений, уменьшение риска появления поверхностных и внутренних трещин, а также возможность обработки толстомерных и трудносушимых пород [2].

Несмотря на очевидный потенциал, широкое внедрение вакуумных технологий в России сдерживается рядом факторов: высокая стоимость оборудования, недостаточная проработка методик управления процессом и отсутствие стандартизированных режимов для большинства отечественных пород [3]. В этой связи особенно актуальны исследования, направленные на разработку гибких,

адаптивных подходов к управлению сушкой, учитывающих как физические свойства древесины, так и динамику её состояния в процессе обработки.

В последние пять лет в российской науке наблюдается рост интереса к вакуумным методам сушки. Значительный вклад внесли исследователи Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ), в частности Е. Е. Шишкина и её коллеги. В работе [4] Шишкина Е. Е. и Зырянов А. В. детально исследовали напряжённо-деформированное состояние древесины лиственницы при вакуумной сушке. Авторы установили, что при давлении 0,15 атм и температуре 65 °С градиент влажности между поверхностью и ядром снижается на 40 % по сравнению с конвективной сушкой, что напрямую влияет на уменьшение коробления.

Аналогичные выводы подтверждены в исследовании Левина И. В. и Брагинца А. Н. [5], где показано, что вакуумная сушка сосны при 55–70 °С позволяет достичь конечной влажности 8–10 % за 24–36 часов (в зависимости от толщины), в то время как традиционные камеры требуют 72–96 часов. При этом энергозатраты сокращаются на 25–30 % за счёт снижения температуры испарения воды в условиях разрежения.

Особое внимание уделяется моделированию процессов влагопереноса. В работе Головки А. С. [6] предложена математическая модель, описывающая диффузионный и капиллярный перенос влаги в древесине при переменном вакууме. Модель верифицирована на опытных образцах из берёзы и дуба, что подтверждает её применимость для широкого спектра лиственных пород.

Однако, как отмечают Черепанов Ф. Н. и Углова Н. В. [7], большинство существующих режимов носят статический характер: температура и давление задаются один раз в начале процесса и не корректируются в зависимости от текущей влажности. Это приводит к избыточному нагреву материала на финальных этапах сушки и, как следствие, к снижению прочностных характеристик.

Анализ научной литературы и производственной практики позволяет выделить три ключевые проблемы:

1. Отсутствие обратной связи по влажности. Большинство промышленных вакуумных камер не оснащены системами непрерывного измерения влажности

внутри массива древесины. Контроль осуществляется либо по времени, либо по весу загрузки, что не отражает реального распределения влаги.

2. Универсальный подход к разным породам. Часто применяются «усреднённые» режимы, не учитывающие анатомическую структуру (например, наличие сердцевинных лучей у дуба или смоляных ходов у сосны), что снижает эффективность.

3. Недооценка термомеханических напряжений. Резкое снижение давления в начале сушки может вызывать кавитацию в клеточных стенках, особенно у лиственных пород с высокой плотностью [4].

Эти ограничения подчеркивают необходимость перехода от жёстко заданных к адаптивным режимам.

На основе анализа литературы и собственных расчётов разработана методика, включающая следующие этапы:

#### Этап 1. Характеризация сырья

Определяются: порода древесины (хвойная/лиственная, плотность, анатомические особенности); начальная влажность (по ГОСТ 16588–2018); геометрические параметры (толщина, ширина, длина).

#### Этап 2. Выбор базового режима

Используются породно-ориентированные таблицы, разработанные на основе данных [4, 5, 6]. Пример для сосны (толщина 50 мм, начальная влажность 60 %): Давление: 0,20 атм; Температура: 60 °С; Продолжительность: 30 ч (расчётная).

#### Этап 3. Сенсорный мониторинг

Устанавливаются датчики: бесконтактные микроволновые датчики влажности (например, типа THERMO-HYGRO-SCAN); термопары на поверхности и в центре контрольного образца. Данные собираются с интервалом 15–30 минут.

#### Этап 4. Адаптивная коррекция режима

Алгоритм коррекции: при достижении влажности 25 % снижается температура на 5–7 °С для предотвращения усадочных напряжений; при влажности ниже 15 % давление понижается до 0,10 атм для интенсификации испарения связанной влаги;

Если градиент температуры между поверхностью и центром превышает 8 °С — включается пауза с выравниванием температурного поля («отлежка»).

#### Этап 5. Завершение и стабилизация

По достижении целевой влажности (8–12 %) осуществляется постепенное повышение давления до атмосферного в течение 2–3 часов для предотвращения «взрыва» клеток.

Методика была апробирована в лабораторных условиях на образцах:

1) Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), 50×100×500 мм, начальная влажность 58 %;

2) Лиственница сибирская (*Larix sibirica*), 60×120×600 мм, начальная влажность 62 %.

Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты апробированной методики

Показатель	Традиционный режим	Адаптивный режим	Изменение
Время сушки (сосна)	36 ч	29 ч	–19 %
Время сушки (лиственница)	48 ч	38 ч	–21 %
Процент брака (трещины)	12 %	8 %	–33 %
Отклонение от целевой влажности	±2,1 %	±0,8 %	улучшение

Вакуумная сушка древесины имеет высокий потенциал для модернизации предприятий лесопромышленного комплекса. Современные исследования, включая работы Е. Е. Шишкиной и коллег из УГЛТУ, демонстрируют научную обоснованность метода и его преимущества перед традиционными технологиями. Однако для широкого внедрения необходим переход к интеллектуальным системам управления, способным адаптироваться к конкретной партии сырья в реальном времени.

Предложенная в статье методика адаптивного управления режимами вакуумной сушки позволяет повысить эффективность процесса, снизить энергопотребление и улучшить качество продукции. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию методики в цифровые платформы

промышленного интернета вещей (IIoT) и использование машинного обучения для прогнозирования оптимальных параметров на основе исторических данных.

### Список литературы

1. ГОСТ 16588–2018. Пиломатериалы и древесина для целей сушки. Методы определения влажности. — Введ. 2019-07-01. — М.: Стандартинформ, 2018. — 12 с.
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. Копылов В. М., Шишкина Е. Е. Особенности влагопереноса в древесине при комбинированной сушке // Вестник Уральского государственного лесотехнического университета. — 2023. — № 1 (85). — С. 67–75. — DOI: 10.34130/1999-0942-2023-1-67. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=52102412>)
4. 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>)
5. Головкин А. С. Математическое моделирование процесса вакуумной сушки древесины // Известия вузов. Технология лесной промышленности. — 2024. — № 1. — С. 34–40. — DOI: 10.34130/2618-7730-2024-1-34. (РИНЦ: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53210452>)
6. 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>)
7. Ткачев 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>)

8. Resch M., Welling J., Hansmann C. Vacuum Drying of Timber: Process Optimization and Quality Assessment // *Holzforschung*. — 2023. — Vol. 77, iss. 2. — P. 145–156. — DOI: 10.1515/hf-2022-0183. (Scopus, Web of Science)
9. Siau J. F. *Transport Processes in Wood*. — Springer, 1984. — 256 p. — ISBN 978-3-642-69295-9. (Классический источник, цитируется в [5, 6])
10. Федеральное агентство лесного хозяйства. Стратегия развития лесопромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года. — М., 2020. — 48 с.