

УДК 66.047.7

**ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ЭНЕРГОЁМКОСТИ СУШКИ
ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ****Зубец Вероника Витальевна,**студент СПбГУПД ВШТЭ,
zubecveronika25@gmail.com**Коновалова Вера Константиновна,**Ассистент кафедры МиП СПбГУПД ВШТЭ,
vera_konoval@inbox.ru**Аннотация**

Сушка волокнистых материалов является одним из наиболее энергозатратных этапов в целлюлозно-бумажной, текстильной и деревообрабатывающей промышленности, потребляя до 70–77% всей энергии бумагоделательной машины. В статье представлен аналитический обзор научных и отраслевых источников, описывающих методы сушки волокнистых материалов, включая конвективную, контактную, инфракрасную, импульсную, осциллирующую, вакуумную и вакуумно-конвективную сушку. Проведён сравнительный анализ их эффективности на основе данных открытых отраслевых источников. Рассмотрены проектные решения, направленные на снижение энергозатрат: рекуперация тепла, многоступенчатая сушка, конструктивные модификации сушильных камер, учёт деформационных свойств материала при проектировании и автоматизация процессов управления.

Ключевые слова: сушка волокнистых материалов; энергоёмкость; энергосбережение; рекуперация тепла; конвективная сушка; вакуумно-конвективная сушка; многоступенчатая сушка; целлюлозно-бумажная промышленность.

**DEVELOPMENT OF DESIGN SOLUTIONS FOR REDUCING THE ENERGY
INTENSITY OF FIBROUS MATERIALS DRYING****Zubets Veronika Vitalievna,**Student, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School
of Technology and Energy,
zubecveronika25@gmail.com**Konovalova Vera Konstantinovna,**Assistant, Department of Machinery and Production (MiP), Saint Petersburg State University of
Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy,
zubecveronika25@gmail.com

ABSTRACT

Drying of fibrous materials is one of the most energy-intensive stages in the pulp and paper, textile, and woodworking industries, consuming up to 70–77% of the total energy of a paper machine. The article presents a systematic review of existing drying methods for fibrous materials, including convective, contact, infrared, pulse, oscillating, vacuum, and vacuum-convective drying. A comparative analysis of their energy efficiency is carried out based on data from open industry sources. Design solutions aimed at reducing energy consumption are considered: heat recovery, multistage drying, structural modifications of drying chambers, consideration of the deformation properties of the material at the design stage, and automation of control processes. Examples of practical implementation of these solutions at pulp and paper enterprises are given. It is shown that the greatest energy-saving effect is achieved not by a single technology, but by a comprehensive consistent application of measures. Recommendations for phased modernization of production with minimal investment risks are formulated.

Keywords: drying of fibrous materials; energy intensity; energy saving; heat recovery; convective drying; vacuum-convective drying; multistage drying; pulp-and-paper industry.

Актуальность

Сушка волокнистых материалов - один из самых затратных этапов в целлюлозно-бумажной, текстильной и деревообрабатывающей промышленности. На сушку уходит до 70–77% всей энергии, потребляемой бумагоделательной машиной [1].

Ещё в прошлом веке предприятия искали способы сократить расход тепла на удаление влаги из материала. Но с ростом цен на энергоносители и ужесточением экологических требований задача приобрела иной масштаб. Речь идет не о локальной оптимизации отдельного участка линии, а о комплексном пересмотре всей технологической цепочки - от подготовки сырья до финальной упаковки готовой продукции.

Волокнистые материалы - бумага, картон, лубяные культуры (лён, конопля), пиломатериалы, нетканые полотна обладают выраженной капиллярно-пористой структурой. Влага в них связана с материалом по-разному: свободная влага удаляется относительно легко, а вот связанная требует значительно больше энергии и времени. Отсюда и возникает основная сложность - процесс сушки нелинеен, и универсального решения для всех видов сырья не существует.

Удельные затраты энергии на сушку 1 кг продукции могут отличаться в разы в зависимости от применяемого оборудования и режимов. Часть исследований последних лет посвящена именно этому - поиску температурных режимов и конструктивных решений, снижающих расход энергии без потери качества готовой продукции.

Цель исследования

Цель данной работы - систематизировать существующие подходы к сушке волокнистых материалов, оценить их энергетическую эффективность и рассмотреть проектные решения, уже показавшие результат на практике, а также сформулировать рекомендации по последовательному снижению энергоёмкости сушки на действующих производствах.

Материалом исследования послужили отечественные научные публикации по тематике сушки волокнистых материалов, включая целлюлозу, бумагу, лубяные культуры и измельчённое растительное сырьё, а также открытые отраслевые данные по удельному энергопотреблению сушильного оборудования различных типов.

Основным методом исследования выступил аналитический обзор и систематизация литературных данных: анализировались способы подвода тепла (конвективный, контактный, инфракрасный, импульсный, вакуумный), температурные режимы и их влияние на качество готовой продукции. Дополнительно проведён сравнительный анализ рассмотренных методов сушки с выделением их преимуществ и недостатков на основе данных открытых отраслевых источников. Обобщён практический опыт внедрения энергосберегающих проектных решений на целлюлозно-бумажных предприятиях.

Анализ существующих методов сушки волокнистых материалов

Конвективная сушка

Самый распространённый способ. Горячий воздух или дымовые газы обдувают материал, влага испаряется и уносится потоком теплоносителя. Оборудование простое, эксплуатация понятная, поэтому метод и закрепился на большинстве предприятий.

КПД конвективных сушилок редко превышает 40–50%, значительная часть тепла уходит вместе с отработанным воздухом. На сушильной части бумагоделательной машины именно на этот этап приходится 72–77% всего энергопотребления линии [1]. Исследования температурных режимов в диапазоне 80–140°C для сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы показали: превышение оптимальной температуры увеличивает расход энергии и одновременно ухудшает механические свойства готового листа бумаги [1].

Также был сделан вывод: не существует единого «оптимального» значения температуры, оно меняется в зависимости от вида целлюлозы и требуемых свойств готового листа [2].

Контактная сушка

Материал соприкасается с нагретой поверхностью - цилиндром, барабаном, плитой. Теплопередача идёт напрямую, без промежуточного теплоносителя, поэтому энергоэффективность выше, чем у конвективной сушки. Именно так работает большинство бумагоделательных машин на этапе сушильной части.

Недостаток метода - неравномерность прогрева при работе с толстыми или неоднородными по плотности материалами. Кроме того, контактные сушилки требуют регулярной очистки поверхности от отложений, иначе теплопередача постепенно ухудшается, а расход энергии растёт.

Инфракрасная сушка

ИК-излучение проникает вглубь материала и нагревает его изнутри, а не только с поверхности. За счёт этого скорость сушки выше, особенно на первых стадиях процесса, когда удаляется свободная влага.

Инфракрасные установки хорошо работают на тонких материалах - нетканых полотнах, лёгкой бумаге. С плотными и толстыми волокнистыми массами эффективность падает, излучение не успевает прогреть внутренние слои равномерно.

Импульсная и осциллирующая сушка

Отдельное направление - конструктивные решения, меняющие сам характер подачи тепла. «Импульсные» режимы сушки пиломатериалов предполагают чередование интенсивного прогрева и пауз, во время которых влага успевает перераспределиться внутри материала к поверхности. (Рис.1). Это позволяет снизить пиковую тепловую нагрузку на сушильную камеру [4].

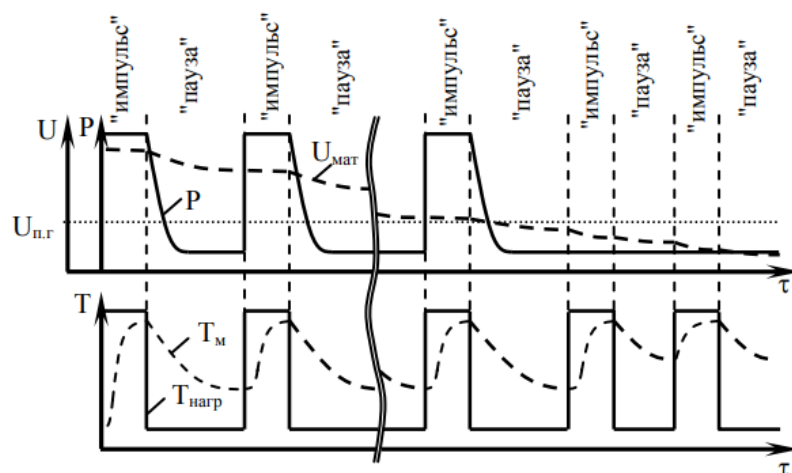


Рис. 1 - Процесс вакуумно-кондуктивной сушки методом «импульс-пауза» [4]

Похожий принцип лежит в основе, осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки древесины - процесс организован циклами с колебанием параметров, а в качестве источника тепла используется тепловой насос [5]. Такая схема заметно экономичнее классической конвективной камеры, особенно на этапе досушки, когда влаги в материале уже немного.

Вакуумная и вакуумно-конвективная сушка

Снижение давления понижает температуру кипения воды, влага испаряется при более низких температурах. Это особенно ценно для термочувствительных материалов, где, перегрев недопустим.

Комбинация вакуума и конвекции даёт заметный энергетический выигрыш по сравнению с чисто конвективным вариантом: часть влаги удаляется за счёт разрежения, часть - конвекцией, и суммарная нагрузка на систему нагрева снижается. Известны конструкции установок с перфорированными полками - такое решение обеспечивает более равномерный прогрев измельчённого растительного сырья по всему объёму камеры [6].

Недостаток метода - сложность аппаратного оформления. Вакуумные камеры дороже, требуют герметичности и дополнительного обслуживания насосного оборудования.

Таблица 1. Сравнение методов сушки волокнистых материалов

Метод	Преимущества	Недостатки
Конвективная [9]	Простота конструкции, гибкость регулировки, при определенных условиях более высокая интенсивность, чем у контактной.	Высокая энергоёмкость, может вызвать деформации бумаги.
Контактная [9]	Основной метод в промышленности, высокие экономические показатели, хорошее качество и двусторонняя гладкость полотна.	Высокая металлоёмкость (до 2/3 массы машины), недостаточная интенсивность процесса.
Комбинированная (контактно-конвективная) [9]	Современный стандарт. Конвекция эффективно удаляет испарившуюся влагу, а контакт обеспечивает основной подвод тепла.	Сложность проектирования и балансировки режимов.

Инфракрасная (ИК) [9]	Эффективная бесконтактная передача энергии.	Низкая энергоэффективность.
СВЧ [10]	Минимизирует деформацию бумаги.	Сложность масштабирования и высокая стоимость.
Вакуумная [11]	Сохраняет структуру, минимизирует деформации, подходит для термочувствительных материалов.	Высокая стоимость оборудования, длительный цикл.

Обзор проектных решений по снижению энергоёмкости

Рекуперация тепла

Отработанный тёплый воздух или пар не выбрасывается в атмосферу, а через теплообменники подогревает свежий приточный воздух или технологическую воду. Применение рекуперации тепла в конвективных сушилках позволяет повысить эксергетический индекс устойчивости (ESI), что указывает на снижение термодинамических потерь и более эффективное использование энергии [8]. Внедрение рекуперации не требует полной замены оборудования: достаточно встроить теплообменник в существующую вентиляционную схему — и уже на этом этапе виден результат. Использование теплового насоса в схемах осциллирующей сушки - ещё один вариант рекуперации, только на другом уровне: тепло, отобранное у отработанного воздуха или у самой камеры, возвращается обратно в процесс, а не рассеивается впустую.

Многоступенчатая сушка

Идея в том, чтобы разделить процесс на этапы с разными режимами. На первой ступени, где влаги много, и она преимущественно свободная, применяют падающие, менее энергозатратные режимы. На финальных этапах, когда остаётся связанная влага, интенсивность повышают точно, только там, где это действительно нужно.

Сравнение двух энергосберегающих способов конвективной сушки лубяных культур и волокон из них подтверждает похожий вывод - дробление процесса на стадии с контролем влажности на каждой из них позволяет избежать перерасхода энергии на уже практически высушенном материале [3].

Конструктивные решения сушильных камер

Часть энергоёмкости закладывается не в режиме сушки, а в самой конструкции оборудования. Обзор современных решений в области техники и технологии сушки пиломатериалов показывает: изменение геометрии камеры, схемы циркуляции воздуха и способа загрузки материала способно снизить расход энергии не хуже, чем смена самого метода сушки [4].

Перфорированные полки в вакуумно-конвективных установках, о которых уже говорилось выше, - пример именно такого конструктивного решения. Оно не меняет физику процесса, но убирает «застойные зоны», где материал сохнет медленнее и требует избыточного времени обработки.

Учёт деформационных свойств материала при проектировании

Отдельная задача - учитывать, как ведёт себя волокнистый материал под нагрузкой в процессе сушки. Анализ деформационных свойств волокнистых материалов и ткани показывает, что усадка, натяжение полотна и изменение геометрии материала при потере влаги напрямую влияют на выбор режима сушки и конструкцию сушильной части оборудования [7].

Если не учитывать деформацию заранее, приходится закладывать запас по температуре или времени сушки, что влечет за собой перерасход энергии. Проектирование

с опорой на реальные деформационные характеристики конкретного материала позволяет этого избежать.

Автоматизация процессов

Ручное управление режимами сушки предполагает избыточный расход энергии - операторы закладывают запас, чтобы точно не испортить партию. Автоматизированные системы с датчиками влажности и температуры убирают этот запас, подстраивая параметры под реальное состояние материала в каждый момент времени.

Алгоритмы прогнозного управления позволяют заранее корректировать параметры сушки на основе данных о влажности сырья на входе, а не реагировать на отклонения постфактум. Разница на первый взгляд небольшая, но именно она даёт существенную экономию в масштабах непрерывного производства.

На ряде целлюлозно-бумажных предприятий внедрение рекуперативных теплообменников в существующие сушильные части бумагоделательных машин позволило сократить расход пара без изменения скорости работы линии.

Другой пример - переход на вакуумно-конвективные схемы с перфорированными полками при переработке измельчённого растительного сырья [6]. Такой подход снижает энергозатраты и одновременно улучшает равномерность сушки по объёму камеры - качество готового продукта не снижается.

Осциллирующая сушка древесины с использованием теплового насоса - пример технологии, где экономия достигается за счёт самой схемы подачи тепла, без замены основного сушильного оборудования [5]. Похожий принцип - импульсные режимы применяется и в сушке пиломатериалов, где чередование прогрева и пауз снижает пиковую тепловую нагрузку [4].

Общая тенденция по всем рассмотренным проектам одна: наибольший эффект даёт не отдельная технология, а комплекс мер, применённых последовательно. Рекуперация тепла в сочетании с контролем режимов сушки и учётом свойств конкретного материала при проектировании - сочетание, которое чаще всего встречается в успешных проектах.

Выводы

Снижение энергоёмкости сушки волокнистых материалов требует системного подхода - универсального метода не существует.

Наибольший эффект по соотношению затрат и результата даёт рекуперация тепла: она недорога, применима на любом конвективном оборудовании и обеспечивает экономию энергии.

Многоступенчатая сушка эффективна для неоднородного сырья (лубяные культуры, растительное сырьё). Импульсные режимы перспективны для древесины и пиломатериалов.

Важно также учесть деформационные свойства материала на стадии проектирования оборудования - продуманная геометрия камеры (например, перфорированные полки) позволяет экономить энергию ещё до установки рекуператора.

На практике наибольший эффект даёт сочетание решений: рекуперация + контроль режимов + оптимизация конструкции камеры. Это даёт ощутимую экономию без остановки производства на полную реконструкцию.

Для модернизации рекомендуется поэтапное внедрение: сначала рекуперация и корректировка режимов (наименее затратные меры), затем — при наличии ресурсов - переход на многоступенчатые или осциллирующие схемы. Такой подход снижает риски и позволяет оценить реальный эффект на каждом этапе.

Список литературы:

1. Прохоров Д.А., Дубовый В.К. Исследование влияния температуры сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы // Лесной журнал (Известия высших учебных заведений). 2023. № 3. С. 173–184. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-173-184.
2. Прохоров Д.А., Дубовый В.К. Влияние температур сушки на свойства бумаги из сульфатной хвойной и лиственной целлюлозы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 243. С. 297–309. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.297-309.
3. Новиков Э.В., Безбабченко А.В. Исследования нового способа сушки лубяных культур и волокон из них // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения академика С.И. Назарова. Минск, 19–20 октября 2023 г. Минск, 2023. С. 273–278.
4. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Кайнов П.А. Обзор современных решений сотрудников ФГБОУ ВПО «КНИТУ» в области техники и технологии сушки пиломатериалов // Вестник Казанского государственного технологического университета. 2013. Т. 16, № 23. С. 76–78.
5. Сафин Р. Р., Мазуркин П. М., Мухаметзянов Ш. Р. Математическое описание скорости вакуумно-кондуктивной сушки древесины в осциллирующем режиме // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2017. №48.
6. Сафин Р. Р., Хасаншин Р. Р., Гараева А. Ф., Ахметов А. И. Вакуумно конвективная сушка измельченного растительного сырья // Вестник Казанского технологического университета. 2016.
7. Поляков А.Е., Иванов М.С. Анализ деформационных свойств волокнистых материалов и ткани : монография. Воронеж : ВГТУ, 2019. 120 с.
8. Zohrabi S., Seiedlou S.S., Golpour I. и др. Exergetic sustainability assessment of a semi-industrial convective dryer employing waste heat recovery for drying wood chips: A BPANN-based approach // Thermal Science and Engineering Progress. – 2026. – Vol. 70. – DOI: 10.1016/j.tsep.2026.104501. (In English)
9. Шульман, Г. З. Теория и конструкция бумагоделательных машин. Ч. II : текст лекций / Г. З. Шульман, А. В. Тверитина. – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 95 с.
10. Kumar, P., Mujumdar, A. S., & Koran, Z. (1990). MICROWAVE DRYING : EFFECTS ON PAPER PROPERTIES. Drying Technology, 8(5), 1061–1087. (In English).
11. Игнатьева С. Ю., Мадякин В. Ф., Гатина Р. Ф., Осипова А. Ю. Термо-вакуум-импульсная сушка модельной композиции на основе целлюлозы марки Э-2 // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №17.

References:

1. Prokhorov D.A., Dubovyi V.K. Issledovanie vliyaniya temperatury sushki na svoystva bumagi iz sul'fatnoy belenoy khvoynoy i listvennoy tsellyulozy [Study of the effect of drying temperature on the properties of paper from bleached softwood and hardwood

- sulfate pulp]. *Lesnoy zhurnal (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy) [Forestry Journal]*, 2023, no. 3, pp. 173-184. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-173-184.
2. Prokhorov D.A., Dubovyi V.K. Vliyanie temperatur sushki na svoystva bumagi iz sul'fatnoy khvoynoy i listvennoy tsellyulozy [Influence of drying temperatures on the properties of paper from softwood and hardwood sulfate pulp]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy]*, 2023, no. 243, pp. 297-309. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.297-309.
 3. Novikov E.V., Bezbabchenko A.V. Issledovaniya novogo sposoba sushki lubyanykh kul'tur i volokon iz nikh. In: *Nauchno-tekhnicheskiy progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu so dnya rozhdeniya akademika S.I. Nazarova*. Minsk, 2023, pp. 273-278.
 4. Safin R.R., Khasanshin R.R., Kaynov P.A. Review of modern solutions by KNITU staff in the field of equipment and technology for lumber drying // *Bulletin of Kazan State Technological University*. 2013. Vol. 16, No. 23. P. 76-78.
 5. Safin R.R., Mazurkin P.M., Mukhametzyanov Sh.R. Matematicheskoe opisanie skorosti vakuumno-konduktivnoy sushki drevesiny v ostsilliruyushchem rezhime. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2017;(48).
 6. Safin R.R., Khasanshin R.R., Garaeva A.F., Akhmetov A.I. Vakuumno-konvektivnaya sushka izmel'chennogo rastitel'nogo syr'ya. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2016.
 7. Polyakov A.E., Ivanov M.S. Analiz deformatsionnykh svoystv voloknistykh materialov i tkani. Voronezh: VGTU, 2019. 120 p.
 8. Zohrabi S., Seiedlou S.S., Golpour I. и др. Exergetic sustainability assessment of a semi-industrial convective dryer employing waste heat recovery for drying wood chips: A BPANN-based approach // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2026. – Vol. 70. – DOI: 10.1016/j.tsep.2026.104501.
 9. Shulman G.Z., Tveritina A.V. *Teoriya i konstruktsiya bumagodelatel'nykh mashin. Ch. II: tekst lektsiy [Theory and design of paper machines. Part II: lecture text]*. Saint Petersburg, VShTE SPbGUPTD Publ., 2023. 95 p.
 10. Kumar, P., Mujumdar, A. S., & Koran, Z. (1990). MICROWAVE DRYING : EFFECTS ON PAPER PROPERTIES. *Drying Technology*, 8(5), 1061-1087.
 11. Ignatyeva S.Yu., Madyakin V.F., Gatina R.F., Osipova A.Yu. Thermo-vacuum-pulse drying of a model composition based on pulp grade E-2. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014;17(17):179-182.