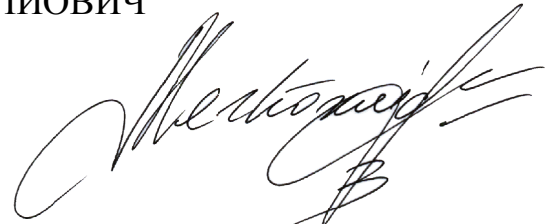


Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Харківський національний університет будівництва та архітектури

МЯГКОХЛІБ РОМАН СЕРГІЙОВИЧ



УДК 697.95

**ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ
В ЦЕХАХ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ**

05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Строй Анатолій Федорович,
директор ТОВ Науково-інженерний центр
«Енергозбереження».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шушляков Олександр Васильович,
Харківський національний університет будівництва та
архітектури, професор кафедри теплогазопостачання,
вентиляції і використання вторинних енергоресурсів;

кандидат технічних наук, доцент
Возняк Орест Тарасович,
Національний університет «Львівська Політехніка»,
доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції.

Захист відбудеться «__» березня 2013 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.056.01 Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

Автореферат розісланий «__» лютого 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доцент



О.В. Гвоздецький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У загальному циклі процесів технологічної обробки деревини як механічної, так і хімічної, доведення деревини до визначеного ступеню сухості є конче необхідною умовою для отримання задовільних кінцевих результатів. Спочатку суто практичним шляхом, а у подальшому й точними дослідженнями було встановлено, що використання свіжо зрубленої деревини є неприпустимим. Так, усім відомі такі прості речі: вологі дрова погано горять та мають низьку теплотворну здатність; вироби із сирого дерева тріскаються та коробляться; волога деревина при температурах $+5\dots+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ та наявності кисню активно гниє, тощо. Звідси стає очевидним, що видалення вологи є найбільш простим способом перетворення нестійкої сировини біологічного походження у дуже цінний матеріал, який може зберігатися тривалий час.

Отже, сушіння – це процес видалення вологи із деревини, для досягнення нею наступних прогнозованих фізичних та експлуатаційних властивостей:

1) забезпечення стабільності розмірів і форми виробів (запобігання чи зведення до мінімуму деформативності деревини). Дана мета досягається за рахунок зниження кількості вологи в деревині до величини, яка відповідає умовам експлуатації. Повторне зволоження деревини не припускається;

2) підвищення стійкості деревини до біопошкодження. Суха деревина менше піддається впливу грибків та комах;

3) зменшення маси деревини на величину, що відповідає відповідній масі видаленої вологи, що є актуальним при транспортуванні;

4) підвищення теплотворної здатності деревини як палива;

5) підвищення механічної стійкості, зниження теплопровідності та електропровідності, підвищення строку служби;

б) полегшення та удосконалення якості обробки, фарбування та склеювання.

Із вказаного переліку видно, що сушіння деревини практично є обов'язковою умовою майже в усіх випадках її застосування. Даний процес обробки деревини є навіть обов'язковим тоді, коли у готовому виробі деревина свідомо буде піддана безпосередній взаємодії з водою. Так, наприклад, у випадку бондарської клепки, сушити деревину необхідно, по-перше, для чистоти обробки, по-друге, для того щоб у зібраному виді бочка не всихала і не розпадалася на частини, і, нарешті, для того, щоб вона не протікала у подальшому.

Необхідно зазначити, що процес сушіння (процес обезводнення) відбувається за допомогою різних фізичних процесів.

На сьогодні найбільш широко розповсюджений конвективний спосіб сушіння в окремих приміщеннях (цехах). Параметри мікроклімату, при цьому способі, досить суттєво впливають на якість продукції та експлуатаційні витрати. Саме по цій причині найбільш актуальним є дослідження формування параметрів мікроклімату (температури, вологості та швидкості руху повітря) в цехах по сушінню деревини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з Комплексною державною Програмою енергозбереження України, прийнятою Постановою Кабінету Міністрів України від 5 лютого 1997 р. № 148, з програмою енергозбереження в житлово-комунальному господарстві, “Концепції пріоритетних напрямків науки і техніки”, прийнятою Постановою Кабінету Міністрів України від 27 червня 2000 р. № 1040, а також з комплексною програмою «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», затвердженої Кабінетом Міністрів України від 15.03.06 р. № 145-р.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – формування параметрів мікроклімату з метою зменшення витрат на процес сушіння та покращення якості деревини.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати вплив параметрів мікроклімату на процес сушіння деревини;
- провести дослідження розподілу вологості та температури у деревині під час сушіння;
- проаналізувати та удосконалити фізико-математичну модель, яка характеризує зміну температури та вологості деревини в процесі сушіння;
- розробити методику розрахунку сушіння деревини;
- розробити рекомендації для покращення параметрів мікроклімату в цехах сушіння деревини.

Об'єкт дослідження – параметри формування мікроклімату в цехах сушіння деревини, зокрема пиломатеріалів із сосни.

Предмет дослідження – процеси зміни стану повітря при сушінні деревини.

Методи дослідження – використане фізичне та математичне моделювання процесів. Для оцінки адекватності запропонованих в роботі математичних моделей проведені експериментальні дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів:

- одержане рівняння, що дозволяє складні граничні умови тепло- і масообміну третього роду замінити на граничні умови першого роду, в якому психрометричний коефіцієнт K залежить від швидкості руху повітря біля поверхні дошки;
- удосконалена математична модель та розрахунковий алгоритм процесу сушіння;
- удосконалена фізична модель процесу сушіння та розроблена методика теоретичного розрахунку коефіцієнтів вологопровідності, вологовіддачі та масообміну віднесених до різниці парціальних тисків водяного пару.

Практичне значення та реалізація результатів досліджень. Результати досліджень можна використовувати для визначення необхідної температури повітря у цехах для сушіння деревини при відомій вологості повітря та швидкості руху. Це створює передумови для відмови від використання обладнання штучного зволоження повітря (парогенераторів), тобто знижуються

капітальні витрати для будівництва даних об'єктів та знижується ризик травматизму в процесі експлуатації цехів для сушіння деревини.

Особистий внесок здобувача. Автором проведено аналіз впливу параметрів мікроклімату на процес сушіння деревини. Проаналізовані властивості деревини, зокрема сосни як об'єкта дослідження. Сформульована мета і визначені задачі дослідження. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження, обробка та аналіз результатів, сформульовані висновки та рекомендації. Наведені у дисертаційній роботі результати досліджень отримані здобувачем самостійно.

У наукових працях автора, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належать: аналіз впливу температури та вологості повітря на процес сушіння деревини, формування граничних умов.

Апробація роботи. Результати досліджень одержали позитивну оцінку на 7-мох науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Полтавського національного технічного університету у 2006-2012 роках. Робота в закінченому вигляді доповідалась у 2012 році на розширеному засіданні науково-технічного семінару кафедри теплогазопостачання, вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського національного університету будівництва та архітектури.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи підготовлено та опубліковано 4 одноосібні й 3 у співавторстві наукових праць у збірниках, що входять до переліку ДАК, один патент на корисну модель.

Обсяг та структура роботи. Дисертаційна робота містить вступ, шість розділів, загальні висновки, список літератури із 143 найменувань на 12 сторінках та додатки. Загальний обсяг роботи – 128 сторінок основного тексту, 41 рисунок і 3 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлено актуальність роботи та її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету досліджень та задачі, які необхідно вирішити для її досягнення. Визначено об'єкт, предмет та методи досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних в роботі результатів досліджень, виділено особистий внесок автора роботи, наведено відомості щодо апробації досліджень та публікацій.

У **першому розділі** розглянуті особливості конвективного сушіння деревини. У ході аналізу було опрацьовано праці С.Н. Горшина, Н.С. Селюгіна, І.В. Кречетова, П.С. Серговського, П.С. Соколова, Е.С. Богданова, П.В. Білея, М.Ю. Лур'є, у яких конвективне сушіння умовно розділяють за способом формування мікроклімату на конвективно-атмосферне, конвективно-теплове та комбіноване. Відповідно до робіт Т.Н. Коноплевої встановлено, що найбільш доцільним з точки зору зберігання якості матеріалу є комбіноване сушіння при якому вільна волога, що міститься у деревині, випаровується під час атмосферного сушіння, а зв'язана – під час конвективно-теплого.

Розглянуті існуючі методики розрахунку параметрів мікроклімату в цехах для сушіння деревини. Вказані їх основні недоліки.

Усі методи дослідження процесу сушіння матеріалу умовно можна поділити на три групи: емпіричні, напівемпіричні та теоретичні. Найбільш складним серед них є теоретичні, адже вони дають можливість цілісного сприйняття процесу та використовують напрацювання як емпіричних так й напівемпіричних підходів у розрізі коефіцієнтів та порівняння розрахунків.

До емпіричних підходів відносять метод «чорної скрині», який описаний у роботах С.П. Рудобашта, Ю.П. Адлера, Е.В. Маркова та Ю.В. Грановського, що у поєднанні з плануванням експерименту та регресійними методиками обробки результатів, дозволяє отримати достовірну інформацію про процеси, що відбуваються. Недоліками цього методу є складність перенесення результатів лабораторних досліджень на промисловий об'єкт та повне ігнорування фізичних процесів. Як наслідок, це ускладнює дослідження впливу інших факторів, які не враховувалися при проведенні лабораторних досліджень, на процес сушіння.

Напівемпіричні методи найбільш широко представлені сьогодні у роботах Б.С. Сажина, В.В. Красникова, А.А. Гухмана, Т.К. Шервуда, С.П. Рудобашта, А.Н. Плановського, Г.К. Філоненко, В.Ф. Фролова, Ю.Ф. Сніжкіна та ін. Основною задачею даних методів є отримання залежності середніх інтегральних значень вологовмісту, температури та швидкості сушіння як функції часу. Саме напівемпіричні методи дали змогу визначити невідомі фізичні коефіцієнти тепло- та вологовіддачі. Недоліками цих методів є те, що вони оперують з усередненими показниками.

Усі теоретичні підходи вивчення процесу сушіння ґрунтуються на тепломасообмінній теорії А.В.Ликова. Запропонована ним система рівнянь, описує тепломасообмінні процеси під час сушіння, є загальною й не відображає мікромеханізми переносу вологи у процесах сушіння. Тобто, наявність коефіцієнту фазового переходу скриває механізм переносу пароподібної вологи. Також запропонована модель не відображає процес, коли випаровування вологи відбувається не з поверхні матеріалу, а у її товщі.

Загальноновизнаним фактом є те, що градієнт парціального тиску – більш універсальний потенціал переносу речовини, тоді як градієнт концентрації (маси) якщо й може виступати потенціалом переносу вологи, то однозначно не у процесах, де є фазові перетворення, тобто сушіння капілярно-пористих тіл. Професор А.Ф.Строй розглянув вісесиметричну задачу зміни температурно-вологісного режиму огорожуючої конструкції з позиції переносу вологи в матеріалі під дією парціальних тисків. Запропонована модель А.Ф. Строя хоча й відрізняється від класичного підходу розгляду тепломасообмінних процесів за А.В. Ликовим оригінальними граничними умовами третього роду біля поверхні матеріалу, котрі враховують не лише зміну вологості та температури матеріалу, а ще й розглядають зміну параметрів повітря біля поверхні, але в цілому запропонована фізична модель не позбавлена такого загального проблемного питання як визначення критерію фазового переходу, рівняння переносу вологи

відображає лише сам перенос водяних парів, але не враховує процеси випаровування, що будуть відбуватися у матеріалі під час сушіння.

При розгляді теоретичних підходів також було опрацьовано праці Г.С. Шубіна, І.Д. Баббіта, Б.С. Чудінова, О.Б. Чумуріной, А.Н. Плановского, П.В. Білея, Н.В. Скуратова та інших.

На основі аналізу літератури сформульовано мету та задачі досліджень.

Другий розділ присвячений аналізу параметрів мікроклімату в цехах сушіння деревини.

Було проаналізовано спочатку вплив температури повітря у цеху на процес сушіння деревини. Для чого був записаний тепловий баланс цеху

$$cm \frac{dt_{\epsilon}}{d\tau} = Q_o(\tau) + Q_{\epsilon}^{ex}(\tau) - Q_o(\tau) - Q_{m.n.}(\tau) - Q_{\epsilon}^{eux}(\tau), \quad (1)$$

де c – теплоємність повітря, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$; m – маса повітря, $кг$; τ – час, $с$;

$Q_o(\tau)$ – тепловий потік, який потрапляє до повітря від нагрівальних приладів розміщених у цеху, $Вт$; $Q_{\epsilon}^{ex}(\tau)$ – тепловий потік, що надходить у приміщення цеху разом із повітрям, $Вт$, $Q_{\epsilon}^{ex} = ct_3 G(\tau)$; $G(\tau)$ – витрата повітря, що надходить у цех й видаляється з нього, $кг/с$; t_3 – температура зовнішнього повітря, $^\circ C$; $Q_o(\tau)$ – тепловий потік, що потрапляє до поверхні деревини, $Вт$; $Q_{m.n.}(\tau)$ – тепловий потік, що характеризує тепловтрати приміщення, $Вт$; $Q_{\epsilon}^{eux}(\tau)$ – тепловий потік, що виходить з приміщення разом з повітрям, що видаляється, $Вт$, $Q_{\epsilon}^{eux} = ct_{\epsilon} G(\tau)$.

У розгорнутому виді, при суміщеному конвективно-променевому теплообміні, рівняння (1) буде мати вигляд

$$cm \frac{dt_{\epsilon}(\tau)}{d\tau} = \alpha_{np} F_{np} (t_{np} - t_{\epsilon}(\tau)) - cG(t_{\epsilon}(\tau) - t_3) - \alpha_o F_o (t_{\epsilon}(\tau) - t_o(\tau)) - \alpha_{cm} F_{cm} (t_{\epsilon}(\tau) - t_{cm}(\tau)), \quad (2)$$

де $\alpha_{np}, \alpha_o, \alpha_{cm}$ – коефіцієнт променево-конвективного теплообміну відповідно біля поверхні нагрівального приладу, біля поверхні деревини й біля поверхні огорожувальних конструкцій цеху, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$; F_{np}, F_o, F_{cm} – відповідно площа поверхні нагрівального приладу, площа матеріалу та площа теплообміну огорожувальної конструкції цеху, $м^2$.

Як правило, параметри, що характеризують теплообмін, зокрема коефіцієнт теплообміну $\alpha_{np}, \alpha_o, \alpha_{cm}$, площі F_{np}, F_o, F_{cm} та витрата повітря при розрахунку процесу теплообміну в цеху повинні бути задані. Тоді, рівняння (2) має три невідомих параметри – це температура у цеху $t_{\epsilon}(\tau)$, температура на поверхні деревини $t_o(\tau)$ й температура на поверхні стіни $t_{cm}(\tau)$. Для рішення даного рівняння необхідно записати ще два рівняння, котрі будуть характеризувати

тепловий баланс на поверхні деревини й тепловий баланс на поверхні огорожі цеху.

Рівняння теплового балансу на поверхні деревини у розрізі спільного променево-конвективного теплообміну та за умов симетричності, що притаманні дощці як об'єкту сушіння, буде мати вигляд

$$\alpha_{\delta} F_{\delta} \left(t_{\delta}(\tau) - t_{\delta}(\tau) \Big|_{x=\frac{\delta_{\delta}}{2}} \right) = \lambda_{\delta} \frac{\partial t_{\delta}(\tau)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{\delta_{\delta}}{2}}, \quad (3)$$

де δ_{δ} – товщина дошки, м; $t_{\delta}(\tau) \Big|_{x=\frac{\delta_{\delta}}{2}}$ – температура на поверхні дошки, $^{\circ}\text{C}$.

У цеху при сушінні постійно відбувається зміна вологості повітря в результаті надходження вологи з деревини й відводу її з приміщення. У свою чергу надходження вологи у приміщення залежить від відносної вологості повітря у приміщенні.

Для аналізу впливу вологості повітря на процес сушіння було записано вологістний баланс повітря у цеху

$$W_{mex.} = W_{поч.} + W_{\delta} d\tau + W_{np.} d\tau - W_{виод} d\tau. \quad (4)$$

Отримане рівняння також можна записати у вигляді

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{W_{\delta} + W_{np.} - W_{o.}}{M}. \quad (5)$$

У рівняннях (4) та (5) уведено наступні позначення:

$W_{mex.}$ – кількість вологи у повітрі після проміжку часу $d\tau$, кг; $W_{поч.}$ – початкова кількість вологи у повітрі цеху, кг; W_{δ} – кількість вологи, що надходить з деревини у процесі сушіння, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, в загальному випадку дана величина залежить від часу, тобто $W_{\delta} = f_1(\tau)$; $W_{np.}$ – кількість вологи, що надходить з припливним свіжим повітрям, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; $W_{o.}$ – кількість вологи, що відводиться з приміщення, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; M – маса повітря у приміщенні, кг; w, τ – відповідно, вологовміст повітря у приміщенні, $\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$, та час, с.

Процес зміни вологості в приміщенні – це процес, який самовирівнюється, тобто зміна вологості у часі буде прямувати до безкінечно малої величини (похідна $\frac{dw}{d\tau} \rightarrow 0$). Іншими словами, якщо збільшується надходження вологи у приміщення від деревини, то це викликає збільшення вологовмісту повітря у приміщенні й як наслідок – відводу вологи з приміщення. Збільшення вологовмісту буде виникати до тих пір, доки кількість вологи, що надходить до приміщення, не зрівняється з кількістю вологи, що відводиться з приміщення. Перехідний процес при сушінні деревини, характеризує перехід повітря в приміщенні з одного вологісного стану в інший. Він може бути викликаний

змінюючи кількість теплоти, що підводиться до деревини у процесі сушіння. Перехідний процес може тривати достатньо великий проміжок часу у тому випадку, якщо тепловий потік, який підводиться до деревини, змінюється у часі. Якщо стрибкоподібно змінювати тепловий потік, то можна передбачити, що перехідний процес буде достатньо коротким у часі, а процес сушіння, в основному, буде характеризуватися сталим процесом, при якому вологовміст повітря у приміщенні змінюватися не буде. Для сталого процесу $\frac{dw}{d\tau} = 0$, тобто рівняння (5) має вигляд

$$W_{\partial} + W_{np.} - W_o = 0.$$

Таким чином, при встановленому (стаціонарному) процесі сушіння кількість вологи W_{∂} , що надходить у цех в результаті сушіння деревини, дорівнює різниці між кількістю вологи W_o , що відводиться з приміщення, та кількістю вологи $W_{np.}$, котра надходить у приміщення цеху із свіжим повітрям. З іншого боку, кількість вологи, що потрапляє у приміщення в процесі сушіння деревини залежить від кількості тепла, яку підвели до деревини, і пов'язана співвідношенням

$$W_{\partial} = \frac{Q_{\partial}^c}{r} = \frac{\alpha_{\partial} F_{\partial} (t_{\partial} - t_{\partial}|_{x=\delta/2})}{r}, \quad (6)$$

де Q_{∂}^c – кількість теплоти, що підводиться до деревини, *Вт*; r – прихована теплота пароутворення, $\frac{Дж}{кг}$; α_{∂} – коефіцієнт теплообміну на поверхні деревини, $\frac{Вт}{м^2 * ^\circ C}$; F_{∂} – площа поверхні деревини, $м^2$; t_{∂} – температура повітря у приміщенні, $^\circ C$; $t_{\partial}|_{x=\delta/2}$ – температура на поверхні деревини, $^\circ C$.

У той же час, процес випаровування вологи з поверхні деревини описується законом Дальтона

$$W_{\partial} = \beta F_{\partial} (P_n - P_{\partial}), \quad (7)$$

де β – коефіцієнт випаровування з поверхні, $\frac{кг}{с * м^2 * Па}$; F_{∂} – площа поверхні деревини, $м^2$; P_n – парціальний тиск насиченої водяної пари над поверхнею деревини, *Па*; P_{∂} – парціальний тиск водяних парів у повітрі приміщення, *Па*.

Тоді, тепловий баланс на поверхні деревини (рис.1) із врахуванням процесу випаровування, що буде відбуватися під час сушіння, можна записати у вигляді

$$\alpha_{\partial} F_{\partial} (t_{\partial} - t_{\partial}|_{x=\delta/2}) - \beta r F_{\partial} (P_n - P_{\partial}) = F_{\partial} \lambda_{\partial} \frac{\partial t_{\partial}}{\partial x}. \quad (8)$$

Так як задача вісесиметрична, то аналогічне рівняння буде описувати тепломасообмін й з іншої сторони дошки. Рівняння (8) характеризує граничні умови біля поверхні дошки й дає можливість оцінити вплив вологості й

швидкості повітря на процес сушіння. Вплив вологості повітря можна оцінити на основі парціального тиску водяних парів у повітря, що омиває дошку, а вплив швидкості – на основі коефіцієнтів теплообміну та масообміну (α_δ и β).

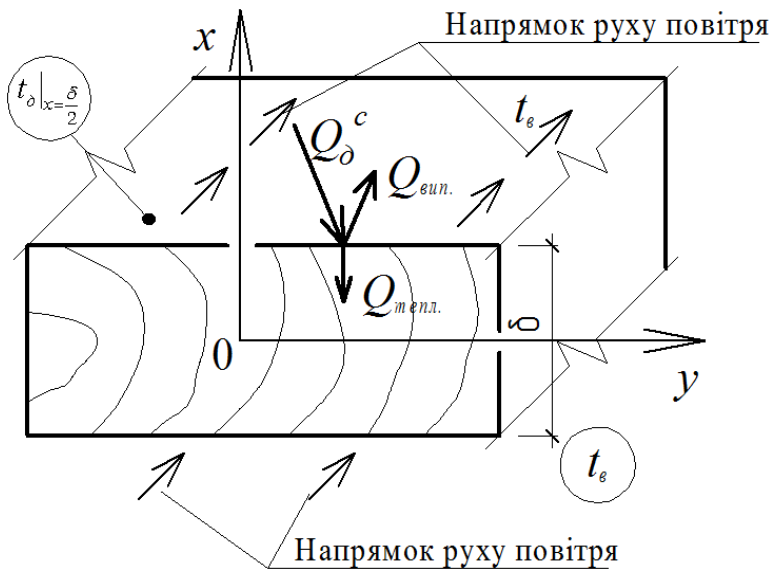


Рис.1. Схема теплового балансу на поверхні дошки.

Якщо передбачити, що у початковий момент часу кількість тепла, що підводиться до дошки, повністю йде на процес випаровування (дошка достатньо добре зволожена), то рівняння (8) буде мати вигляд

$$\alpha_\delta F_\delta (t_\delta - t_\delta|_{x=\delta/2}) - \beta r F_\delta (P_n - P_\delta) = 0. \quad (9)$$

Із рівняння (9) при заданій температурі та вологості повітря у приміщенні, можна визначити температуру на поверхні деревини $t_\delta|_{x=\delta/2}$. У початковий момент часу ця температура буде характеризувати граничні умови процесу теплообміну на поверхні деревини при випаровуванні вологи з поверхні матеріалу, тобто

$$t_\delta|_{x=\delta/2} = t_\delta - \frac{1}{K} (P_n - P_\delta). \quad (10)$$

Співвідношення величин $\frac{\alpha_\delta}{\beta r} = K$, $\frac{\text{Па}}{^\circ\text{C}}$, називають психрометричним коефіцієнтом. На чисельне значення цього коефіцієнту суттєво впливає швидкість руху повітря біля поверхні деревини.

Так як психрометричний коефіцієнт змінюється при зміні швидкості руху повітря біля поверхні, то й температура на поверхні буде залежати від швидкості руху повітря. На основі цього можна зробити висновок про те, що температура на поверхні деревини залежить не лише від температури і вологості повітря в приміщенні, але й від швидкості руху повітря біля поверхні матеріалу.

Виконаний аналіз свідчить про те, що при вирішенні задач тепло- й вологопереносу у масиві деревини при її сушінні можна граничні умови третього роду спростити до граничних умов першого роду. Так як на поверхні відбувається випаровування вологи, то для визначення температури на поверхні необхідно щоб була задана швидкість руху повітря біля поверхні, а також температура й відносна вологість повітря у початковий момент часу. Таким

чином, при сушінні деревини граничні умови дещо складніші ніж окремо при теплообміну чи вологообміну.

Третій розділ присвячений моделюванню тепломасообмінних процесів у масиві деревини. Для розгляду нестационарних процесів сушіння та визначення розподілу температури та вологості по масиву деревини була запропонована наступна фізична модель процесу сушіння. Підведена теплота до скелету матеріалу частково йде на процес теплопровідності та акумулювання теплоти, а також на процеси випаровування вологи, що міститься у клітинній оболонці. Волога, що виділяється з оболонки, потрапляє у порожнину капіляру, збільшуючи при цьому як вологовміст повітря капіляру так й парціальний тиск водяних парів у повітрі капіляру. Цим самим створюється градієнт тиску й відбувається дифузія вологи з капіляру, тобто відбувається процес сушіння матеріалу.

Сформувані математичний запис, який би описував механізми тепломасообміну на всіх стадіях сушіння матеріалу досить складно, оскільки потенціали перенесення вологи в матеріалах різного ступеню зволоження мають різні значення. У дисертаційній роботі розглянутий процес сушіння деревини з вологовмістом меншим за 30%.

Оскільки деревина характеризується досить малим коефіцієнтом висихання вздовж волокон, а розміри поперечного перерізу більшості матеріалів, яких потрібно сушити, є досить малими порівняно з довжиною, то дослідники у переважній більшості розглядають дошку в процесі сушіння як двовимірне тіло. Переміщення вологи в дошці проходить у двох напрямках – перпендикулярно до пласті (більша площа дошки) та у напрямку до кромки (менша площа дошки). Обмежимося випадком дощок тангенціального розпилу, в яких переміщення вологи відбувається переважно перпендикулярно до пласті.

Зроблені допущення та обмеження спрощують модель процесу сушіння дошки до одновимірної задачі процесів тепло масообміну, що відбуваються у безкінечно довгій осесиметричній пластині, що омивається повітрям з двох боків (рис.2).

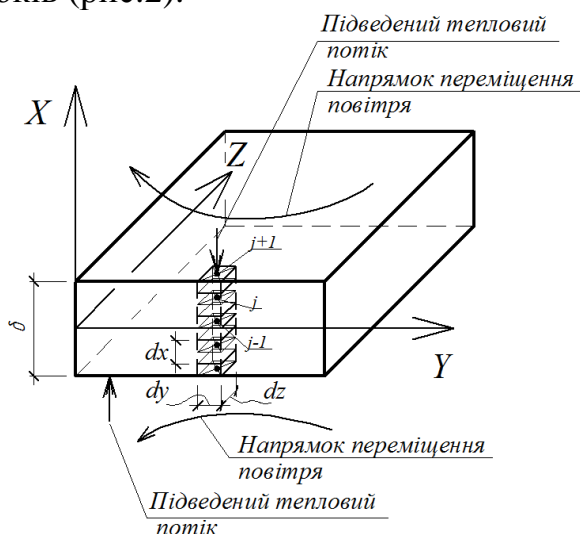


Рис.2. Схема процесу сушіння дошки.

Для розробки математичної моделі розглянемо процес перенесення вологи в матеріалі. Виділимо j -тий елементарний об'єм $dv = dx * dy * dz$ (дивися рис.2) і запишемо баланс теплоти й вологи у ньому. Графічно потоки теплоти та вологи показані на рис.3. Елементарний об'єм зображений точкою.

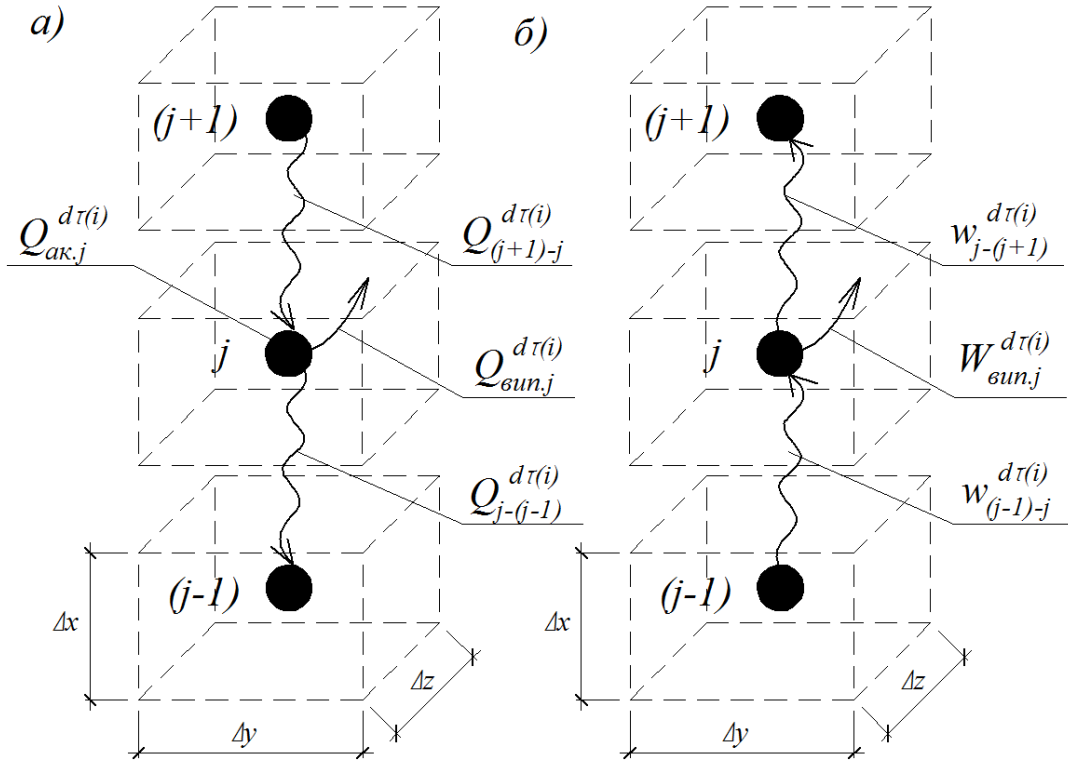


Рис.3. Схема теплових потоків (а) та потоків вологи (б) для елементарного об'єму.

У загальному випадку підведена теплота $Q_{(j+1)-j}^{d\tau(i)}$ буде витрачатися не лише на акумуляцію теплоти $Q_{ак.ж}^{d\tau(i)}$ в даному елементарному об'ємі dv та теплопровідність до іншого вузлу $Q_{ж-(j-1)}^{d\tau(i)}$, але ще й на випаровування вологи $Q_{вун.ж}^{d\tau(i)}$, тобто

$$Q_{(j+1)-j}^{d\tau(i)} = Q_{ак.ж}^{d\tau(i)} + Q_{ж-(j-1)}^{d\tau(i)} + Q_{вун.ж}^{d\tau(i)}. \quad (11)$$

Після розкриття складових та спрощення, рівняння (11) буде мати вигляд

$$c_j^{\tau(i)} \rho_j^{\tau(i)} \frac{t_j^{\tau(i+1)} - t_j^{\tau(i)}}{\Delta \tau(i)} = \lambda_j^{\tau(i)} \frac{t_{j+1}^{\tau(i)} - 2t_j^{\tau(i)} + t_{j-1}^{\tau(i)}}{(\Delta x)^2} - r_j^{\tau(i)} \rho_{нов.ж}^{\tau(i)} \Pi \frac{\Delta W_{вун.ж}^{d\tau(i)}}{\Delta \tau(i)}, \quad (12)$$

де $\lambda_j^{\tau(i)}$ – коефіцієнт теплопровідності j -того вузла у відповідний момент часу $\tau(i)$, Вт/(м*град); Δx – відповідно розміри j -того елементарного вузла по вісі ОХ, м; $t_{j+1}^{\tau(i)}$, $t_j^{\tau(i)}$, $t_{j-1}^{\tau(i)}$ – температура відповідно $(j+1)$ -шого, j -того та $(j-1)$ -шого вузлів у відповідний момент часу $\tau(i)$; $c_j^{\tau(i)}$ – теплоємність матеріалу j -того вузла у відповідний момент часу $\tau(i)$, 0C ; $\rho_j^{\tau(i)}$ – густина матеріалу j -того вузла у відповідний момент часу $\tau(i)$, кг/м³; $\rho_{нов.ж}^{\tau(i)}$ – густина повітря j -того вузла у відповідний момент часу $\tau(i)$, кг/м³; $r_j^{\tau(i)}$ – теплота фазового перетворення j -того вузла у відповідний момент часу $\tau(i)$, Дж/кг; $\Delta \tau(i)$ – i -тий часовий крок, с; $\Delta W_{вун.ж}^{d\tau(i)}$ – зміна вологовмісту повітря капіляру за рахунок випаровування,

кг(води)/кг(сухого повітря); Π – пористість матеріалу (відношення об'єму пор до об'єму матеріалу).

Баланс j -того елементарного об'єму по волозі можна записати у вигляді

$$W_j^{\tau(i+1)} - W_j^{\tau(i)} = W_{(j-1)-j}^{d\tau(i)} - W_{j-(j+1)}^{d\tau(i)} + W_{\text{вун.}j}^{d\tau(i)}, \quad (13)$$

де $W_j^{\tau(i+1)}$, $W_j^{\tau(i)}$ – кількість вологи у повітрі j -того вузла відповідно наприкінці та на початку $d\tau(i)$ -того інтервалу часу, кг; $W_{(j-1)-j}^{d\tau(i)}$, $W_{j-(j+1)}^{d\tau(i)}$ – кількість вологи у повітрі j -того вузла, що перейшла відповідно з $(j-1)$ -шого у j -тий вузол та з j -того вузла у $(j+1)$ -ший вузол за відповідний $d\tau(i)$ -тий інтервал часу, кг; $W_{\text{вун.}j}^{d\tau(i)}$ – кількість вологи, що випарувалася з матеріалу у повітря вузла за відповідний $d\tau(i)$ -тий інтервал часу, кг.

Взаємозв'язок між абсолютною кількістю вологи у повітрі W_j та вологовмістом повітря w_j можна записати через залежність

$$W_j = \Pi \rho_{\text{нов.}j} w_j \Delta x \Delta y \Delta z,$$

де Π – пористість матеріалу; $\rho_{\text{нов.}j}$ – густина повітря j -того елементарного об'єму, кг/м³; w_j – вологовміст повітря j -того елементарного об'єму, кг/кг; Δx , Δy , Δz – відповідно розміри j -того елементарного вузла по осям Ox , Oy , Oz , м.

Тобто,

$$W_j^{\tau(i+1)} - W_j^{\tau(i)} = \Pi \rho_{\text{нов.}j} \Delta x \Delta y \Delta z (w_j^{\tau(i+1)} - w_j^{\tau(i)}). \quad (14)$$

Запишемо перенос вологи з $(j-1)$ -шого до j -того вузла $W_{(j-1)-j}^{d\tau(i)}$ й з j -того в $(j+1)$ -ший вузол $W_{j-(j+1)}^{d\tau(i)}$ за відповідний інтервал часу $d\tau(i)$

$$W_{(j-1)-j}^{d\tau(i)} = \frac{\beta_j^{\tau(i)}}{\Delta x} (P_{j-1}^{\tau(i)} - P_j^{\tau(i)}) \Delta y \Delta z \Delta \tau(i), \quad (15)$$

$$W_{j-(j+1)}^{d\tau(i)} = \frac{\beta_j^{\tau(i)}}{\Delta x} (P_j^{\tau(i)} - P_{j+1}^{\tau(i)}) \Delta y \Delta z \Delta \tau(i), \quad (16)$$

де $P_{j-1}^{\tau(i)}$, $P_j^{\tau(i)}$, $P_{j+1}^{\tau(i)}$ – парціальний тиск водяних парів відповідно у $(j+1)$ -шому, j -тому та $(j-1)$ -шому вузлі у відповідний момент часу $\tau(i)$, Па; $\beta_j^{\tau(i)}$ – коефіцієнт вологопереносу віднесеного до різниці парціальних тисків j -того елементарного об'єму у відповідний момент часу $\tau(i)$, кг/(с*м*Па).

Із врахуванням

$$W_{\text{вун.}j}^{d\tau(i)} = \Pi \rho_{\text{нов.}j}^{\tau(i)} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta w_{\text{вун.}j}^{d\tau(i)} \quad (17)$$

та рівнянь (14), (15) та (16) рівняння (13) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} \Pi \rho_{\text{нов.}j}^{\tau(i)} \Delta x \Delta y \Delta z (w_j^{\tau(i+1)} - w_j^{\tau(i)}) &= \frac{\beta_j^{\tau(i)}}{\Delta x} \Delta y \Delta z \Delta \tau(i) (P_{j-1}^{\tau(i)} - 2P_j^{\tau(i)} + P_{j+1}^{\tau(i)}) + \\ &+ \Pi \rho_{\text{нов.}j}^{\tau(i)} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta w_{\text{вун.}j}^{d\tau(i)}. \end{aligned} \quad (18)$$

Поділимо рівняння (18) на $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta \tau_{(i)}$, одержимо

$$\Pi \rho_{нов. j}^{\tau(i)} \frac{w_j^{\tau(i+1)} - w_j^{\tau(i)}}{\Delta \tau_{(i)}} = \beta_j^{\tau(i)} \frac{P_{j-1}^{\tau(i)} - 2P_j^{\tau(i)} + P_{j+1}^{\tau(i)}}{(\Delta x)^2} + \Pi \rho_{нов. j}^{\tau(i)} \frac{\Delta w_{sun. j}^{d\tau(i)}}{\Delta \tau_{(i)}}. \quad (19)$$

Якщо вважати, що $\Delta \tau_{(i)} \rightarrow 0$, $\Delta x \rightarrow 0$, $\Delta w_{sun. j}^{d\tau(i)} \rightarrow 0$, $\Delta t_j \rightarrow 0$, то рівняння теплового (12) та вологісного (19) балансу можна записати у диференційному вигляді відповідно

$$c\rho \frac{dt}{d\tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - r\rho \Pi \frac{dw_{sun.}}{d\tau}, \quad (20)$$

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{\beta}{\Pi \rho} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{dw_{sun.}}{d\tau}. \quad (21)$$

У свою чергу кількість вологи $W_{sun. j}^{d\tau(i)}$, що випарується з матеріалу у повітря елементарного об'єму, можна знайти за залежністю

$$W_{sun. j}^{d\tau(i)} = e_j^{\tau(i)} f (P_{j.нас.}^{\tau(i)} - P_j^{\tau(i)}) \Delta \tau_{(i)}, \quad (22)$$

де $P_{j.нас.}^{\tau(i)}$, $P_j^{\tau(i)}$ – відповідно насичений парціальний тиск водяних парів (тиск біля змоченої поверхні матеріалу капіляру) та парціальний тиск водяних парів у повітрі вузла, Па; $e_j^{\tau(i)}$ – коефіцієнт масообміну, що характеризує процес випаровування вологи з матеріалу вузла до його повітряного середовища, кг/(с*м²*Па); f – площа стінок капілярів (вузла) із яких відбувається процес випаровування, м².

Для визначення площі випаровування f , прийнемо припущення, що елементарний об'єм dV містить в собі деяку кількість капіляр одного діаметра R , м, тоді можна записати рівність

$$\Pi \Delta x \Delta y \Delta z = \pi R^2 l. \quad (23)$$

Виразивши із рівняння (23) загальну довжину капілярів l по відомій залежності визначимо площу випаровування (площу циліндра)

$$f = \pi R l = \pi R \frac{\Pi \Delta x \Delta y \Delta z}{\pi R^2}, \text{ тобто } f = \frac{\Pi \Delta x \Delta y \Delta z}{R}.$$

Із урахуванням вище сказаного рівняння (22) можна записати так

$$\frac{\Delta w_{sun. j}^{d\tau(i)}}{\Delta \tau_{(i)}} = \frac{e_j^{\tau(i)}}{\rho_{нов. j}^{\tau(i)} R} (P_{j.нас.}^{\tau(i)} - P_j^{\tau(i)}). \quad (24)$$

У диференційному вигляді рівняння (24) можна записати так

$$\frac{dw_{sun.}}{d\tau} = \frac{e}{\rho R} (P_{нас.} - P). \quad (25)$$

Таким чином, процес сушіння матеріалу описується системою рівнянь, що містить рівняння теплового балансу (20), балансу вологи повітря у капілярі (21) та рівняння, що описує процес випаровування вологи з матеріалу капіляра у повітря даного капіляру (25). Для однозначності одержаного рішення дану систему рівнянь необхідно доповнити граничними умовами, початковими

умовами та умовами симетрії. Аналітичне рішення даної системи викликає деякі труднощі, тому в подальшому у дисертаційній роботі вона вирішена за допомогою метода кінцевих різниць (метода сіток).

У дисертаційній роботі приведені алгоритми розрахунку трьох елементарних об'ємів: поверхневого, типового та того, що знаходиться на вісі симетрії. За даними алгоритмами була запропонована єдина розрахункова блок-схема для розрахунку процесів тепломасообміну під час сушіння.

Четвертий розділ присвячений визначенню масових коефіцієнтів віднесених до різниці парціальних парів.

Одною з основних проблем теорії тепломасообміну є визначення масових коефіцієнтів. У даному розділі були проаналізовані існуючі методи для визначення коефіцієнтів вологопровідності запропоновані А.В. Ликовим, В.І. Дубницьким, Г.С. Шубіним, В.П. Мироновим та ін. Аналіз існуючих методів показав, що умови при яких вони були отримані не завжди відповідають фактичним умовам сушіння.

Для вирішення задачі математичного моделювання процесу сушіння деревини, відповідно до запропонованої у третьому розділі моделі, були визначені розрахункові залежності масових коефіцієнтів. За допомогою запропонованих залежностей можна визначити коефіцієнти вологопровідності, вологовіддачі та масообміну, скориставшись експериментальними даними різних авторів.

Коефіцієнт вологопровідності $\beta_j^{\tau(i)}$, $\frac{\kappa\mathcal{Z} * \mathcal{M}^2}{\mathcal{M}^3 * c * \text{Па}}$, характеризує скільки вологи з елементарного об'єму (1 м^3) перейде через одиницю ізопотенціальної поверхні за одиницю часу при різниці парціальних тисків, що дорівнює 1 Па. Для режиму, коли кількість вологи, що випаровується в вузлі, дорівнює кількості вологи, яка відходить від вузла за рахунок вологопровідності, можна визначити коефіцієнт вологопровідності за допомогою рівняння

$$\beta_n^{\tau(i)} = \frac{m_{\text{сух.}}}{\Delta P_n^{\tau(i)} \Delta \tau_{(i)} \Delta x} \sum_{j=1}^n (u_j^{\tau(i+1)} - u_j^{\tau(i)}), \quad \frac{\kappa\mathcal{Z} * \mathcal{M}^2}{\mathcal{M}^3 * c * \text{Па}}, \quad (26)$$

де $\beta_n^{\tau(i)}$ – коефіцієнт вологопровідності n -ного елементарного об'єму у відповідний момент часу $\tau_{(i)}$, $\frac{\kappa\mathcal{Z}}{\mathcal{M} * c * \text{Па}}$; $m_{\text{сух.}}$ – маса абсолютно сухого тіла, кг;

Δx – характерний розмір n -ного елементарного об'єму по осі OX , м; $u_j^{\tau(i+1)}$, $u_j^{\tau(i)}$ – вологовміст матеріалу j -того елементарного об'єму у відповідний момент часу, кг/кг; $\Delta \tau_{(i)}$ – i -тий інтервал часу, с; $i = 1, 2, 3, \dots$ – часовий індекс;

$j = 1, 2, 3, \dots, n, \dots, f$ – індекс елементарного об'єму; $\Delta P_n^{\tau(i)}$ – зміна парціального тиску у n -ному елементарному об'ємі, Па.

Коефіцієнт вологовіддачі $\alpha_p^{\tau(i)}$, $\frac{\kappa\mathcal{Z}}{\mathcal{M}^2 * c * \text{Па}}$, характеризує скільки вологи виділяється з поверхні матеріалу через одиницю площі за одиницю часу при різниці парціальних тисків на поверхні й у повітрі 1 Па.

Рівняння для визначення коефіцієнту $\alpha_p^{\tau(i)}$ має вигляд

$$\alpha_p^{\tau(i)} = \frac{m_{\text{сух.}}}{\Delta y \Delta z (P_f^{\tau(i)} - P_c^{\tau(i)}) \Delta \tau_{(i)}} \sum_{j=1}^f (u_j^{\tau(i+1)} - u_j^{\tau(i)}), \frac{\kappa z}{m^2 * c * Pa}, \quad (27)$$

де $P_f^{\tau(i)}, P_c^{\tau(i)}$ – відповідно парціальний тиск водяних парів у повітрі приповерхневого f -го елементарного об'єму та у зовнішньому повітрі, Pa ; $\Delta y \Delta z$ – ізопотенціальна площа масообміну, m^2 .

Коефіцієнт масообміну $e_j^{\tau(i)}$ має однакову розмірність із коефіцієнтом вологовіддачі $\alpha_p^{\tau(i)}$, але фізичний зміст даної характеристики дещо відрізняється. Він характеризує скільки води випаровується в капілярі через одиницю площі поверхні за одиницю часу при різниці парціальних тисків на поверхні капіляру та у повітрі капіляра 1 Па. Розрахункова формула для визначення цього коефіцієнту має вигляд

$$e_n^{\tau(i)} = \frac{m_{\text{сух.пов.}} (d_{n.\text{нас.}}^{\tau(i)} - d_n^{\tau(i)}) + m_{\text{сух.}} \sum_{j=1}^n (u_j^{\tau(i+1)} - u_j^{\tau(i)})}{f (P_{n.\text{нас.}}^{\tau(i)} - P_n^{\tau(i)}) \Delta \tau_{(i)}}, \quad (28)$$

де $P_{n.\text{нас.}}^{\tau(i)}, P_n^{\tau(i)}$ – відповідно парціальний тиск водяних парів n -го вузла біля поверхні капіляру та у повітрі n -го капіляру, Pa ; f – площа масообміну, m^2 ; $d_{n.\text{нас.}}^{\tau(i)}, d_n^{\tau(i)}$ – відповідно вологовміст повітря n -го елементарного об'єму в стані насичення та дійсний у відповідний момент часу $\tau(i)$, кг/кг; $m_{\text{сух.пов.}}$ – маса сухого повітря n -го капіляру, кг.

Щоб скористатися рівняннями (26), (27), (28) необхідно знати як змінюється вологість та температура матеріалу в залежності від часу. Таким чином, на основі експериментальних даних, чи інших даних, які існують у літературі, можна аналітично визначити коефіцієнти теплопровідності, вологовіддачі та масообміну віднесені до різниці парціальних тисків водяних парів у повітрі.

Експериментальне визначення цих коефіцієнтів на сьогодні неможливе, оскільки дуже складно експериментально визначити парціальний тиск водяних парів у капілярі деревини.

П'ятий розділ присвячений апробації та оцінці достовірності запропонованої математичної моделі процесу сушіння, шляхом порівняння результатів розрахунку з даними інших дослідників та експериментальними дослідженнями.

Натурний експеримент був проведений в діючому цеху для сушіння деревини, який розташований у місті Полтава за адресою вул. Дружби, 2.

Приміщення цеху має розміри: ширина – 4,5 м, довжина – 10 м, висота – 3 м. У цеху передбачена механічна система вентиляції за допомогою вентилятора ВЦ-4-70 та системи вентиляційних каналів (дивися рис.4-рис.6). Підігрів повітря для подачі в цех відбувається безпосередньо у паливоспалюючому пристрої (рис.6) (циркуляційне повітря омиває камеру згорання). Паливом в основному є дерев'яна щепка, іноді – пілети із соняшникової лузги.



Рис.4. Подавальний повітропровід.



Рис.5. Повітропровід на всмоктування.



Рис.6. Паливо-спалюючий прилад

При проведенні експерименту вимірювались наступні параметри:

- вологість деревини на поверхні дошки;
- температура деревини на поверхні дошки;
- температура повітря по сухому термометру;
- відносна вологість повітря;
- швидкість руху повітря.

Об'єктом дослідження була соснова дошка товщиною 50 мм, шириною 200 мм та довжиною 6 м. Дошка для експерименту була розміщена зверху основного штабелю дощок (дивися рис.7).

Вологість деревини на поверхні дошки, а також температура й вологість повітря вимірювалась контактним електричним вологовимірювачем «Testo 606-1/2», температуру на поверхні матеріалу було визначено за допомогою «Testo 810». Швидкість повітря біля поверхні дошки вимірювалась за допомогою електричного анемометра Skywatch Xplorer1. Барометричний тиск – за допомогою барометра-анероїда БАММ-1. Точність вимірювання вологості матеріалу $\pm 1\%$, температури повітря $\pm 0,5$ °С, відносної вологості повітря $\pm 2,5\%$, температури на поверхні деревини $\pm 0,5$ °С, швидкості повітря $\pm 0,1$ м/с, барометричного тиску $\pm 0,5$ кПа.

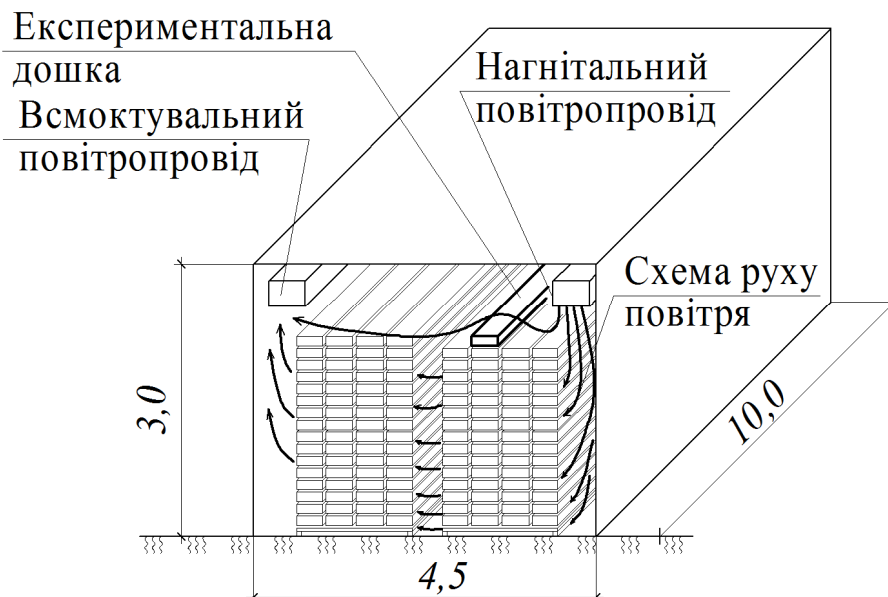


Рис.7. Схема цеху для сушіння деревини.

Вимірювання температури та вологості на поверхні дошки проводилося у 3-х точках із кроком рівним 1,5 м по довжині. Всі точки вимірювання знаходилися по вісі дошки (дивися рис.8). Вимірювання тривали 2 доби з інтервалом 4 години.

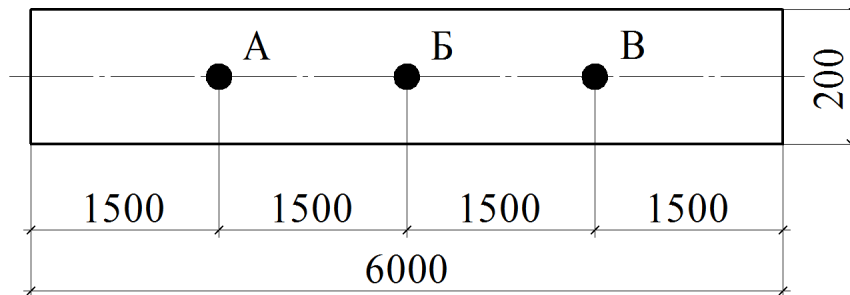


Рис.8. Схема розміщення точок для вимірювання температури та вологості на поверхні дошки.

Результати порівняння експериментальних даних з розрахунковими наведеним на рис.9 та рис.10.

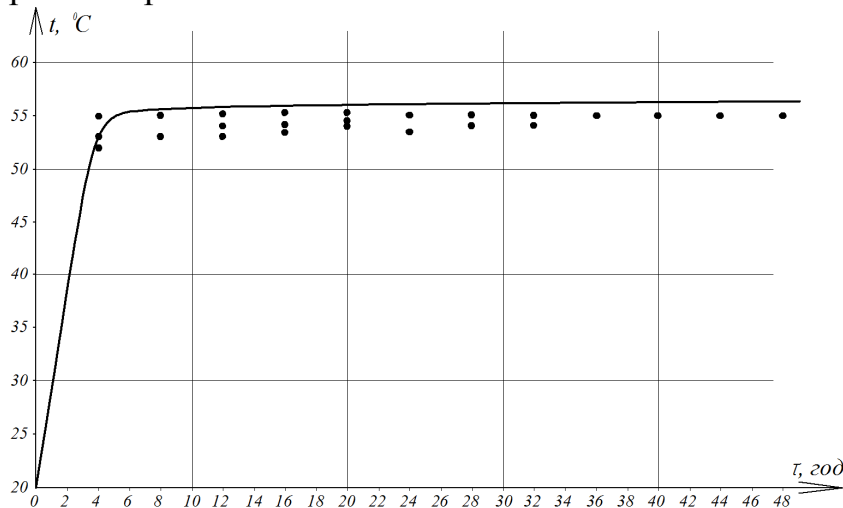


Рис.9. Температура поверхні дошки при сушінні:
● – експериментальні дані; — – розрахункові дані.

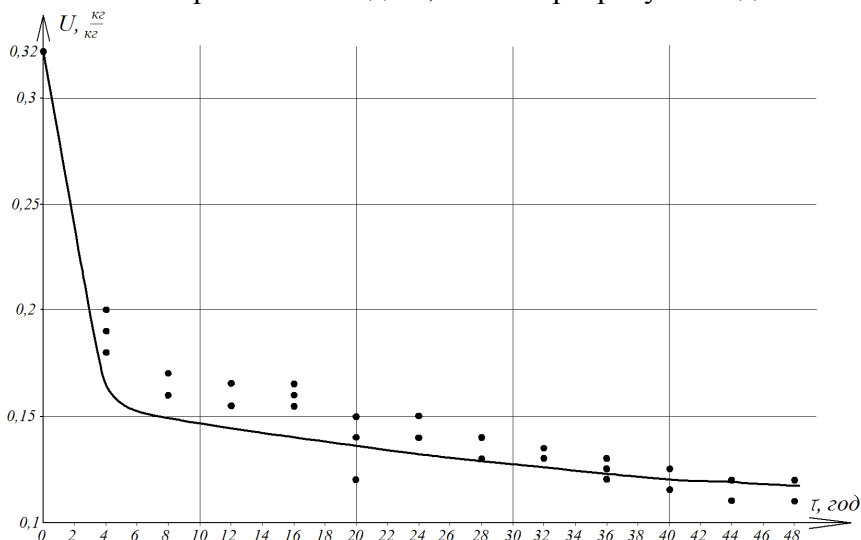


Рис.10. Вологість поверхневого вузла дошки при її сушінні:
● – експериментальні дані; — – розрахункові дані.

Співставлення розрахункових даних з експериментальними свідчать про те, що середня відносна похибка при визначенні температури становить 2,8%, вологості – 8,3%. Мінімальна відносна похибка при визначенні температури складає 1,5%, а максимальна – 7,38%. Мінімальна відносна похибка при визначенні вологості поверхневих шарів матеріалу становить 0,8%, а максимальна – 22,5%.

Оскільки натурний експеримент дав можливість дослідити динаміку зміни температури та відносної вологості матеріалу лише на зовнішній поверхні, то виникла необхідність порівняння отриманих розрахунків із експериментальними даними інших дослідників. Були опрацьовані дані по вологості деревини з робіт Г.С.Шубіна та Б.П.Поберейко, та встановлено що у вибірці даних, отриманих розрахунком, відсутні постійні розходження з експериментальними даними даних дослідників. Мінімальна відносна похибка склала 1,6%, а максимальна – 21,92%.

Виходячи з проведеного аналізу можемо стверджувати, що запропонована модель розрахунку процесів сушіння з певним рівнем адекватності відображає процеси тепломасообміну під час сушіння деревини.

Шостий розділ присвячений рекомендаціям щодо формування параметрів мікроклімату в цехах сушіння деревини.

Регулювати процес сушіння можна впливаючи на параметри мікроклімату (повітря) як на агент сушіння. При цьому основне завдання – це визначити критерій, за допомогою якого необхідно контролювати параметри мікроклімату в приміщенні.

Основною вимогою до технологічних процесів сушіння є створення таких параметрів мікроклімату, які б з мінімальними затратами і без втрати якості деревини забезпечили процес сушіння. Критерієм процесу сушіння є насамперед якість матеріалу, тобто естетичні особливості деревини і міцнісні характеристики матеріалу.

Забезпечити необхідну якість можна при умові, що виникаючі в процесі сушіння напруження у матеріалі не перевищуватимуть границю міцності. Або періодичним зняттям накопичених напружень шляхом проведення додаткової тепловгогісної обробки деревини. Необхідно у процесі сушіння – попередити руйнацію матеріалу. Найбільш раціональні параметри мікроклімату це ті параметри, при яких не повинно бути напружень, які викликають руйнацію матеріалу.

Згідно досліджень, проведених Б.Н. Уголевим, напруження $\sigma_j^{\tau(i+1)}$ у кінці певного проміжку часу $\Delta\tau_{(i)}$ можна подати у вигляді алгебраїчної суми напружень $\sigma_j^{\tau(i)}$ і його приросту $\sigma_j^{d\tau(i)}$, визначених на момент часу $\tau_{(i)}$, тобто

$$\sigma_j^{\tau(i+1)} = \sigma_j^{\tau(i)} + \sigma_j^{d\tau(i)}, \quad (29)$$

де приріст $\sigma_j^{d\tau(i)}$ у будь-якому j -тому елементарному об'ємі розраховують по формулі

$$\sigma_n^{d\tau(i)} = \beta_t \frac{E_n^{\tau(i-1)} + E_n^{\tau(i)} \sum_{j=1}^f (u_j^{d\tau(i)} - u_n^{d\tau(i)}) E_j^{\tau(i)}}{2 \sum_{j=1}^m E_j^{\tau(i)}}, \quad (30)$$

f – кількість елементарних об'ємів; $j = 1, 2, 3, \dots, n, \dots, f$ – індекс елементарного об'єму; β_t – коефіцієнт усушування; $u_j^{d\tau(i)}, u_n^{d\tau(i)}$ – зміна вологовмісту матеріалу відповідно j -того та n -ного елементарних об'ємів; $E_j^{\tau(i)}$ – модуль пружності матеріалу, залежить від температури та вологості матеріалу.

У свою чергу модуль пружності в залежності від вологості та температури деревини (для сосни) можна визначити за допомогою виразу

$$E_j^{\tau(i)} = 15t_j^{\tau(i)} u_j^{\tau(i)} - 1600u_j^{\tau(i)} - 5,25t_j^{\tau(i)} + 575. \quad (31)$$

Границю міцності для сосни в залежності від температури та вологовмісту матеріалу можна визначити за допомогою виразу

$$\sigma_{np,j}^{\tau(i)} = 0,067t_j^{\tau(i)} u_j^{\tau(i)} - 17u_j^{\tau(i)} - 0,035t_j^{\tau(i)} + 7,1. \quad (32)$$

У процесі сушіння необхідно щоб напруження, що виникають, не перевищували границю міцності. У цьому випадку можна забезпечити відповідну якість деревини. У той же час, напруження, що виникають, залежать від інтенсивності сушіння. Оцінити інтенсивність процесу сушіння можна за допомогою розробленої в даній роботі математичної моделі та запропонованій методиці розрахунку.

Граничні умови на поверхні матеріалу, під час сушіння характеризуються температурою, вологістю і швидкістю руху повітря. Всі ці параметри впливають на процес сушіння. Змінюючи їх можна змінювати інтенсивність процесу сушіння. Найбільш просто регулювати температуру і швидкість повітря. Для того, щоб регулювати вологість необхідно передбачити систему кондиціонування повітря. У цехах для сушіння деревини це економічно недоцільно. Тому, як правило, інтенсивність процесу сушіння регулюють за рахунок зміни температури і швидкості повітря.

Згідно до результатів досліджень А.К.Пухова встановлено, що оптимальною по техніко-економічним показникам слід вважати швидкість руху повітря (агента сушки) 2-3 м/с. Тобто за розрахункову швидкість повітря можна приймати 3-5 м/с, так як у виробничих умовах близько 50% циркулюючого повітря йде поза штабелів.

Збільшення швидкості повітря збільшує підведення теплоти до матеріалу й інтенсифікує процес сушіння. Але необхідно розуміти, що даний параметр має вирішальний вплив на рівномірність просихання матеріалу в об'ємі штабеля, зумовлюючи якість сушки усієї партії деревини в цілому.

У дисертаційній роботі запропонований алгоритм розрахунку температури повітря в цеху в залежності від заданого вологовмісту при заданій швидкості повітря із збереженням міцносних характеристик. Запропонований алгоритм зображений структурно-логічною схемою на рис.11.

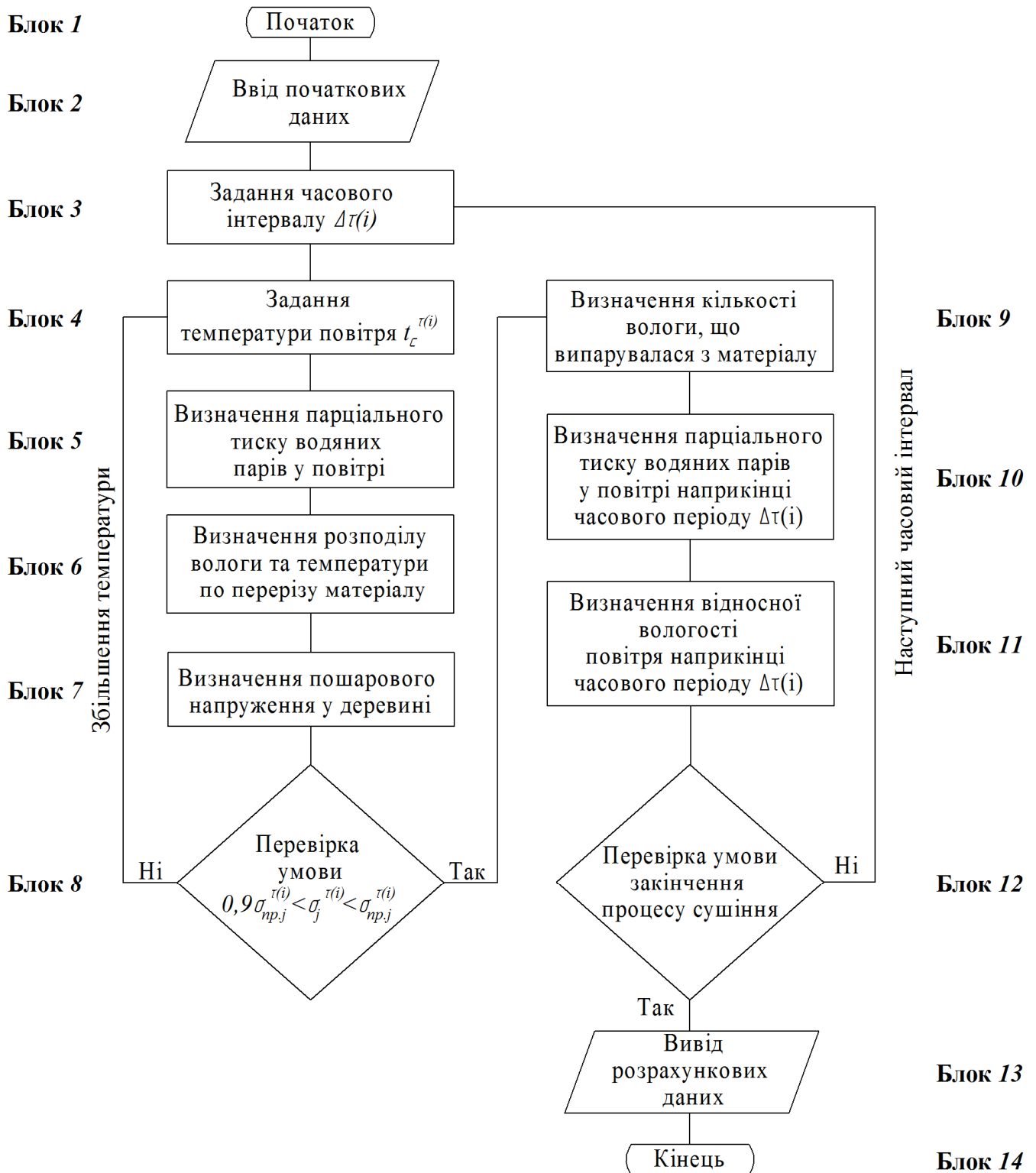


Рис.10. Структурно-логічна схема визначення температури повітря.

Користуючись розробленою методикою був виконаний розрахунок для визначення температури повітря в приміщенні в залежності від вологості при сушінні соснової дошки товщиною 30 мм, довжиною 8 м та шириною 200 мм. Результати розрахунку приведені на рис.12. Ці результати були впроваджені у виробництво на ПП «Партнер-плюс».

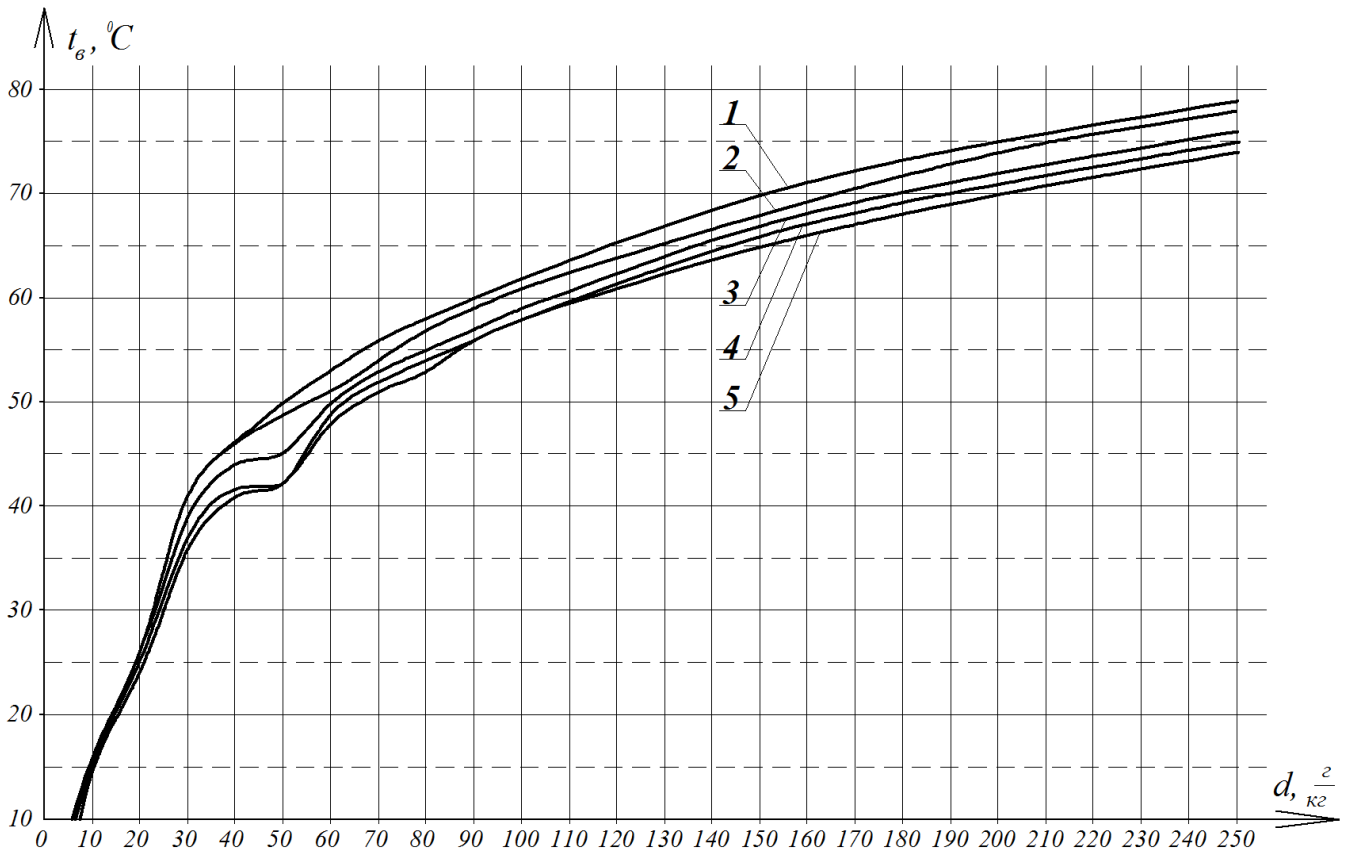


Рис.11. Залежність температури повітря від вологовмісту повітря:

1 – при швидкості руху повітря 0,5 м/с; 2 – при 1 м/с; 3 – при 2 м/с;
4 – при 3 м/с; 5 – при 4 м/с.

Неможливість прецензійного регулювання вологовмісту повітря на початковій стадії процесу сушіння деревини і необхідність рівномірного розподілу його по штабелю матеріалу спричинили розробку нових конструктивних рішень при проектуванні цехів для сушіння деревини.

На основі запропонованого способу формування температури й вологості була розроблена та запатентована конструкція сушильного цеху, що має наступні переваги:

- * не потребує додаткових заходів для зволоження повітря у цеху;
- * наявність теплої підлоги унеможливорює процеси конденсації на ній, що дає змогу більш гнучко регулювати параметри мікроклімату;
- * забезпечується рівномірний розподіл повітря за допомогою рівномірно перфорованої перегородки змінного поперечного перерізу та з однаковими отворами;
- * наявність фальш-стелі з ролетами, що вирішує проблему неповного заповнення цеху;
- * передбачено регулювання кількості повітря, що циркулює, як за допомогою частотних перетворювачів так й за допомогою різної кількості встановлених вентиляторів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

При проведенні досліджень одержані наступні наукові та практичні результати:

1. При формуванні параметрів мікроклімату в цехах для сушіння деревини запропоновано відмовитися від стадії прогрівання матеріалу, при якій відбувається штучне зволоження повітря. Це дає можливість зменшити енергетичні витрати на процес сушіння та зменшити капітальні витрати під час спорудження цехів сушіння деревини на вартість обладнання для штучного зволоження повітря;

2. Запропоноване рівняння, що дозволяє граничні умови тепло- і масообміну третього роду замінити на граничні умови першого роду. В цьому рівнянні психрометричний коефіцієнт K залежить від швидкості руху повітря біля поверхні дошки;

3. У дисертаційній роботі удосконалена математична модель процесу сушіння деревини та запропонований алгоритм розрахунку цього процесу. Приведена блок-схема розрахунку, що дає можливість автоматизувати процес розрахунку;

4. У роботі розроблена методика розрахунку для визначення коефіцієнтів вологопровідності, вологовіддачі та масообміну віднесених до різниці парціальних тисків водяних парів. Експериментальне визначення цих коефіцієнтів на сьогодні дуже ускладнене, тому що неможливо експериментально визначити парціальний тиск водяних парів у капілярі деревини.

Аналіз існуючих експериментальних методів для визначення коефіцієнтів вологопровідності показав, що вони отримані при умові, коли потенціалом перенесення вологи є вологість матеріалу. Це спрощує фізичну картину процесу сушіння матеріалу і не дає можливості врахувати процеси фазового переходу рідини в матеріалі в пароподібний стан;

5. У дисертаційній роботі запропонований алгоритм розрахунку температури повітря у цеху для сушіння деревини в залежності від напружень, які виникають при сушінні;

6. Розроблені інженерні рекомендації щодо визначення температури повітря в процесі сушіння в залежності від вологовмісту повітря та швидкості руху біля поверхні дошки;

7. На основі запропонованої моделі формування параметрів мікроклімату було запатентовано корисну модель цеху для сушіння деревини;

8. Результати дисертаційної роботи пройшли експериментальне випробування та впроваджені у виробництво на ПП «Партнер-плюс».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Мягкохліб Р.С. Аналіз процесів тепло масообміну при сушінні деревини // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПНТУ, 2007 р. – № 20. – С. 183-189.
2. Мягкохліб Р.С. Розрахунок тепловологістного стану деревини в процесі сушіння на стадії прогрівання // Комунальне господарство міст: Науково-технічний збірник. – К.: Техніка, 2008 р. – № 84. – С. 88–101.
3. Мягкохліб Р.С. Моделювання тепломасообмінних процесів при сушці деревини: алгоритмування розрахунку // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця: Глобус-прес, 2010 р. – №1(27). – С. 27-30.
4. Мягкохліб Р.С. Фізична модель сушіння матеріалу // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011 р. – № 64. – С. 279–287.
5. Строй А. Ф. Математична модель для оцінки впливу параметрів повітря в приміщенні на процес сушіння деревини / А. Ф. Строй, Р.С. Мягкохліб // Нова тема. – К.: ТОВ «Юнівест ПреПрес», 2008 р. – № 1. – С. 24–25. *(внесок здобувача – запропонована фізична модель впливу параметрів повітря на процес сушіння деревини).*
6. Строй А.Ф. Аналіз впливання вологості воздуха в цехах по сушке древесины на граничные условия процесса сушки / А.Ф.Строй, Р.С.Мягкохлеб // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011 р. – № 65. – С. 286–293. *(внесок здобувача – аналіз граничних умов на поверхні деревини під час сушіння).*
7. Строй А. Ф. Аналіз впливання температури воздуха в цехе на процесс сушки древесины / А. Ф. Строй, Р.С. Мягкхлеб // Комунальне господарство міст: Науково-технічний збірник. – К.: Техніка, 2011 р. – № 101. – С. 211–221. *(внесок здобувача – аналіз граничних умов при теплообміні під час сушіння деревини).*
8. Пат. 51633U Україна, МПК F26B 9/06. Модульна сушильна камера для пиломатеріалів / Строй А.Ф., Мягкохліб Р.С.; заявник і власник Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – № u201000435, заявл. 18.01.2010; опубл. 26.07.2010 р., Бюл. №14. *(внесок здобувача – розроблення конструкції модульної сушильної камери).*

АНОТАЦІЯ

Мягкохліб Р.С. Формування параметрів мікроклімату в цехах сушіння деревини. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – Харківський національний університет будівництва і архітектури, Харків, 2012.

Актуальність та спрямованість теми дисертаційної роботи націлені на покращення процесу сушіння шляхом відповідного визначення параметрів мікроклімату.

Запропоновано для стаціонарного режиму сушіння складні граничні визначати як граничні умови першого роду, у яких психрометричний коефіцієнт K залежить від швидкості руху повітря біля поверхні дошки. Запропонований підхід спростить в цілому розрахунок процесів сушіння.

Удосконалена фізична модель процесу сушіння, на основі якої створений розрахунковий алгоритм та наведена блок-схема розрахунку процесу сушіння деревини, що дає можливість автоматизувати розрахунки.

Розроблено алгоритм розрахунку температури повітря у цеху для сушіння деревини в залежності від напружень, які виникають у деревині при сушінні.

Запропонований новий підхід до формування параметрів мікроклімату у цехах із сушіння деревини. Температура повітря у цеху визначена як функція від вологовмісту та швидкості, але з врахуванням збереження якості матеріалу.

Результати експериментального дослідження підтвердили достовірність отриманих аналітичних залежностей.

Ключові слова: мікроклімат у цеху, сушіння деревини, теплообмін, масообмін, граничні умови.

АННОТАЦІЯ

Мягкохлеб Р.С. Формирование параметров микроклимата в цехах сушки древесины. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – вентиляция, освещение и теплогазоснабжение. – Харьковский национальный университет строительства и архитектуры Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, Харьков, 2012.

Актуальность и направленность темы диссертационной работы нацелены на улучшение процесса сушки путем соответственного определения параметров микроклимата.

Предложено для стационарного режима сложные граничные условия определять как граничные условия первого рода, в которых психрометрический коэффициент K , зависит от скорости движения воздуха возле поверхности доски. Это в целом упростит расчет процессов сушки.

Улучшена физическая модель процесса сушки, на основании которой был построен расчетный алгоритм и наведена блок-схема расчета процесса сушки древесины, что дает возможность автоматизировать расчеты.

Разработан алгоритм расчета температуры воздуха в цеху в зависимости от напряжений, которые возникают в древесине во время сушки.

В работе разработана методика расчета для определения коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и массообмена отнесенных к разности парциальных давлений водяных паров. Экспериментальное определение этих коэффициентов сегодня затруднено, потому что невозможно инструментальным путем определить парциальное давление водяных паров в капилляре древесины.

По сравнению с существующими технологическими схемами процесса сушки древесины предложено отказаться от стадии прогрева материала, при которой происходит искусственное увлажнение воздуха. Это дает возможность уменьшить энергетические затраты на сушку и уменьшить капитальные вложения при сооружении цехов для сушки древесины на стоимость оборудования для искусственного увлажнения воздуха.

В работе разработаны инженерные рекомендации по определению температуры воздуха в процессе сушки в зависимости от скорости воздуха у поверхности материала и влагосодержания.

Результаты экспериментального исследования подтвердили достоверность полученных аналитических зависимостей.

Ключевые слова: микроклимат в цехе, сушка древесины, теплообмен, массообмен, граничные условия.

ABSTRACT

Myagkohlib R.S. Microclimate formation in wood drying premises. – Manuscript rights.

The dissertation is submitted to obtain the Candidate of sciences (technical) degree (Ph.D.), on specialty 05.23.03 – ventilation, illumination, heat and gas supply. – Kharkov national university of civil engineering and architecture, Kharkov, 2012.

It's being proposed the boundary conditions of the first kind, which contain a psychometric coefficient K that depends on the speed of air near the surface of board. This statement is aimed to simplify the calculation of drying processes.

The physical model of drying process has been improved. The new block-scheme is proposed that leads to automatic calculation possibilities.

The air temperature in wood drying premises is defined as a function of speed and water content, but with the materials quality preservation.

The experimental results has confirmed of the analytical dependences reliability.

Keywords: microclimate in the premises, wood drying, heat transfer, mass exchanged, boundary conditions.

Підписано до друку 29.01.2013 р.
Папір офсетний. Друк трафаретний.
Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 120 прим. Формат 60× 84/16. Зам. №510/1.

Виготовлювач: ТОВ “Фірма “Техсервіс”.
Адреса: 36011, м. Полтава, вул. В. Міщенко, 2.
Тел.: (0532) 56-36-71.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4421 від 16.10.2012 р.

<http://myagkohlib.at.ua>