

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ**

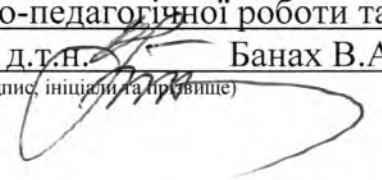
Кваліфікаційна робота
другий магістерський
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз процесу сушіння різних порід деревини

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1449з
спеціальності 144 Теплоенергетика
(код і назва спеціальності)
освітньої програми «Теплоенергетика»
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

Тимощенко Антон Дмитрович
(ініціали та прізвище)

Керівник доц. каф. металургії, к.т.н.  Румянцев В.Р.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент проректор з науково-педагогічної роботи та
технічної освіти, професор, д.т.н.  Банах В.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики
Рівень вищої освіти другий магістерський
Спеціальність 144 Теплоенергетика
(код та назва)
Освітня програма Теплоенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« 04 » грудня 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Тимошенко Антону Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз процесу сушіння різних порід деревини

керівник роботи Румянцев Владислав Ростиславович к.т. н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «25» травня 2020 року № 601-с

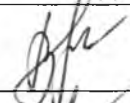
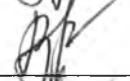
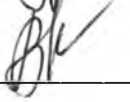
2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020р.

3 Вихідні дані до роботи Породи деревини: сосна, яблуня, груша. Розміри зразка: 70мм × 25мм × 12мм відносна вологість у приміщенні 58 %. Температура зовнішнього повітря 20 °С.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз існуючих способів сушіння деревини. 2. Дослідження процесу сушіння різних порід деревини у конвективній сушарці. 3. Розробка заходів з охорони праці та техніки безпеки.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Схема експериментальної установки. 2. Залежність вологи від часу. 3. Залежність маси від часу. 4. Зміна маси зразка груши за часом 5. Зміна маси зразка яблуня за часом. 6. Зміна вологості зразка за часом для різних порід.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	з г
1 розділ	Румянцев В.Р., доцент кафедри металургії		✓
2 розділ	Румянцев В.Р., доцент кафедри металургії		✓
Охорона праці	Румянцев В.Р., доцент кафедри металургії		✓

7 Дата видачі завдання 1 червня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
	Аналіз існуючих способів сушіння деревини.	1.06.2020- 1.08.2020
	Дослідження процесу сушіння різних порід деревини у конвективній сушарці	1.08.2020- 1.10.2020
	Розробка заходів з охорони праці і техніка безпеки	1.10.2020- 1.11.2020
	Розробка графічного матеріалу	1.11.2020- 1.12.2020

Студент


(підпис)

А.Д. Тимошенко
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)

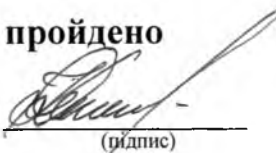
(підпис)



В.Р. Румянцев
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

Ю.М. Каюков
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Тимошенко А.Д. Аналіз процесу сушіння різних порід деревини.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник В.Р. Румянцев. Запорізький національний університет. Інженерний навчально – науковий інститут. Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2020.

Виконаний аналіз існуючих способів сушіння деревини, а також проведено серію експериментів де визначено які з параметрів більш істотно впливають на процес сушіння деревини. У якості деревини використовуються сосна, яблуня, груша. На основі проведених дослідів обрано оптимальний режим сушіння деревини за найкоротший час при режимі з мінімальною швидкістю теплоносія та максимальною температурою сушильного агенту. Час який витрачався на сушіння зразка майже вдвічі менше ніж при режимі 1 та 2.

Ключові слова: вологовміст, сушильний агент, випаровування, конвекція, сушіння, тепломасообмін, теплоносій.

ABSTRACT

Timoshchenko A. Analysis of the drying process of different wood species.

Qualification final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat Power Engineering, supervisor V. Rumyancev. Zaporizhzhya National University. Engineering educational and scientific institute. Department of Heat Power Engineering and Hydropower Engineering, 2020.

The analysis of existing methods of wood drying is carried out, and also a series of experiments where it is defined which of parameters more essentially influence process of wood drying is defined. Pine, apple, and pear are used as wood. Based on the experiments, the optimal mode of wood drying in the shortest time at the mode with the minimum speed of the coolant and the maximum temperature of the drying agent was selected. The time spent on drying the sample is almost twice less than in mode 1 and 2.

Key words: moisture content, drying agent, evaporation, convection, drying, heat and mass transfer, heat carrier.

АННОТАЦИЯ

Тимощенко А.Д. Анализ процесса сушки различных пород древесины.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель В.Р. Румянцев. Запорожский национальный университет. Инженерный учебно – научный институт. Кафедра теплоэнергетики и гидроэнергетики, 2020.

Выполнен анализ существующих способов сушки древесины, а также проведена серия экспериментов, в которых определены какие из параметров оказывают существенное влияние на процесс сушки древесины. В качестве опытных образцов использовались, яблоня, груша, сосна. На основе проведенных опытов выбран оптимальный режим сушки древесины за кратчайшее время при режиме с минимальной скоростью теплоносителя и максимальной температурой сушильного агента. Время которое тратилось на сушку образца почти вдвое меньше, чем при режиме 1 и 2.

Ключевые слова: влагосодержание, сушильный агент, испарение, конвекция, сушки, тепломассообмен, теплоноситель.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1 Сушка як процес.....	9
1.2 Види сушки.....	17
1.3 Основні рівняння кінетики сушки.....	18
1.4 Конвективна сушка	23
1.5 Особливості процесу конвективного сушіння деревини	42
1.6 Експериментальні методи дослідження процесу сушіння.....	44
1.7 Висновки за розділом	49
2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ РІЗНИХ ПОРІД ДЕРЕВИНИ	50
2.1 Планування експерименту	50
2.2 Експериментальна частина	53
2.3 Дослідження процесу сушіння сосни, яблуні та груші.....	65
2.4 Висновки за розділом	70
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	71
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	71
3.2 Заходи з поліпшення умов праці	73
3.3 Виробнича санітарія	73
3.4 Електробезпека.....	76
3.5 Пожежна безпека.....	78
3.7 Інженерний розрахунок піногенераторів автоматичної системи пожежогасіння.....	79
3.8. Техногенна безпека	81
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	84

ВСТУП

Актуальність теми. Процес сушіння – найбільш тривалий і один з найбільш енерговитратних у всій технології деревообробки. Тому скорочення тривалості сушіння, зниження енерговитратності при збереженні якості висушеної деревини завжди були актуальним напрямком наукових досліджень, що сприяють вирішенню загальної проблеми не тільки раціонального використання деревини, але і паливно – енергетичних ресурсів.

Об'єкт дослідження – процес конвективної сушки різних порід деревини.

Предмет дослідження :

- вплив температури сушильного агенту на тривалість процесу сушіння;
- вплив швидкості теплоносія сушильного агенту на тривалість процесу сушіння;
- вплив сорту деревини на процес сушіння.

Мета роботи – розробка конструкції установки конвективного типу для сушіння деревини з застосуванням вимірювально – контрольно операційної системи яка фіксує дані з тензодатчика та забезпечує максимальну точність вимірювання ваги.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі визначено ряд задач:

- розробка фізичної моделі для дослідження впливу різних режимів сушки;
- визначення параметрів, що найбільш впливають на ефективність процесу конвективного сушіння;
- отримання рівняння регресії та побудова кривих сушіння;

Методи та засоби дослідження. Задачі дослідження виконувались шляхом проведення серії експериментів на основі створеної лабораторної

установки. В роботі використані основні теоретичні положення тепло- і масообмінних процесів, теоретичних основ сушіння.

Особистий внесок. Розроблена фізична модель для дослідження впливу різних режимів сушки сировини.

Наукова новизна:

– розроблена фізична модель сушильної установки з використанням вимірювально – контрольної операційної системою АТМ;

– встановлено, що найбільш ефективним є режим сушіння, якому відповідає швидкість 1м/с, а температура теплоносія 60 °С. Вплив температури проявляється більш сильно в порівнянні зі швидкістю руху теплоносія.

Практична цінність цієї роботи в наступному:

– результати досліджень можуть використовуватися для вдосконалення або розробки нових установок для сушіння сировини, а також можуть бути впроваджені в якості лабораторної роботи з курсу «Тепло технологічні процеси та установки»

Апробація роботи. Положення роботи викладені на наступних конференціях: загальноуніверситетській конференції «Молода наука» 2020.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань. Загальний обсяг сторінок 87. Кількість малюнків 29, кількість таблиць 12, кількість джерел посилань 47.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Сушка як процес

Процес сушіння має велике значення в різних галузях промисловості. Сушка дозволяє збільшити термін зберігання матеріалів (виробів), підвищити їх якість і зменшити масу продукту, що транспортується. Зв'язок вологи з матеріалом є однією з найбільш важливих характеристик при розгляді процесу сушіння. На величину цього зв'язку впливає дисперсність, структура і фізико-хімічні властивості матеріалу [1]. У свою чергу сушка є досить енергоємним процесом.

Вологе тіло, яке набирає теплову і вологісну взаємодію з навколишнім середовищем, є відкритою термодинамічною системою, і в ньому виникають процеси перенесення теплоти і маси [2]. Звідси випливає, що теорія процесу сушіння вологих матеріалів базується на двох наукових дисциплінах тепло- і масообмінних при фазових перетвореннях і на вченні про форми зв'язку поглиненої речовини з речовиною самого матеріалу [3].

Процес сушіння матеріалу складається з переміщення вологи всередині матеріалу, паротворення і переміщення вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище. При зіткненні вологого матеріалу з нагрітим повітрям рідина на поверхні випаровується і шляхом дифузії залишає поверхню матеріалу, переходячи в навколишнє середовище. Випаровування вологи з поверхні матеріалу створює перепад вологовмісту між наступними шарами і поверхневим шаром, що викликає обумовлене дифузією переміщення вологи з нижчих верств до поверхневих. Наявність температурного градієнта всередині матеріалу ускладнює механізм перенесення вологи. Під впливом перепаду температури (температура поверхні матеріалу більше температури центральних шарів) волога прагне переміститися всередину тіла (під впливом термодифузії волога переміщується у напрямку потоку тепла). Зазвичай при малих температурних

перепадах термодифузія невелика і результуючий потік вологи збігається з потоком концентраційної дифузії. У капілярно-пористих тілах, коли випаровування відбувається всередині тіла, дифузійному потоку сприяє дифузія ковзання, при якій перенесення вологи відбувається проти потоку тепла. Таким чином, в процесі сушіння ми маємо безперервне підведення вологи з внутрішніх шарів до поверхневих шарів матеріалу, внаслідок чого зменшується вологість не тільки на поверхні, але і в глибині матеріалу. У найпростішому випадку випаровування відбувається на поверхні матеріалу, а пара, що утворюється дифундує в навколишнє середовище. У більш складних випадках випаровування відбувається всередині матеріалу, в певній його зоні, або у всій масі матеріалу, причому переміщення вологи, всередині матеріалу відбувається як у вигляді рідини, так і у вигляді пари. Швидкість переміщення вологи всередині матеріалу залежить від форми зв'язку її з матеріалом, тому процес сушіння є фізико-хімічним. Характер протікання процесу сушіння визначається механізмом переміщення вологи всередині матеріалу, енергетикою випаровування і механізмом переміщення вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище через так званий прикордонний шар, який розташовується біля поверхні даного матеріалу.

Таким чином, сутність процесу сушіння полягає в дифузії вологи з внутрішніх шарів до поверхні матеріалу і випаровуванні її на поверхні з переходом в газоподібний стан в навколишнє середовище. Такий процес може протікати лише в тому випадку, якщо парціальний тиск пари в прикордонному шарі над поверхнею матеріалу більше парціального тиску пари навколишнього газоподібного середовища. У теплових процесах зневоднення матеріалу розглядають два завдання - кінетику і статику сушки [4].

Кінетика теплової сушки вологого матеріалу розглядає питання механізму і швидкості переносу вологи у вигляді рідини і пари, а також перенесення теплоти між матеріалом і сушильним агентом. На швидкість сушіння можуть впливати умови проведення процесу (температура, тиск),

особливість пористої структури матеріалу, ступінь заповнення пор рідиною, рухливість каркаса тіла і інше [5]. Ликовим А. В. [4] було вивчено, що кінетика сушіння встановлює зв'язок між зміною вологості матеріалу в часі і параметрами процесу: властивостями і структурою матеріалу, його розмірами, гідродинамічними умовами обтікання матеріалу сушильним агентом і іншими факторами. Закономірності кінетики процесу сушіння дозволяють розрахувати кількість випареної вологи з матеріалу і витрату тепла на сушку. Рівняння кінетики описують процес видалення вологи з матеріалу в часі і використовуються для визначення тривалості і режиму сушки.

Статика сушки встановлює зв'язок між початковими і кінцевими параметрами, які беруть участь в сушінні матеріалу і сушильного агента на основі матеріального і теплового балансів. За допомогою залежностей статика сушіння визначають склад матеріалу, витрату теплоти, сушильного агента.

Для розрахунку процесу сушіння і створення раціональних конструкцій сушарок необхідно спільний розгляд кінетики і статика сушіння. Механізм сушки вологих матеріалів визначається в основному формою зв'язку вологи з матеріалом, а також режимом сушіння або умовами випаровування вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище.

Зміна локального вмісту вологи та й локальної температури t з плином часу τ залежить від взаємопов'язаного механізму перенесення вологи і тепла всередині вологого матеріалу і масо-і теплообміну поверхні тіла з навколишнім середовищем. Механізм волого і теплопереносу всередині вологих тіл в свою чергу дуже складний, він визначається характером зв'язку вологи з вологими тілами, тому кінетика процесу сушіння в значній мірі визначається фізико-хімічними властивостями матеріалу.

Знаходження полів вологовмісту $i(x, y, z, \tau)$ і температури $t(x, y, z, \tau)$ пов'язано з рішенням системи диференціальних рівнянь масо-і теплопереносу при відповідних граничних умовах, що відображають спосіб і режим сушіння

(сушка нагрітими газами, інфрачервоними променями і т. д.). Ця система рівнянь є системою нелінійних диференціальних рівнянь, і її вирішення можливе шляхом лінеаризації рівнянь або методами машинної техніки.

Таким чином, нестационарні поля вологовмісту і температури (динаміка процесу сушіння) визначаються закономірностями волого і теплопереносу всередині тіла, зовнішнім волого і теплообміном з навколишнім середовищем. Зміни середніх вологовмісту і температури тіла з плином часу в першу чергу визначаються закономірностями взаємодії тіла з навколишнім середовищем, тобто зовнішнім тепло-і масообміном.

Особливості процесу сушіння вологих матеріалів виявляються за характером зміни локальних вологовмісту і температури з плином часу. Ці експериментальні закономірності повинні розглядатися одночасно.

У періоді швидкості, яка падає, інтенсивність сушки j_n і інтенсивність теплообміну q_n безперервно зменшуються з часом. Зміна інтенсивності сушіння відбувається за складною закономірності, яка визначається формою зв'язку вологи з матеріалом і механізмом переміщення вологи і тепла всередині матеріалу. Визначити інтенсивність теплообміну за формулами Ньютона і Дальтона не представляється можливим, так як коефіцієнти тепло-і масообміну змінюються з плином часу, а температура і вологовміст на поверхні тіла визначаються поєднанням підведення тепла і вологи (внутрішній волого і теплообмін) і відведення тепла і вологи з поверхонь тіла в навколишнє середовище (зовнішній тепло- і масообмін). Повне рішення такого завдання (розрахунок швидкості сушки) пов'язано з рішенням системи диференціальних рівнянь масо-і теплопереносу при відповідних граничних умовах.

Однак, користуючись законом збереження енергії і маси речовини, можна встановити взаємозв'язок середніх інтегральних значень вологовмісту i і температури t з інтенсивностями тепло- і масообміну j_n і q_n , а отже, і зі швидкістю сушки у вигляді рівняння балансу тепла. Відповідно до закону

збереження енергії, все тепло, підведене до тіла, так само тепла, витраченого на випаровування вологи, і тепла, витраченому на його нагрівання

$$q_{п}(\tau) = \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right) \cdot (1 + Rb) = \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right) \left(1 + \left(\frac{B}{K_0}\right)\right). \quad (1.1)$$

Рівняння (1.1) є основним рівнянням кінетики сушіння, воно встановлює взаємозв'язок між теплообміном $q_{п}(\tau)$ і масообміном $(d\bar{u}/d\tau)$ за допомогою критерія Rb або критерію B/K_0 . Це рівняння справедливо для будь-якого тіла і при будь-якому способі або засобі сушки.

Для того щоб скористатися основним рівнянням кінетики сушіння, необхідно знати залежність між вмістом вологи тіла і часом (рівняння кривої сушки). Цю залежність можна отримати шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь волого і теплопереносу, для чого необхідно знати залежність коефіцієнтів переносу від вмісту вологи і температури

$$\lg(W - W_p) = \lg \cdot (W_{к.п} - W_p) - \frac{1}{2,3} \cdot K_{\tau}. \quad (1.2)$$

Однак для досліджень в області технології необхідно знати розподіл вологовмісту а й температури t матеріалу в процесі сушіння (динаміка процесу сушіння). Знаходження нестационарних полів вологовмісту і температури пов'язано з рішенням системи диференціальних рівнянь волого і теплопереносу. Ця система рівнянь була виведена на підставі дослідження механізму волого і теплопереносу в капілярно-пористих колоїдних тілах.

Система диференціальних рівнянь, що описує волого і теплоперенос у вологих тілах, в будь-яких умовах має вигляд:

$$\frac{du}{d\tau} = k_{11}\nabla^2 u + k_{12}\nabla^2 T + k_{13}\nabla^2 P;$$

$$\frac{dt}{d\tau} = k_{21}\nabla^2 u + k_{22}\nabla^2 t + k_{23}\nabla^2 P;$$

$$\frac{dP}{d\tau} = k_{31}\nabla^2 u + k_{32}\nabla^2 T + k_{33}\nabla^2 P. \quad (1.3)$$

Така система рівнянь є найбільш загальною, вона справедлива для будь-якого виду волого і теплопереносу, але при умові постійних коефіцієнтів волого і теплопереносу (система лінійних диференціальних рівнянь).

1.1.1 Умови та закономірності сушіння матеріалів

На випаровування вологи витрачається суворо визначена кількість теплоти. Отже необхідно забезпечувати непереставне підведення теплоти до сировини, в результаті якого буде відбуватися випаровування вологи з поверхні та з внутрішніх шарів.

З метою підвищення ефективності сушіння необхідно одночасно з нагрівом матеріалу відводити вологу за межі об'єкту, що сушиться. Процес сушіння можливий лише тоді, коли тиск водяних парів всередині сировини або на її поверхні вище, ніж в навколишньому середовищі. Такий процес проходить при підвищеній температурі матеріалу. Якщо температура матеріалу дорівнює температурі навколишнього середовища, то процес сушіння припиняється. На рисунку 1.1 можна бачити, що процес сушіння матеріалів умовно можна розділити на три періоди в залежності від того, як змінюється вологовміст та температура на поверхні та в центрі матеріалу.

Перший період - період прогріву матеріалу. В цьому періоді температура в середині матеріалу протягом часу збільшується більш повільно ніж температура поверхні. Через визначений проміжок часу температури поверхні та центру матеріалу стають рівними температурі, яка відповідає адіабатичному насиченню повітря (температура мокрого термометру). Інтенсивність випаровування вологи з поверхні матеріалів в цей період уповільнена. Тривалість прогріву матеріалу не значна, при

розгляданні тепломасообмінних процесів в процесі сушіння цим періодом нехтують [6, 7, 8, 9].

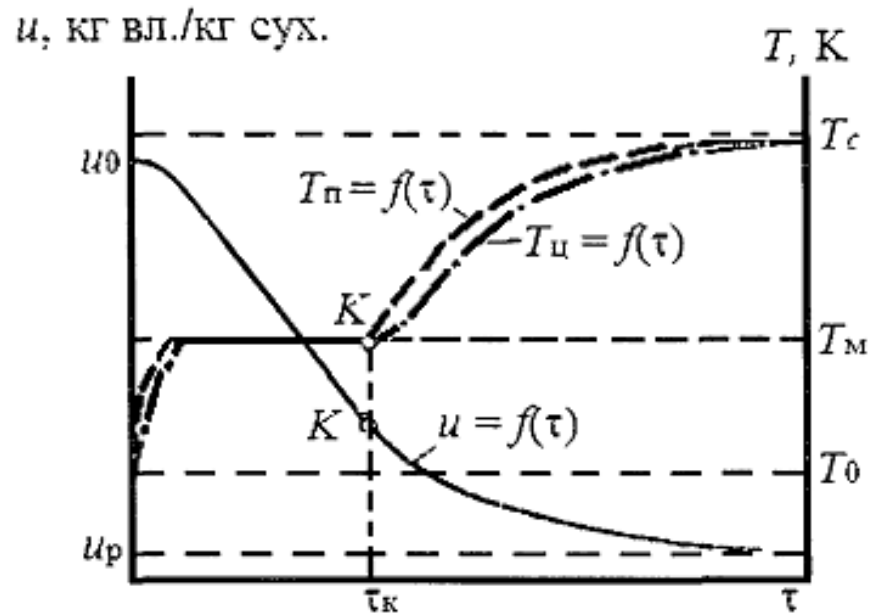


Рисунок 1.1 – Зміна вологовмісту та температури на поверхні та в центрі вологого матеріалу

Другий період - період постійної температури матеріалу (постійної швидкості сушіння). Вологовміст матеріалу в цьому періоді зменшується протягом часу за лінійним законом, що відповідає постійній швидкості сушіння (зміна вологовмісту в одиницю часу). Температура поверхні матеріалу залишається не змінною та дорівнює температурі мокрого термометру, тому вся теплота, що підводиться до матеріалу, що сушиться, витрачається на випаровування вологи з поверхні матеріалу. Цей період характеризується видаленням вільної вологи з матеріалу і відповідає максимальному вологовидаленню [8, 9].

Третій період - період температури, що підвищується. Цей період характеризується видаленням залишеної пов'язаної вологи з матеріалу. Потік вологи з центральної частини об'єкту відстає від швидкості її випаровування, у зв'язку з чим, на поверхні матеріалу створюються ділянки, які недостатньо

насичені вологою. Це приводить до швидкого розігріву поверхні та центру матеріалу, причому температура центру матеріалу трохи відстає від температури його поверхні. Вологовміст та швидкість сушки в цьому періоді знижуються протягом часу. Через визначений проміжок часу вологовміст досягає рівноважного значення, видалення вологи не відбувається, а температура матеріалу стає рівною температурі навколишнього середовища. Процес сушіння закінчується.

До основних факторів, які впливають на процес сушіння та на якість матеріалу, що сушиться відносяться:

1. Температура сушильного агента. Напочатку сушки збільшення температури повітря веде до прискорення процесу сушіння. Але одночасно збільшуються і теплові втрати, які найбільші в кінці сушки, коли матеріал має низьку вологість. Максимально допустимі температури залежать від матеріалу та способу сушіння. При сушці матеріалу у нерухомому шарі нижній шар матеріалу, що висушується, стикається з сушильним агентом, який нагрівається до максимальної температури, та з сушильною сіткою, що приводить до місцевого перегріву (максимальна температура (70...75) °C).

2. Швидкість повітряного потоку впливає на швидкість сушіння тільки на ділянці з сталою швидкістю (при сталій температурі та відносній вологості). Збільшення швидкості повітряного потоку підвищує швидкість сушіння. Цей вплив помітно до швидкості 5 м/с.

3. Вологість повітря. Збільшення вологості повітря при сталій температурі та швидкості повітряного потоку знижує швидкість сушіння в першому періоді та збільшується на кінцевому етапі. В цей момент залежність процесу сушіння від вологості повітря визначається значенням рівноважного вологовмісту, яке відповідає залишковій вологості матеріалу, що висушується [10, 7, 8, 9].

4. Атмосферний тиск. Зниження тиску прискорює процес сушіння, але тільки на першому етапі.

5. Товщина шару матеріалу. Збільшення товщини шару знижує швидкість сушіння. По мірі висихання товщина шару зменшується, а швидкість збільшується. Збільшення товщини шару пов'язано зі збільшенням витрати електроенергії на вентилятор, що подає повітря на сушку. Товщина шару матеріалу впливає на рівномірність нагріву, що характеризується перепадом температур по товщині матеріалу.

1.2 Види сушки

Залежно від способу передачі тепла процес сушки підрозділяється на:

1. Камерна сушка. Вона протікає в спеціальних пристроях, у яких циркулює нагрітий при атмосферному тиску агент сушіння: пароповітряна суміш, перегріта пара, топкові гази. Тепло матеріалу передається шляхом конвекції [11].

2. Конвективна сушка - це сушка виробів обдувом повітря з наступним видаленням вологи з сушарки. Іншими словами, конвективна сушка - це підведення тепла до оброблюваного матеріалу за допомогою теплоносія, який називають сушильним агентом або середовищем сушки. В якості теплоносія використовується повітря, димові гази або перегрітий пар [12]. Найбільш поширеним способом сушіння дерева (пиломатеріалів) є конвективний. Його також можна розділити на види і підвиди, основним з яких є конвективно-атмосферний і конвективно-тепловий. Різні комбінації цього способу можуть інтенсифікувати процес або його штучно сповільнити, досягти високої якості висушеного матеріалу і забезпечити збереження його природних властивостей, зменшити енергоємність процесу [13].

3. Радіаційно-конвективна сушка. Тепло подається до матеріалу тільки прямим випромінюванням від сильно нагрітого тіла. Джерелами тепла служать спеціальні електричні лампи або плити (керамічні або чавунні). Промениста теплота, являє собою потік інфрачервоних променів, що поширюється прямолінійно і затримується будь-якими екранами і тілами, які

перебувають на шляху потоку. Тому висушувати променевої теплою можна тільки предмети, які відкриті для безпосереднього опромінення [14].

4. Кондуктивна сушка - заснована на передачі теплоти матеріалу при зіткненні з гарячою поверхнею. Повітря при цьому способі служить тільки для видалення водяної пари з сушарки і є вологопоглиначем. Коефіцієнт тепловіддачі при цьому способі в десятки разів вище, ніж при конвективному сушінні. Обов'язкова умова при такій сушці - хороший контакт матеріалу з гріючої поверхнею [15].

5. Сублімаційне сушіння. Сублімацією зветься процес переходу речовини з твердого стану безпосередньо в пару [16]. Деякі матеріали необхідно сушити при низькій температурі, так як незначне її підвищення викликає різке погіршення їх технологічних властивостей. Сушка при низьких температурах і при атмосферному тиску відбувається дуже повільно. Тому з метою інтенсифікації процесу сушіння таких нетерmostійких матеріалів застосовують сушку в вакуумі. Зменшення тиску різко збільшує інтенсивність випаровування за рахунок підвищення коефіцієнта масообміну, який в першому наближенні обернено пропорційний тиску. Так як вакуумне сушіння відбувається в герметично закритому апараті, то передача тепла конвекцією невелика. Тому, щоб підтримати значну інтенсивність сушки в вакуумі, тепло, яке необхідне для випаровування рідини, підводиться до матеріалу шляхом теплопровідності від нагрітої поверхні (контактна сушка) або радіацією від нагрітих екранів (сушка інфрачервоними променями). Таким чином, вакуумна сушка за способом підведення тепла до матеріалу є контактним сушінням або сушінням інфрачервоними променями в умовах вакууму [4].

1.3 Основні рівняння кінетики сушки

Користуючись законом збереження енергії і маси речовини, можна встановити взаємозв'язок середніх інтегральних значень вологовмісту \bar{u} й

температури t з інтенсивністю тепло- і масообміну j_n і q_n а отже, і зі швидкістю сушки у вигляді рівняння балансу тепла.

Відповідно до закону збереження енергії, все тепло, підведене до тіла, так само тепла, витраченого на випаровування вологи, і тепла, витраченому на його нагрівання. Нехай загальна поверхня вологого тіла дорівнює S , в ньому міститься деяка маса вологи m_B і маса сухого тіла m_0 . Позначимо питомі теплоємності вологи і абсолютно сухого тіла відповідно через c_B і c_0 . Тоді кількість тепла, необхідне для нагрівання тіла в одиницю часу, дорівнюватиме

$$(c_0 \cdot m_0 + c_B \cdot m_B) \cdot \frac{dt}{d\tau}, \quad (1.4)$$

де t – середня температура тіла.

Кількість теплоти витраченої на випаровування вологи

$$r \cdot \frac{dm_B}{d\tau} = r \cdot m_0 \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (1.5)$$

так як вміст вологи тіла $\bar{u} = m_B/m_0$; r – питома теплота випаровування вологи дорівнює сумі питомої теплоти випаровування рідини $r_{ж}$ і теплоти змочування r_c , то

$$r = r_{ж} + r_c. \quad (1.6)$$

Сума кількості тепла, що йде на нагрівання тіла і випаровування вологи в ньому, дорівнює кількості підведеної тепла в одиницю часу до всієї поверхні тіла S

$$\int_{(S)} q dS. \quad (1.7)$$

Позначимо середній питомий потік тепла на одиницю поверхні через q_n , тоді рівняння (1.7) можна написати так

$$S \frac{1}{S} \int_{(S)} q_n dS = S q_n. \quad (1.8)$$

Підсумовуючи (1.4) і (1.5) і прирівнюючи до (1.8), а потім розділивши обидві частини рівності на V , отримаємо

$$q_n = (c_0 + c_B \bar{u}) \rho_0 \cdot R_v \cdot \frac{dt}{d\tau} + \rho_0 \cdot R_v r \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (1.9)$$

де R_v – відношення обсягу абсолютного сухого v_0 до поверхні вологого тіла S ($R_v = v_0/S$).

Якщо усадка поверхні тіла відбувається за співвідношенням, то

$$S = S_0 \cdot (1 + \beta_s \cdot \bar{u})^n, \quad (1.10)$$

де β_s – коефіцієнт поверхневої усадки тіла, n – постійна, то величина R_v є

$$R_v = R_{v0} / (1 + \beta_s \cdot \bar{u})^n, \quad (1.11)$$

де $R_{v0} = v_0/S_0$ – відношення обсягу до поверхні абсолютно сухого тіла. Якщо усадка тіла мала ($1 > \beta_s \bar{u}$), то $R_v = R_{v0} = const$. Позначимо теплоємність вологого тіла через ($c = c_0 + c_B \bar{u}$), тоді рівняння (1.9) можна записати у вигляді

$$q_n = \rho_0 R_v r \frac{dt}{d\tau} \left(1 + \frac{c}{r} \frac{dt}{d\bar{u}} \right). \quad (1.12)$$

Відношення $dt/d\tau$ характеризує збільшення середньої температури тіла при зміні вмісту води на одиницю в процесі сушіння. Ця величина є

дуже важливою характеристикою кінетики процесу сушіння. Позначимо $dt/d\bar{u}$ через b й назвемо температурним коефіцієнтом сушки, тоді

$$b = \frac{dt}{d\bar{u}} = \frac{dt}{dW} \cdot 100. \quad (1.13)$$

Температурний коефіцієнт сушіння визначається з температурних кривих або з аналітичних рішень диференціальних рівнянь тепло- і вологопереносу.

Величина $\frac{c}{r} \frac{dt}{d\bar{u}}$ є безрозмірною, вона показує відношення кількості тепла, який пішов на нагрів тіла, до кількості тепла, що йде на випаровування вологи, за нескінченно малий проміжок часу.

Таким чином, величина cb/r є основним критерієм кінетики процесу сушки. Цей критерій зветься критерієм Ребіндера R_b на честь видатного вченого, академіка П. А. Ребіндера творця вчення про форми зв'язку вологи з капілярно-пористими колоїдними тілами, що є основою теорії сушіння

$$R_b = \frac{cb}{r} = \frac{c}{r} \cdot \left(\frac{dt}{d\bar{u}} \right). \quad (1.14)$$

Критерій Ребіндера залежить від температурного коефіцієнта сушіння (основна характеристика кінетики сушіння), питомої теплоємності вологого тіла c і питомої теплоти випаровування вологи r . Останні величини c і r залежать від форм зв'язку вологи з вологим тілом. Теплота випаровування включає в себе не тільки теплоту випаровування рідини, але і теплоту змочування.

Рівняння (1.12) перепишеться у вигляді

$$q_n(\tau) = \rho_0 \cdot R_v \cdot r \cdot \frac{dt}{d\tau} (1 + R_b). \quad (1.15)$$

Рівняння (1.15) у критеріальній формі запишеться так

$$Ki_q(\tau) = Ki_m(\tau) \cdot Lu \cdot Ko \cdot (1 + Rb), \quad (1.16)$$

де $Ki_q(\tau)$ і $Ki_m(\tau)$ - відповідно теплообмінний і масообмінний критерії Кирпичева в періоді падаючої швидкості, є функціями часу, а Ko – критерій Косовича, який дає залежність між кількістю теплоти, витраченої на випаровування рідини та на нагрів вологого тіла. Оскільки питомі потоки тепла $q_n(\tau)$ і вологи $j_n(\tau)$ змінюються з плином часу, то

$$Ki_q(\tau) = \frac{q_n(\tau) \cdot R_v}{\lambda \cdot T_c}; \quad Ki_m = \frac{j_n(\tau) \cdot R_v}{a_m \cdot \rho_0 \cdot \bar{u}_0}. \quad (1.17)$$

Критерій Ребіндера на критерій Кірпічова є новою узагальненою змінною B , що представляє собою безрозмірний температурний коефіцієнт сушіння

$$B = Ko \cdot Rb = \frac{dt/T_c}{d\bar{u}/\bar{u}_0} = b \cdot \frac{\bar{u}_0}{T_c}. \quad (1.18)$$

Тоді рівняння (1.16) можна записати так

$$\frac{Ki_q(\tau)}{Ki_m(\tau)} = Lu \cdot (Ko + B). \quad (1.19)$$

У періоді постійної швидкості критерій Ребіндера дорівнює нулю, тоді зі співвідношення (1.15) $q_n = j_n r$, тобто

$$q_n(0) = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot \frac{N}{100} = const. \quad (1.20)$$

Позначимо відношення потоку тепла в періоді падаючої швидкості до потоку тепла в періоді постійної швидкості через q_n

$$q_n(\tau) = \frac{q_n(\tau)}{q_n(0)} = \frac{d\bar{u}}{d\tau} \cdot (1 + Rb) \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_{ж}}\right), \quad (1.21)$$

де $(d\bar{u})/d\tau$ – безрозмірна швидкість сушіння в періоді падаючої швидкості

$$\frac{d\bar{u}}{d\tau} = \left(\frac{dW}{d\tau}\right) \cdot \frac{1}{N}. \quad (1.22)$$

Якщо теплота змочування r_c значно менше теплоти випаровування рідини $r_{ж}$ ($r_c < r_{ж}$) в тому інтервалі вмісту вологи, в якому відбувається сушка, то рівняння (1.21) має наступний вигляд

$$q_{п}(\tau) = \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right) \cdot (1 + Rb) = \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right) \cdot \left(1 + \frac{B}{Ko}\right). \quad (1.23)$$

Це рівняння (1.23) є основним рівнянням кінетики сушки, воно встановлює взаємозв'язок між теплообміном $q_{п}(\tau)$ і масообміном $(d\bar{u}/d\tau)$ за допомогою критерію Rb або критерію B/Ko . Рівняння доцільне для будь-якого тіла і при будь-якому методі сушки [4].

1.4 Конвективна сушка

1.4.1 Вплив режиму сушки на кінетику процесу сушки

У більшості випадків сушка вологих матеріалів проводиться нагрітим газом, повітрям, топковим газами. У сушильних пристроях режим сушіння змінюється з плином часу, сушка відбувається при змінному режимі. Строгий аналіз кінетики процесу сушіння при таких умовах надзвичайно складний. Щоб виявити основні закономірності кінетики процесу сушіння, розглянемо спочатку сушку при постійному режимі, коли температура вологого повітря (парогазової суміші) t_c , вологість ϕ і швидкість руху його v залишаються постійними протягом всього процесу сушіння. Як вже було зазначено сушка представляє собою комплексний процес, в якому теплотехнічні та технологічні закономірності взаємно пов'язані між собою. Кінетика процесу сушіння визначається як тепло- і вологообмін між поверхнею тіла і навколишнім середовищем, так і перенесенням всередині тіла. Технологічні

боки процесу сушіння є вирішальними при виборі оптимального режиму сушіння.

При цьому необхідно зазначити, що вологі матеріали являють собою капілярнопористі колоїдні тіла. Форма зв'язку поглиненої речовини (вологи) з речовиною самого тіла робить основний вплив на механізм переносу тепла і речовини всередині тіла, а також на технологію сушки. Матеріали, що підлягають сушінню, мають найрізноманітніші форми зв'язаної вологи. Якщо основна частина вологи пов'язана осмотично, то такий матеріал за своїми властивостями наближається до колоїдних тіл, і закономірності в процесі сушіння цього матеріалу близькі до закономірностей сушки колоїдного тіла. Тому, щоб не розглядати процес сушіння безлічі матеріалів, зупинимося на двох типових тілах: капілярнопористому тілі (кварцовий пісок) і колоїдному тілі (желатин), а також на деяких проміжних за своїми властивостями тілах (капілярнопористі колоїдні тіла - глина, деревина, торф).

Аналіз закономірностей процесу сушіння цих тіл дозволяє поширити ці закономірності на більшість вологих матеріалів.

Режим сушіння нагрітим газом характеризується трьома параметрами: температурою газу t_c його вологістю ϕ і швидкістю руху v . Ці параметри впливають не тільки на тривалість сушіння, а й на якість висушеного матеріалу. Тому необхідно знайти такий режим сушіння, щоб при мінімальній тривалості сушіння і найменшій витраті тепла виходили найкращі технологічні властивості даного матеріалу.

Наприклад, якщо вивчається вплив температури, то на графіках наносяться криві сушіння, які відповідають різним температурам повітря, але при однаковій вологості і швидкості руху повітря. Якщо початкове вологовміст матеріалу різне, то криві сушіння можуть бути приведені до одного початкового вологовмісту шляхом переміщення їх по осі абсцис, якщо при цьому зміщення ми не виходимо з області періоду постійної швидкості сушіння. Необхідно відзначити справжнє початкове вологовміст

матеріалу, так як останнім в загальному випадку впливає на критичне вологовміст.

Збільшення товщини шару матеріалу різко уповільнює процес сушіння. При збільшенні шару в 3 рази загальна тривалість сушіння збільшується з 5 до 20 годин, а це приблизно в 4 рази (див. рис. 1.2). Найбільш вплив режиму сушіння на кінетику процесу можна бачити на кривих інтенсивності сушіння. Криві інтенсивності сушіння мають графічну залежність між інтенсивністю сушки і вологовмістом тіла. Зазвичай інтенсивність сушки в другому періоді обчислюється з кривою сушіння за допомогою методу графічного диференціювання (у першому періоді інтенсивність сушки постійна і визначається безпосередньо по убутку ваги тіла в одиницю часу). Метод графічного диференціювання вносить певну похибку, і його не можна рекомендувати для точних розрахункових обчислень. Тому одержувані цим методом криві інтенсивності носять наближений характер.

Однак криві інтенсивності сушіння можуть бути використані для якісного аналізу впливу режиму сушіння на кінетику процесу. Всі криві інтенсивності сушіння зміщені по осі абсцис на величину рівноважного вологовмісту, тобто відлік вологовмісту проводиться від рівноважного [4].

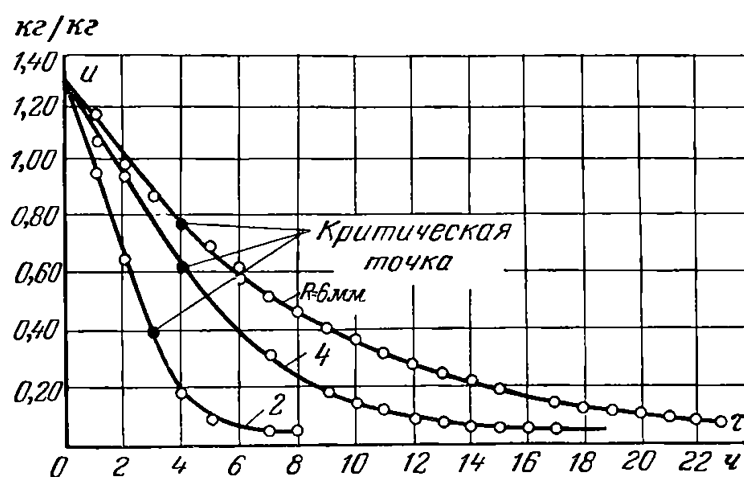


Рисунок 1.2 – Вплив товщини шару на криві сушіння колоїдного тіла ($t_c = 20^\circ\text{C}$; $\varphi = 0,76$; $v = 1,5 \text{ м/с}$)

1.4.2 Вплив режиму сушіння на наведений критичний вологовміст

Наведене критичне вологовміст є основною характеристикою технологічних властивостей матеріалу, яка визначає величину коефіцієнта сушіння і початок періоду падаючої швидкості в наведеній кривій швидкості сушіння. Величина приведенного критичного вмісту вологи може бути визначена по кривій швидкості сушіння або за значенням відносного коефіцієнта сушіння K , тобто

$$W_{к.п.} = \frac{N}{K} + W_p = \frac{1}{\chi} + W_p. \quad (1.24)$$

Наведене критичне вологовміст також залежить від режиму сушіння, але змінюється в порівняно невеликих межах. З рисунка 1.2 видно, що відносна вологість повітря майже не впливає на $W_{к.п.}$. Підвищення температури повітря зменшує величину наведеного критичного вологовмісту.

Обробка близько 70 дослідів з сушіння шкіри показала, що наведене критичне вологовміст в інтервалі температур (30...50) °С та відносній вологості $\phi = (30...60) \%$ при постійній швидкості руху повітря майже змінюється. Тільки при підвищенні температури понад 60 °С $W_{к.п.}$ починає зменшуватись [4].

1.4.3 Вплив напрямку потоку повітря і випромінювання на швидкість сушіння

На швидкість сушіння впливає не тільки величина швидкості руху повітря, а й напрямок потоку по відношенню до сушеного матеріалу. Експериментальне дослідження сушки глини в формі пластини розміром $5 \times 8 \times 2$ см показало, що напрямок потоку помітно впливає тільки в перший період сушіння і майже не впливає до кінця процесу. Експерименти

ставилися наступним чином: всі поверхні пластини, за винятком однієї, покривалися вологоізоляцією так, що випаровування вологи відбувалося тільки з однієї поверхні. Пластина розташовувалася під різними кутами по відношенню до потоку повітря, а саме під кутом 180° , 90° , 45° і 0° (при куті нахилу в 0° потік повітря вдаряв в сторону, протилежну по відношенню до поверхні випаровування). Результати одного з експериментів по сушці каоліну ($t_c = 30^\circ\text{C}$; $\varphi = 30\%$; $v = 4\text{ м/с}$) приведені на рисунку 1.3 у вигляді кривих швидкості сушіння.

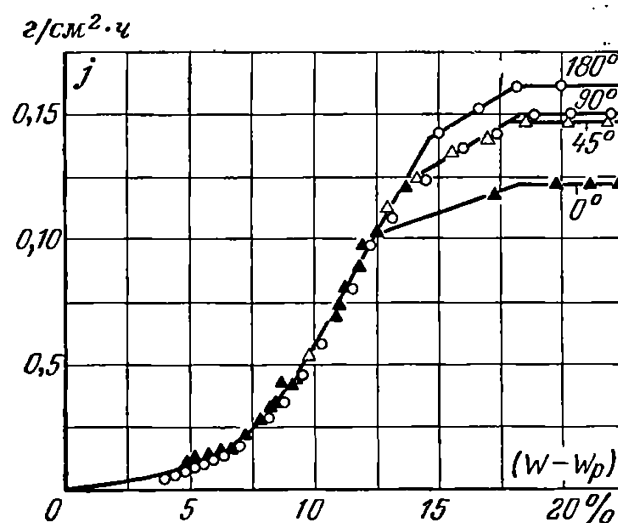


Рисунок 1.3 – Вплив напрямку потоку повітря на інтенсивність j сушки глини

Цей рисунок показує, що швидкість сушіння при направленні потоку в 90° (потік повітря йде уздовж поверхні випаровування) дуже мало відрізняється від швидкості сушіння при куті нахилу 45° в періоді постійної швидкості.

Це пояснюється збільшенням температури поверхні випаровування за рахунок більш посиленого притоку тепла через екрануючу поверхню. Ставлення швидкості сушки при крайніх положеннях одно 1,52, а між положеннями 180° (потік перпендикулярний поверхні випаровування) і 90° (потік паралельний поверхні випаровування) цей показник одно 1,1. Тут

також позначається вплив екранованих поверхонь. На швидкість сушіння впливає також теплове випромінювання від навколишніх предметів. Частина тепла в цьому випадку передається у вигляді променевої енергії від нагрітих поверхонь (стінки сушильної установки, приміщення всередині сушильної камери). Вплив випромінювання позначається помітним чином, коли різниця між температурою випромінюючих поверхонь і температурою матеріалу досить велика. Якщо різниця невелика, то випромінюванням можна знехтувати. Цей додатковий потік випромінюваного тепла діє на швидкість сушіння так само, як екрановані поверхні, підвищуючи температуру поверхні матеріалу і тим самим збільшуючи швидкість сушіння.

Швидкість сушіння в першому періоді з урахуванням випромінювання дорівнює

$$N = \frac{100}{R_v \cdot \rho_0} \left[\frac{\alpha}{r} \cdot (t_c - t_{\text{п.м.}}) + \frac{c_\sigma}{r} (T_{\text{и}}^4 - T_{\text{п.м.}}^4) \right], \quad (1.25)$$

де $T_{\text{и}} = t_{\text{и}} + 273 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура випромінюючих поверхонь в градусах абсолютної шкали температур;

σ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

c - постійна випромінювання, що залежить від коефіцієнта променевбирання поверхні матеріалу і від розташування випромінюючих поверхонь.

Таким чином, знаючи основні параметри, що характеризують процес сушіння вологого матеріалу, можна визначити тривалість сушіння, а отже, намітити такий режим, при якому тривалість сушіння буде мінімальною [4].

1.4.4 Основні кінетичні характеристики

Основними кінетичними характеристиками процесу сушіння вологих матеріалів є температурний коефіцієнт сушіння B і коефіцієнт сушки K .

Температурний коефіцієнт сушки B є функцією вологовмісткості і визначається емпіричними формулами. Коефіцієнт сушки розраховується за величиною швидкості сушіння в першому періоді N і відносному коефіцієнту сушки χ , який в першому наближенні може бути обчислений за величиною початкового вологовмісту \bar{u}_0 ($\chi = 1,8/\bar{u}_0$). Температурний коефіцієнт сушки B може бути обчислений за величиною критерію Косовича Ko та критерію Ребіндера Rb ($B = Rb \cdot Ko$). Критерій Ребіндера також визначається за емпіричними формулами, він в основному залежить від вмісту вологи тіла. При цьому треба розрізняти, яка питома теплоємність тіла входить в критерій Ребіндера. Теплоємність вологого тіла є лінійною функцією вмісту вологи

$$c = c_0 + c_{ж} \cdot \bar{u} = c_0 + 1\bar{u}, \quad (1.26)$$

де c_0 і $c_{ж}$ – питомі теплоємності абсолютно сухого тіла і рідини ($c_{ж} = 1$).

Тому доцільно при великому вологовмісту тіла критерій Ребіндера обчислювати по відношенню до питомої теплоємності сухого тіла ($Rb_0 = c_0 b/r$). У цьому випадку між критеріями Rb і Rb_0 має місце співвідношення

$$Rb = K_c \cdot Rb_0, \quad (1.27)$$

де K_c - параметричний критерій теплоємності вологого тіла; він є лінійною функцією вмісту вологи тіла \bar{u}

$$K_c = 1 + \frac{c_{ж}}{c_0} \cdot \bar{u}. \quad (1.28)$$

При малому вологовмісту тіла необхідно враховувати теплоту змочування r_c , тобто $r = r_{ж} + r_c$, де $r_{ж}$ — питома теплота випаровування рідини.

Критерій Косовича розраховується за величиною питомої теплоти випаровування r , питомої теплоємності тіла c і заданим значенням вмісту вологи і температури тіла, наприклад \bar{u} і T_c (температура навколишнього середовища). В основне рівняння кінетики процесу сушіння в узагальнених змінних входить критерій влаготеплодіфузії Lu ($Lu = a_m/a$). Коефіцієнт дифузії тепла a (коефіцієнт температуропровідності) визначається за табличними даними. Коефіцієнт дифузії вологи у вологому тілі a_m може бути розраховано за формулою В. П. Журавльової

$$\frac{a_0}{a_m} = 1 - D\bar{u}, \quad (1.29)$$

$$a_0 = Ma_{00} \left(\frac{T^n}{100} \right). \quad (1.30)$$

Коефіцієнт дифузії вологи для капілярно-пористих тіл змінюється з температурою тіла T пропорційно T^{20} ($n = 20, M = 10^{-15}$). Постійна D для капілярно-пористих тіл приблизно дорівнює

$$D = 3,5 \frac{\rho_0}{1000}. \quad (1.31)$$

а для колоїдних капілярно-пористих тіл

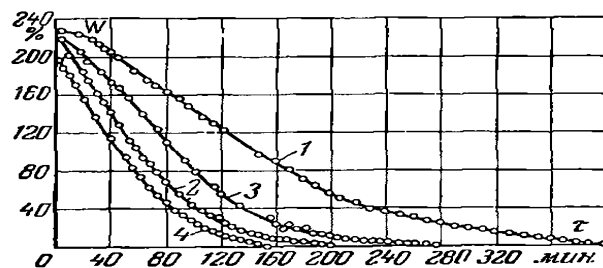
$$D = 2 \frac{\rho_0}{1000}. \quad (1.32)$$

Таким чином, коефіцієнт дифузії вологи a_m в першому наближенні може бути визначений для даного матеріалу в залежності від вмісту вологи тіла і його температури. Однак якщо термодифузією вологи знехтувати не можна, тоді необхідно визначити відносний коефіцієнт термодифузії вологи δ ($\delta = a_m^T/a_m$). Зазначених вище критеріїв досить для розрахунку кінетики процесу сушіння тіла і його температури в періоді падаючої швидкості сушки. У періоді постійної швидкості сушки інтенсивності теплообміну q

(ккал/м²·год) та вологообміну j (кг/(м²·год)) визначаються за відомими формулами зовнішнього тепло- і масообміну, а між q і j існує простий взаємозв'язок ($q = r \cdot j$) [4].

1.4.5 Сушка перегрітою парою

У виробництві деяких матеріалів застосовується нагрівання вологого матеріалу насиченою або перегрітою водяною парою, в процесі якого одночасно відбувається його сушка [4]. При використанні перегрітої водяної пари відбувається видалення рідини практично до нульового змісту. Таким чином, цю стадію технологічного процесу можна розглядати як процес конвективного сушіння капілярно-пористого матеріалу [17]. На рисунку 1.4 наведені криві сушіння целюлози при видаленні з неї вологи за допомогою двох теплоносіїв - перегрітої пари і повітря. Видно, що швидкість сушіння повітрям на всьому протязі процесу більше або приблизно однакова у порівнянні зі швидкістю сушки перегрітою парою при однакових температурах обох теплоносіїв. Ця різниця в швидкостях згладжується при переході до більш високих температур, що пояснюється зменшенням відносини $(t_B - t_M)/(t_{\Pi} - 100)$ з підвищенням температури теплоносія (t_B, t_M, t_n) – відповідно температури повітря, матеріалу і пари.



- 1 – перегріта пара, 150° С; 2 – перегріта пара, 200 °С
3 – повітря, 150 °С; 4 – повітря при t 200 °С.

Рисунок 1.4 – Криві сушіння целюлози при сушінні перегрітою парою і повітрям

Температурні криві, наведені на рисунку 1.5, показують, що при сушінні перегрітою парою ($t_c = 150\text{ }^\circ\text{C}$) температури поверхні і центру зразка однакові і рівні приблизно $100\text{ }^\circ\text{C}$ протягом усього періоду постійної швидкості (при видаленні від 220 % до 80 % вологи). У періоді падаючої швидкості сушки всередині тіла виникає перепад температури, який спочатку збільшується, досягаючи максимуму, а потім зменшується, поступово наближаючись до нуля в кінці процесу сушіння. У разі сушіння нагрітим повітрям при тій же температурі $150\text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається аналогічна закономірність, але температура тіла в періоді постійної швидкості сушіння дорівнює приблизно $70\text{ }^\circ\text{C}$.

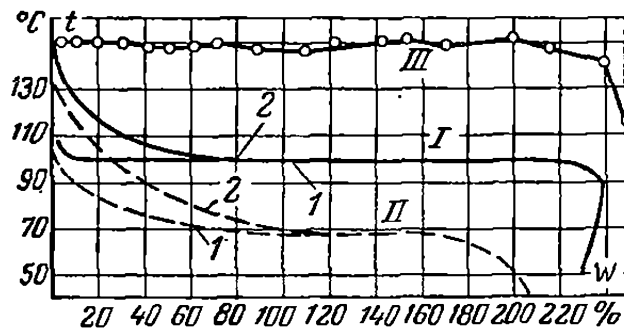


Рисунок 1.5 - Залежність між температурою і вологовмісткості кульки з целюлози при сушінні перегрітою парою (I) і повітрям (II) для центру (1) та поверхні (2) кульки (III — температура перегрітої пари)

Отже, при сушінні перегрітою парою температура тіла в процесі сушіння вище, що сприяє більш інтенсивному переносу вологи всередині тіла. З кривих розподілу вологовмісту всередині тіла при обох способах сушіння (див. рис.1.6) можна зробити наступні висновки. При сушінні повітрям градієнт вмісту вологи в періоді постійної швидкості практично дорівнює нулю, в періоді падаючої швидкості він спочатку збільшується, а потім, досягнувши максимуму, поступово зменшується.

Криві розподілу вологовмісту за формою близькі до параболи. При сушінні перегрітою парою (див. рис. 1.6 (б)) вологовміст на поверхні тіла в

періоді прогріву, як і слід було очікувати, більше, ніж в центрі, в результаті конденсації пари на холодній поверхні тіла в періоді підігріву.

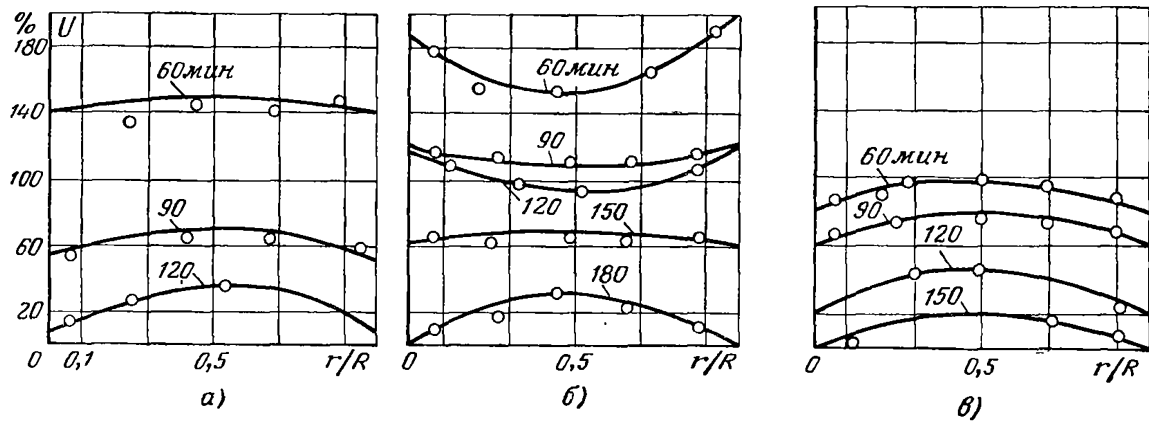


Рисунок 1.6- Розподіл вмісту вологи по радіальній координаті r/R при сушінні повітрям (а), перегрітою парою (б) і перегрітою парою з попереднім підігрівом (в) при температурі теплоносія $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ при різному часі сушки

У міру віддалення вологи різниця вологовмісту на поверхні і в центрі тіла зменшується, і в періоді падаючої швидкості криві розподілу вологовмісту мають такий же вигляд, як і при сушінні повітрям. При сушінні перегрітою парою з попереднім підігрівом (див. рис. 1.6 (в)) явища конденсації усуваються, і криві розподілу вологовмісту стають аналогічними кривим при сушінні повітрям.

На рисунку 1.7 зображена зміна величини α у процесі сушки. Коефіцієнт рахується за формулою

$$\alpha = \frac{1}{t_T + t_M} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} \cdot \rho_0 \cdot R_v \left[r_i + (c_0 + \bar{u}) \cdot \frac{dt}{d\tau} \right], \quad (1.33)$$

де t_m, t_M – відповідно температура теплоносія і матеріалу;

r_i - різниця ентальпій пара в теплоносії і вологи при середній температурі тіла

$$r_i = 595 + 0,46 \cdot t_T - t. \quad (1.34)$$

Температура матеріалу t_M приймалася рівною температурі поверхні (криві 1 і 2) і центру тіла (криві 3 і 4).

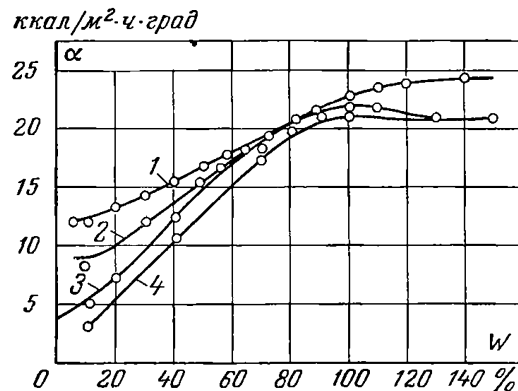


Рисунок 1.7- Зміна коефіцієнта теплообміну від вмісту вологи при сушінні перегрітою парою (1, 3) і повітрям (2, 4), коли температура теплоносія 150 °С

З рисунку 1.7 видно, що коефіцієнти теплообміну при сушінні повітрям і перегрітою парою в періоді постійної швидкості приблизно однакові і для обраних умов дослідів рівні (21...25) ккал/(м²·год·град). Рівність коефіцієнтів теплообміну відповідає теоретичним припущенням, так як при теплообміні вільною конвекцією і випромінюванням, як це було в даних експериментах, ставлення коефіцієнтів має бути трохи менше 1,1. При температурі 200 °С коефіцієнти теплообміну в середньому буде на (7...10) % вище, ніж при температурі 150 °С. Слід відзначити, що експериментальні значення коефіцієнтів теплообміну для повітря і перегрітої пари збігаються з обчисленими за відомими формулами для теплообміну в умовах вільної конвекції з урахуванням додаткового тепла випромінюванням від стінок апарату. Коефіцієнти теплообміну, віднесені до різниці температур між теплоносієм і поверхнею тіла α_n , як і до різниці температур між теплоносієм і центром тіла α_c , зменшуються після критичної точки з пониженням вмісту вологи (див. рис. 1.7).

Коефіцієнт α_c зменшується більш різко, ніж α_n , складаючи при малій вологовмісткості всього близько 50 % α_n . Це пояснюється додатковим

опором, яке надає шар тіла підводу тепла, що йде на нагрівання тіла і внутрішнє випаровування вологи. зменшення величини α_n , яка при середньому вологовмісті 15 % становить всього (40...50) % коефіцієнта теплообміну в періоді постійної швидкості сушки, пояснюється наступними причинами:

– зниженням коефіцієнта теплообміну конвекцією в міру зменшення різниці температур між теплоносієм і тілом, наприклад при зменшенні різниці температур від 100 °С до 10 °С коефіцієнт теплообміну зменшується

$$\text{у } \sqrt[4]{\frac{100}{10}} = 1,77 \text{ рази;}$$

– зниженням теплообміну випромінюванням; теплообмін віднесений до різниці температур між теплоносієм і тілом ($t_\tau - t_M$), так як при температурі стінок t_{cm} нижчою ніж температура теплоносія, ця величина

$$\dot{\alpha}_L = \alpha_L \cdot \frac{t_{ст} - t_M}{t_\tau - t_M}. \quad (1.35)$$

Зі збільшенням початкового вологовмісту збільшується і приріст вмісту вологи за період прогріву. Період постійної швидкості сушки протікає при температурі, що відповідає температурі насичення (кипіння). При підвищенні тиску температура збільшується. При незмінності режимних параметрів темп зміни її постійний. Механізм переносу вологи при сушінні перегрітою парою істотно не відрізняється від механізму вологопереносу при сушінні нагрітим повітрям. Основною рушійною силою вологопереносу є градієнт загального тиску. Процес сушіння поступово перетворюється в процес випаровування рідини з тіла. Розташування зони випаровування можна наближено визначити за температурним кривим. Однак цей метод дає недостатньо точні дані при сушінні перегрітою парою, так як випаровування рідини, як уже зазначалося, відбувається не тільки в зоні випаровування, але і у всій масі тіла.

На рисунку 1.8 приведені криві $\rho = f(Fo)$ для різних безрозмірних координат (от $X = 0,0$ до $X = 0,75$). З рисунку 1.8 видно, що криві $\rho = f(Fo)$ мають максимальне значення, в результаті чого на початку процесу сушіння криві розподілу тиску $\rho = f(X)$ мають два максимуми і один мінімум (див. рис.1.9). У міру сушіння це складний розподіл тиску змінюється і криві $\rho = f(X)$ стають близькими до параболи. Великий вплив на поле тиску має критерій Lu . Чим вище інерційність поля вологовмісту в порівнянні з інерційністю поля температур, тобто чим менше значення критерію Lu , тим інтенсивніше зростання безрозмірного тиску ρ , при менших значеннях чисел Фур'є досягається його максимум, тим більше абсолютна величина максимуму і пізніше (при великих Fo) відбувається його повна релаксація.

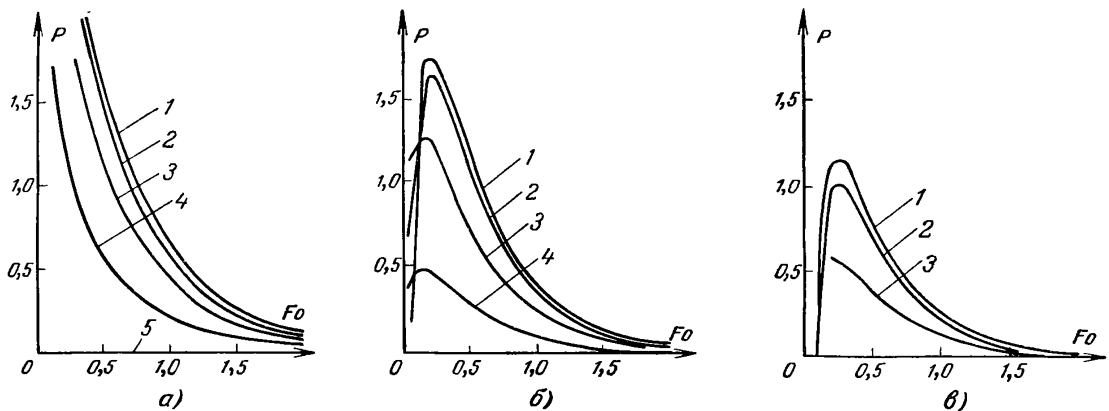


Рисунок 1.8 - Нестационарне поле тиску (а — $Lu = 0,5$; б — $Lu = 1,0$; в — $Lu = 2,0$; 1 — $X = 0$; 2 — $X = 0,25$; 3 — $X = 0,5$; 4 — $X = 0,75$)

Причина більш раннього формування максимуму тиску при малих значеннях критерію Lu прихована в динаміці розвитку температурного поля. При малих Lu спостерігається найбільш інтенсивний розвиток температурного поля, яке обумовлює швидке прогрівання тіла, інтенсифікацію фазових перетворень, а отже, посилений ріст надлишкового тиску.

З наведеного аналізу випливає, що критерій Lu здійснює істотний вплив на величину тиску. Середнє значення цього потенціалу, як показують розрахунки, з ростом критерію зменшується (див. рис. 1.10). При $Lu > 1,7$

вплив критерію стає слабим, а при $Lu > 2,0$ - нікчемним. Дещо інший фізичний зміст має залежність безрозмірного тиску від критерію Lu_p (див. рис. 1.10). Оскільки коефіцієнт конвективної дифузії a_p значно більше коефіцієнту теплопровідності a_q критерій $Lu_p > 1$. Збільшення a_p , а отже, і Lu_p покращує умови фільтрації пара через зразок і тим самим прискорює релаксацію поля тисків. Тому зі збільшенням Lu_p величина надлишкового тиску зменшується, при цьому найбільш інтенсивна зміна спостерігається в інтервалі значень $Lu_p = 300 \dots 700$.

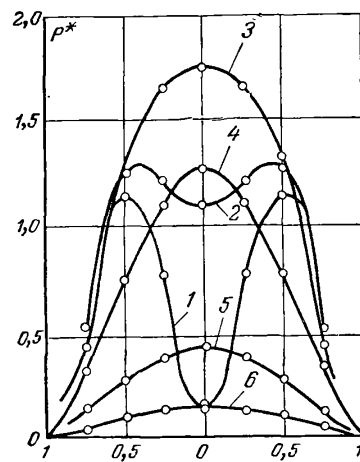


Рисунок 1.9 - Розподіл безрозмірного тиску в тілі ($1 - Fo = 0,045$; 2 — $0,15$; 3 — $0,23$; 4 — $0,5$; 5 — $1,0$; 6 — $1,5$)

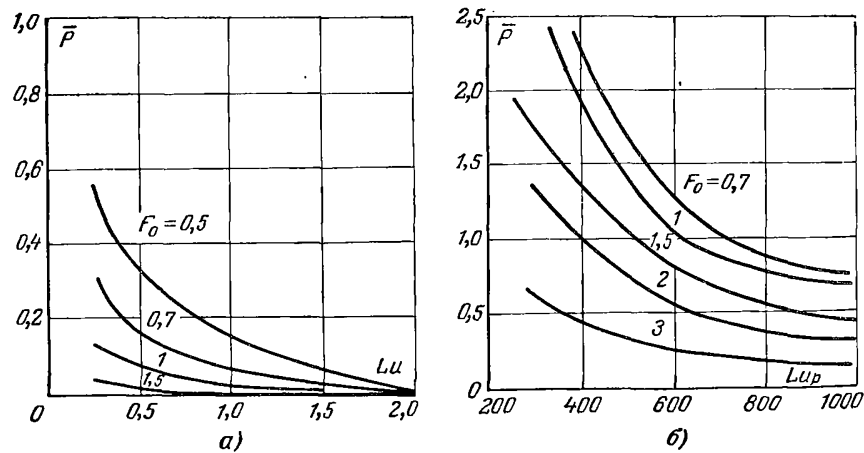


Рисунок 1.10 - Залежність безрозмірного тиску від критеріїв Lu (а) і Lu_p (б)

Підвищення температури перегрітої пари збільшує інтенсивність внутрішнього пароутворення і тим самим підвищує надлишковий тиск. Надлишковий тиск виникає в тілі, коли його температура значно менше 100 °С. При цьому чим більше t_c , тим більший тиск. При досягненні торфом температури 100 °С тиск різко збільшується за рахунок бурхливого пароутворення. Подальше підвищення температури тіла не дає інтенсивного приросту тиску, швидкість сушіння різко зменшується [4].

1.4.6 Інтенсифікація процесу конвективної сушки

У зв'язку з підвищеними вимогами до якості сировини виникає необхідність в розробці нових способів сушки, що забезпечують високу якість матеріалу та значну інтенсифікацію процесу. За параметр, що характеризує інтенсивність процесу, приймають інтенсивність випаровування вологи с 1 м³ робочої камери установки, яка залежить від концентрації матеріалу в об'ємі робочої камери, від максимально допустимих температури та вологості матеріалу та навколишнього середовища, від активної поверхні тепло та масообміну в одиниці об'єму установки та аеродинамічних умов.

Інтенсивність конвективної сушки характеризується рівняннями балансу теплоти та маси:

$$\alpha_n \cdot (t_c - T_n) = r \cdot j_n + \frac{c \cdot m_0}{F_n} \cdot \frac{dT}{d\tau}, \quad (1.36)$$

$$j_n = \beta \cdot (\nabla u + \delta \cdot \nabla T)_n, \quad (1.37)$$

де α_n – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні матеріалу, Вт/(м·К);

t_c – температура навколишнього середовища, К;

T_n – температура поверхні матеріалу, К;

r – теплота пароутворення води, Дж/кг;

j_n – інтенсивність випаровування з поверхні матеріалу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

c – приведена питома теплоємність вологого матеріалу, $\text{кг вл.}/\text{кг сух.}$;

m_0 – маса сухого матеріалу, кг ;

F_n – площа поверхні матеріалу, м^2 ;

T – середня по об'єму температура матеріалу, К ;

τ – час процесу сушки, с ;

β – коефіцієнт масоотдачі з поверхні матеріалу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

δ – термоградієнтний коефіцієнт, К^{-1} ;

∇u , ∇T – градієнт вологовмісту та температури.

Проаналізувавши ці рівняння можна зробити висновок, що для інтенсифікації процесу конвективної сушки та підвищення економічної ефективності роботи установки може бути обрано один з наступних шляхів:

- використання більш високих початкових температур повітря;
- використання більших локальних швидкостей повітряного потоку, вібрації часток матеріалу;
- збільшення площі поверхні матеріалу;
- застосування комбінованих способів сушіння та суміщення різноманітних процесів в одному апараті;
- використання вторинних енергетичних та теплових ресурсів виробництва.

З підвищенням температури середі стрімко скорочується тривалість сушіння, в результаті матеріал зберігає свої якісні показники. При цьому зменшуються питомі витрати електроенергії [6, 7, 8, 9].

Збільшення інтенсивності сушки можна домогтися за рахунок збільшення коефіцієнту тепловідачі, так як в даному випадку підвищується теплообмін тіла з навколишнім середовищем. Однак великі швидкості руху газів потребують більших витрат електроенергії. Для збільшення інтенсивності сушки необхідно збільшити коефіцієнт дифузії вологи та градієнт вологовмісту. При цьому направлення градієнтів вологовмісту и

температури протилежні. Також інтенсифікація процесу сушки можна досягнути зміною напрямлення потоку газу.

Практика сушіння підтверджує, що висока температура сушильного агента приводить до різкого підвищенню температури поверхні часток [7, 8]. Отже безперестанно інтенсифікувати процес сушки шляхом зменшення розмірів часток, не змінюючи якості сушильного матеріалу не можливо. З іншого боку, для збільшення продуктивності устаткування бажано збільшити товщину шару матеріалу, інтенсивність випаровування різко знижується із-зі більшого насичення повітря, що проходить крізь шар матеріалу.

Як правило, режим сушки не повинен бути сталим протягом усього процесу сушки, а повинен змінюватися по ходу процесу у відповідності з закономірностями переносу тепла та вологи в даному матеріалі. Здійснити змінні режими можна при використанні комбінованих методів підводу теплоти.

Підвищення ефективності роботи різних видів сушильних установок пов'язано з інтенсифікацією теплових та масообмінних характеристик за допомогою різних факторів. Підвищення ефективності роботи агрегатів можливо шляхом застосування теплових насосів у якості генераторів теплоти, що має економічний та екологічний ефект.

1.4.7 Вплив режиму сушіння

Основними режимними параметрами сушки перегрітою парою є температура t_c швидкість руху v та тиск p . Специфічним для сушки перегрітою парою є період прогріву зі зростаючою вологовмісткістю тіла. Він займає приблизно 10 % загальної тривалості сушіння, причому половина часу цього періоду супроводжується збільшенням вмісту вологи. Період постійної швидкості починається при вологовмісткості, трохи меншому початкового вологовмісту. Ця різниця невелика, для торфу - близько 4 %. Для тонких зразків період прогріву незначний і протікає за час, що становить

близько 1 % загальної тривалості, тому практично період прогріву на кривих сушіння не спостерігається.

Кількість сконденсованої вологи на поверхні тонкого матеріалу можна визначити за відомими формулами теплопередачі. Для товстих зразків тривалість періоду прогріву в годинах визначається за формулою, де W_0 - початкова вологовміст, %

$$\tau_{\text{п}} = 0,150 \lg W_0 - 0,273 . \quad (1.38)$$

Збільшення вологовмісту $\Delta \bar{u}$ (кг/кг) у цьому періоді буде

$$\Delta \bar{u} = \bar{u}_{\text{макс}} - \bar{u}_0 = 0,0632 \cdot 10^{0,205 \bar{u}_0} . \quad (1.39)$$

Зі зростанням тиску p величини $\tau_{\text{п}}$ і $\Delta \bar{u}$ збільшуються.

На основі аналізу дослідних даних по сушінню можна прийти до висновку, що величина $\Delta \bar{u}$ є однозначною функцією перегріву пари Δt ($\Delta t = t_c - t_s$), тобто $\Delta \bar{u} = f(\Delta t)$. Зі зростанням Δt величина $\Delta \bar{u}$ зменшується.

Період постійної швидкості характеризується безперервним збільшенням інтенсивності сушіння із зменшенням вологовмісту, що пов'язано з інтенсивним пароутворенням у всій масі тіла аналогічно процесу випарювання рідини з пористих тел. Відносний вологоз'єм до точки насичення волокна в пиломатеріалах при 100 °С становить 2 % /год, при 115 °С - 4 % /год і при 195 °С - 39 %/год.

Підвищення тиску також призводить до збільшення швидкості сушіння. При постійній температурі перегріву Δt підвищення швидкості сушіння має місце при будь-яких значеннях тиску.

При збереженні сталості температури середовища збільшенні швидкості сушіння спостерігається на обмеженому інтервалі зміни тиску. Після досягнення екстремуму швидкість сушіння починає швидко падати, так як подальше зменшення температури перегріву починає обмежувати

підведення до зразком тепла і істотно знижує випарну здатність теплоносія. Однак навіть при насиченому стані пара швидкість сушіння має кінцеве значення.

Дослідження по сушінню деревини при температурі 112 °С показали, що збільшення швидкості від 3 м/с до 11 м/с підвищує інтенсивність сушіння в 2,08 рази. З ростом температури це відношення збільшується: при температурі 130 °С інтенсивність сушіння підвищується вже в 2,65 рази. Для деревини швидкість сушіння залежить від швидкості потоку в ступені 0,5 при ламінарному режимі течії і ступеня 0,6 при турбулентному режимі.

Період падаючої швидкості характеризується різким зменшенням інтенсивності сушіння. Вплив параметрів сушіння (t_c , v , p) на інтенсивність сушіння приблизно те ж саме. Однак вплив швидкості руху пари значно слабшає. Наприклад, при вологовмісті деревини нижче точки насичення волокна швидкість руху пари практично не впливає на інтенсивність сушіння. В процесі сушіння матеріали органічного походження зазнають термічне розкладання сухої маси.

Однією з причин збільшення інтенсивності сушіння є більш інтенсивний прогрів тіла, викликаний наявністю конденсації пари в періоді прогріву, коли коефіцієнт теплообміну різко збільшується. Доцільність та економічність застосування сушіння перегрітою парою повинна визначатися не тільки теплоенергетичними показниками, але в першу чергу технологічними властивостями матеріалу [4].

1.5 Особливості процесу конвективного сушіння деревини

Найбільш ефективним методом зневоднення деревини в промислових умовах є її сушіння. Вона здійснюється за рахунок підведення до вологого матеріалу тепла з нагрітим повітрям або гарячими продуктами згорання. Випарена волога несеться цим же повітрям [18]. Механічна міцність

деревини різко зростає по мірі зменшення кількості вологи в діапазоні нижче 30 %, одночасно деревина стає легше [19].

Процес сушіння – найбільш тривалий і один з найбільш енерговитратних у всій технології деревообробки. Тому скорочення тривалості сушіння, зниження енерговитратності при збереженні якості висушеної деревини завжди були актуальним напрямком наукових досліджень, що сприяють вирішенню загальної проблеми раціонального використання деревних ресурсів. Оптимальною вважається сушіння, при якій швидкість просування вологи з внутрішніх шарів наближається до швидкості її випаровування з поверхні деревини. В реальних умовах випаровування вологи з поверхні відбувається швидше, ніж її просування всередині деревини. Саме в досягненні інтенсивного руху вологи усередині матеріалу (з внутрішніх шарів до поверхні) полягають можливості одержання високих техніко-економічних показників процесу сушіння пиломатеріалів.

При конвективній сушці основною рушійною силою є градієнт вологості. Чим більше товщина, тим більше вміст вологи в деревині. Це явище називають градієнтом вологості. Це відношення між величинами вологості двох точок на деревині, розташованих на різній відстані від поверхні. Чим вище цей градієнт, тим швидше сохне деревина; чим менше цей градієнт, тим повільніше сохне деревина. Оскільки це призводить до того, що поверхня деревини швидко досягає рівноважної вологості з навколишнім середовищем і вологообмін деревини з середовищем припиняється. При цьому процес сушіння різко сповільнюється, незважаючи на наявність психрометричної різниці, і градієнта вологості в матеріалі, а в деяких випадках може припинитися повністю. Тому, щоб інтенсифікувати процес сушіння необхідно підвищити швидкість переміщення вологи в матеріалі, за допомогою підключення інших градієнтів, при одночасному зменшенні інтенсивності випаровування вологи з поверхні. В процесі конвективного сушіння підведення тепла здійснюється вологим повітрям, що характеризується значенням $\phi < 1$.

Оскільки при конвективної сушки поверхневі шари деревини досить швидко досягають рівноважної вологості, то температура поверхні матеріалу прагне до температури середовища. Величина Δt зменшується і, відповідно, знижується інтенсивність теплообміну. Величина перепаду температури по перерізу матеріалу $\Delta t'$ також зменшується і до кінця кожної щаблі становить (0,2...0,4) °С. Це, в свою чергу, призводить до того, що у внутрішні шари деревини надходить недостатня кількість тепла для фазового переходу рідини в пару і процес сушіння сповільнюється, незважаючи на наявність психрометричної різниці і те, що вологість всередині матеріалу ще досить висока.

Очевидно, щоб скоротити загальну тривалість при збереженні якості висушеної деревини, необхідно виключити з процесу сушіння періоди відповідають мінімальним значенням втрат вологи, коли швидкість сушіння прагнути до нуля, а поверхня деревини має вологість близьку до рівноважної. Більш висока вологість поверхні буде мати температуру близьку до температури змоченого термометра. Тому протягом усього процесу сушіння буде зберігатися більший перепад температур, а отже і більш інтенсивний теплообмін, який дозволяє додатково стимулювати струм вологи в матеріалі. Застосування технології сушіння деревини з попередньою термохімічною обробкою дозволить без істотних капітальних вкладень підвищити продуктивність існуючих конвективних сушильних камер [20, 21]. Попередня термохімічна обробка дозволяє в 2,0...3,0 рази скоротити терміни атмосферного сушіння деревини [22].

1.6 Експериментальні методи дослідження процесу сушіння

1.6.1 Методи визначення вологості повітря

Як сказано в [23], температура повітря легко і досить точно може бути виміряна термометрами або термопарами. У практиці найбільш широко застосовуються наступні методи визначення вологості повітря:

психрометрический, метод точки роси, гігроскопічний і масовий, причому психрометрический метод – найпоширеніший, далі йде гігроскопічний.

Існуючі методи вимірювання вологості засновані на залежності концентрації парів води в повітрі від процесів випаровування і конденсації, від її теплоємності, теплопровідності, діелектричної проникності, поглинання електромагнітного випромінювання в певному ділянці спектра і інших. Найбільш часто застосовуються прилади для вимірювання і реєстрації відносної вологості, в основі яких лежать методи точки роси, психрометрический, сорбційний [24]. Сорбційна вологість - рівноважна гігроскопічна вологість матеріалу при певних умовах протягом заданого часу. Фізичний сенс сорбційної вологості полягає в тому, що будівельний матеріал, висушений до мінімально можливої вологості, і приміщень в експлуатаційну середу з параметрами атмосферного повітря, набуває деяку вологість. Збільшення сорбційної вологості відбувається внаслідок поглинання матеріалом вологи з навколишнього повітря [25].

У вологомірах використовується залежність від вологості повітря однієї з таких величин: 1) різниці температур сухого і мокрого термометрів (психометричний метод); 2) точки роси (гігрометричний метод); 3) лінійних розмірів вlagосорбуючих матеріалів (механічні гігрометри); 4) маси вlagосорбуючого матеріалу (ваговий метод); 5) теплопровідності пароповітряної суміші; 6) тиску або об'єму пароповітряної суміші; 7) іонної провідності або рухливості іонів; 8) діелектричної проникності вологого повітря або вlagосорбуючого матеріалу; 9) інтенсивність спектральної лінії пароповітряної суміші; 10) показника заломлення вlagосорбуючої рідини, вміщеній в пароповітряне середовище; 11) ефектів дифузії; 12) параметрів хімічних процесів (хімічні методи); 13) електропровідності вlagосорбуючого матеріалу (методи електроопору). В сушильній техніці застосовуються не всі вище перераховані методи, переважно тільки психометричні або гігрометричний методи [26].

Спосіб визначення вологості повітря гігromетричним методом заснований на зміні температури точки роси. Температура до якої слід ізобарно охолодити повітря даної вологості, щоб водяна пара стала насиченою, називається точкою роси [27].

Визначення вмісту води у великих обсягах повітря (в сушільних приміщеннях і сушільних установках) виробляють за допомогою різного виду психрометрів (див. рис. 1.11).

Психрометр - це спеціальний прилад, призначений для вимірювання температури та вологості повітря. Він складається з двох термометрів: "сухого" і "вологого", термодатчики яких є абсолютно незалежними один від одного. Перший термометр, що визначає температуру, в той час як вологість вираховується як різниця між показаннями "сухого" і "мокрого" термометрів [28]. Кулька одного з термометрів обгорнутий вологою тканиною, внаслідок чого показання сухого і мокрого термометрів різні. Очевидно, що чим менше ступінь насичення вологою атмосферного повітря, тим інтенсивніше процес випаровування з вологої тканини і, отже, більше різниця показань сухого і мокрого термометрів [29].



Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд різного виду психрометрів

Температура, яку мокрим термометром психрометра, не дорівнює істинній температурі мокрого термометра, а завжди трохи вище. Це відбувається внаслідок передачі тепла через виступаючий стовпчик ртуті, який має температуру сухого термометра, сприймаючи випромінювання від оточуючих предметів і ряду інших причин [26].

1.6.2 Визначення температури і вологості газу в малих обсягах і прикордонних шарів

Для найбільш повного дослідження переносу речовини у всіляких матеріалах необхідно мати надійні методи вимірювання вологості повітря в малих обсягах. Дослідження тепло - і масообміну в процесах випаровування, сушіння і зволоження тел пов'язане з вимірюванням температури і вологості полів поблизу поверхні тіла, в прикордонному слою.

Н.Ф. Докучаєвим розроблений і перевірений в роботі цілий ряд таких приладів. Для вимірювання вологості повітря в малих обсягах він сконструював спеціальний волосяний гігрометр, має дуже невелику вимірювальну частину, а датчиком служить оброблений відрізок волоска.

Термогігрометр для вимірювання вологості і температури повітря в малому шарі являє собою волосяний гігрометр з пружинним покажчиком і мікрометричним відліковим пристроєм. Для вимірювання температури він забезпечений тонкими термопарами. Прилад зміцнюється в горизонтальному положенні в спеціальному пристосуванні, що дає можливість переміщати прилад по вертикалі зі зміною переміщення.

Термопсихрометр для вимірювання вологості і температури повітря в прикордонному шарі застосовується при вимірюваннях, аналогічних вимірювань за допомогою термогігрометра. Він дає більш надійні свідчення і має малу інерцію порівняно з термогігрометром, він може бути застосований лише при відомих умовах. Наприклад, при відсутності руху

повітря він вносить спотворення, тому застосовується в умовах вимушеної конвекції.

Для визначення температури і вологості повітря в малих обсягах електричним методом Р. Е. Вишневським був розроблений спеціальний прилад, що складається з датчика і вимірювальної апаратури. Датчик є вузлом, що сприймає зміну вимірюваної величини і перетворює цю величину в електричний параметр, зручний для реєстрації і кількісної оцінки. При виконанні датчиків основну трудність становить вишукування відповідного гігроскопічного напівпровідника [26].

1.6.3 Методи зважування матеріалу в процесі сушіння.

Расев А. І. [30] В основних закономірностях про сушіння деревини виділив, що сушка деревини - дуже складний процес, характер якого визначається одночасним протіканням ряду фізичних явищ, для якого важливо який спосіб зважування буде використаний. Велике поширення має атмосферна сушка (атмосферні сушарки) матеріалів.

Добре розглянуті методи зважування матеріалів в процесі сушіння Ликовим А. В. [26], з приведенням різних видів ваг для дослідів.

Тензометричні ваги. При сушінні матеріалів в атмосферних сушарках, де ваги, що вимірюють спад вологи в матеріалі в процесі сушіння, можуть бути винесені з сушильної камери, при дослідженнях в умовах високого вакууму це зробити технічно неможливо. Ваги, що поміщаються в сублімаційну камеру, повинні бути компактними, мати достатню чутливість, повинні дозволяти точно і зручно фіксувати спад вологи.

Реєструючі ваги. Такі ваги застосовуються для безперервної реєстрації ваги матеріалу в процесі сушіння. Ці ваги дозволяють для запису кривої убутку ваги матеріалу, користуватися звичайною міліметровою папером замість спеціального паперу з особливою шкалою ваги матеріалу [31].

Коромислові ваги. Коромисло, до обох кінців якого підвішені чаші для гир і вантажу, що зважується. У рівноплечого важеля опора розташована на рівній відстані від точок прикладання сил. В основу дії таких ваг покладений принцип рівноваги [32].

1.7 Висновки за розділом

В результаті проведеного аналізу технологічного процесу сушки виявлено наступне:

1. Швидкість сушіння визначають умови проведення процесу (температура, тиск), особливість пористої структури матеріалу, ступінь заповнення пор рідиною.
2. Режим сушіння нагрітим газом характеризується трьома параметрами: температурою газу t_c його вологістю ϕ і швидкістю руху v .
3. Визначені шляхи інтенсифікації процесу конвективної сушки.
4. Проаналізовані експериментальні методи дослідження процесу сушіння

Таким чином, для розробки оптимального режиму сушки потрібно:

- визначити вплив температури сушильного агенту на тривалість процесу сушіння;
- дослідити вплив швидкості теплоносія сушильного агенту на тривалість процесу сушіння;
- визначити вплив сорту деревини на процес сушіння.

2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ РІЗНИХ ПОРІД ДЕРЕВИНИ

2.1 Планування експерименту

Процес тепло та масообміну при сушінні матеріалів залежить від багатьох факторів і пов'язаний як з властивостями матеріалу, так і параметрами ведення процесу.

Враховуючи, що різниця парціальних тисків водяної пари на поверхні матеріалу і в навколишньому середовищі залежить перш за все від швидкості руху теплоносія і його температури, то загальну функціональну залежність при сушінні матеріалу можна представити у вигляді

$$\frac{du}{dt_{\text{ч}}} = f(t_T^{\circ}, v_T, \alpha, \beta, \lambda, c, \rho_0, u_0, R_v). \quad (2.1)$$

При цьому рівноваги вплив зазвичай вважають постійним для даної установки. Тоді змінні величини, від яких залежить функція $du/dt_{\text{ч}}$, для спрощення структурної схеми даної замкнутої системи можна розділити на три групи: змінні, що характеризують властивості формувальної маси, спрямованої на сушку ($\rho_0, u_0, c_0, \lambda_0, R_0, R_v$); параметри, що характеризують властивості висушеного матеріалу ($\rho_m, u_m, \lambda_m, c_m, R_m$), і параметри, що характеризують умови сушіння ($t_T^{\circ}, v_T, \alpha, \beta$). При такому підході ці групи параметрів можуть бути розглянуті як вхідні та вихідні керованого процесу, а сам процес сушіння представлений у вигляді блок - схеми для дослідження процесу.

Такий підхід дозволяє цілеспрямовано провести вивчення процесу сушіння матеріалу, використовуючи планування експерименту, створення математичних моделей і їх застосування при оптимізації як окремих параметрів, так і всього процесу сушіння матеріалу [33].

На вихідній блок-схемі моделі конвективного сушіння матеріалу є п'ять вихідних параметрів, п'ять вхідних некерованих параметрів і п'ять вхідних керуючих впливів (рис. 2.1).

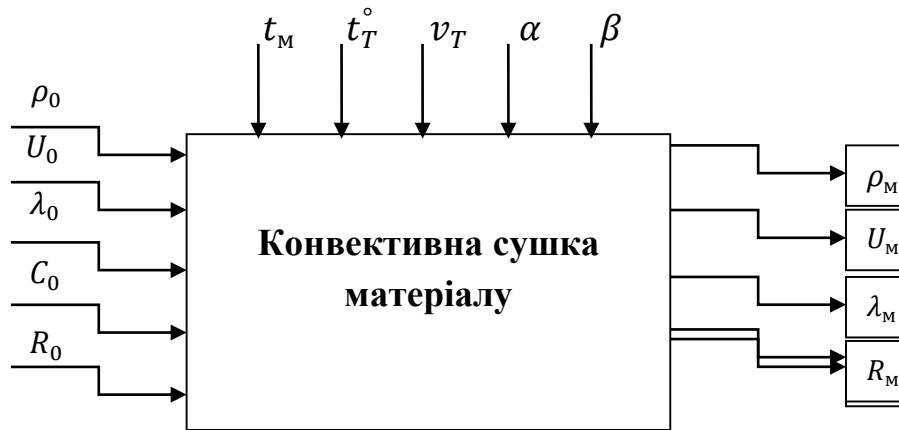


Рисунок 2.1 – Блок схема сушки матеріалу у конвективній сушарці

На початковій стадії вивчення по блок - схемі моделі, поведінку матеріалу у конвективній сушарці зі всієї безлічі параметрів, що впливають на процес, необхідно виділити основні.

Ранжування факторів можна проводити наприклад за результатами попередніх експериментів або аналізу даних літературних джерел.

В даному експерименті ранжування факторів проводиться за даними літератури. Вказується, що для опису процесу сушіння в якості основних вхідних параметрів слід вибрати: початкове вологовміст матеріалу - u_0 , температуру теплоносія - t_T° , та швидкість руху теплоносія - v_T . При плануванні експерименту ці параметри позначаються x_1 , x_2 , відповідно.

Як вихідних параметрів, що підлягають визначенню, вибирається тривалість сушіння t_q та межа міцності матеріалу при вигині $R_{виг}$ або стиснення R_{cm} . Ці параметри при експерименті відповідно позначаються y_1 та y_2 .

Для встановлення рівнів варіювання необхідно визначити рівень (0) і інтервал варіювання Δx_i . Верхній (+1) нижній (-1) рівні виходять шляхом додавання і віднімання інтервалу варіювання до нульового рівня.

Отримана інформація, що показує умови планування експерименту зводиться в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Фактори, рівні та інтервали варіювання при конвективній сушці

Фактори		Рівні варіювання			Інтервали варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	1	
Швидкість руху теплоносія, м/с	x_1	1	2	3	1
Температура теплоносія, °С	x_2	60	45	30	15

При вивченні теплових процесів найбільш часто мають місце лінійні і неповні квадратичні залежності, перебування яких пов'язане з проведенням повного факторного експерименту. При проведенні ПФЕ планування здійснюється на двох рівнях - верхньому (+1) і нижньому (- 1). Число дослідів N залежить від числа факторів K та дорівнює 2^K .

Для визначення помилки відтворюваності необхідно повторити експеримент на нульовому (основному) рівні. В цьому випадку матриця планування має вигляд представлений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Матриця планування експерименту

№ Дослідів	Фактори		Вихідні параметри	
	x_1	x_2	y_1	y_2
1	+	+	y_{11}	y_{21}
2	+	-	y_{12}	y_{22}
3	-	+	y_{13}	y_{23}
4	-	-	y_{14}	y_{24}

Згідно матриці планування експерименту необхідно виготовити зразки із заданим змістом вологи, налаштувати роботу сушильної установки на задані параметри x_2 і x_1 і виконати виміри вихідних параметрів y_1 і y_2 . Дані, що характеризують умови проведення експериментів і отримані результати, зводяться в таблицю [33].

2.2 Експериментальна частина

Для проведення експериментів використовується сушильна установка, яка встановлена у аудиторії №1 кафедри теплоенергетики та гідроенергетики (див. рис. 2.2.), і яка схематично представлена на рисунку 2.3.



Рисунок 2.2 – Модель сушильної установки у лабораторії

Установка складається з вентилятора 1, швидкість обертів якого регулюється регулятором обертів P1, вологоміру повітря після нагрівача 4, нагрівача – 2, температура якого регулюється регулятором потужності P2, реєструючих ваг – 3.

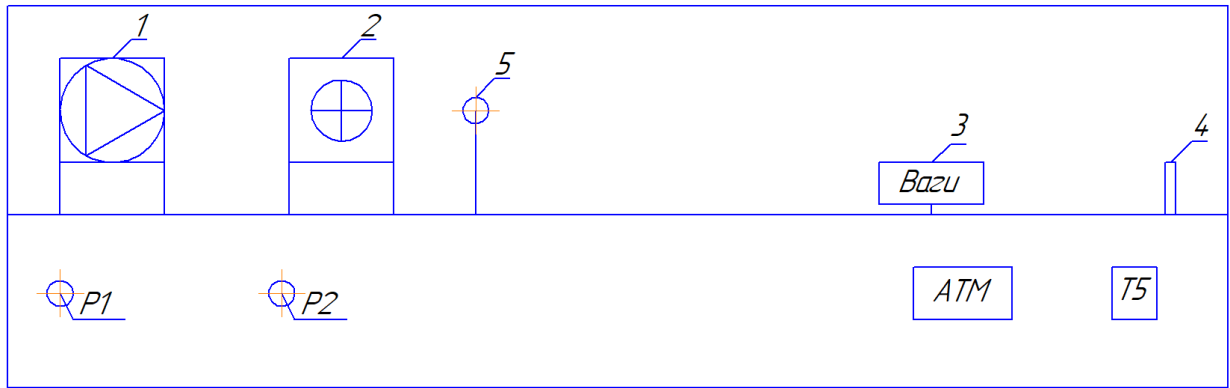


Рисунок 2.3 – Схема сушильної установки

За зразок береться брусок сосни розміром 70мм × 25мм × 12мм. На початку експерименту визначається початковий вологовміст зразка вологоміром деревини CSY01H EMT01 MT-10 (див. рис. 2.4).



Рисунок 2.4 - Вологомір деревини

За допомогою вологоміру можна визначити вологість деяких порід деревини, для цього треба обрати необхідний режим (A, B, C, D) та голчасту частину занурити у деревину. Метод визначення значень вологості на основі електричного опору (кондуктометричний метод). Групи порід дерев:

A: тик, волоський горіх, каучукова деревина, пробка;

В: тополь, бук, кедр, толу;

С: ясен, в'яз, яблуко, дуб, вишня;

Д: липа, модрина, сосна, береза.

Технічні характеристики:

Діапазон значень вологості: 0-99,9% (деревина);

- дозвіл 0,1%;
- точність вимірів $\pm 1\%$;
- довжини електродів 10 мм;
- харчування: 9V (Крона);
- матеріал корпусу: ABS пластик;
- діапазон робочих температур: від 0 до 40 °С;
- розміри: 145 · 67 · 32 мм;
- вага: 200 г.

Лабораторний стенд (див. рис. 2.3) працює наступним чином. Випробуваний зразок поміщається в сушильну камеру на платформу ваг 3, яка з'єднана з датчиком температури і ваги (див. рис. 2.5 та 2.6). Повітря, що нагнітається вентилятором 1, проходить через електричний калорифер 2, де нагрівається до заданої температури. Температура нагрівача 2 змінюється регулятором потужності P2. Нагріте повітря в сушильній камері омиває зразок, при цьому відбувається тепло- і масообмін між теплоносієм і матеріалом. Швидкість руху теплоносія змінюється від (1...3) м/с за допомогою регулятора обертів P1. Кількість вилученої вологи фіксується за допомогою ваг 3, температура і вологість навколишнього середовища фіксується за допомогою вологоміра 4 и виводиться на екран T5. Вага зразка та температура сушильного агента вимірюється вимірювально – контрольно операційною системою АТМ (рис. 2.8, 2.9).



Рисунок 2.5 – Термометр – гігрометр з виносним датчиком

Датчик допомагає визначити температуру та вологість навколишнього середовища.

Технічні характеристики:

- діапазон вимірювання температури (0...+70) °С;
- діапазон вимірювання вологості (10... 95) %;
- похибка +/- 1 °С, 5 %;
- ціна поділки 0,1 °С, 1 %;
- довжина виносного датчика вологості: 150 см;
- монтажний розмір: 45x26x13 мм;
- екран: 36x16мм.

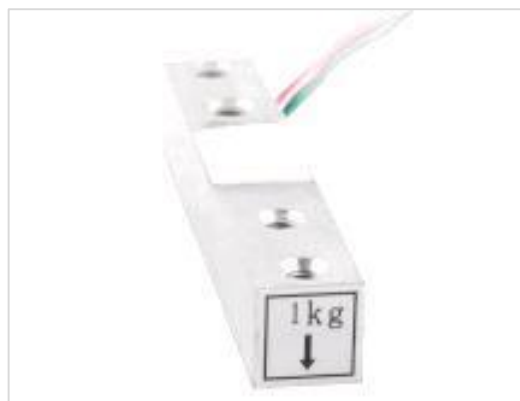


Рисунок 2.6 – Тензометричний датчик

Тензометричний датчик – датчик, що перетворює величину деформації в зручний для вимірювання сигнал (зазвичай електричний), основний компонент тензметра (приладу для вимірювання деформацій).

Тензорезистивного датчик зазвичай являє собою спеціальну пружну конструкцію із закріпленим на ній тензорезистором і іншими допоміжними деталями. Після калібрування, по зміні опору тензорезистора можна обчислити ступінь деформації, яка буде пропорційна силі, яка додається до конструкції.

Конструкція резистивного тензодатчика є пружний елемент, на якому зафіксовано тензорезистор. Під дією сили (ваги вантажу) відбувається деформація пружного елемента разом з тензорезистором. В результаті зміни опору тензорезистора, можна судити про силу впливу на датчик, а отже, і про вагу вантажу. Принцип вимірювання ваги за допомогою тензодатчиків заснований на зрівноважуванні маси вантажу, що зважується з пружною механічною силою тензодатчиків і подальшого перетворення цієї сили в електричний сигнал для подальшої обробки. Технічні характеристики:

- розміри 80x12,7x12,7мм;
- матеріал: алюміній;
- комплексна помилка 0,2 %;
- рекомендована напруга (5...10) В;
- максимальна вага: до 1 кг.

Такий датчик рекомендується використовувати спільно з датчиком НХ711 (див. рис. 2.7)



Рисунок 2.7 - Датчик НХ711

Високоточний двоканальний модуль підключення резистивних датчиків тиску (тензодатчиків) побудований на чіпі NH711.

Технічні характеристики:

- диференційний вхід з напругою: ± 40 мВ (Повномасштабна диференціальне вхідна напруга ± 40 мВ);
- точність перетворення: 24 біт (24 біт / D конвертер.);
- частота оновлення: 80 Гц;
- робоча напруга: 5 В постійного струму;
- робочий струм: <10 мА;
- розмір: 38мм · 21мм · 10 м.
-

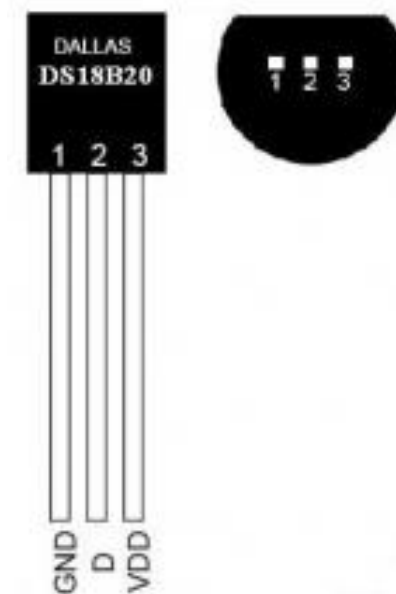


Рисунок 2. 8 – Датчик температури цифровий DS18B20

Датчик температури DS18B20 цифровий має діапазон вимірюваних температур від -55 °С до $+125$ °С. Зчитуваний з приладу цифровий код є прямим безпосереднім кодом вимірюваного значення температури і не потребує додаткових перетвореннях. Абсолютна похибка перетворення менше $0,5$ °С в діапазоні контрольованих температур -10 °С до $+85$ °С. Термометр має індивідуальний 64-розрядний реєстраційний номер (груповий код 028H) і забезпечує можливість роботи без зовнішнього джерела живлення, тільки за

рахунок паразитного харчування однопровідної лінії. Живлення приладу через окремий зовнішній висновок виробляється напругою від 3,0 В до 5,5 В.

Технічні характеристики датчика температури DS18B20:

- розрядність - 9...12 бит;
- точність виміру $\pm 0.5\%$ в області температур (-10...+85) °С;
- напруга живлення для точності вимірювання $\pm 0,5\%$ (3,0...5,5) В.

Мікроконтролер АТmega328 представлений на рисунку 2.9.

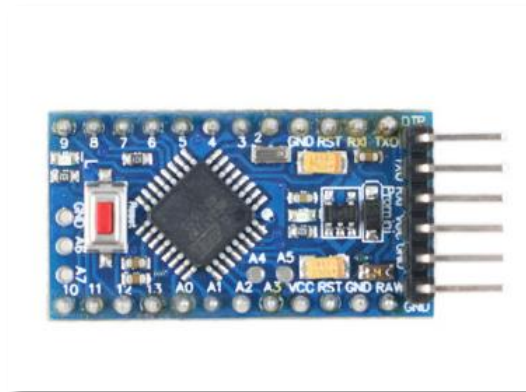


Рисунок 2.9 – Мікроконтролер АТmega328

Технічні характеристики мікроконтролеру АТmega328:

- тактова частота: 0 - 20 МГц;
- обсяг Flash-пам'яті 32 кб;
- обсяг SRAM-пам'яті 2 кб;
- обсяг EEPROM-пам'яті 1 кб;
- напруга живлення: 1,8 - 5,5 В
- струм в режимі роботи: 0,2 мА (1 МГц, 1,8 В);
- струм в режимі сну: 0,75 мкА (1 МГц, 1,8 В);
- кількість таймерів / лічильників: 2 восьмибітних, 1 шістнадцятибітну;
- загальна кількість портів 23.

Сухий зразок попередньо зважується, потім занурюється у воду і визначається вологовміст зразка. Вмикаємо установку в мережу.

Встановлюємо швидкість обертів вентилятора та потужність нагрівача. Виходимо на стаціонарний режим. Встановлюємо зразок на ваги і фіксуємо кожні 15 хвилин зміну маси та вологовмісту зразка. Результати експериментів при різних режимах роботи зводимо до таблиці 2.3, таблиці 2.4, таблиці 2.5. Після того як маса і волога стабілізувалися зразок виймається і охолоджується до температури навколишнього середовища.

При сушінні визначається початкове вологовміст маси, температура і швидкість руху теплоносія, межа міцності і час сушки матеріалу.

Початкове вологовміст маси, кг/кг

$$u_0 = \frac{(G_{вл} - G_{сух})}{G_{сух}}, \quad (2.2)$$

де $G_{вл}$ і $G_{сух}$ – середнє значення маси проб відповідно вологого і сухого матеріалу.

На основі даних робочих таблиць будуються криві сушіння, які наочно показують зміна вмісту вологи зразка в часі. По кривим сушки можна визначити тривалість сушіння (рис. 2.10, 2.11, 2.12).

Таблиця 2.3 – Робоча таблиця сушки зразка деревини ($\varphi = 70 \%$, $t^\circ = 30^\circ\text{C}$, $v = 3 \text{ м/с}$)

Показники	Показники через t_q від початку експерименту																		
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270
Маса зразка, г	17,0	15,9	15,2	14,6	14,3	13,9	13,8	13,6	13,5	13,3	13,2	13,1	13,0	13,0	12,9	12,7	12,6	12,6	12,5
Маса випарованої вологи, г	0	1,1	1,8	2,4	2,7	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7	3,8	3,9	4,0	4,0	4,1	4,3	4,4	4,4	4,5
Вологість зразка, %	70	56	49	39	37	35	35	30	27	25	20	17	15	15	12	10	9	9	8
Кінцевий вологовміст, %		6,5	4,4	3,9	2,1	2,8	0,7	1,4	0,7	1,5	0,8	0,8	0,8	0	0,8	1,6	0,8	0	0,8

Таблиця 2.4 – Робоча таблиця сушки зразка деревини ($\varphi = 70 \%$, $t^\circ = 60^\circ\text{C}$, $v = 1 \text{ м/с}$)

Показники	Показники через t_q від початку експерименту									
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135
Маса зразка, г	17,0	15,1	14,7	14,3	13,9	13,6	13,3	13,1	12,9	12,8
Маса випарованої вологи, г	0	2	2,3	2,7	3,1	3,4	3,7	3,9	4,1	4,2
Вологість зразка, %	70	35	31	27	22	19	15	11	10	8
Кінцевий вологовміст, %		11	2,6	2,7	2,8	2,2	2,2	1,5	1,5	0,8

Таблиця 2.5 – Робоча таблиця сушки зразка деревини ($\varphi = 70\%$, $t^\circ = 45^\circ\text{C}$, $v = 2\text{ м/с}$)

Показники	Показники через t_4 від початку експерименту																
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240
Маса зразка, г	17,0	16,8	16,0	15,2	14,6	14,3	14,2	14,0	13,8	13,8	13,7	13,5	13,3	13,1	13,1	12,9	12,7
Маса випарованої вологи, г	0	0,2	1,0	1,8	2,4	2,7	2,8	3,0	3,2	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	3,9	4,1	4,3
Вологість зразка, %	70	55	50	47	31	23	22	17	16	16	15	12	11	10	10	9	8
Кінцевий вологовміст, %		1,2	4,8	5	3,95	2,1	0,7	1,4	1,4	0	0,7	1,5	1,5	1,5	0	1,5	1,6

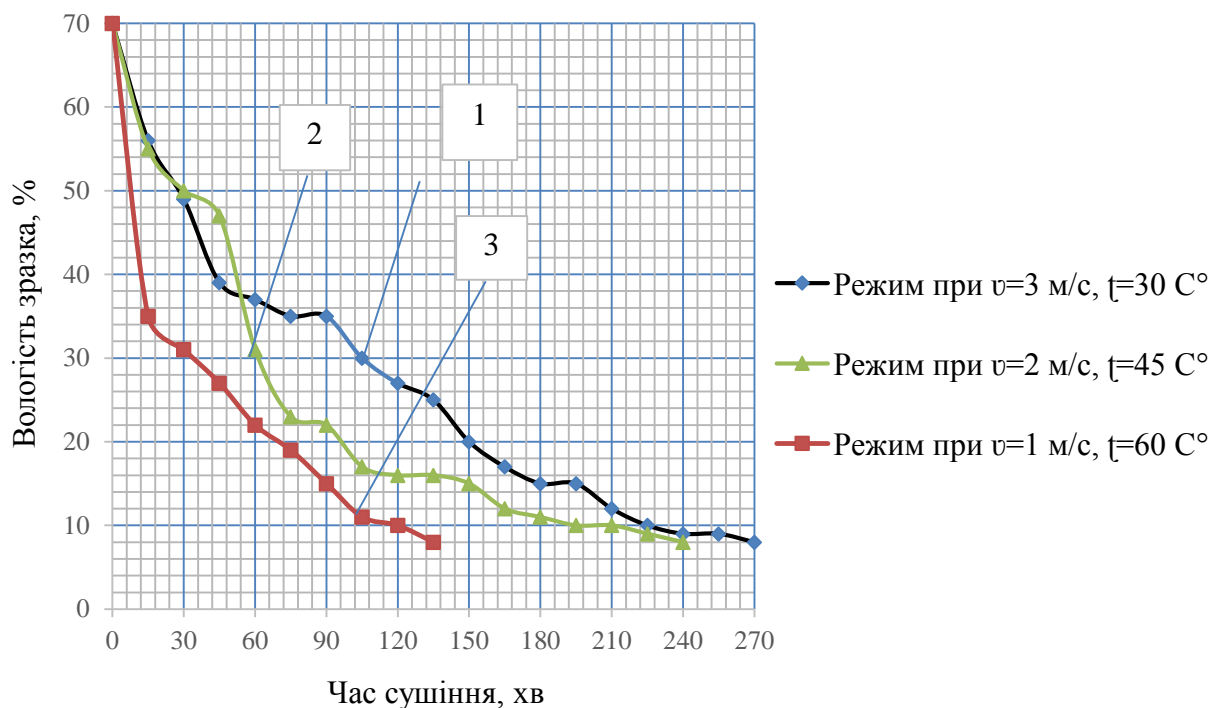


Рисунок 2.10 – Крива сушки зразків при різних режимах сушки. Залежність вологи від часу

На графіку, який показано на рисунку 2.10 побудовано криві сушіння на основі даних робочих таблиць (таблиця 2.3, 2.4).

Крива 1 відповідає першому експерименту який проводився при максимальній швидкості теплоносія (3 м/с) і мінімальної температури теплоносія (30 °C). Видно, що режим сушки 1 характеризується тим, що час, який витрачається на сушку – максимальний, а волога зменшується більш плавно і врівноважено.

Крива 2 відповідає режиму 2 і показує наступне: часу на сушку було витрачено менше ніж при режимі 1, зменшення вологості зразка більш швидке і стрімке.

Крива 3 відповідає режиму 3. Сушка відбувалася з мінімальною швидкістю теплоносія і максимальною температурою теплоносія. Процес сушіння при таких параметрах триває в 2 рази швидше.

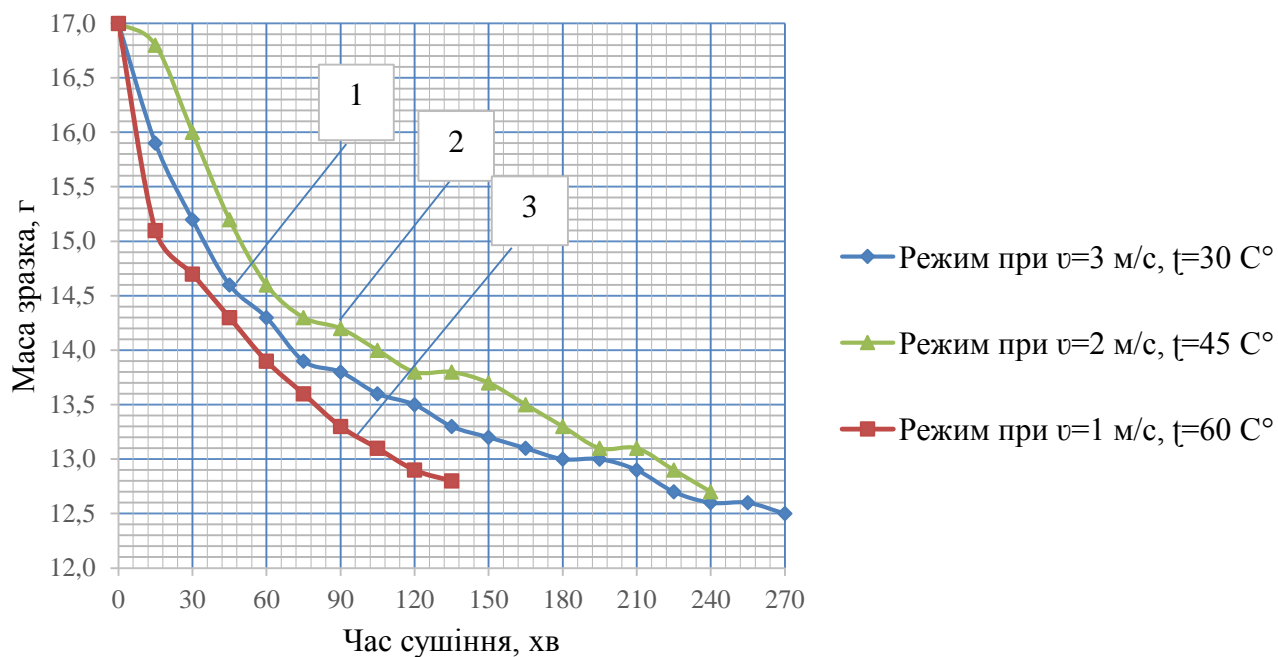


Рисунок 2.11– Крива сушки зразків при різних режимах сушки. Залежність маси від часу

На графіку зображені три криві сушіння. За аналогією з попереднім графіком видно, що експерименти при режимах 1 і 2 мають близькі вихідні дані і один від одного відрізняються несуттєво. Режим 3 має більш швидке зменшення маси і на порядок менший час витрачений на експеримент. Із всього вище сказаного можна зробити висновок, що найбільш ефективним є 3 режим сушіння, якому відповідає швидкість 1 м/с, а температура теплоносія 60 °С.

За рисунком 2.11 можна зробити висновок, що так як і у попередніх графіках експерименти при режимах 1 і 2 відрізняються несуттєво, а кінцевий вологовміст при режимі 3 досягається значно швидше. Криві сушіння рисунку 2.8 були побудовані за даними розрахунку вологовмісту за формулою (2.2).

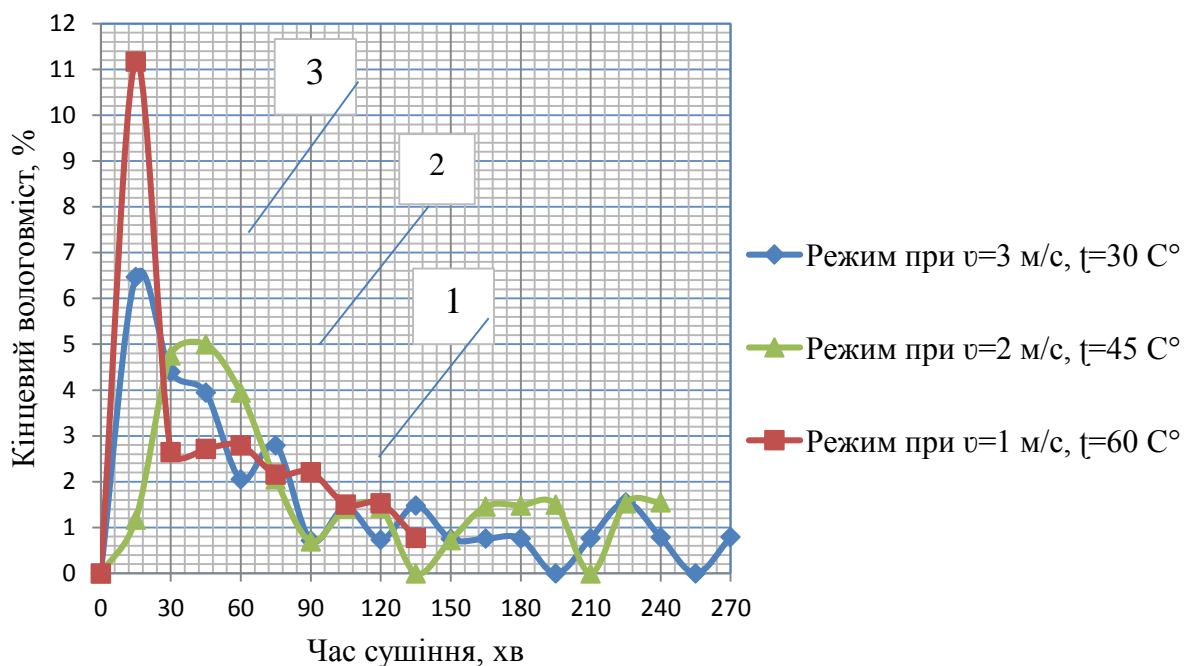


Рисунок 2.12 – Крива сушіння при різних режимах. Залежність кінцевого вологовмісту від часу

2.3 Дослідження процесу сушіння сосни, яблуні та груші

Одним з завдань досліджень було визначення часу сушіння різних порід деревини. В експерименті було задіяно такі породи дерев як сосна, яблуня та груша. Розміри зразків 70мм × 25мм × 12мм. Методика проведення експериментів аналогічна попереднім дослідженням і виконується з застосуванням того ж обладнання. Результати досліджень процесу сушіння груші представлено у таблиці 2.6. Зміна маси зразка у часі представлена на рисунку 2.13. Зміна вологості зразка за часом представлена на рисунку 2.14.

Таблиця 2.6 - Експериментальні дані сушки груши

Час, хв	Маса зразка, г	Вологість зразка, %
0	71,96	29,9
15	69,76	15,3
30	68,95	11,7
45	67,88	09,8
60	67,62	08,4
75	67,33	07,9
90	67,26	07,4
105	67,17	12,5
135	67,05	07,0
150	66,87	06,8
165	66,87	06,8
180	37,9	08,4

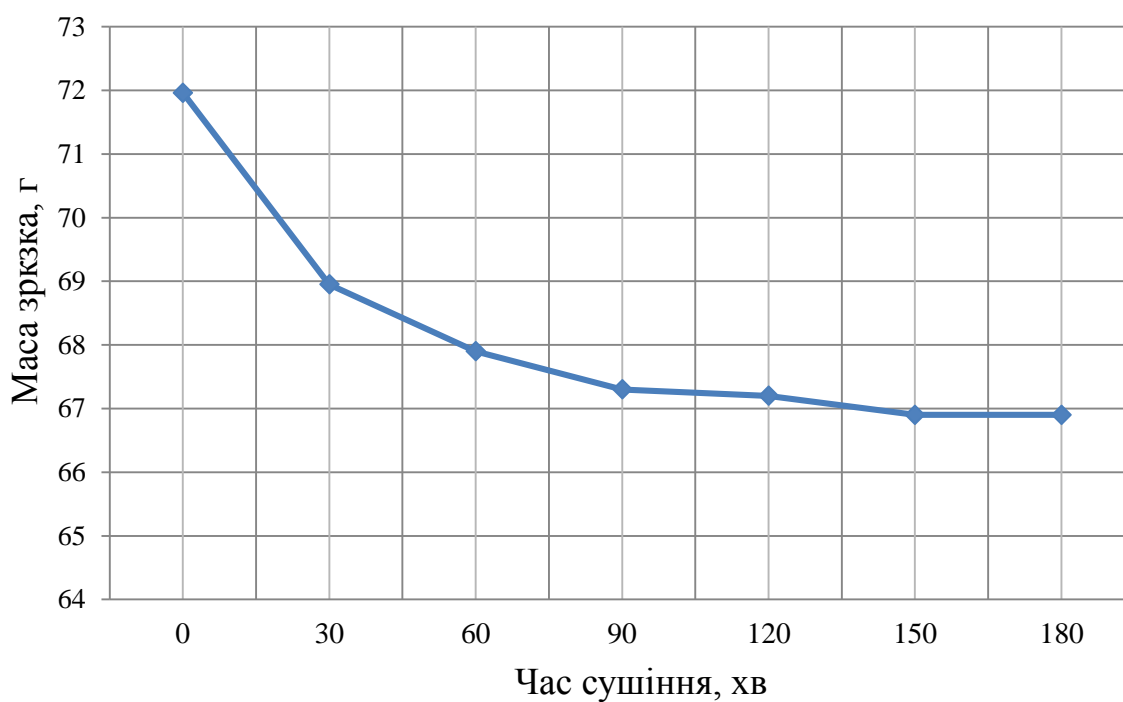


Рисунок 2.13 – Зміна маси зразка груши за часом

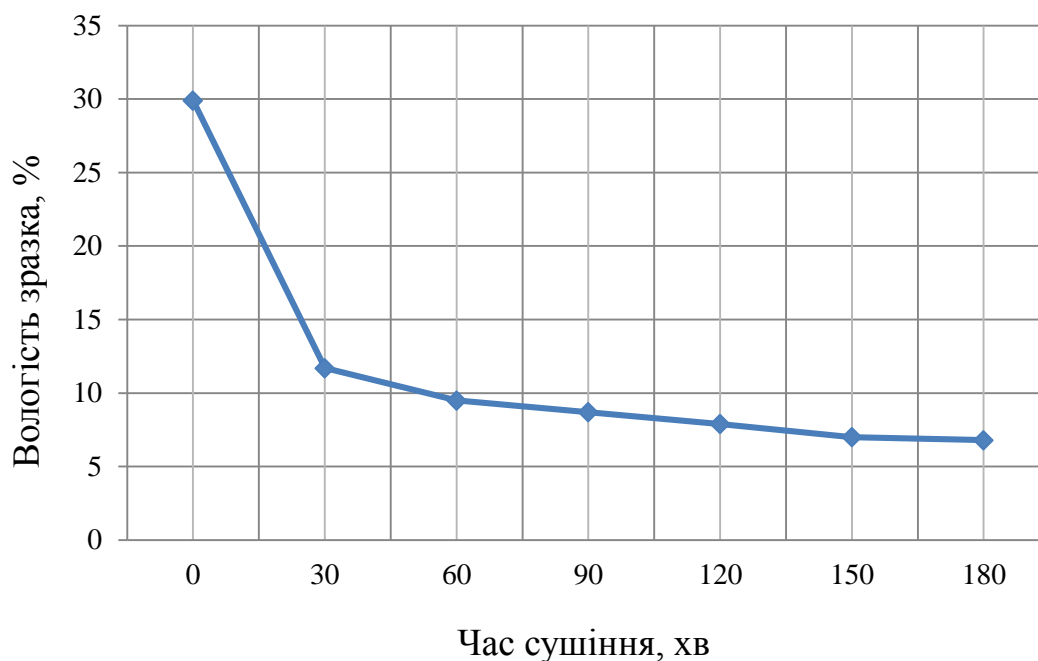


Рисунок 2.14 - Зміна вологості зразка за часом

Результати досліджень процесу сушіння яблуні представлено у таблиці 2.7. Зміна маси зразка у часі представлена на рисунку 2.15. Зміна вологості зразка за часом представлена на рисунку 2.16.

Таблиця 2.7 - Експериментальні дані сушки яблоні

Час, хв	Маса зразка, г	Вологість зразка, %
1	2	3
0	17,04	79,1
15	15,90	67,0
30	15,25	63,0
45	15,0	59,6
75	14,69	58,6
90	14,55	54,1
105	14,35	48,5
120	14,16	47,0

Продовження таблиці 2.7

1	2	3
135	14,10	43,2
150	13,77	42,8
165	13,64	38,2
180	13,46	36,8
195	13,41	30,9
210	13,27	30,1
225	13,20	29,9
240	13,18	29,8

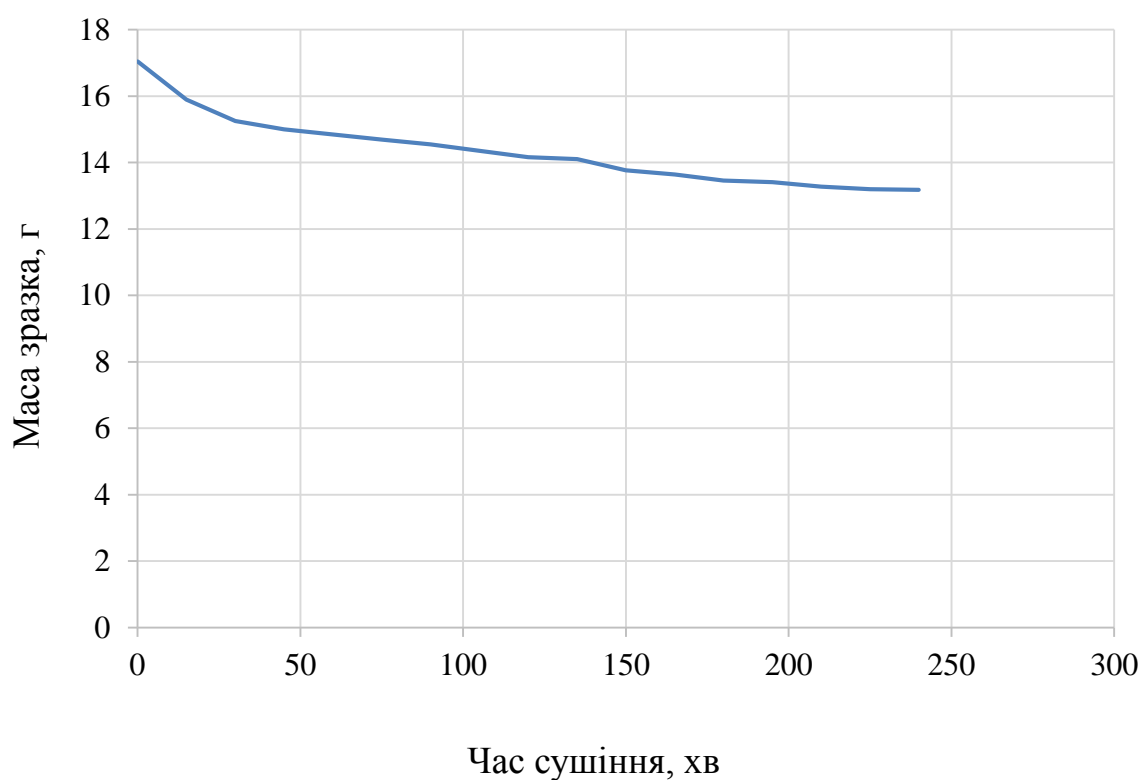


Рисунок 2.15 – Зміна маси зразка яблуна за часом

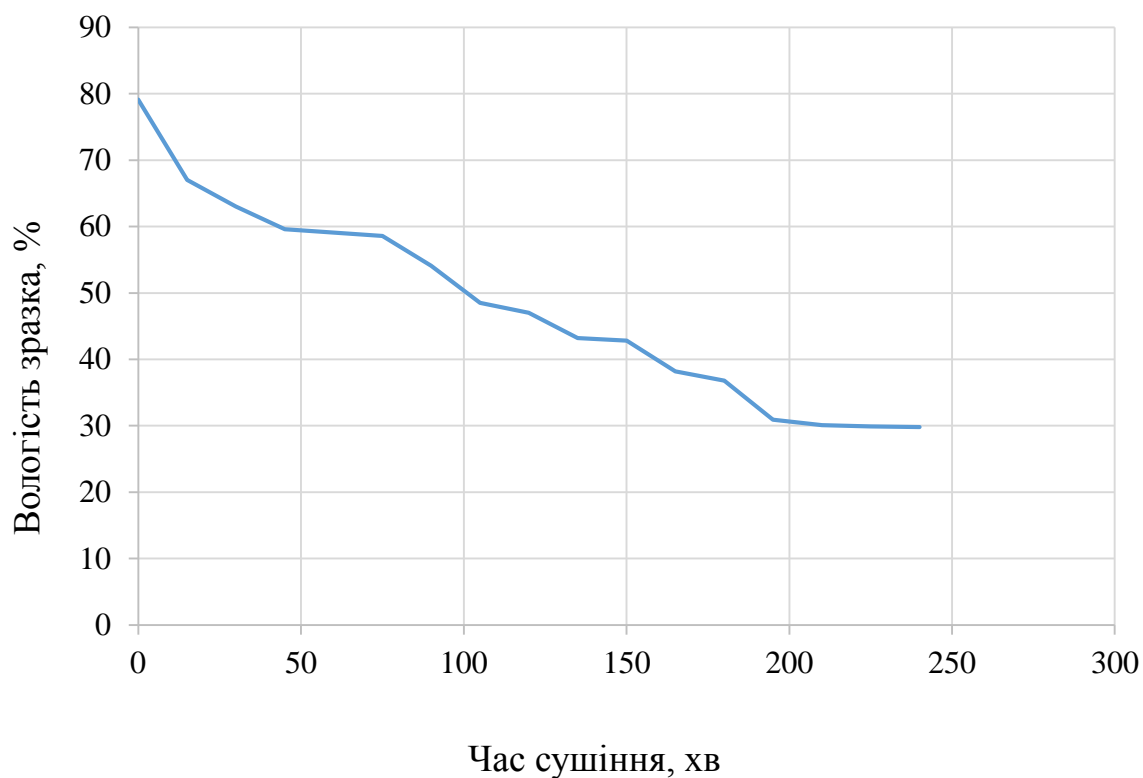


Рисунок 2.16 - Зміна вологості зразка за часом

Результати порівняльного аналізу процесу сушіння різних порід дерев представлено на рисунку 2.17.

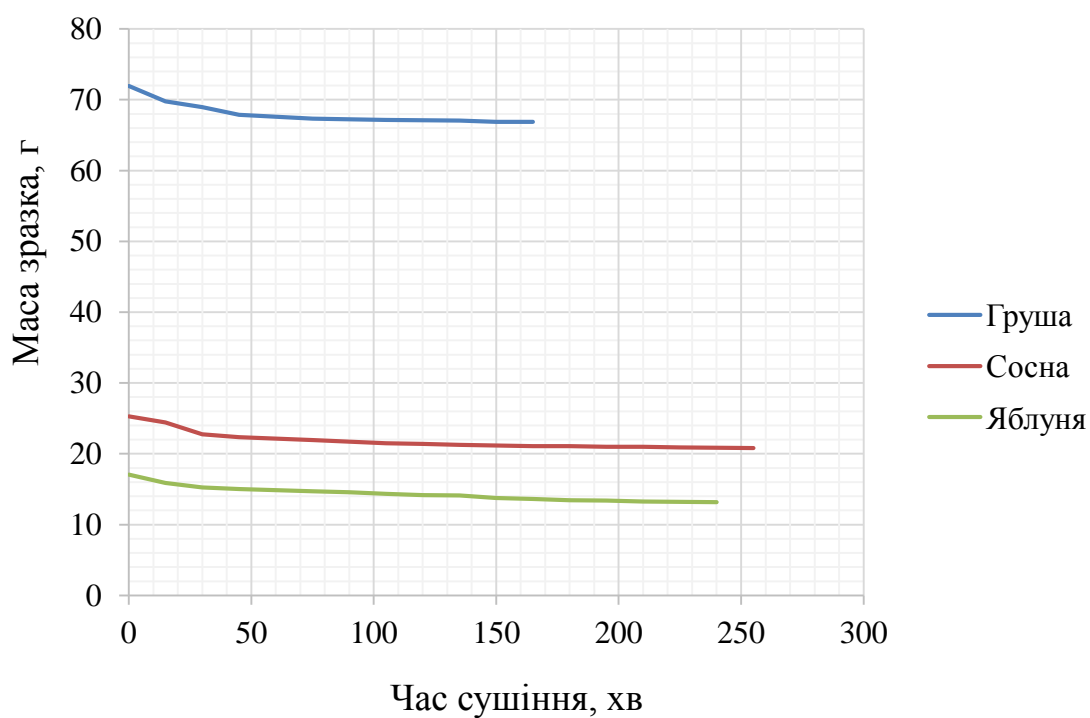


Рисунок 2.17 - Зміна вологості зразка за часом

2.4 Висновки за розділом

У даному розділі для проведення експериментів була розроблена сушильна установка конвективного типу. Лабораторний стенд дав змогу проводити досліди при різних режимах та варіювати параметри.

Для проведення серії експериментів була розроблена матриця планування, згідно з якої були виготовлені зразки з потрібним вологовмістом, а сушильна установка налаштована на задані параметри x_1 , x_2 . Виконані виміри вихідних параметрів були занесені до таблиці експериментів згідно з яких було побудовано криві сушіння. Проаналізувавши криві сушки видно, що оптимальний режим сушіння спостерігається при режимі 3. Цей режим де швидкість теплоносія 1 м/с, а температура теплоносія 65 °С дозволяє значно скоротити час сушіння без шкоди для зразка. На перших п'ятнадцяти хвилинах експериментальний зразок втрачає найбільшу кількість вологості та маси, далі при проведенні іспиту ці параметри змінюються майже однаково і стабільно без різких перепадів.

Результати експериментів по дослідженню процесу сушіння різних порід дерев показують, що найбільш швидко сохне груша, а яблуня і сосна майже однаково.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Об'єктом дослідження умов праці є лабораторія кафедри теплотехніки ЗДІА (ауд. №1). Тут встановлено обладнання, що використовує електроенергію: електродвигун насосу, електронагрівач, освітлювальні прилади. Для проведення досліджень розміщений посуд, що працює під підвищеним тиском (0,3 МПа). У приміщенні є комунікації (водопровідні труби, електричні мережі). Всі вони є джерелами небезпечних та шкідливих факторів. Процес досліджень у лабораторії супроводжується утворенням надлишкового тепла, інфрачервоної радіації. Токсичні речовини у процесі досліджень у повітря робочої зони не виділяються. Може мати місце занос таких речовин зовні, так як приміщення розташовано поблизу основної транспортної магістралі індустріального місця. Можлива присутність у повітрі, наприклад, оксиду вуглецю та інших речовин, що виділяються при роботі автотранспорту та заносяться з промислової зони.

Для живлення силового устаткування, ручного електроінструменту і освітлювальної мереж застосовується напруга 380/220 В, що є небезпечним для життя [34].

Робота насосу створює в котельній шум і вібрацію. Шум по своєму походженню є механічним, за частотними характеристиками – середньо частотний (200...300 Гц), за часовими характеристиками – змінний, переривистий. Максимальний рівень звукового тиску спостерігається безпосередньо біля насосу – близько 70 дБА, що не перевищує гранично допустимого – 80 дБА [35].

Вібрація в лабораторії є загальною, технологічною, категорії 3а. Гранично допустимий рівень для частот ≥ 16 Гц складає 92 дБ [36]. Фактичний рівень не перевищує 50 дБ.

Поверхні дослідного посуду є джерелами тепловиділень, що можуть створювати в теплий період року підвищену температуру повітря робочої зони – більш 30 °С. Нагріті поверхні також можуть бути причиною термічного опіку при дотику до них.

Так як у приміщенні відсутнє природне освітлення, це треба відзначити як шкідливий фактор, бо природне освітлення більш сприятливе при виконанні будь - яких робіт, що потребують зорової напруги.

Основні шкідливі чинники, що мають місце у лабораторії наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Оцінка факторів виробничого середовища і трудового процесу на робочому місці дослідника

Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативні значення [1, 2, 3]	Фактичні значення	III клас - шкідливі умови праці		
			I ст.	II ст.	III ст.
1. Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ : 3-4 клас небезпеки оксид сірки SO ² вуглецю оксид азоту оксиду азоту оксиду	10 20 5 2	1 5 0,05 0,02			
2. Пил переважно фіброгенної дії, мг/м ³	4	2			
3. Вібрація загальна, дБ	92	50			
4. Шум, дБА	80	70			
5. Мікроклімат в приміщенні (теплий період року): - температура повітря, °С - відносна вологість, % - швидкість руху повітря, м/с - інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	18-27 60 0,2 - 0,4 100	22-32 50 0,2 60		5	

За важкістю роботи дослідника відноситься до категорії Па – середньої важкості, за напруженістю роботу можна вважати помірно напруженою.

3.2 Заходи з поліпшення умов праці

Усі гарячі поверхні, до котрих можливий дотик у процесі роботи, покриваються теплоізоляцією, що виключає можливість отримання опікових травм персоналом і знижує тепловиділення у робочу зону. Температура зовнішньої поверхні теплоізоляції не повинна перевищувати 45 °С [34].

Одна з ефективних мір боротьби з тепло надлишками – загально змінна вентиляція. Ще ефективніше застосовувати кондиціонування повітря. Більше про ці заходи – у пункті 3.3.

Обертові частини насосу закриваються огорожувальними кожухами.

Боротьба з шумом та вібрацією, що виникають при роботі насосу, полягає в його правильній експлуатації. Насос встановлюється на гумові амортизатори, що демпфують вібрацію і знижують рівень звукового тиску. Треба постійно спостерігати за роботою насосу, усувати розхитаність, що може виникати. Для цього надійно затягують болтові та гвинтові з'єднання.

3.3 Виробнича санітарія

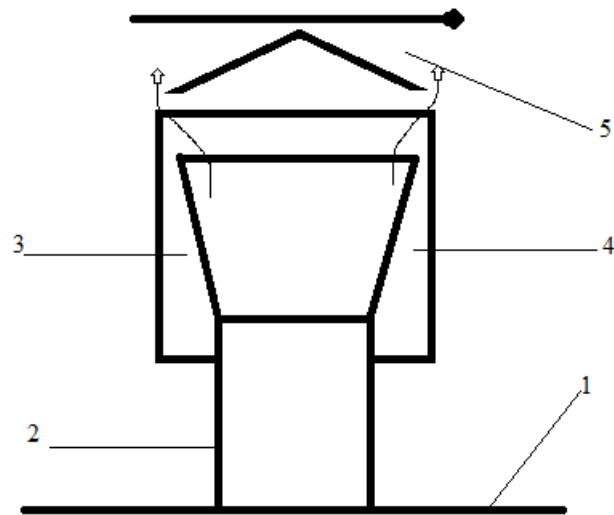
Роботи, що виконуються в лабораторії за енерговитратами можна віднести до різних категорій – 1а, 1б (легкі), 2а (середньої важкості). Для визначення норм мікроклімату у приміщення приймаємо роботи, які тут переважно виконуються, тобто роботи категорії 2а. Це робота, пов'язана з ходьбою, не вимагає перенесення вантажів або, що вимагає перенесення невеликих, до 10 кг, вантажів. Допустимі і оптимальні значення метеоумов для данної категорії, та реальні показники котельної приведені в таблиці 3.2 [34].

У приміщенні лабораторії застосовується механічна припливна загально змінна вентиляція. Кратність вентиляції 3 год^{-1} , тобто протягом години повітря в приміщенні обмінюється 3 рази.

Таблиця 3.2 – Нормативні параметри повітряного середовища [34] і їх дійсні значення

Параметри	Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Допустимі норми:			
Холодний період	17...23	≤ 75	$\leq 0,3$
Теплий період	18...27	≤ 60 (при 27 °C) ≤ 65 (при 26 °C) ≤ 70 (при 25 °C) ≤ 75 (при 24 °C)	0,2...0,4
Оптимальні норми:			
Холодний період	18...20	40...60	$\leq 0,2$
Теплий період	21...23	40...60	$\leq 0,3$
Дійсні значення:			
Холодний період	16...22	50...60	0,1
Теплий період	22...32	45-55	0,2

Витяжна вентиляція – природна, здійснювана за допомогою витяжних шахт та дефлекторів. Два отвори шахт розташовані на стінах приміщення і закриті ґратами. Вертикальні шахти прокладені у стінах і мають вихід на даху будівлі, де до них приєднані дефлектори. Конструкція дефлектора забезпечує розрідження на його виході за наявності вітру, тим більше розрідження, і тим ефективніше працює витягання (рис. 3.1)



1- крівля; 2 – витяжна труба; 3- циліндрична обичайка; 4- дифузор; 5 – кришка

Рисунок 3.1 – Дефлектор

У холодний період року для підтримання нормативної температури повітря робочої зони застосовується центральне водяне опалення. У випадку, коли воно не забезпечує мінімально необхідну температуру ($17\text{ }^{\circ}\text{C}$), використовується електричні калорифери для обігріву персоналу.

Так як системи загальної вентиляції і центрального опалення не в змозі підтримувати температуру повітря у допустимих діапазонах (влітку температуру перевищує верхню межу, взимку іноді опускається нижче нижньої межі), у дипломному проекті пропонується встановлення системи кондиціонування повітря. Наприклад, можна застосувати Panasonic CS-W7NKD (CU-W7NKD).

Згідно [41] приміщення лабораторії відноситься до IV розряду зорових робіт – роботи середньої точності з розміром об'єкту спостереження (05,...1) мм. Підрозряд зорових робіт – «в» (середній контраст і середній фон).

Так як у лабораторії відсутнє природне освітлення, в будь – який час доби застосовується штучне освітлення. Для більшості робіт, що мають місце у приміщення, використовується загальна система освітлення із

застосуванням люмінесцентних ламп ДБ65 – 4. Потужність, споживана лампою – 65 Вт, світловий потік 4550 Лм, світловіддача – 70 Лм/Вт [40]. Застосування люмінесцентних ламп пояснюється їх значно більшою економічністю, ніж у ламп розжарювання, спектральним складом світла, близьким до сонячного і доброю передачею кольорів. Лампи використовуються у світильниках ПВЛ 1 – 2x40 (захищений від пилу та вологи). Норма загальної освітленості для цього випадку – 200 Лк.

Для виконання деяких робіт застосовується комбінована система освітлення. При цьому додатково вмикаються світильники місцевого освітлення «Альфа» з лампами розжарювання Б – 100 або БК – 100 (споживана потужність 100 Вт, світловий потік відповідно 1350 і 1450 Лм, світловіддача – 13,5 і 14,5 Лм / Вт). Норма комбінованої освітленості – 300 Лк. Аварійне освітлення в аудиторії не передбачається.

3.4 Електробезпека

Основні споживачі електроенергії в аудиторії – насос і електронагрівач доцільної установки, освітлювальна установка у холодний період року – електрокалорифери.

Згідно ПБЕ [43] приміщення лабораторії відноситься до сухих (відносна вологість повітря не перевищує 60%), жарких (температура повітря може тривалий час перевищувати 30 °С), не пильних, без струмопровідної підлоги і без хімічно активного середовища.

Приміщення лабораторії відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою поразки струмом, оскільки тут в теплий період року можлива температура повітря, що тривало перевищує 30 °С .

Для живлення виробничого устаткування використовується трифазна чотири провідна мережа змінного струму з глохозаземленою нейтраллю напругою 380 / 220 В.

Як захисні заходи від поразки електричним струмом в лабораторії застосовується:

- електрична ізоляція струмоведучих частин – гумова, поліхлорвінілова, бавовняна, нормативний опір ізоляції на ділянці (між двома послідовно встановленими апаратами захисту або після останнього апарату) 500 кОм;
- знижена напруга для ручного електроінструменту 3 класу і переносних світильників – 12В, з використанням знижувальних трансформаторів із зануленою вторинною обмоткою;
- подвійна електроізоляція ручного електроінструменту 2 класу – струмоведучих частин усередині корпусу і самого корпусу;
- захисне занулення електроустановок;
- захисне відключення – як додаткова міра захисту до занулення;
- електрозахисті засоби.

Електротехнічне обладнання має закриті виконання струмоведучих частин. Все електротехнічне обладнання заземлюється підключенням до загальної системи заземлення.

Як основних засіб захисту від дотику до не струмоведучих частин електроустановок, що випадково опинилися під напругою, у мережі з глухо заземленою нейтраллю застосовується захисне занулення [43]. Принцип його дії – перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання (тобто замикання між фазним і нульовим захисним провідником) з метою викликати великий струм, здатний забезпечити спрацьовування захисту і тим самим автоматично відключити пошкоджену установку від мережі.

Ізольюючі електрозахисні засоби, що застосовуються при обслуговування електроустановок, діляться на основні та додаткові. Основні мають достатній опір, щоб витримати робочу напругу устаткування. Ними можна торкатися відкритих струмоведучих частин. Додаткові засоби не мають такого електричного опору. Їх призначення – підсилювати захисну дію основних засобів, разом з якими вони повинні застосовуватися. У лабораторії

можуть застосовуватися електрозахисні засоби для напруги до 1000 В (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Ізолюючі електрозахисні засоби

Основні засоби	Додаткові засоби
Діелектричні рукавички, ізолюючі штанги, ізолюючі струмовимірюючі кліщі, показники напруги, слюсарно - монтажний інструмент з ізольованими рукоятками.	Діелектричні калоші, діелектричні килимки, ізолюючі підставки.

3.5 Пожежна безпека

Категорія приміщення лабораторії за пожежною та вибухопожежною небезпеками – В. До цієї категорії відносяться приміщення, де обертаються тверді горючі і важкогорючі матеріали, горючі і важкогорючі рідини.

У лабораторії обертаються такі речовини, небезпечні у пожежному відношенні:

- мінеральні масла; температура спалаху (150...180) °С, температура самозаймання (250...400) °С; застосовуються у системах гідроприводу, змащення;
- електрична ізоляція – гумова, поліхлорвінілова, бавовняна;
- деревина з якої вироблені окремі предмети меблі, температура займання (270...300) °С, самозаймання – (330...470) °С;
- папір, температура займання 230 °С, самозаймання – 360 °С;
- пластмаси – конструктивний матеріал корпусів деякого обладнання, захисних щитків; це горючий матеріал, температура займання 400 °С, самозаймання (500...580) °С [45].

У приміщенні лабораторії можливі пожежі класів А (тверді горючі речовини). В (горючі рідини) і Е (електроустановки під напругою).

Приміщення лабораторії знаходиться у підвалі. Згідно [46] з такого приміщення передбачається один евакуаційний вихід, якщо його площа не перевищує 300 м^2 і кількість людей, що в ньому одночасно перебувають, не перевищує 5. Так як у приміщенні лабораторії один вихід, а число людей, що там знаходиться, часто більше 5, ми маємо порушення протипожежних норм. У цьому приміщенні має бути 2 евакуаційних виходи.

Ширина шляхів евакуації має бути не менше 1,0 м, дверей – не менше 0,8 м, висота проходів і дверей не менше двох метрів. Ці норми витримуються. Двері з приміщення відкриваються назовні, по ході евакуації.

Для гасіння пожежі лабораторія обладнана ручним вуглекислотним вогнегасником типу ОУ – 5. На поверсі, у коридорі розташований потужний кран.

Близкавкозахист будинку, де розташована лабораторія відноситься до III категорії, зона захисту Б. Для захисту від удару блискавки металеві конструкції даху заземлені.

3.7 Інженерний розрахунок піногенераторів автоматичної системи пожежогасіння

Піногенератор - це апарат безперервної дії для утворення хімічної піни, що являє собою струменевий насос - ежектор з бункером для піноутворюючого порошку. Піна розтікається по поверхні мастил, твердих горючих матеріалів і утворює шар, що перешкоджає передачі тепла від факела полум'я до поверхні горіння, а також створює перешкоду виходу парів масла.

Визначимо кількість піногенераторів, порошку й води, необхідних для гасіння приміщення де розташовані горючі матеріали

Вихідні дані, розмір приміщення : $L=26 \text{ м}$, $V=10 \text{ м}$.

1 Визначимо площу ,яка охоплена пожежею, м^2

$$F = L \cdot B, \quad (3.1)$$

$$F = 26 \cdot 10 = 260.$$

2 Секундна витрата хімічної піни, дм³/с

$$q = F \cdot i, \quad (3.2)$$

де $i=0,5$ дм³/(с·м²) – інтенсивність подачі піни.

$$q = 260 \cdot 0,5 = 130.$$

3 Необхідна кількість піногенераторів, шт.

$$n = \frac{q}{q_0}, \quad (3.3)$$

де q_0 – продуктивність піногенератору, дм³/с.

Приймаємо піногенератор типу ПГ-50 з $q_0=(4,5 \dots 5,0)$ дм³/с.

$$n = \frac{130}{5} = 26.$$

Приймаємо 26 штук.

4 Потреба в піногенераторному порошку, кг

$$Q = q_1 \cdot t \cdot n, \quad (3.4)$$

де $q_1=1,2$ кг/с- витрата порошку піногенератора ПГ-50;

$t=20$ с - час гасіння;

$n=26$ - кількість піногенераторів.

$$Q = 1,2 \cdot 20 \cdot 26 = 624.$$

5 Потреба води при гасінні пожежі для утворення піни, дм³/с, (м³/год.)

$$W = n \cdot q_2, \quad (3.5)$$

де $q_2=10 \text{ дм}^3/\text{с}$ – витрата води на утворення піни, що подається в резервуар піногенератору ПГ-50.

$$W=26 \cdot 10=260 \text{ (72,1 м}^3/\text{год)}.$$

3.8. Техногенна безпека

На всі види аварійних ситуацій необхідно складати плани ліквідації аварій (ПЛА).

При створенні ПЛА також враховується порушення нормальних виробничих умов і режимів роботи, відключення електроенергії, припинення роботи вентиляції, вимикання освітлення, припинення подачі сировини, палива, газу, води, пара, порушення технологічного процесу або режиму роботи агрегатів, апаратів, пилоочисного і газових установок, комунікацій, загоряння від газових розривів і вторинних напрямків блискавок, які можуть привести до аварії.

До аварійних ситуацій в цеху можливо віднести: розриви і пожежі на газопроводах горючого газу. Допускається об'єднання в одну позицію можливих випадків вибуху і пожежі. При цьому для зазначених аварій необхідно передбачити окремі заходи.

В оперативній частині ПЛА передбачається:

- заходи з порятунку людей і ліквідації аварій, конкретно по кожному передбаченому нагоді аварій;
- особи, відповідальні за виконання передбачених заходів та контроль за виконавцями;
- дії газорятувального підрозділи і пожежної частини в початковий момент з порятунку людей і ліквідації аварій;
- місця знаходження коштів для ліквідації аварій.

Розглянемо заходи, спрямовані на ліквідацію розриву газопроводу (див. табл. 3.4).

Таблиця 3.4 - Заходи з ліквідації аварії при пошкодженні газопроводу і виникнення пожежі

Заходи з порятунку людей і ліквідації аварії	Особи відповідальні за виконання	Дії газорятувального підрозділи і пожежників	Місця знаходження засобів порятунку людей
1. По гучному зв'язку попе-редити всіх про аварію, а при його пошкод-женні окриком	Газовщик або хто перший помітив аварію	Обстежити місце аварії і надати допомогу постраждалим	Газозахисна апаратура знаходиться в газовій будці
2.Видалити усіх людей із загазованої зони	Начальник зміни, майстер печі і старший газівник	Майстер доменної печі зобов'язаний вивести людей з робочих місць в безпечне місце	Відкрита територія біля цеху
3.Виставить попереджувальні знаки або людей для обмеження загазованої зони	Майстер, бригадир	Не допускати людей в небезпечну зону	Провести медичне обстеження
4.Визвати рятувальників, працівників медпункту і пожежну частину	Майстер	При необхідності надавати допомогу	Використати психолога для зняття напруги
5. Припинити роботу виробництва	Майстер, диспетчер цеху	Забезпечувати контроль	-
6.Зняти сушильні агрегати з режиму "нагрів"	Старший газовик, газівник	Не допускати порушень	-
7.Повідомити про аварію начальника цеху або його заступників	Бути на зв'язку	Виконувати їхні накази	-

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Досліджено існуючі способи сушіння деревини : конвективна сушка, радіаційно – конвективна, кондуктивна сушка, сублімаційне сушіння, атмосферна сушка. Встановлено, що найбільш ефективним є конвективний режим сушіння, перевагами якого є: можливість урізноманітнити режими сушки, що дозволяє підбирати оптимальний режим сушіння для різних порід дерев и отримати якісний кінцевий продукт потрібної вологості; час процесу менший ніж у інших видах сушіння, можливість повністю автоматизованою та не вимагати постійної присутності людини;

2. Розроблена схема та фізична модель лабораторної установки для сушіння.

3. Створено експериментальний стенд для дослідження процесу конвективного сушіння деревини

4. Експериментальним шляхом встановлено оптимальний режим сушки якому відповідає швидкість теплоносія 1м/с, температура 60 °С.

5. Результати експериментів по дослідженню процесу сушіння різних порід дерев показують, що найбільш швидко сохне груша, а яблуня і сосна майже однаково.

6. Розроблено заходи з охорони праці та техніки безпеки при проведенні експериментів в лабораторії, виконано розрахунок потрібної кількості піно генераторів для автоматичної системи пожежогасіння.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Левина, Н. С. Исследование кинетики нагрева и сушки пористых материалов / Н.С. Левина. – Ползуновский Вестник, № 1-2 2008
2. Сырица, А. И. Методические указания к выполнению лабораторной работы «Исследование основных закономерностей кинетики и механизма массотеплопереноса в процессах сушки капиллярно-пористых строительных материалов» / Г.В. Сырица, А.И. Пикула. – БГТУ, 2002. – 16 с.
3. Теория процесса сушки [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.chem21.info/info/1846522/Назва_з_екрану.
4. Лыков, А.В. Теория сушки / А. В. Лыков – М. : Изд – во ЭНЕРГИЯ, 1968. – 472 с.
5. Натариев, О. С. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Моделирование и расчет процесса сушки влажных материалов в камерной сушилке» / О. С. Натариев – Иваново: гос. хим. технолог.ун-т, 2016. – 147с.
6. Иоффе, А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы/ А. Ф. Иоффе –М.:Изд – во Атом,1961.– 160 с.
7. Струков, Б.А. Сегнетоэлектричество / Б. А. Струков - М.: Наука, 1979. – 92 с.
8. Смоленский, Г.А. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / Г. А. Смоленский – М: Наука, 1968.– 82 с.
9. А.с. 494574 СССР, МКИЗ G 05 D 23/30. Установка для получения сверхнизких температур/ В.И. Соболев (СССР).–Бюл.№45. 1975.
10. Цветков, Ю. Н. Судовые термоэлектрические охлаждающие устройства / Ю. Н. Цветков, С. С. Аксенов, В. М. Шульман – Л.: Судостроение, 1972.– 192 с.
11. Симиков, И. А. Гидротермическая обработка древесины: учеб.пособие / А. А. Симилова, Л. И. Сергеева, Л.И. Гидротермическая

обработка древесины: учеб. пособие / И.А.Симиков, А.А. Симикина, Л.И. Сергеева – Братск: БрГУ, 2009. –80 с.

12. Конвективная сушка [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://abc.vvsu.ru/> / Назва з екрану.

13. Конвективна сушка деревини [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://derevo.ua/articles/category/sushka%20drevesiny/> / Назва з екрану.

14. Пейч, Н. Н. Сушка древесины.[Учебник для проф.- технических училищ и подготовки рабочих на производстве. Издание 2-е переработанное и дополненное] / Н. Н. Пейч, Б. С. Царевич – М.: «Высшая школа», 1971. – 220 с.

15. Сушка пищевых продуктов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.prosushka.ru/> / Назва з екрану.

16. Бахтін, В. І. Технічна термодинаміка.Конспект лекцій по курсу: «Технічна термодинаміка» / В. І. Бахтін – Запоріжжя, 2005. – 128 с.

17. Покровский, А. А. Сушка водяным паром с механическим воздействием на металл. Интернет – журнал «Технические науки» №54, 2016. Режим доступа: <http://novainfo.ru/archive/> / Назва з екрану.

18. Кречетов, И. В. Сушка и защита древесины. Учебник для техникумов / И. В. Кречетов – М.: Лесная промышленность 1987-328с.

19. Кречетов И. В. Сушка древесины. [3-е издание переработанное] / И. В. Кречетов – М.: Лесная промышленность, 1980 – 432с

20. Платонов, А.Д. Особенности процесса конвективной сушки термохимически обработанной древесины/ А. Д. Платонов, Т. К. Курьянова – ВГЛТА, г. Воронеж, РФ.

21. О сушке, градиент влажности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cathild.ru/osushke12.html/> / Назва з екрану.

22. Платонов, А. Д. Теоретические основы сушки древесины после предварительной термохимической обработкой. Интернет – журнал «Научный журнал КубГАУ» №77, 2012. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/> / Назва з екрану.

23. Основные методы определения влажности воздуха [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://holod-proekt.com/2011/10/osnovnye-metody-opredeleniya-vlazhnosti-vozduha/> Назва з екрану.

24. Кочетова, Ж. Ю. Определение влажности воздуха в широком диапазоне температур и концентраций. Сборник трудов №1 «Аналитика и контроль» / Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, Т.А. Кучменко, А.А. Мишина, К.П. Щербак – Воронеж, 2012.

25. Теплоизоляция: «Кто, как и зачем» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2004/46/sn44602.html> / Назва з екрану.

26. Лыков, А. В. Тепло и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М.: ГЭИ, 1956. – 464с.

27. Влажность воздуха. Точка росы. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://worldofschool.ru/fizika/molekulyarnaya/sostoyaniya/gazy/vozduh/vlazhnost-vozduha.-tochka-rosey/> Назва з екрану.

28. Устройство психрометр [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://analit-pribor.com.ua/developments/psihrometr-ystroystvo-princip-rabotutipu/> Назва з екрану.

29. Северова, Н. А. Определение влажности воздуха и влажности древесины. Определение предела насыщения для образца из сосны : метод. указания / Н. А. Северова – Ухта : УГТУ, 2014. – 12 с.

30. Расев, А. И. Сушка древесины / А. И. Расев. – М.: Высшая школа, 1990. – 224 с.

31. Самопишущие весы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id401158p1.html> / Назва з екрану.

32. Старинные весы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://museum.vzvt.ru/starinnye-vesy/koromyslovye-vesy/> Назва з екрану.

33. Румянцев Б.М., Журба В.П., Тепловые установки в производстве строительных материалов и изделий: Учебное пособие для строительных

вузов по спец. «Пр – во строительных изделий и конструкций». – М.: Высш. шк., 1991. – 160 с.: ил.

34. Г.Б.Кожемякін,В.Г.Рижков,К.В.Белоконь. Охорона праці і техногенна безпека. Методичні вказівки до виконання розділу магістерських робіт для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форми навчання.-Запоріжжя:ЗДІА,2012.- 48с.

35. Охорона праці та промислова безпека: Навч.посіб./ К.Н.Ткачук та ін. К.: Основа ,2009-350с.

36. Раздорожный А.А. Охрана труда и производственная безопасность.-М.: Экзамен,2006.-510с.

37. Белов С.В., Козьяков А.Ф.,Партолин О.Ф. и др./ Под ред..Белова С.В. Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование. Справочник .-М.: Машиностроение ,1989.- 368 с.

38. ДБН В.2.5-67:2016. Опалення, вентиляція та кондиціонування.

39. ДБН В.2.5-28-2006 Природне та штучне освітлення.

40. НПАОП 0.00-4.33-99 Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій.

41. ДБН В.2.5-28-2006 Природне та штучне освітлення.

42. Новак С. М., Логвинец А.С. Защита от вибрации и шума в строительстве. – К.: Будівельник, 1990. – 184с.

43. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок

44. Смирнов Н.В., Коган Л.М. Пожарная безопасность предприятий чёрной металлургии.- М.: Металлургия, 1989. – 432с.

45. Щербина Я. Я., Щербина И. Я. Основы противопожарной защиты. – К.: Вища школа, 1985 – 255с.

46. СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы.

47. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – М.: Энергоиздат, 1982. – 800с.