

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

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМОВ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР

Аннотация. В статье рассмотрены особенности процесса сушки древесины и влияние режимов сушильных камер на качество и эксплуатационные свойства готовой продукции. Рассмотрены основные типы сушильных камер и применяемые в них режимы сушки, выявлены их характерные недостатки, связанные с энергоёмкостью, продолжительностью процесса, неравномерностью распределения влаги. Особое внимание уделено современным направлениям изменения и совершенствования режимов сушки. В их числе: повышение энергоэффективности, оптимизация аэродинамических условий, внедрение интеллектуальных систем управления. Показано, что адаптация режимов сушки позволяет повысить качество

продукции и снизить энергетические затраты без значительных капитальных вложений.

Ключевые слова: сушка древесины, сушильная камера, режимы сушки, энергоэффективность, аэродинамика, интеллектуальные системы управления.

Annotation. The article discusses the features of the wood drying process and the influence of drying chamber modes on the quality and performance properties of finished products. The main types of drying chambers and the drying modes used in them are considered, their characteristic disadvantages related to energy intensity, duration of the process, and uneven moisture distribution are revealed. Special attention is paid to modern trends in changing and improving drying modes. Among them are: improving energy efficiency, optimizing aerodynamic conditions, and implementing intelligent control systems. It is shown that the adaptation of drying modes makes it possible to improve product quality and reduce energy costs without significant capital investments.

Keywords: wood drying, drying chamber, drying modes, energy efficiency, aerodynamics, intelligent control systems.

Процесс сушки материалов занимает важное место во многих отраслях промышленности, в частности в деревообработке, строительстве, а также производстве строительных материалов. От правильно выбранного режима сушки во многом зависит качество готовой продукции, её прочность, долговечность, внешний вид. Нарушение режимов сушки может привести к таким дефектам, как растрескивание, коробление, неравномерное распределение влаги и снижение эксплуатационных свойств материала.

В настоящее время применяются различные типы сушильных камер: конвективные, конденсационные, вакуумные и комбинированные. Каждый из этих типов имеет свои особенности, преимущества и недостатки. На практике часто используются стандартные режимы сушки, которые не всегда учитывают специфику материала, его начальную влажность и условия эксплуатации камер. Это приводит к

увеличению энергозатрат, удлинению времени сушки, снижению качества конечного продукта.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности сушильных процессов в условиях роста требований к качеству продукции и рациональному использованию энергетических ресурсов. Изменение и оптимизация режимов сушильных камер рассматриваются как один из наиболее доступных и экономически оправданных способов улучшения технологического процесса без существенных капитальных вложений в оборудование.

Целью работы является анализ существующих режимов сушки в различных типах сушильных камер, выявление их основных недостатков, а также рассмотрение возможных направлений изменения и совершенствования режимов сушки.

Что представляет собой сушка? П.В. Болдырев определяет сушку как ключевую операцию в деревообрабатывающем производстве и напрямую влияет на качество и стоимость готовых изделий. Древесина с высокой влажностью подвержена гниению и биологическим повреждениям, тогда как снижение влажности повышает её прочность, стойкость и удобство обработки. Сухая древесина сохраняет форму и размеры, лучше склеивается и отделяется, что особенно важно при изготовлении и эксплуатации изделий. В процессе сушки древесина переходит из природного сырья в полноценный промышленный материал, соответствующий требованиям конкретных условий применения. Процесс сушки заключается в удалении влаги путём испарения и может осуществляться естественным способом или в специальных сушильных камерах [1, с. 5-6].

Атмосферная сушка древесины заключается в укладке лесоматериалов в штабели и их выдерживании на открытом воздухе либо в неотапливаемых помещениях. Процесс протекает за счет естественного тепло- и массообмена с окружающей средой. Основными недостатками являются низкая скорость сушки, сильная зависимость от погодных условий, необходимость больших производственных площадей и невозможность снижения влажности древесины ниже 22 %, что ограничивает применение данного метода предварительной стадией сушки [3, с. 32].

Аэродинамическая сушка осуществляется в закрытых камерах, где воздух нагревается за счет аэродинамических потерь при работе центробежного вентилятора и циркулирует с высокой скоростью. Удаление влаги происходит конвективным способом. Недостатком метода являются высокие затраты электроэнергии [3, с. 32].

Контактная сушка основана на зажатии тонких плоских материалов между нагретыми плитами пресса, от которых тепло передается непосредственно через контакт. Существенным недостатком является ограниченность применения по форме, размерам и толщине высушиваемых материалов [3, с. 32].

Сушка в жидкостях заключается в погружении влажной древесины в нагретую маслянистую среду, где влага закипает и удаляется в виде пара. Недостаток метода состоит в проникновении масла в древесину, что затрудняет последующую механическую обработку, склеивание и отделку [5, с. 6].

Сушка в поле токов высокой частоты реализуется путем нагрева древесины в электрическом поле за счет диэлектрических потерь. Основными недостатками являются сложность и высокая стоимость оборудования, а также большие затраты электроэнергии [5, с. 7].

Индукционная сушка основана на нагреве ферромагнитных элементов, размещенных между рядами пиломатериалов, в электромагнитном поле промышленной частоты. К недостаткам относятся неравномерность нагрева, возникновение внутренних напряжений и высокая стоимость оборудования [7].

Ротационная сушка осуществляется за счет вращения штабеля пиломатериалов, при котором центробежная сила способствует перемещению влаги к поверхностям досок. Недостатками метода являются громоздкость конструкции и сложность эксплуатации, что ограничивает его промышленное применение [5, с. 7].

Ультразвуковая сушка заключается в удалении влаги под действием ультразвуковых волн, вызывающих кавитацию. Основным недостатком является невозможность снижения влажности древесины ниже 40–45 % [3, с. 33].

Инфракрасная сушка основана на нагреве древесины инфракрасным излучением. Недостатком метода является малая глубина проникновения излучения в материал [7].

Конденсационная сушка проводится в закрытых камерах, где испаряющаяся влага конденсируется на охладителях и удаляется из системы. К недостаткам относятся высокая стоимость оборудования и увеличение продолжительности сушки по сравнению с конвективными методами [4].

Конвективная сушка древесины осуществляется в камерах с циркуляцией нагретого теплоносителя между рядами досок. Процесс протекает в несколько стадий и сопровождается испарением влаги с поверхности древесины. Недостатками являются высокая длительность процесса, загрязнение окружающей среды выбросами и сравнительно невысокое качество высушенного материала [3, с. 33-34].

Вакуумная сушка проводится при пониженном давлении, что снижает температуру кипения воды и обеспечивает удаление влаги при мягких режимах. Недостатками являются малая загрузочная емкость камер и высокая стоимость оборудования [3, с. 34].

Сверхвысокочастотная сушка основана на объемном нагреве древесины за счет поглощения энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, что ускоряет перенос влаги из внутренних слоев к поверхности. К недостаткам относятся высокая стоимость оборудования и сложность обеспечения равномерного распределения СВЧ-поля в рабочей зоне [3, с. 34].

Вопрос изменения и совершенствования режимов сушки древесины в сушильных камерах активно рассматривается в современных научных исследованиях. В своей научной работе Ахмед Хуйа подчёркивает, что традиционные режимы термической сушки характеризуются чрезмерным потреблением энергии и значительной продолжительностью процесса, особенно в зимний период. Автор указывает, что использование аккумуляирования тепла и рекуперации энергии в солнечных сушильных камерах позволяет существенно изменить режим сушки за счёт стабилизации температурных параметров и снижения зависимости от внешних климатических условий. Проведённые им экспериментальные и численные исследования показали, что внедрение тепловых аккумуляторов сокращает время сушки на 40–60 %, а комбинированное использование аккумуляирования и рекуперации тепла снижает энергопотребление до 91 % [9]. Таким образом,

изменение режима сушки за счёт интеграции накопителей тепловой энергии рассматривается как перспективное направление повышения энергоэффективности сушильных камер.

Проблеме совершенствования аэродинамических режимов в конвективных сушильных камерах посвящена работа В. А. Сычевского, А. Д. Чорного и Т. А. Барановой. Авторы отмечают, что в большинстве промышленных сушильных камер формируются сложные вихревые структуры потока, приводящие к неравномерному подводу теплоты и удалению влаги из штабеля пиломатериалов. В своем исследовании они показывают, что изменение режима сушки возможно без корректировки начальных параметров теплоносителя за счёт выравнивания профилей скоростей воздушного потока в рабочей зоне. Однако подчёркивается, что на практике выявление зон паразитных течений затруднено вследствие конструктивных особенностей камер; это требует применения численного моделирования. Использование современных программных комплексов позволяет оптимизировать аэродинамический режим и, тем самым, повысить равномерность сушки без увеличения энергозатрат [8].

Значительное внимание в последние годы уделяется интеллектуализации режимов сушки. Так, в работе С. Рахими, В. Насира, С. Аврамидиса и Ф. Сассани показано, что использование методов машинного обучения позволяет существенно повысить точность прогнозирования конечной влажности древесины. Авторы отмечают, что надёжное моделирование режима сушки невозможно без учёта не только свойств древесины, но и параметров самого процесса (температуры, относительной влажности и скорости сушильного агента) [6]. Полученные результаты демонстрируют, что оптимизация графиков сушки с применением интеллектуальных моделей является важным направлением совершенствования режимов, особенно при необходимости обеспечения равномерной влажности по объёму пиломатериала.

Подобный подход прослеживается и в работе В. В. Гречушникова, А. А. Шилина и С. В. Прохорова. Авторы показывают, что изменение режимов сушки должно осуществляться с учётом неформализуемых факторов, таких как

конструктивные особенности сушильной камеры, климатические условия, порода древесины и сезон эксплуатации. Разработанный алгоритм на основе нечеткой логики позволяет формировать безопасные и оптимальные зоны сушки и адаптировать режим в реальном времени [2]. Таким образом, переход от фиксированных режимов к адаптивным и самообучающимся системам управления рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений развития сушильных технологий.

В целом анализ научных источников показывает, что совершенствование режимов сушки древесины в современных сушильных камерах осуществляется по нескольким ключевым направлениям: повышению энергоэффективности за счёт аккумулирования и рекуперации тепла, оптимизации аэродинамических характеристик сушильных камер, внедрению численного моделирования потоков и развитию интеллектуальных систем управления режимами сушки. Комплексная реализация данных подходов позволяет снизить энергозатраты, сократить продолжительность процесса и повысить качество высушенной древесины.

Список литературы

1. **Болдырев П. В.** Сушка древесины: практическое руководство. — Санкт-Петербург: Проф Икс, 2002. — 336 с.
2. Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов // Известия ТПУ. 2024. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-algoritma-avtomatizirovannoy-podstroyki-parametrov-protsessa-sushki-pilomaterialov> (дата обращения: 25.12.2025).
3. Кизина О. А. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины / О. А. Кизина, А. Л. Адамович, Ю. Г. Грозберг // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2011. — № 3. — С. 32-37. — EDN TTVKJB.
4. Кровиков М. Выбор сушильной камеры. Человеческий фактор / М. Кровиков // ЛесПромИнформ. — 2009. — № 1(50).

5. Пейч Н.Н. Сушка древесины: учеб. для проф.-техн. училищ и подготовки рабочих на производстве / Н.Н. Пейч, Б.С. Царев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1971. – 220 с.

6. Рахими, С.; Насир, В.; Аврамидис, С.; Сассани, Ф. Роль режима сушки и кондиционирования в обеспечении равномерности влажности древесины: подход с использованием машинного обучения. *Polymers* 2023 , 15 , 792.<https://doi.org/10.3390/polym15040792>

7. Рахманкулов Д.Л. Применение микроволнового излучения для сушки дерева и пиломатериалов / Д.Л. Рахманкулов, С.Ю. Шавшукова, И.Н. Вихарева // Башкирский химический журнал. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 46 – 52.

8. Сычевский В. А., Чорный А. Д., Баранова Т. А. Оптимизация аэродинамического режима работы сушильной камеры // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-aerodinamicheskogo-rezhima-raboty-sushilnoy-kamery> (дата обращения: 24.12.2025).

9. Хуйа А. Влияние регенерационного тепла и аккумуляирования энергии на эффективность термической сушки в солнечной печи для сушки древесины твёрдых пород // Возобновляемая энергия (Renewable Energy). — 2020. — Т. 155. — Август. — С. 783–799. — DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.020. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120305115> (дата обращения: 25.12.25).