

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

Львовский политехнический институт

На правах рукописи

БИЛЕЙ ПЕТР ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 674. 047

**ТЕХНОЛОГИЯ КАМЕРНОЙ СУШКИ
ТВЕРДЫХ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД**

Специальность 05. 17. 08 — процессы и аппараты химической технологии:

05. 21. 05 — технология и оборудование деревообрабатывающих производств, лесоведение

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ЛЬВОВ — 1993

7021

Работа выполнена на кафедре технологии деревообработки Львовского лесотехнического института

Официальные опоненты — доктор технических наук, профессор
С. П. РУДОБАШТА;

— академик международной инженерной Академии, доктор технических наук, профессор
Г. М. ШУТОВ;

— доктор технических наук Я. Н. ХАНЫК;

Ведущая организация — Украинское научно - производственное дерево-обработывающее объединение

Защита состоится 25 сервня 1993 г. в 15⁰⁰ часов на заседании специализированного совета Д 068. 36. 03 при Львовском политехническом институте по адресу:

290013, г. Львов, пл. Св. Юра 3-4, корп: 8; ауд 339

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Львовского политехнического института по адресу; Львов-13, ул. Профессорская, 1.

Автореферат разослан 17 травня 1993 г.


ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00815238 (R)

Учений секретарь специализированного совета
Д 068. 36. 03 доктор химических наук, профессор

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

 В. М. ЖИЗНЕВСКИЙ.

Актуальность проблемы. По характеру взаимосвязи материала с влагой древесина отнесена к капиллярно-пористым коллоидным телам. Такое классификационное определение древесины в ранге влажных тел связано с ее капиллярно-пористым строением и тем, что стенки клеток обладают свойствами ограниченно набухающих гелей. Древесина является сложным биологическим продуктом, на свойства которого влияют порода, место и условия произрастания, местоположение образца в стволе дерева и другие факторы. Для применения древесины в народном хозяйстве она должна подвергаться сушке, которая является одним из самых дорогостоящих, длительных и энергоемких технологических процессов.

Анализируя современное состояние техники и технологии сушки пиломатериалов, следует отметить, что мебельные и деревообрабатывающие предприятия укомплектованы сушильными камерами устаревших конструкций на 72%, доля современных составляет всего лишь 28%. Средний уровень механизации трудоемких работ, автоматизации, контроля и регулирования процесса составляет 10...20%, что часто приводит к невыполнению технологических требований и низкому качеству камерной сушки. Особенно низкое качество наблюдается при сушке пиломатериалов и заготовок из древесины твердых лиственных пород, где дефекты /трещины и коробление/ достигают до 40%.

В теоретическом плане вопросы сушки древесины проработаны, в основном, на примере хвойных пород. Поэтому механический перенос физических закономерностей сушки хвойных пород на твердые лиственные привел к значительным отклонениям теоретических данных с их практической реализацией. Расхождения теоретических данных с производственными достигают 20...40%, что существенно отражается на эффективности проведения процесса сушки.

Создавшееся положение в области теории, оборудования и технологии сушки древесины твердых лиственных пород требовало проведения специальных исследований, обобщения производственного опыта и результатов исследований, разработки оптимизационной технологии и рациональных аэродинамических схем сушильных камер. Объемы сушки пиломатериалов и заготовок из древесины твердых лиственных пород на отдельно взятых мебельных и деревообрабатывающих предприятиях относительно невелики, поэтому предметом данного исследования является их конвективная сушка в камерах периодического действия, как базовой технологии, основанной на использовании самого расп-

ространенного способа подвода тепла к высушиваемому материалу.

Материалы диссертации положены в основу исследований, проведенных автором по техническому заданию координационного Совета отраслевых министерств, производственных объединений и предприятий: "Разработка, внедрение и исследование лесосушильных камер с перфорированными перегородками и осевыми вентиляторами" /номер госрегистрации 75066947/, 1976; "Интенсификация процесса сушки пиломатериалов твердых лиственных пород" /номер госрегистрации 78081141/, 1978; "Интенсификация процесса сушки липовых и буковых заготовок" /номер госрегистрации 73076255/, 1979; "Проведение испытаний экспериментального образца сушильной камеры конструкции ЛЛТИ и разработка режимов камерной сушки пиломатериалов карпатского бука" /номер госрегистрации 79047909/, 1979; "Исследование физико-механических свойств и разработка предварительных режимов сушки карпатского бука" /номер госрегистрации 30038363/, 1980; "Разработать режимы камерной сушки пиломатериалов карпатского бука" /номер госрегистрации 31053346/, 1981; "Разработать раздел к "Руководящим материалам по технологии сушки буковых пиломатериалов" /номер госрегистрации 01323057095/, 1982; "Исследование, разработка и внедрение усовершенствованной сушильной камеры конструкции ЛЛТИ" /номер госрегистрации 30038869/, 1983; "Разработать режимы промежуточной и конечной влаготеплообработки при сушке пиломатериалов твердых лиственных пород /бук, дуб, граб/" /номер госрегистрации 01330025465/, 1983; "Исследование процесса сушки буковых заготовок нелинейной конфигурации" /номер госрегистрации 01311003202/, 1984; "Совершенствование процессов гидротермической обработки и склеивания древесины" /номер госрегистрации 01340037096/, 1985; "Разработать нормы допустимых дефектов сушки пиломатериалов твердых лиственных пород в мебельном производстве" /номер госрегистрации 01350035922/, 1986; "Разработать показатели качества и рекомендации по технологии сушки пиломатериалов твердых лиственных пород в мебельном производстве" /номер госрегистрации 01360011523/, 1987.

Данная проблема является разделом научного направления кафедры технологии деревообработки по проблеме "Комплексное и рациональное использование лесных ресурсов".

Цель работы. Создание систем сушильных камер с улучшенными технико-экономическими показателями на основании исследований их аэродинамики и тепломассообменных процессов при сушке древесины на примере твердых лиственных пород.

Научная новизна. Установлено, что одним из наиболее эффективных способов интенсификации процесса сушки и улучшения качества высушиваемого материала является создание равномерной циркуляции агента сушки. На основании анализа влияния равномерности циркуляции агента обработки на количественные и качественные показатели процесса сушки разработаны требования к аэродинамике лесосушильных камер периодического действия, специализирующихся на сушке пиломатериалов твердых лиственных пород. Получено аналитическое решение задачи распределения воздуха через щели перфорированной перегородки, размещенной в лесосушильной камере. Найдена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления перфорированной перегородки от основных геометрических и кинематических параметров камеры, определены его оптимальные значения. Описано истечение струй воздуха из щелей распределительных перегородок и дано объяснение сопутствующих им явлений. Исследован характер распределения температурного поля в сушильных камерах и его зависимость от параметров среды и периода сушки. Показано, что применение в лесосушильных камерах перфорированных перегородок для распределения агента сушки целесообразно как с точки зрения уменьшения энергетических затрат, так и с точки зрения улучшения качества высушиваемого материала.

Определены отличительные особенности строения и физико-механических свойств древесины твердых лиственных пород, показана изменчивость этих свойств и влияние на них процессов тепловой обработки, условий произрастания, типа насаждений, возраста, местоположения образца в стволе и других факторов. Предложена методика расчета полей влагосодержания при исследовании механизма конвективной сушки пиломатериалов, показавшая, что при сушке древесины твердых лиственных пород практически отсутствует стадия нерегулярного режима изменения влажности. Соответственно с этим дан анализ и объяснение кинетики сушки. Составлена методика построения рациональных режимов низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов твердых лиственных пород в паровоздушных камерах периодического действия. Даны рекомендации по оптимизации режимов начальной и промежуточной влаготеплообработки. Разработана методика определения остаточных деформаций в процессе сушки. Определены требования к качеству сушки пиломатериалов твердых лиственных пород.

В результате аналитических и экспериментальных исследований аэродинамических и теплоинерционных характеристик сушильных камер,

свойств древесины, кинетики и механизма сушки получены необходимые для инженерных расчетов зависимости, графики и номограммы.

Практическая значимость работы и реализация результатов в промышленности. Разработаны системы сушильных камер с перфорированными перегородками, в которых по сравнению с современными отечественными и зарубежными типами камер данного класса, процесс сушки интенсифицируется в 1,5...2,0 раза с одновременным снижением энергозатрат и улучшением качества высушиваемого материала. Составлена программа и методы инженерного расчета параметров каналов и перфорированной перегородки. Полученные математические модели аэродинамики сушильных камер и их теплоинерционных характеристик позволяют проводить технологический, тепловой и аэродинамический расчет различных модификаций конвективных сушилок и осуществлять в них широкий спектр технологических разработок режимов тепловой обработки и сушки древесины. Созданное оборудование и разработанная технология позволяют в значительной степени изменить технологический процесс сушки, осуществленный на примере трудносохнущей древесины твердых лиственных пород, и таким образом, практически решить данную проблему.

Результаты исследований внедрены на:

- предприятиях лесной и деревообрабатывающей промышленности стран СНГ и прошли практическую апробацию на Львовском заводе телевизионных узлов, Львовском мебельном комбинате, Каменка-Бугском лесопаркетном комбинате, Ужгородском механическом заводе, Велико-Березнянском, Мукачевском и Стрийском мебельных комбинатах, Свалявском и Межгорском лесокombинатах, Сколевском и Тересвянском ДЖКе, Уфимском заводе средств передвижения и других предприятиях с общим экономическим эффектом /в ценах на I.01.1991 г./ свыше 300 тыс. рублей в год.

Разработки диссертации включены:

- в "Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины" /Архангельск, 1985/, раздел "Проведение процесса сушки";

- в изменения к ГОСТу 19773-84 по режимам сушки пиломатериалов из древесины твердых лиственных пород;

- в "Инструкцию по определению показателей качества и проведению процесса сушки пиломатериалов и заготовок твердых лиственных пород" /Архангельск.: ЦНИИМОД, 1988/;

- в техно-рабочий проект опытного образца усовершенствован-

ной камеры конструкции ЛЛТИ, выполненного в 1980 году Ивано-Франковским ПХТИ /Минлеспром Украины/ по техническому заданию ЛЛТИ /заказ № 4053/ с экономическим эффектом от внедрения одной камеры 8,1 тыс. рублей в год.;

- в техно-рабочий проект модернизации сушильных камер /по схеме ЛЛТИ-3/ для Чинадиевской опытно-экспериментальной каблучно-колодочной фабрики по техническому заданию ЛЛТИ /заказ № 4410/ с экономическим эффектом от внедрения одной камеры 7,9 тыс. рублей в год /в ценах на I.01.1991 г./;

- в учебный процесс высшей школы, где они представлены двенадцатью методическими разработками, общим объемом 26,8 п.л. в курсах: "Гидротермическая обработка и консервирование древесины" и "Основы научных исследований".

Апробация работы. Основные положения диссертации и ее отдельные разделы докладывались на:

- Всесоюзных научно-технических конференциях с зарубежными участниками: "Актуальные направления развития сушки древесины" /Архангельск, 1980/, "Состояние и перспективы развития сушки древесины" /Архангельск, 1985/, "Совершенствование техники, технологии и кооперации в производстве оборудования для сушки древесины" /Архангельск, 1990/;

- Международных симпозиумах и конференциях: "Строение, свойства и качество древесины" - Симпозиум Координационного совета по современным проблемам древесиноведения /Москва, 1990/, УП Международном Симпозиуме по сушке /Лодзь, 1991/, 8 Международная конференция по сушильному делу "Новые направления и тенденции исследований в развитии промышленных и сельскохозяйственных сушилок" /Карловы Вары, 1991/, Международная конференция *JUFRO* по сушке древесины /Вена, 1992/;

- Всесоюзных научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях по сушке древесины: "Научно-технический семинар по сушке древесины токами высокой частоты" /Воронеж, 1977/, "Рациональное использование энергетических ресурсов при сушке пиломатериалов" /Саласпилс, 1983/, "Совершенствование методов и режимов сушки пиломатериалов с целью повышения их качества, снижения брака и производственных потерь" /Красноярск, 1984/, "Модификация и защитная обработка древесины" /Красноярск, 1989/;

- Всесоюзных научно-технических конференциях по проблемам древесиноведения: "Современные проблемы древесиноведения" /Воро-

неж, 1981/; "Современные проблемы древесиноведения" /Красноярск, 1987/;

- Всесоюзных и республиканских научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях по сушке материалов: "Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок" /Симферополь, 1978/, "Дальнейшее совершенствование теории, техники и технологии сушки" /Чернигов, 1981/, "Оптимизация процессов сушки" /Харьков, 1983/, "Разработка прогрессивных способов сушки различных материалов, и изделий на основе достижения теории тепло-массообмена" /Черкасы, 1987/;

- Республиканских отраслевых научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях: "Достижения техники и технологии деревообрабатывающей промышленности" /Киев, 1973; 1975/, "Повышение эффективности и качества в деревообрабатывающей промышленности" /Киев, 1977/, "Научно-технический прогресс в лесной и деревообрабатывающей промышленности" /Киев, 1981; Ивано-Франковск, 1981/, "Повышение эффективности деревообрабатывающих производств" /Киев, 1984/, "Основное направление и ускорение научно-технического прогресса в деревообрабатывающей промышленности в 12-й пятилетке" /Киев, 1986/, "Научно-технический прогресс в лесной и деревообрабатывающей промышленности" /Киев, 1991/;

- ежегодных научно-технических конференциях Львовского лесотехнического института по итогам научно-исследовательских работ /1972 - 1993 гг./.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в одной монографии, 3 брошюрах, 22 научных статьях, 35 тезисах докладов научных конференций и одном авторском свидетельстве на изобретение.

Автор защищает:

- систему сушильных камер с перфорированными перегородками, расширяющими возможности конвективного способа сушки;

- математическую модель распределения агента обработки при помощи перфорированных перегородок, позволяющую определить основные аэродинамические характеристики сушильных камер;

- методику расчета оптимальных параметров узлов и элементов циркуляционной системы и температурных полей в зависимости от периода процесса и равномерности распределения агента обработки;

- методику расчета полей влагосодержания в материале при отсутствии стадии нерегулярного режима изменения влажности и величины остаточных деформаций при сушке;

- новые режимы и требования к качеству сушки пиломатериалов и заготовок из древесины твердых лиственных пород, а также методы определения продолжительности начального прогрета, промежуточной и конечной влаготеплообработок;

- результаты аналитических и экспериментальных исследований системы сушильных камер, режимов и технологии сушки твердых лиственных пород.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 7 глав и выводов, изложенных на 313 стр., из которых 213 стр. - основной текст, 52 стр. - рисунки, 16 стр. - таблицы, а также список использованной литературы, включающий 224 наименования.

Приложения /отдельный том/ включают в себя основные методики экспериментальных исследований, программы расчетов на ЭВМ, экспериментальные данные, материалы по внедрению и использованию результатов исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор схем аэродинамики и систем сушильных камер периодического действия, проанализированы их особенности, сравнительные преимущества, недостатки, техническая характеристика. Дан анализ применяемых режимов и технологии сушки пиломатериалов из древесины твердых лиственных пород, области их использования. Выделены критерии оптимизации, охватывающие технические, технологические и экономические аспекты двух целевых функций: интенсификации T_y процесса сушки и повышение качества высушиваемого K_y материала, поставлены задачи исследования.

Анализ аэродинамики наиболее распространенных сушильных камер периодического действия /с естественной циркуляцией, эжекционного типа с вентиляторами размещенными в торце и у боковых стен/ позволил определить такие их основные недостатки, как неравномерное распределение агента сушки по штабелю материала /значение которого колеблется от 23 до 100%/ и нерациональное использование циркулирующего потока, потому что 30...70% его проходит мимо штабеля, которые приводят к некачественной сушке и неэффективной затрате материальных и энергетических ресурсов.

Применяемые в настоящее время режимы и технология сушки дре-

весины твердых лиственных пород не обеспечивают качественного и интенсивного проведения процесса в связи с отсутствием ряда точных физических данных и сведений об особенностях строения этих пород, оказывающих влияние на теоретические расчеты, кинетику и механизм сушки. Неточное определение условий проведения процесса сушки приводит к значительным дефектам, достигающим 40%.

Сушка древесины представляет собой очень сложный процесс в течении которого изменяются ее физические и эксплуатационные свойства. Эффективное проведение процесса сушки определяется двумя взаимосвязанными группами критериев, образующих соответствующие целевые функции /рис. 1/, описанных в общем виде следующим образом:

$$T_y / P_k, U_w, U_e, \rho_V, \rho_K, \rho_s, i, O_{cp}, C_T) \rightarrow \min \quad 1/1$$

$$K_y / P_k, U_w, U_e, W_k, \Delta W_k, \Delta W_s, k_G, f_G, \Phi_E, C_E) \rightarrow \max \quad 1/2$$

Изучение влияния данных критериев на условия и характер проведения процесса, позволяет рационально использовать базовый конвективный способ в решении проблемы сушки пиломатериалов и заготовок из древесины твердых лиственных пород.

Во второй главе определены нормы допустимых отклонений от средней скорости циркуляции при низкотемпературной сушке пиломатериалов твердых лиственных пород, рассмотрены средства оптимизации аэродинамических характеристик сушильных камер периодического действия. Рассмотрены два способа создания равномерности циркуляции: параллельное подключение вентиляторов и применение перфорированных распределительных перегородок. Определено влияние равномерности циркуляции агента сушки и температурного поля на равномерность просыхания материала.

Главным требованием оптимизации аэродинамики является равномерность распределения сушильного агента по штабелю материала. Увеличение скорости циркуляции ускоряет процесс и в некоторой степени улучшает равномерность просыхания пиломатериалов. Однако скорость циркуляции следует ограничить условиями теплообмена. Известные основные способы достижения равномерности циркуляции в сушильных камерах: специальная укладка и расположение штабелей /камеры с естественной циркуляцией/; установка наклонных стенок или экранов, создающих переменное сечение воздушного потока /камеры УД, ВК-4/; применение всевозможных экранов и распределительных решеток /камеры ПЛК-2, СГМ-2К, ЛЛТИ/; параллельное подключение вентиляторов /камеры МТИ, КВ ММСК-1, ВКТИМ, СПЛК-2, СГМ-2К, ЛЛТИ/



Рис. 1. Классификация критериев оптимизации

УД, ВК-4 и другие/ - имеют свои особенности, не всегда поддаются управлению и не являются универсальными. Требования к равномерности циркуляции при сушке пиломатериалов твердых листовенных пород могут быть сформулированы на основании анализа уравнения продолжительности сушки низкотемпературного процесса. Зависимость продолжительности процесса /при прочих равных условиях/ от скорости циркуляции можно аппроксимировать выражением

$$C = 1 + \frac{a}{W_{um}} \quad /3/$$

где C - коэффициент, учитывающий замедление процесса при сушке в штабеле;

a - коэффициент, зависящий от множителя $/C_2 B_1 /$, принимает значения: $a = 1,70$ при $C_2 B_1 = 40$; $a = 0,75$ при $C_2 B_1 = 80$; $a = 0,35$ при $C_2 B_1 = 120$; $a = 0,15$ при $C_2 B_1 = 160$; $a = 0,10$ при $C_2 B_1 \geq 200$; $C_2 B_1$ - множитель, показывающий совместное влияние жесткости режима, породы и размеров материала на продолжительность сушки;

W_{um} - средняя скорость циркуляции агента сушки по штабелю материала, м/с.

Если принять за критерий равномерности требование, чтобы отклонение продолжительности сушки отдельных зон штабеля не превышало 5%, то допускаемые отклонения скорости циркуляции $/\Delta W, \frac{m}{c}/$ не должны превышать при данной толщине материала $/S_1, \text{мм}/$ значений вычислительных по формулам:

- при	$W_{um} = 1,0 \text{ м/с,}$	$\Delta W = 0,35-0,0038 S_1$	/4/
- при	$W_{um} = 1,5 \text{ м/с,}$	$\Delta W = 0,52-0,0053 S_1$	/5/
- при	$W_{um} = 2,0 \text{ м/с,}$	$\Delta W = 0,92-0,0106 S_1$	/6/

Создание равномерной циркуляции сушильного агента по всему штабелю является одним из наиболее эффективных способов интенсификации процесса сушки /за счет одновременного просыхания материала/ и улучшения качества высушиваемого материала, так как при равномерном распределении агента сушки создаются также и одинаковые температурно-влажностные условия для проведения процесса.

Расчеты продолжительности сушки графоаналитическим методом с использованием данных опытных сушек и выражения /3/ позволили получить приблизительное значение /при средней скорости $W_{um} = 1,5 \text{ м/с}/$ степени влияния неравномерности циркуляции $/W_{cr} /$ на увели-

чение продолжительности / $\Delta \tau$ / сушки, час

$$\Delta \tau = 0,4 \Delta U_{\omega} \quad , \quad /7/$$

где U_{ω} - коэффициент неравномерности циркуляции агента сушки в качестве которого принят коэффициент изменчивости, %

$$U_{\omega} = \frac{100}{\bar{\omega}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \omega_i)^2}{n-1}} \quad , \quad /8/$$

n - число наблюдений.

Из формулы /7/ видно, что на каждый процент неравномерности циркуляции приходится увеличение продолжительности сушки на 0,4%.

Точность автоматического регулирования /рекомендуется пропорционально-интегральный закон регулирования/ параметров среды зависит от температурно-влажностного поля сушильной камеры, создаваемого ее циркуляционной и тепловой системой. Приблизительно зависимость равномерности распределения температур / U_t , %/ от равномерности циркуляции / U_{ω} , %/ можно выразить отношением

$$U_t = C U_{\omega} \quad , \quad /9/$$

где C - коэффициент пропорциональности;

U_t - коэффициент равномерности температурного поля в качестве которого принят коэффициент изменчивости, %

$$U_t = \frac{100}{\bar{t}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i)^2}{n-1}} \quad , \quad /10/$$

\bar{t} - средняя температура в камере, °C;

Δt_i - отклонение от средней температуры, °C.

Для лесосушильных камер с перфорированными перегородками по экспериментальным исследованиям автора получены следующие эмпирические зависимости

$$U_t = 0,17 \exp(2,33 \bar{f}) \quad /11/, \quad U_t = 11,5 \exp(-0,225 \bar{L}) \quad /12/$$

где \bar{f} - относительная площадь щелей перфорированной перегородки при $\bar{L} = 8,2$;

\bar{L} - относительная длина воздухораспределительного канала при $\bar{f} = 0,9$.

Затем по выражению

$$G_t = 0,01 U_t \bar{t} \quad /13/$$

определился значение дисперсии температур в камере при соответствующих параметрах воздухораспределительной системы и средней температуре агента сушки. При этом необходимо учесть, что равномерность температурного поля будет зависеть от степени насыщенности воздуха водяными парами, %

$$U_t = 6,1 - 0,053 \varphi, \quad /14/$$

где φ - относительная влажность воздуха, %.

В практике конструирования лесосушильных камер применяется такой способ достижения равномерности циркуляции, как рассредоточенная установка параллельно подключенных вентиляторов /например, ВК-4, ВПКТИМ с вентиляторами на вертикальных валах, КБ, ММСК-1 с наклонно установленными вентиляторами, конструкции МТИ, УЛ-1, УЛ-2, СПЛК-2, СПМ-2К, ЛЛТИ-2, ЛЛТИ-3 и других/. Возникающие при этом трудности конструктивного и эксплуатационного порядка дополняются явлением наложения воздушных потоков, резко снижающих производительность вентиляторов.

Эффективность параллельной работы вентиляторов / $\zeta_{||}$, %/ определяется величиной коэффициента наложения воздушных потоков, который находим по формуле

$$\zeta_{||} = \left(1 - \frac{V_{\Sigma}}{\sum V_i}\right) 100\%, \quad /15/$$

где $\sum V_i$ - сумма расходов отдельно работающих вентиляторов, $\text{м}^3/\text{с}$;
 V_{Σ} - расход при параллельном подключении вентиляторов, $\text{м}^3/\text{с}$.

Равномерность подачи воздуха из вентиляторной установки /имеющей четыре вентилятора/ при одном работающем вентиляторе составляет $U_w = 33,6 \dots 51,5\%$, при двух - $U_w = 4,9 \dots 40,2\%$, при четырех - $U_w = 4,6 \dots 6,9\%$. Таким образом, в воздухоподводящем /к штабелю/ канале можно достичь достаточно равномерное по длине канала распределение агента сушки. Дальнейшее распределение сушильного агента по штабелю материала зависит от его размещения, способа укладки, наличия паразитных потоков и геометрических параметров нагнетательного канала. В производственных условиях значение возрастает в 4...5 раз. Получена экспериментальная зависимость величины коэффициента наложения воздушного потока от количества / x / параллельно подключенных вентиляторов

$$\zeta_{||} = - 2,2 x^2 + 25,4 x - 23,2, \quad /16/$$

Полученные данные рекомендуется использовать при проектировании вентиляторного оборудования в сушильных камерах с параллель-

ным подключением вентиляторов, а также при определении коэффициента использования агента сушки - ϱ_v

$$\varrho_v = \frac{V_4}{V_{\Sigma}} 100\%, \text{ /Г7/}$$

где V_4 - количество агента сушки, циркулирующего в штабеле, $\text{м}^3/\text{с}$.

В третьей главе дано аналитическое решение задачи распределения агента сушки через перфорированные перегородки и определения ее коэффициента аэродинамического сопротивления. Найдены значения параметров каналов и перегородки в зависимости от геометрических и кинематических характеристик сушильных камер. Дана методика расчета элементов и узлов циркуляционной системы. Показано, что применение перфорированных перегородок позволяет получить любую заданную равномерность распределения воздушного потока.

Трубовые воздухопроводы с распределением воздуха через перфорированные перегородки или продольные щели часто применяются для нужд вентиляции. Применение их в сушильных камерах имеет ряд отличительных особенностей, требующих соответствующего исследования.

Баланс количества воздуха, которое подается в воздухопровод с распределительной перфорированной перегородкой, и вытекающего из него, описывается равенством

$$\int_0^{\tau_0} q_v(\tau) d\tau = \mu \bar{f} F \sqrt{\frac{2 \Delta P_{ст}}{\rho}}, \quad \text{/И8/}$$

где $q_v(\tau)$ - количество воздуха, подаваемого в канал /воздуховод/ в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$;

μ - коэффициент истечения воздуха из щелей, в тонкой стенке $\mu \approx 0,62$;

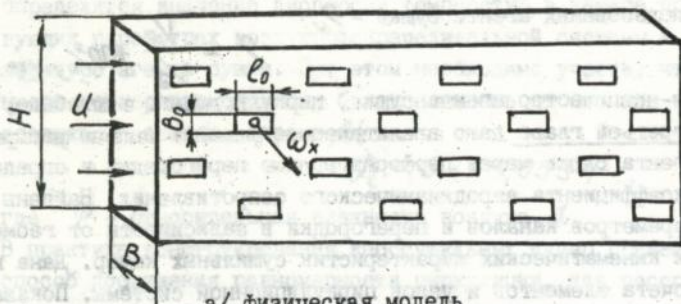
$\bar{f} F$ - суммарная площадь щелей $\int \bar{f} f$, отнесенная к площади выходного сечения канала F , то есть $\bar{f} = \int \bar{f} f / F$

$\Delta P_{ст}$ - избыточное статическое давление воздуха в канале;

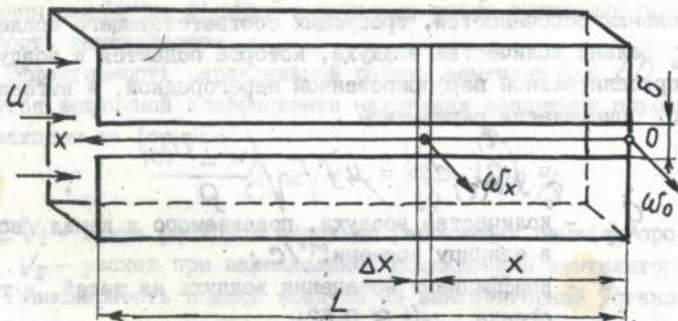
ρ - плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Так как поле скорости есть функция распределения давления в канале, то одно и то же поле скорости можно получить и при раздаче воздуха через перфорированную перегородку и через продольную щель. Таким образом, можно значительно упростить аналитическое решение задачи распределения воздуха /рис. 2/.

В задаче принята классическая методика решения аэродинамической задачи. На расстоянии X от конца /принятого за начало координат/ воздухопровода с одной продольной щелью проведем сечение и составим уравнение Бернулли, принимая в учет только избыточное давление



а/ физическая модель



б/ аналитическая модель

Рис. 2. Модель канала с перфорированной перегородкой

$$\Delta P_x + \frac{\rho U_x^2}{2} = \Delta P_0 + \Delta P \quad , \quad /19/$$

где: $\Delta P_x, \Delta P_0$ - избыточное /по отношению с атмосферным/ статическое давление в соответствующих сечениях $x, 0$, Па;
 $\frac{\rho U_x^2}{2}$ - динамическое давление в сечении x , /в сечении 0 динамическое давление равно нулю, так как осевая скорость в заглушенном конце канала $U_0 = 0$;
 ΔP - потери давления в воздуховоде, Па.

Подставив соответствующие значения членов уравнения и произведя преобразования, получим дифференциальное уравнение в общем виде, описывающее физические явления, происходящие в нагнетательном канале с продольной щелью

$$Q_x'' Q_x' + \left(\frac{\mu f}{LF}\right)^2 Q_x' Q_x - \frac{1}{8} \lambda \left(\frac{\mu f}{LF}\right)^2 \left(\frac{Q_x}{F}\right)^2 S_x' = 0, \quad /20/$$

где Q_x - расход воздуха через щель, M^3/c

$$Q_x = U_x F = \omega_x \delta L = \omega_x \Sigma f; \quad Q_x' = \frac{dQ_x}{dx}$$

U_x - осевая скорость в канале; ω_x - средняя скорость истечения из щели;

δ - ширина эквивалентной щели;

λ - коэффициент трения воздуха о стенки канала;

S_x - боковая поверхность канала.

Уравнение /20/ можно представить в безразмерной форме

$$\bar{Q}_x'' \bar{Q}_x' + (\mu \bar{f})^2 \bar{Q}_x' \bar{Q}_x - \frac{1}{2} (\mu \bar{f})^2 \lambda \bar{L} \bar{Q}_x^2 = 0, \quad /21/$$

где $\mu \bar{f}$ - параметр перфорированной перегородки;

$\lambda \bar{L}$ - параметр воздуховода /канала/.

Решение уравнения /21/ позволяет найти скорость истечения воздуха в любой щели при любых заданных параметрах перфорированной перегородки и канала, а также расхода воздуха. Однако, несмотря на принятые допущения и упрощения, полученное решение достаточно сложное для практического применения.

Рассмотрим как распределяется поток воздуха внутри канала.

Приняв условие, что

$$\bar{Q}_0 = 1; \quad \bar{Q}_1 = 0 \quad /22/$$

уравнение /21/ с условиями /22/ представляется краевой задачей обыкновенного дифференциального уравнения, решение которого позволяет получить следующую расчетную зависимость

$$Q_x = \frac{6 Q_H}{6 - (\mu \bar{f})^2} (1 - \bar{x}) \left[1 - \frac{(\mu \bar{f})^2}{6} (1 - \bar{x}) \right] \quad /23/$$

где Q_H - расход воздуха на входе в канал;

\bar{x} - безразмерная координата, $\bar{x} = x/L$.

На основании проведенных автором экспериментальных исследований равномерности распределения агента сушки при помощи перфорированной перегородки принята эмпирическая зависимость

для практики точностью описывающая данный процесс

$$\bar{w}_x = a_0 + a_1(\bar{x}) + a_2(\bar{x})^2 + a_3(\bar{x})^3, \quad /24/$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 - коэффициенты уравнения; \bar{w}_x - скорость истечения воздуха из щели в заданной точке; \bar{x} - безмерная координата.

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных на модели и в производственных условиях показал, что равномерность распределения зависит, в основном, от параметра перегородки - $\mu \bar{f}$ и параметра канала $-\lambda \bar{L}$ /являющихся коэффициентами теоретического уравнения/. Значения μ и λ для каждого конкретного случая величины постоянные. Было найдено, что с уменьшением относительной площади щелей /при постоянной величине \bar{L} / распределение поля скорости улучшается. Равномерность распределения воздуха улучшается также и при увеличении относительной длины канала /принимая $\bar{f} = const$ /. Аппроксимация экспериментальных данных позволила получить следующие эмпирические зависимости

$$\bar{f} = 0,3 \exp(0,136 U_w) \quad /25/; \quad \bar{L} = 13,8 \exp(-0,065 U_w) \quad /26/$$

Выбрав по этим зависимостям желаемую равномерность циркуляции агента сушки / U_w /, получим оптимальные значения относительной площади щелей / \bar{f} / и длины канала / \bar{L} /.

Перфорированные перегородки позволяют получить почти идеальную равномерность распределения воздуха / $U_w = 2...3\%$ /, однако аэродинамическое сопротивление такого канала очень велико.

Полное давление на входе в нагнетательный канал

$$\Delta P_H = \Delta P_{ст} + \Delta P_{д} + \Delta P_{тр} \quad /27/$$

где $\Delta P_{ст}$ - статическое давление, Па; $\Delta P_{ст} = \frac{\rho \omega_H^2}{2}$; здесь ω_H - скорости истечения из щели в канале /у входа /м/с;

$\Delta P_{д}$ - динамическое давление, $\Delta P_{д} = \frac{\rho U_H^2}{2}$, Па;

$\Delta P_{тр}$ - потери давления на трение в канале, Па

$$\Delta P_{тр} = \int_0^x \frac{1}{8} \lambda \rho U_x^2 \frac{dS_x}{F}$$

Произведя соответствующие преобразования, получим

$$\Delta P_H = \left[\frac{\bar{\omega}^2}{(\mu \bar{f})^2} + 1 + \lambda \bar{L} \right] \frac{\rho U_H^2}{2},$$

где $\bar{\omega}$ - относительная скорость, $\bar{\omega} = \omega_H / \omega_{ср}$

Приняв, что $\frac{\bar{w}^2}{(\mu \bar{f})^2} + 1 + \lambda \bar{L} = \xi$, /29/

получим

$$\Delta \rho_H = \xi \frac{\rho U_H^2}{2} \quad /30/$$

Если обе части уравнения /30/ умножить на $\frac{2}{\rho U_H^2}$, то получим, что

$$\xi = 2 \frac{\Delta \rho_H}{\rho U_H^2} = 2 E_u \quad /31/$$

где E_u - критерий Эйлера.

По результатам экспериментальных исследований получены эмпирические зависимости аэродинамического сопротивления от относительной площади щели и длины канала

$$\xi = 2,2 \exp(0,052 \bar{L}) \quad /32/; \quad \xi = 3,1 \bar{f}^{-1,7} \quad /33/$$

которые связаны между собой отношением

$$\bar{f} = 1,22 \exp(-0,03 \bar{L}) \quad /34/$$

Формула /29/ преобразованная в расчетную зависимость позволяет промоделировать на ЭВМ различные параметры воздухораспределительного канала и перегородки, а затем рассчитать их элементы.

В четвертой главе описаны особенности строения и физико-механических свойств древесины твердых лиственных пород. Характерно, что признаки /тип перфорации сосудов, число и характер распределения сосудов, направления контактных стенок сосудов, включения в полостях клеток и другие/ анатомического строения по разному влияют на процессы гидротермической обработки древесины. Отмечается чрезвычайная изменчивость свойств древесины как по породам, так и в пределах одного биотипа, что необходимо учитывать при проведении процессов сушки и тепловой обработки.

Положительное влияние анатомического строения на процессы гидротермической обработки древесины оказывают такие признаки: равномерное расположение сосудов, простые перфорации, узкие полосы равномерно расположенной паренхимы, отсутствие тилля и веществ в сосудах, отсутствие толстостенных волокон. Капиллярные явления древесины тесно связаны со структурой клеточной стенки, породой древесины, местоположением в древесине, ее возрастом и другими факторами.

Исследование распределения влажности свежесрубленной древеси-

ны бука показало отклонения как по высоте ствола $/h/$, так и по диаметру $/d/$, что выражено эмпирическими зависимостями:

$$W_n = 74,0 + 0,60 h \quad /35/; \quad W_n = 74,3 + 0,61 d \quad /36/.$$

$$W_u = 63,7 + 0,76 h \quad /37/; \quad W_u = 85,9 - 0,51 d \quad /38/$$

Обобщены данные по величине усушки основных лиственных пород. Построена номограмма для определения припусков на усадку буковых пиломатериалов в зависимости от конечной влажности $/W_k/$ и толщины $/S_i/$ материала. Получены расчетные формулы

$$\beta_t = (0,12 + \frac{2,7}{S_i})(40 - \bar{W}_k) /39/; \quad \beta_r = (0,075 + \frac{1,2}{S_i})(40 - \bar{W}_k) \quad /40/$$

$$\beta_v = (12,0 + \frac{87,5}{S_i}) K \quad /41/; \quad \text{где } K = 0,93 - 0,023 \bar{W}_k$$

$\beta_t, \beta_r, \beta_v$ - коэффициент тангенциальной, радиальной и объемной усушки.

Таким образом, усадка поверхностных слоев начинается при средней влажности материала $W \approx 40\%$, что позволяет повысить величину переходной влажности до 35...40%.

В пятой главе приводятся материалы исследования механизма конвективной сушки твердых лиственных пород, анализ методов расчета полей влагосодержания. Исследование послойной влажности /описанное не по параболической, а по косинусоидальной зависимости/ показывает, что при сушке пиломатериалов и заготовок из древесины твердых лиственных пород практически отсутствует стадия нерегулярного режима изменения влаги. Определено значение влажности материала, при которой наблюдается наибольшая величина остаточных деформаций. Проверка классических уравнений /Льков А.В., Шубин Г.С./ полей влагосодержания при сушке пиломатериалов твердых лиственных пород показала большие отклонения расчетных данных от экспериментальных. Причиной неудовлетворительного совпадения является практическое отсутствие при их сушке стадии нерегулярного режима перемещения влаги. Другой причиной можно считать неправильный подбор исходного уравнения распределения влажности по толщине материала. Более точным является уравнение

$$U(x, \tau) = U_n + (U_u - U_n) \cos \frac{\pi x}{2R} \quad /42/$$

Анализ методов расчета полей влагосодержания и исследования, проведенные автором, позволили получить уравнение влагосодержания в центре $/U_u/$ и на поверхности сортифта $/U_n/$

$$U_u(\tau) = U_p + (U_n - U_p) \exp\left(-\frac{\pi^2 B_i' F_0'}{4B_i' + \pi^2}\right); \quad /43/$$

$$U_n(\tau) = \frac{U_u(\tau) + B_i' U_p}{B_i' + \pi^2/4} \quad /44/$$

Так как в процессе сушки изменяются режимные параметры среды и влажность материала, то на n -ой ступени режима влажность в данный момент времени $/\tau/$ и координата $/x/$ определится по формуле

$$U_{(x,\tau)}^{(n)} = U_{p(n)} + (U_{n(n)} - U_{p(n)}) \exp\left(-\frac{\pi^2 B_i'(n) F_0'(n)}{4B_i'(n) + \pi^2}\right) \times \\ \times \left(\frac{4 B_i'(n) \cos \frac{\pi x}{2R} + \pi^2}{4 B_i'(n) + \pi^2}\right) \quad /45/$$

где B_i', F_0' - массообменные критерии Био и Фурье;

U_p, U_n - соответственно равновесное и начальное влагосодержание древесины;

R - половина толщины сортимента, M .

Чтобы убедиться в отсутствии стадии нерегулярного режима, были проведены специальные опыты, при которых одновременно высушивались букковые заготовки толщиной 19, 25, 32 и 40 мм. Раскрой секции влажности на полоски в процессе сушки позволил определить характер изменения и распределения влажности по толщине /рис. 3/.

Скорость сушки в стадии регулярного режима период падающей, скорости сушки определяется с одной стороны теплопроводностью $/a'/$, а с другой - влагообменом $/\alpha'/$

$$\frac{dw}{d\tau} = \mu^2 \frac{a'}{R} (W - W_p) \quad /46/; \quad \frac{dw}{d\tau} R \pi = \alpha' (W_n - W_p) \quad /47/$$

из которых находим

$$\alpha' = \frac{R^2 \mu^2 \theta}{U^2} \quad \text{и} \quad \alpha' = \frac{R \mu^2 \theta}{\frac{U^2}{HR}}, \quad \text{где} \quad \theta = \frac{dw}{d\tau} \frac{1}{W - W_p}$$

коэффициент сушки, который определяется из кривой скорости сушки и из кривой сушки по средней скорости за малый промежуток времени.

Наиболее удачной моделью исследования динамики развития внутренних напряжений при сушке является предложенная Б.Н. Уголевым трехстержневая, которая характеризует изменение остаточных деформаций в поверхностных и центральной частях сортиментов. Более сложной является многостержневая система для которой величина напряжений в i -ом стержне σ_i' в j -ый момент времени рассчитывается по

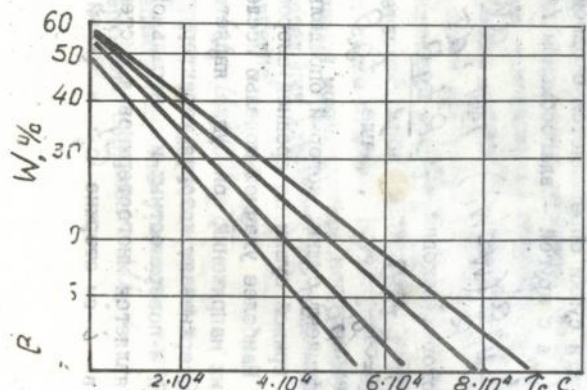
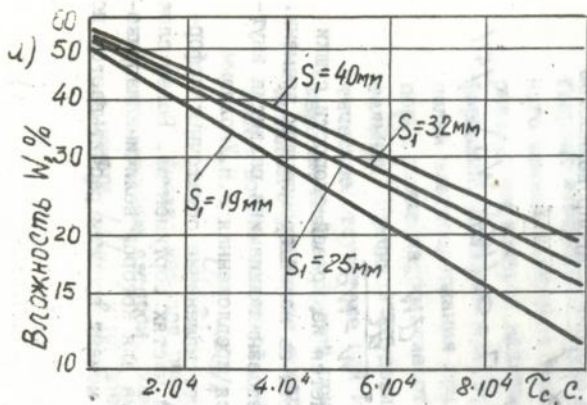


Рис. 3. Коэффициент сушки: а/ центрального; б/ поверхностного слоя

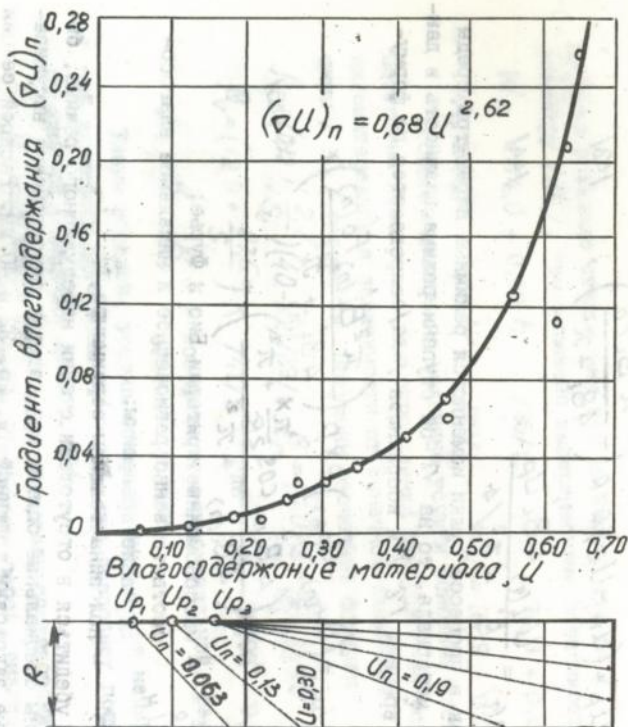


Рис. 4. Изменение градиента влажности поверхностного слоя при сушке бука

формуле

$$G_i^j = G_i^{j-1} + \delta G_i^j, \quad /48/$$

где G_i^j - величина напряжений в i -том стержне, имевшихся в момент времени $j-1$;
 δG_i^j - приращение напряжений в i -том стержне за промежуток времени $j-1 \dots j$

$$\delta G_i^j = \beta \bar{E}_i^j \left[\delta \Delta W_i^j - \frac{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i^j \delta \Delta W_i^j}{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i^j} \right] \quad /49/$$

где β - коэффициент усушки;
 \bar{E}_i^j - модуль упругости древесины.

Модуль упругости в i -том сечении материала в момент времени t в зависимости от температуры t и влажности W аппроксимируется линейным уравнением

$$E_{(W,t)} = a - \beta t + (ct - d)W \quad /50/$$

где a, β, c, d - коэффициенты уравнения, равные, соответственно, для бука: 980; 8,0; 0,21; 25,3 и для дуба: 1200; 9,5; 0,24; 31,3.

Предложена методика измерения деформации поверхностных слоев, по которой определяется характер развития в них напряжений. На простроганных заготовках /контрольных образцах/ перед сушкой размечаются зоны выпилки контрольных секций и измеряется начальная длина наружных и внутренних зон, из которых будут в последствии отбираться полоски.

По известной величине полной усушки находим длину слоев-полосок в абсолютно сухом состоянии

$$l_0 = l_i \left(1 - \frac{30\beta}{100} \right) \quad /51/, \quad \text{где } \beta = \frac{(l_1 - l_2) + 100}{l_1 (30 - W_k)} \quad /52/$$

Определив величину изменения длины Δl поверхностных и внутренних слоев и отнеся ее к начальной длине, получим значение деформации ϵ этих слоев. Имея значения деформации можно найти величину напряжений

$$G_i^j = \epsilon_i^j \bar{E}_i^j \quad /53/$$

В процессе исследований было обнаружено, что наибольшая величина остаточных деформаций наблюдается при $\bar{W} \approx 25\%$ для различных пород и толщин. Данное значение влажности и является вторым значением переходной влажности в режимах сушки.

Большой интерес представляет определение градиента поверх-

ностной влажности ΔU_n различных пород во время сушки

$$(\Delta U)_n = 2(W_n - W_p) / S_1 \quad /54/$$

Получены эмпирические зависимости

- для бука

$$(\Delta U)_n = 0,53 U^{2,47} \quad /55/$$

- для дуба

$$(\Delta U)_n = 0,68 U^{2,62} \quad /56/$$

Долю толщины, отсекаемую касательными кривых /55/ или /56/ на линии $U = 0,30$, можно ориентировочно считать глубиной испарения и судить по ней /по доле толщины/ о потенциале сопротивляемости поверхностных слоев, ибо, чем толще слой, тем меньше вероятность нарушения его целостности /рис. 4/.

В шестой главе разработаны рекомендации по оптимизации режимов сушки, начального прогрева, промежуточных и конечных влаготеплообработок. Найдены их математические модели, учитывающие количественные и качественные характеристики данных процессов. Изменение режимных параметров в процессе сушки принято ступенчатым, однако представленное в работе описание изменения режимных параметров по времени позволит перейти к АСУ ТП сушки пиломатериалов.

Проведенные Шубиным Г.С. исследования позволили составить расчетную зависимость продолжительности начального прогрева по аналогии с расчетом продолжительности сушки. На практике такой метод реализовать трудно в связи с отсутствием сведений о циркуляционных характеристиках камеры, начальной влажности и температуры материала.

Целевая функция оптимизации начального прогрева материала может быть записана следующим образом

$$Z = C [\tau_{np}(\rho_g, W, t_c, t_{\partial p}, S_1)] \rightarrow \min \quad /57/$$

где C - себестоимость процесса прогрева; S_1 - толщина материала, мм; τ_{np} - продолжительность прогрева, час.; $t_{\partial p}$ - температура древесины в центре сортимента, принимаем

$$t_{\partial p} = t_c - 3, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В результате аналитических и экспериментальных исследований процесса нагрева получена следующая зависимость

$$\tau_{np} = 0,55 \cdot 10^{-7} \rho_g t_{\partial p}^{0,92} S_1 \lg W, \text{ час.}, \quad /58/$$

и в частных случаях:

- для бука $\tau_{np} = 2,95 \cdot 10^{-5} t_{\partial p}^{0,92} S_1 \lg W, \text{ час.};$

- для дуба $\tau_{np} = 3,08 \cdot 10^{-5} t_{ap}^{0,92} S_1^2 \lg W$, час; /60/

- для граба $\tau_{np} = 3,35 \cdot 10^{-5} t_{ap}^{0,92} S_1^2 \lg W$, час. /61/

Построены номограммы /рис. 5/ и составлены таблицы, по которым можно определить продолжительность начального прогрева. При этом отсчет продолжительности произведен с момента достижения в камере заданных параметров среды, чем исключается влияние тепловой инерционности камеры, начальных тепловых и влажностных характеристик материала.

По результатам экспериментальных исследований найдена продолжительность обязательной /при $W = 25\%$ / промежуточной влаготеплообработки:

$$\tau_{дук} = 1,8 - 0,18 S_1 + 0,0037 S_1^2 / 62/ \quad \tau_{дуб} = 1,8 - 0,15 S_1 + 0,0053 S_1^2 / 63/$$

Ориентировочно продолжительность промежуточной влаготеплообработки / $\tau_{по}$, час/ при скорости циркуляции $W_{ум} = 1,0 \dots 1,5$ м/с для пиломатериалов толщиной $S_1 > 20$ мм определится по формуле

$$\tau_{по} = B + A \sqrt{(S_1 - 20)^3}, \quad /64/$$

где A, B - коэффициенты, учитывающие влияние породы; для бука и клена $A = 0,025$, $B = 3,5$; для ясена $A = 0,027$, $B = 4,0$; для дуба и ильма $A = 0,036$, $B = 5,5$; для граба $A = 0,028$, $B = 6,5$.

Продолжительность конечной влаготеплообработки зависит от породы древесины, толщины и средней конечной влажности пиломатериалов, параметров среды. При конечной влаготеплообработке температуру среды принимают по последней ступени, а психрометрическую разность - $1 \dots 2^\circ\text{C}$. Продолжительность конечной обработки / $\tau_{к0}$, час/ можно определить по формуле

$$\tau_{к0} = C S_1^2 \bar{W}_k \sqrt{\frac{W_u}{W_n}} \cdot 10^{-3} \quad /65/$$

где C - коэффициент, учитывающий породу древесины: для бука и клена $C = 0,23$; для ясена $C = 0,26$; для дуба и ильма $C = 0,33$; для граба $C = 0,28$;

W_u, W_n - соответственно, влажность в центре и на поверхности сортамента, % абс.

Для расчета продолжительности обработки по формуле /65/ отношение W_u/W_n можно принять равным 2,5. Рациональный режим сушки должен обеспечить минимальную длительность процесса и наименьший расход тепла при сохранении качества высушиваемого материала. С

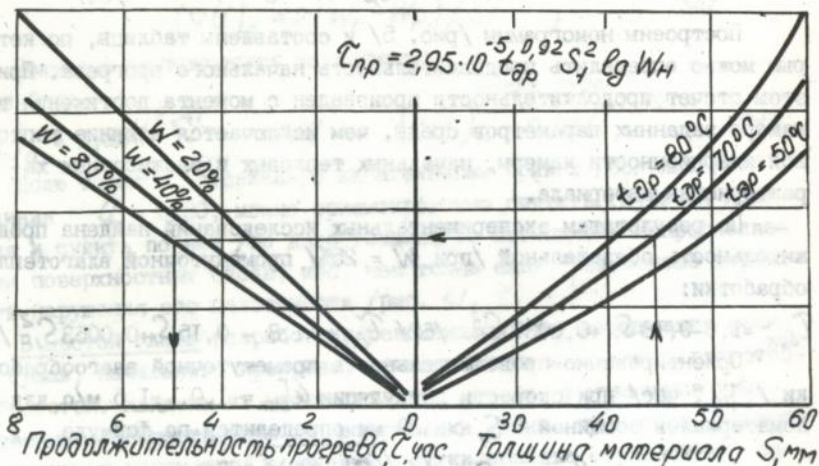


Рис. 5. Номограмма определения продолжительности начального прогрева букowych пиломатериалов

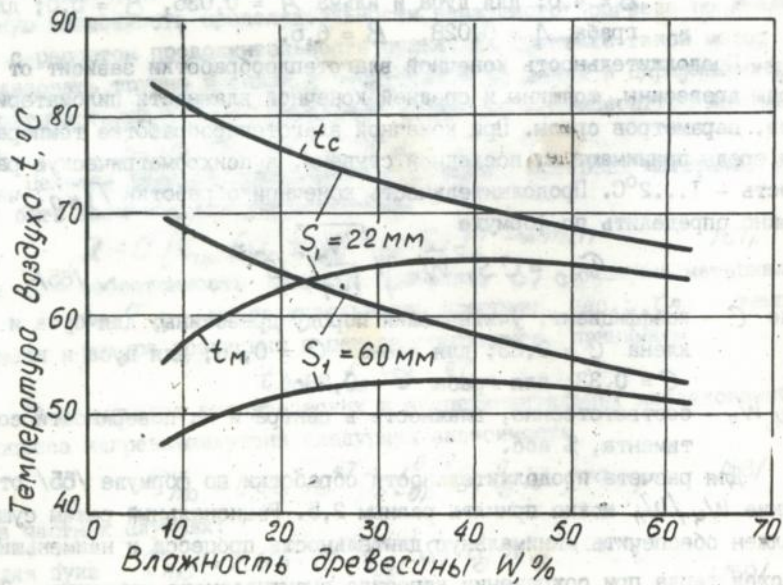


Рис. 6. Изменение параметров среды при сушке бука

повышением относительной влажности воздуха уменьшается значение критической влажности и скорости сушки, но увеличивается коэффициент влагопроводности, поэтому есть смысл, определив параметры среды в начале процесса, увеличивать одновременно температуру по сухому и мокрому термометру /рис. 6/. По приведенным экспериментальным исследованиям и расчетам на ЭВМ качество сушки обеспечивают параметры среды, описанные уравнениями параболы

$$t_c = a_{01} U^2 + a_{11} U + a_{21} \quad /66/; \quad \Delta t = a_{02} U^2 + a_{12} U + a_{22} \quad /67/;$$

$$t_M = a_{03} U^2 + a_{13} U + a_{23} \quad /68/;$$

где $a_{01}, a_{02}, a_{03}, \dots$ - коэффициенты уравнения регрессии;
 U - влагосодержание материала, $U = W/100$

Изменения параметров среды были описаны также и во временной зависимости. Например,

$$\text{для бука при } S_t = 32 \text{ мм} \quad , \quad t_c = 54 \tau^{0,067} \quad , \quad ^\circ\text{C} \quad /69/;$$

$$\text{для дуба при } S_t = 32 \text{ мм} \quad , \quad t_c = 39 \tau^{0,08} \quad , \quad ^\circ\text{C} \quad /70/;$$

где τ - продолжительность сушки, час.

Решая совместно /66/ и /69/ для бука /аналогично и для других пород/, учитывая динамику развития остаточных деформаций процесс сушки был разделен на ступени: при толщине до 32 мм - три ступени, в диапазоне $32 < S_t < 50$ мм - четыре ступени, и при $50 < S_t < 75$ - пять ступеней.

Описание изменения режимных параметров от времени позволит ввести микропроцессорную технику для ведения процесса сушки и АСУ ТП сушки пиломатериалов.

В седьмой главе обобщены результаты экспериментальных исследований и производственных испытаний лесосушильных камер, в которых применены распределительные перфорированные перегородки, определена их экономическая эффективность. Разработаны требования к качеству сушки пиломатериалов по основной группе твердых листовых пород. Экономическая эффективность режимов сушки и влаготеплообработки подтверждена опытными данными. Исследование аэродинамики сушильных камер показали, что уменьшение неравномерности циркуляции способствует интенсификации процесса, улучшению качества высушиваемого материала, снижению затрат тепловой и электрической энергии.

С одной стороны геометрические параметры сушильных камер можно подобрать таким образом, чтобы равномерность распределения воздушного потока была наилучшей, а с другой стороны такое сочетание

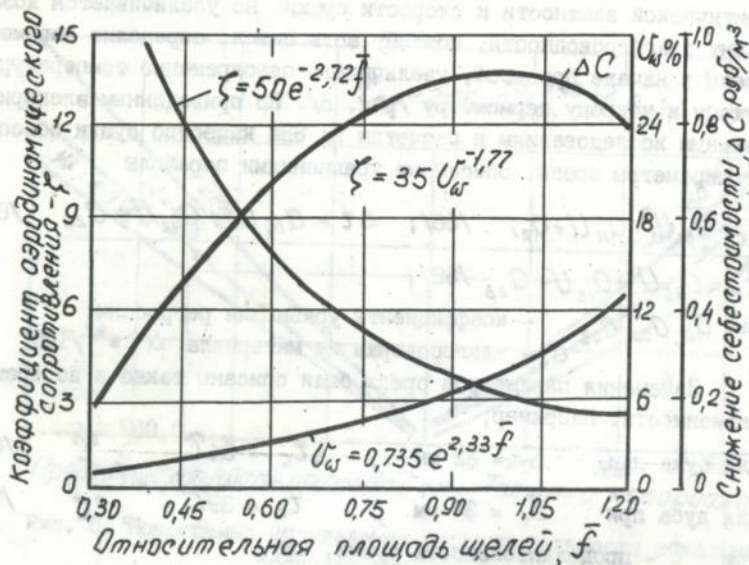


Рис. 7.1. Зависимость ζ , U_w и ΔC от \bar{f}

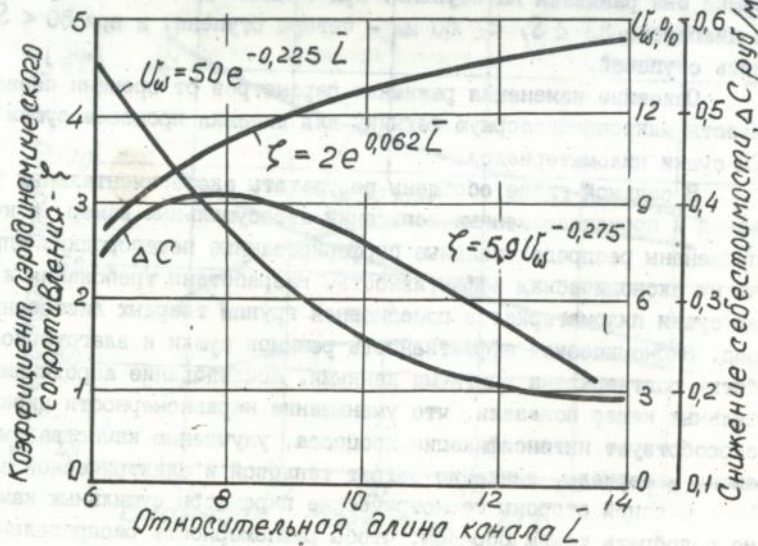


Рис. 7.2. Зависимость ζ , U_w

\bar{L}

геометрических параметров приводит к значительному повышению аэродинамического сопротивления кольца циркуляции и, соответственно, к увеличению расхода электроэнергии на привод вентиляторов и снижению эффективности работы вентиляторной установки и в результате к повышению затрат на сушку. На рис. 7.1 и 7.2 изображена взаимосвязь аэродинамического сопротивления перфорированных перегородок ζ и равномерности циркуляции $U_{\text{ср}}$ от параметров перфорированной перегородки f и относительной длины канала L и их влияние на снижение себестоимости процесса сушки ΔC , руб./м³. Данные зависимости обобщают результаты лабораторных и производственных экспериментальных исследований, проведенных на лесосушильных камерах ЛЛТИ-1 /построенные на Львовском заводе телевизионных узлов и Каменка-Бугском лесопаркетном комбинате/, ЛЛТИ-2 /эксплуатируемых на Ужгородском механическом заводе/ и ЛЛТИ-3 /эксплуатируемых на Львовском мебельном комбинате/.

Лесосушильные камеры с перфорированными перегородками могут применяться при сушке всех древесных пород при низкотемпературном режиме. Но особенно хорошо они зарекомендовали себя при сушке трудносохнущих сортиментов, к которым относятся и твердые лиственные породы. Сушка таких материалов очень длительная, поэтому остро стоит вопрос создания средней по интенсивности, но равномерной циркуляции агента сушки. Сравнительные характеристики камер с перфорированными перегородками /конструкции ЛЛТИ/ и наиболее распространенными сушильными камерами периодического действия приведены в таблице.

Технические характеристики сушильных камер

№ п/п	Показатели	Типы камер				
		эжекторные	СПЛК-2: УЛ-1	УЛ-2 : дрв.	ЛПА-Гипро- : ЛЛТИ-1	ЛЛТИ-2
1	2	3	4	5	6	7
1	Удельная установленная мощность вентилятора - $N_{\text{уд}}$, квт/куб.м	1,20	0,6	1,20	0,85	0,90
2	Удельная тепловая мощность калорифера, $-F_{\text{уд}}$ м ² /м ³	18,7	13,8	18,2	18,8	13,3

I :	2	:	3	:	4	:	5	:	6	:	7
3	Коэффициент неравномерности циркуляции - U_w , %		56		23		28		35		12
4	Коэффициент использования воздушного потока - q_v , %		30...70		50...70		50...70		30...70		80...90
5	Отклонение температуры от среднего значения в камере, t_c , °C		7...10		3...4		3...4		5...7		2...3

Проведенные в производственных условиях экспериментальные исследования подтверждают правильность теоретических выводов и рекомендаций по оптимизации аэродинамических и температурных характеристик сушильных камер с перфорированными перегородками, режимов и технологии сушки пиломатериалов из древесины твердых листовых пород. Экономическая эффективность результатов исследований 3,39...7,72 руб./м³ высушиваемого материала /в ценах на I.01.1991 года/, что для предприятий Минлеспрома Украины составляло экономии более 2 млн. рублей.

В В О Д И

1. Разработаны системы сушильных камер с улучшенными технико-экономическими показателями, имеющие по сравнению с современными отечественными и зарубежными типами сушильных камер данного класса, в 2...3 раза более равномерную циркуляцию и почти в 2 раза более полное использование воздушного потока. Создание эффективной циркуляции выравнивает температурно-влажностные поля агента обработки, интенсифицирует конвективный теплообмен и способствует более точному ведению процесса гидротермической обработки и, соответственно, повышению качества высушиваемого материала. Разработана и апробирована теория расчета созданных систем сушильных камер.

2. Разработаны научные основы анализа различных схем паровоздушных сушильных камер периодического действия, режимов и технологии сушки древесины на критериальной основе. Предложены критерии

оптимизации, охватывающие технические, технологические и экономические аспекты проблемы.

3. Предложена классификация средств усовершенствования аэродинамики лесосушильных камер периодического действия, удовлетворяющая требованиям равномерности циркуляции агента сушки, уменьшения паразитных потоков и создания минимального аэродинамического сопротивления. Установлено влияние равномерности циркуляции на продолжительность процесса сушки и распределение температурного поля.

4. Детально исследовано выравнивающее действие перфорированных перегородок в схеме циркуляции сушильных камер. Получены теоретические и экспериментальные зависимости равномерности распределения воздушных потоков от: параметров перфорированной перегородки и воздухопроводов, кинематических и динамических характеристик объекта исследования. Моделированием на ЭВМ, графическим и расчетным путем найдены оптимальные значения параметров канала и перфорированной перегородки, определено их аэродинамическое сопротивление. Исследован факел струи при выходе из перфорированной перегородки, позволивший определить порядок рассредоточения отверстий на перегородке и оптимальное расстояние от штабеля материала. Разработана методика инженерного расчета основных элементов циркуционного оборудования. Определен энергетический и экономический эффект, условия и способы применения перфорированных перегородок в лесосушильных камерах.

5. Изучены особенности строения и физико-механических свойств древесины твердых лиственных пород: плотности, усадки, распределения влажности в свежесрубленном состоянии и в процессе тепловой обработки, прочности древесины на сжатие, растяжение и скалывание. Определено влияние гидротермической обработки на изменение этих свойств и максимально допустимые уровни температуры агента обработки на первой и последней ступени режима.

6. Установлено, на основании исследования полей влагосодержания и кривых скорости сушки пиломатериалов твердых лиственных пород, практическое отсутствие стадии нерегулярного режима, т.е. есть удаление влаги, происходит в стадии регулярного режима с падающей скоростью сушки. Используя графоаналитический метод расчета полей влагосодержания получены уравнения, описывающие распределение влагосодержания в пиломатериалах при постоянных и изменяющихся /ступенчато/ параметрах среды, которые подтверждены экспериментальными исследованиями.

7. Разработан графоаналитический метод определения остаточных деформаций при сушке древесины твердых лиственных пород, основанный на использовании аппарата теории линейной вязко-упругости для расчета напряжений, возникающих в материале при сушке. Предложен метод экспериментального определения остаточных деформаций при сушке, который показал, что независимо от породы и толщины материала остаточные деформации достигают максимального значения при влажности около 25%, данный момент - самый оптимальный для проведения промежуточной влаготеплообработки. Определено влияние на продолжительность влаготеплообработки режимных параметров, породы и толщины материала. Разработаны режимы и определена продолжительность начального прогрева /перед сушкой/ пиломатериалов твердых лиственных пород.

8. Исследована кинетика и механизм конвективной сушки пиломатериалов твердых лиственных пород, найдены влагокоэффициенты и их изменение в зависимости от породы, толщины, параметров среды, периода процесса и других факторов. Получены кривые изменения режимных параметров среды по которым можно, применяя микропроцессорную технику, провести процесс сушки с минимальной длительностью при сохранении качественных показателей. Разработаны режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов твердых лиственных пород, в которых предусмотрено изменяющееся количество ступеней сушки. При этом, для пиломатериалов толщиной до 32 мм режимы трехступенчатые с переходной влажностью 35 и 25%, для пиломатериалов толщиной свыше 32 до 50 мм - четырехступенчатые с переходной влажностью 35, 25 и 15% и для пиломатериалов толщиной свыше 50 до 75 мм - пятиступенчатые с переходной влажностью 35, 25, 20 и 15%.

9. Определены требования к качеству сушки пиломатериалов твердых лиственных пород и допустимые нормы дефектов сушки, применение которых в производственных условиях позволит получить экономический эффект до 7,33 руб./м³ в ценах на I.01.1991 г. Проведенные производственные опытные сушки подтвердили правильность теоретических выводов и рекомендаций по оптимизации аэро- и термодинамики сушильных камер, режимов и технологии сушки пиломатериалов твердых лиственных пород, эффективность которых составляет 3,39...7,72 руб./м³ в ценах на I.01.1991 г. Применение предлагаемого оборудования и технологии только по Минлеспрому Украины позволит получить экономический эффект более двух миллионов рублей в год в ценах по состоянию на I.01.1991 г.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Билей П.В. Сушка древесины твердых лиственных пород: Экология. - М., 1992. - 224 с.

2. Билей П.В. Результаты опыта эксплуатации лесосушильных камер, разработанных в ЛЛТИ //Материалы научно-техн. конференции. - Киев, 1973. С.62.

3. Брыкин К.И., Билей П.В., Шевага И.М., Дутчак М.П. Исследование динамических характеристик сушильных камер с распределительными щитами и их влияние на равномерность сушки пиломатериалов //Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая промышленность. - Киев: Будівельник, 1975. -С.29-32.

4. Билей П.В., Брыкин К.И. Определение коэффициента гидравлического сопротивления воздуховода с перфорированной перегородкой //Достижения техники и технологии деревообрабатывающей промышленности: Тез. докл. научно-техн. конф. - Киев, 1975. -С.76-77.

5. Билей П.В., Шевага И.М. Исследование температурного поля лесосушильной камеры ЛЛТИ //Лесное хозяйство, лесная и деревообрабатывающая промышленность. - Киев: Вища школа, 1975. -С.28-29.

6. Билей П.В., Брыкин К.И., Филипович Р.С. Методика исследования равномерности распределения воздуха через перфорированные перегородки //Повышение эффективности и качества в деревообрабатывающей промышленности: Тез. докл. научно-техн. конф. - Киев, 1977. -С.63-64.

7. Билей П.В., Кныш В.А., Филипович Р.С. Разработка и внедрение лесосушильных камер с перфорированными перегородками: Тез. докл. научно-техн. семинара по сушке древесины токами высокой частоты. - Воронеж, 1977. -С.77-80.

8. Билей П.В., Дутчак М.П. Лесосушильные камеры с перфорированными перегородками //Деревообрабатывающая пром-сть, 1978. -№ I. -С.7-8.

9. Билей П.В. Некоторые особенности расчета лесосушильных установок с перфорированными перегородками //Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок: Тез. докл. Всес. научно-техн. совещания. - Киев, 1978. -С.52.

10. Билей П.В., Богданов Е.С., Дутчак М.П. Результаты испытаний лесосушильной камеры ЛЛТИ-2. Реферативный сборник "Механическая обработка древесины", 1979. -№ II. -С.4-5.

11. Билей П.В. Расчет элементов лесосушильных камер с перфори-

рованными перегородками //Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая пром-сть. - Киев: Будівельник, 1979. -С.58-60.

12. Билей П.В. Особенности аэродинамических схем и конструкций камер ЛЛТИ //Актуальные направления развития сушки древесины: Тез. докл. Всес. конф. - Архангельск, 1980. -С.178-180.

13. Билей П.В., Павлюст В.Н. Некоторые вопросы аэродинамики лесосушительных камер с перфорированными перегородками //Дальнейшее совершенствование теории, техники и технологии сушки: Тез. докл. Всес. научн. конф. - М., 1981. -С.140-141.

14. Билей П.В. Параллельная работа вентиляторов в лесосушительных камерах периодического действия //Деревообр. пром-сть. - 1981. -№ 9. -С.10.

15. Билей П.В. О формировании и развитии струи воздуха в лесосушительных камерах с перфорированными перегородками //Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая промышленность. - Киев: Будівельник, 1982. -С.91-93.

16. Билей П.В., Винтонив И.С. О влажности древесины бука европейского, произрастающего в Украинских Карпатах. ИВУЗ.: Лесной журнал. - 1983. -№ 1. -С.73-76.

17. Билей П.В. Экономическая эффективность применения перфорированных перегородок в лесосушительных камерах //Всесоюзн. конф. по сушке. - Харьков, 1983.

18. Билей П.В. Энергетические аспекты применения перфорированных перегородок в лесосушительных камерах //Рациональное использование энергетических ресурсов при сушке пиломатериалов: Тез. докл. Всес. семинара. - Саласпилс, 1983. -С.53-54.

19. Билей П.В., Травский В.П. Распределение температурного поля в лесосушительной камере ЛЛТИ-2 //Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая пром-сть. -Киев, 1983. -№ 2, -С.34.

20. Билей П.В., Винтонив И.С., Дутчак М.П. Влияние процесса сушки на некоторые механические характеристики бука европейского // Совершенствование методов режимов сушки пиломатериалов с целью повышения их качества, снижение брака и производственных потерь. - Красноярск, 1984. -С.66-67.

21. Павлюст В.Н., Билей П.В., Андрашек И.В. Динамика пропарки букowych профилных заготовок //Совершенствование методов и режимов сушки пиломатериалов с целью повышения их качества, снижения брака и производственных потерь: Тез. докл. межвузовской конференции. - Красноярск, 1984. -С.67-68.

22. Билей П.В. Основы аэродинамики лесосушильных камер с перфорированными перегородками //ИВУЗ: Лесной журнал: - 1984, -№ 6. -С.72-75.

23. Билей П.В. Сравнительный анализ качественных характеристик древесины бука европейского и восточного. - М., 1985, Деп. ЦНТИ лесхоза 30.04.85 № 273 лх-83 Деп. -С.116-118.

24. Билей П.В., Андрашек И.В., Басальга Е.В. Проблема качества сушки пиломатериалов твердых лиственных пород //Основные направления ускорения научно-технического прогресса в деревообрабатывающей пром-сти в 12-й пятилетке: Тез. докл. Республ. научно-техн. конф. - Киев, 1986. -С.168-169.

25. Билей П.В., Винтонив И.С., Костик Н.В. Влияние условий произрастания на микроструктуру и статистическую твердость ясеня обыкновенного. - В кн.: Современные проблемы лесоведения. - Красноярск, 1987. -С.81-82.

26. Билей П.В., Белошицкий В.М., Басальга Е.В., Илюк В.И. Способ диалектрической сушки древесины. Авторское свидетельство 1303797 А. Бюл. № 14, 15.04.1987.

27. Билей П.В., Горшкова Т.Г. Кондиционирующая влаготеплообработка при сушке древесины твердых лиственных пород //Тез. докл Респ. научн.-техн. конф. - Черкассы, 1987/.

28. Билей П.В., Басальга Е.В. Применение метода модели при исследовании аэродинамики лесосушильных камер //Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая пром-сть, - Киев, 1988. -№ 19. -С.65-67.

29. Инструкция по определению показателей качества и проведению процесса сушки пиломатериалов и заготовок твердых лиственных пород древесины //Богданов Е.С., Билей П.В., Павлюст В.Н., Андрашек И.В. - Архангельск: ЦНИИМОД, 1988, - 19 с.

30. Билей П.В., Горшкова Т.Г. Определение продолжительности начальной влаготеплообработки при сушке пиломатериалов //Научно-техн. прогресс в лесной и деревообрабатывающей пром-сти: Тез. докл. 17 научно-техн. конф. - Киев, 1989.

31. Билей П.В., Павлюст В.Н., Андрашек И.В., Басальга Е.В. Тепловая стерилизация букowych пиломатериалов и ЧМЗ //Модификация и защитная обработка древесины: Тез. докл. Всесоюзной конф. -Красноярск, 1989.

32. Билей П.В., Гербей В.М., Новикова С.Ф. Энергосберегающее управление процессом сушки в камерах периодического действия //

Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая промышленность. Вып. 20. - Киев: Будівельник, 1989.

33. Билей П.В. Состояние и направление развития техники и технологии сушки пиломатериалов на предприятиях западных областей Украины //Совершенствование техники, технологии и кооперации в производстве оборудования для сушки древесины: Тез. докл. Всес. научно-техн. конф. - Архангельск, 1990.

34. Билей П.В. Реконструкция сушильных камер эжекционного типа //Деревообр. пром-сть. - № 12, - М., 1990.

35. Билей П.В. Технология камерной сушки пиломатериалов твердых лиственных пород /монография/: ЛПИ, - Львов, 1991. - 79 с.

36. Билей П.В. Зависимость равномерности просыхания материала от параметров агента обработки //Тез. докл. 13 научно-техн. конф. - Киев, 1991.

37. Билей П.В., Горшкова Т.Г., Озаркив И.М. Изменение влажности древесины при влаготеплообработке //Деревообр. пром-сть, - № 4. - М., 1991.

38. Билей П.В. Низкотемпературные режимы сушки пиломатериалов твердых лиственных пород //7-й Международный Симпозиум по сушке. - Лодзь, 1991.

39. Билей П.В. Лесосушильные камеры с перфорированными перегородками //8-я Международная конференция по сушильному делу. - Карловы Вары, 1991.

40. Билей П.В. Изменение влажности древесины при влаготеплообработке //Международная конференция по сушке древесины. - Вена, 1992.

Билей П.В.

№ 27.550
Ав 27.550

Подписано в печать 28. ~~04~~ 93 формат 60x84/16. Бум, тип, № 2
Печать офсетная, усл. печ. л., 2,0. Тираж 100 экз; Зак: 1303

Львовское областное управление по печати. 290006. Львов, Подвальная, 3
292010 Перемышлянская районная типография г. Перемышляны
ул. Почтовая, 2