

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки

Назва теми

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група МБм-23-1


Підпис

Чучвала А.В.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

проф. Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

С.І. Тукучи
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 12 2024 р.

Хмельницький 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Шифр і назва
Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

17 . 12 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Чучвала Артем Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки

керівник роботи д.т.н., проф. Скиба М.Є.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 16 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики установок аналогів та текстильних матеріалів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки. 3. Експериментальне дослідження процесу сушіння з використанням конвективної сушарки. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Сушарки для сушіння матеріалів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Сушильний апарат. Схема комбінована принципова (A1). Аркуш 3. Сушарка. Схема електрична (A2)+Вимірювальний пристрій. Схема електрична (A2). Аркуш 4. Експериментальна установка. Вид загальний (A1). Аркуш 5. Блок-діаграма віртуального приладу. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 6. Експериментальна установка. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 7. Графіки. Документ дослідницький (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 29.10.22р.	
2. Розробка установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки	до 11.11.22р.	
3. Експериментальне дослідження процесу сушіння з використанням конвективної сушарки	до 21.11.22р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.22р.	

Студент

Підпис

А.В. Чучвала
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

М.Є. Скиба
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Чучвала Артем Володимирович

2. Тема магістерської роботи Розробка установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 7 арк., сторінок записки 80

5. Актуальність сушіння матеріалів полягає у необхідності забезпечення якісної підготовки текстильних матеріалів до подальшої обробки, зберігання або використання. Вдосконалення технологій сушіння, зокрема розробка конвективної сушарки, дозволяє оптимізувати процес, забезпечити рівномірність сушіння, зменшити енерговитрати та зберегти властивості текстильних матеріалів. Така розробка має значення для підвищення ефективності текстильного виробництва та проведення наукових досліджень у цій галузі. Тому тема магістерської роботи є актуальною.

В роботі розроблена установка для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки. В третьому розділі виконано експериментальне дослідження процесу сушіння з використанням конвективної сушарки.

Підпис студента _____

" 17 " 12 20 24 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від " 23 " 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК добре / с

Рекомендації ЕК _____




Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 23 " 12 20 24 р.

ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1	Теоретичні відомості про процес сушіння матеріалів	8
1.2	Огляд і аналіз способів сушіння в легкій промисловості	11
1.3	Різновиди конвективних сушарок для легкої промисловості	14
1.4	Графоаналітичний метод розрахунку витрат теплоти та повітря під час сушіння	19
1.5	Кінетика процесу сушіння	22
1.6	Висновки до першого розділу	28
2	Розробка установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки	29
2.1	Конструктивні особливості та принцип дії розробленої конвективної сушарки	29
2.2	Вибір датчиків для вимірювання параметрів процесу сушіння текстильних матеріалів	31
2.3	Вибір гальванічної розв'язки для експериментальної установки	39
2.4	Вибір аналогово-цифрового перетворювача для експериментальної установки	41
2.5	Вибір оптимального програмного забезпечення для збору та аналізу експериментальних даних	44
2.6	Вибір апаратного забезпечення для обробки експериментальних даних	

МРМА 24.00.00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	Надокум.	Підпис	Дата		Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Чучвала			Розробка установки для дослідження текстильних матеріалів з використанням конвективної сушарки Пояснювальна записка	М	4	80
Перевір.		Скиба				ХНУ гр. МБм-23-1		
Н. контр.								
Затвер.		Неймак						

2.7	Побудова блок-діаграми віртуального приладу в програмному середовищі LabView	47
2.8	Опис експериментальної установки для дослідження текстильних матеріалів	49
2.9	Висновки до другого розділу	50
3	Експериментальне дослідження процесу сушіння з використанням конвективної сушарки	52
3.1	Розробка плану експериментальних досліджень процесу сушіння	52
3.2	Методологія виконання експериментальних досліджень процесу сушіння	52
3.3	Калібрування датчиків для забезпечення точності вимірювань	54
3.4	Виконання експериментальних досліджень	57
3.5	Оцінка та узагальнення експериментальних результатів	65
3.6	Теоретичний аналіз та розрахунок параметрів процесу	69
3.7	Оцінка точності та аналіз похибок експериментальних даних	71
3.8	Практичне впровадження та перевірка отриманих результатів	73
3.9	Висновки до третього розділу	74
	Висновки	75
	Перелік джерел посилання	77
	Додаток А	
	Додаток Б	

ВСТУП

Сушіння є невід'ємною частиною багатьох промислових технологічних процесів, і правильна організація цього етапу суттєво впливає на експлуатаційні витрати та якість кінцевої продукції. При цьому важливо забезпечити мінімальне споживання енергоресурсів.

Головною метою сушіння є видалення рідини (вологи) з різних матеріалів – твердих, рідких або газоподібних (продуктів, препаратів) [1, 2]. Найчастіше рідина, яку необхідно видалити, представлена вологою або летючими органічними розчинниками. Швидкість масообмінного процесу залежить як від характеристик матеріалу, що піддається сушінню, так і від параметрів навколишнього середовища.

У легкій промисловості об'єктами сушіння є матеріали з капілярною структурою, такі як текстильні полотна, хутро, шкіра, картон тощо. Для цих матеріалів характерний фізико-механічний (макро- і мікрокапілярний) та фізико-хімічний адсорбційний зв'язок з вологою.

Макрокапілярна волога розташовується на поверхні матеріалу в великих порах і капілярах, які заповнюються під час змочування. Її видалення здійснюється механічним шляхом, наприклад, віджиманням, або за допомогою теплового нагрівання, у результаті якого макрокапілярна волога випаровується, перетворюючись на пар [3].

Мікрокапілярна волога, на відміну від макрокапілярної, знаходиться у дрібних капілярах, які заповнюються не лише під час змочування, але й завдяки поглинанню (абсорбції) вологи з повітря. Вона має значно сильніший зв'язок із матеріалом, що ускладнює її видалення.

Волога, що адсорбційно зв'язана, утримується на поверхні та в порах матеріалу, а волога набухання розташовується всередині його клітин. Цей тип вологи має значно міцніший зв'язок із матеріалом порівняно з макрокапілярною вологою.

					MPMA20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Операція сушіння матеріалів може проводитися за атмосферного тиску або у вакуумі, залежно від необхідного рівня залишкової вологості. У процесі сушіння матеріал може залишатися нерухомим або перебувати в русі, а сам процес може бути як періодичним, так і безперервним [2].

Підведення тепла до матеріалу здійснюється різними способами: контактним, конвективним, радіаційним тощо [3]. Серед цих методів найпоширенішим є конвективний, при якому теплота передається конвекцією. У цьому випадку волога випаровується з матеріалу, дифундує в повітряний потік і виводиться із сушильного апарату в навколишній простір.

Дослідження взаємозв'язку між кількістю теплоти, що подається до матеріалу, швидкістю повітряного потоку, пропускнуою здатністю матеріалу з різним рівнем вологості та продуктивністю сушильного процесу є актуальним завданням. Вирішення цього завдання можливе на основі експериментів, які мають бути проведені.

Актуальність сушіння матеріалів полягає у необхідності забезпечення якісної підготовки текстильних матеріалів до подальшої обробки, зберігання або використання. Вдосконалення технологій сушіння, зокрема розробка конвективної сушарки, дозволяє оптимізувати процес, забезпечити рівномірність сушіння, зменшити енерговитрати та зберегти властивості текстильних матеріалів. Така розробка має значення для підвищення ефективності текстильного виробництва та проведення наукових досліджень у цій галузі. Тому тема магістерської роботи є актуальною.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Теоретичні відомості про процес сушіння матеріалів

При виборі оптимальних умов і способу сушіння важливими факторами є характеристики матеріалу, що підлягає сушінню (наприклад, кусковий, сипучий, листовий), його фізичні властивості, розміри готової продукції, тривалість сушіння, умови обслуговування обладнання тощо. Для сушіння сипучих матеріалів найбільш ефективним є використання обладнання з псевдозрідженим шаром, яке забезпечує рівномірний розподіл тепла та високу продуктивність.

Сушіння листових матеріалів в повітряно-циркуляційних сушарках може бути оптимізоване шляхом використання рециркуляції повітря, обдування матеріалу або комбінованих способів підведення тепла, що підвищує ефективність процесу.

За конструктивними особливостями конвективні сушарки поділяють на: кільцеві, теплові, роликові з псевдозрідженим шаром, стрічкові, розпилювальні та інші.

У конвективних сушарках тепло передається до матеріалу через конвекцію, а сушильним агентом можуть виступати повітря, топкові гази або перегрітий пар розчинника [4]. Найбільш поширеним і економічним агентом є нагріте повітря.

Топкові гази, як правило, застосовують для високотемпературного сушіння, коли матеріал не вступає в хімічну реакцію з оксидом карбону (IV) чи сірчаним ангідридом, що містяться в газах. Сушіння за допомогою топкових газів є більш продуктивним та економічним порівняно з повітряним сушінням, особливо для матеріалів, стійких до впливу високих температур.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Одним із недоліків сушіння топковими газами є ризик забруднення матеріалу сажею, що може вплинути на якість кінцевого продукту [5]. Особливо це актуально за наявності в газах сіркових сполук. Крім того, в газопроводах можуть утворюватися відкладення вуглецю, що ускладнює обслуговування системи. У легкій промисловості цей метод сушіння не отримав широкого застосування [6].

Сушіння з використанням перегрітих парів розчинника застосовується у випадках, коли рідина, яка видаляється, здатна утворювати вибухонебезпечні суміші, наприклад, пари розчинника у поєднанні з повітрям.

Метод сушіння перегрітим паром має низку переваг. У разі використання повітря або топкових газів нагрітий теплоносій виводиться з сушарки в атмосферу або частково повертається в сушильний простір. Натомість у сушарках з перегрітим паром носій залишається в системі, циркулюючи без значних втрат. Теплота розчинника, що видаляється, використовується для часткової компенсації енергетичних втрат. Об'ємна теплоємність водяного пару приблизно на 20% вища, ніж у повітря, що підвищує ефективність процесу.

Крім того, наявність кисню в повітрі може призводити до окислення та навіть займання матеріалів. Перегрітий пар розчинника виключає ці ризики, забезпечуючи більшу безпеку процесу. Також він дозволяє досягти вищої температури сушіння, знижуючи питому втрату тепла на 25–30% порівняно з сушінням повітрям, і скорочує тривалість процесу вдвічі. Наприклад, сушіння целюлози при температурі 200 °C за допомогою повітря триває 3,3 години, тоді як перегрітий водяний пар забезпечує той самий результат за 2,5 години.

Однак слід зазначити, що сушильні установки з використанням перегрітого пару є складнішими за конструкцією та дорожчими у виробництві й експлуатації.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Прикладом сушіння з використанням перегрітих парів розчинника є процес сушіння склотканини, яка застосовується в електротехнічній промисловості [3]. Склотканина попередньо насичується різними смолами, розчиненими в етиловому спирті. Схожі сушарки можуть бути використані й на підприємствах легкої промисловості для висушування вологих тканин.

На ефективність конвективного сушіння суттєво впливають такі фактори, як швидкість руху повітря, температура сушильного агента та його вологість. Підвищення швидкості газового потоку сприяє прискоренню процесу сушіння, оскільки збільшується як кількість тепла, що передається конвекцією, так і рушійна сила масообміну. Останнє визначається різницею парціального тиску парів вологи на поверхні матеріалу та у навколишньому середовищі.

Наприклад, інтенсивність сушіння взуттєвого картону значно зростає при збільшенні швидкості нагрітого повітря. Так, при швидкості 8,5 м/с процес проходить майже вдвічі інтенсивніше, ніж при швидкості 2,1 м/с, а загальна тривалість сушіння скорочується приблизно втричі [3].

Однак підвищення швидкості теплового носія вимагає значних витрат електроенергії, що може впливати на загальну економічність процесу. Крім того, збільшення швидкості газового потоку є ефективним переважно в першій стадії сушіння, коли видаляється основна кількість вологи. У другій стадії, коли матеріал втрачає вологу повільніше, підвищення швидкості теплового носія вже не сприяє суттєвому збільшенню інтенсивності процесу.

Збільшення температури повітря в сушильній камері значно впливає на ефективність процесу сушіння, оскільки посилює різницю температур, що сприяє швидшому випаровуванню вологи. Наприклад, під час плівкоутворення з латексу натурального каучуку при температурі 50 °С процес займає близько 20 хвилин. Підвищення температури до 70 °С скорочує тривалість удвічі, а при 90 °С плівка формується всього за вісім хвилин.

Подібний ефект спостерігається й у процесах сушіння картону. Підвищення температури з 140 °С до 150 °С дозволяє збільшити продуктивність сушильної установки на 25 % без шкоди для якості готової продукції.

1.2 Огляд і аналіз способів сушіння в легкій промисловості

Конвективне сушіння здійснюється шляхом передачі теплової енергії від джерела до поверхні матеріалу через тепловий носій [3]. Як тепловий носій використовують повітря, інертні гази, димові гази або перегрітий пар.

Сутність процесу полягає у видаленні вологи з матеріалу завдяки різниці парціальних тисків: над матеріалом $p_{\text{пм}}$ і в навколишньому середовищі $p_{\text{пс}}$. Процес сушіння триває, якщо виконується умова:

$$p_{\text{пм}} > p_{\text{пс}}$$

Як тільки парціальні тиски вирівнюються, настає рівновага, і процес сушіння припиняється. Видалення вологи з поверхні матеріалу залежить від дифузії вологи всередині нього до поверхні. Якщо ці два процеси не узгоджені, це може призвести до пересихання, деформації поверхні матеріалу і погіршення його якості.

В процесі конвективного сушіння волога переміщується до поверхні матеріалу під впливом градієнта вологості [1]. Водночас градієнт температури уповільнює цей процес. Різниця температур між поверхнею та внутрішньою частиною матеріалу спричиняє рух вологи в напрямку середини, де температура нижча.

На перебіг конвективного сушіння та рівноважну вологість впливають такі фактори [1]: властивості матеріалу, що висушується; характер зв'язку вологи з матеріалом; параметри навколишнього середовища.

Контактне сушіння [1, 7].

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У контактному сушінні передача тепла до матеріалу відбувається через нагріту перегородку, що контактує з його поверхнею.

Цей спосіб сушіння відрізняється тим, що термодифузія і дифузія, обумовлена різницею концентрацій вологи, мають однаковий напрямок. Це сприяє посиленню процесу в першій стадії сушіння. У другій стадії, зі зменшенням температурної різниці, інтенсивність сушіння знижується.

Терморадіаційне сушіння [8].

При використанні інфрачервоного випромінювання для сушіння матеріалів напрями потоку вологи (градієнт вологості) і потоку тепла (градієнт температури) є протилежними. Це призводить до певного уповільнення процесу сушіння на першому етапі. У міру прогрівання матеріалу волога переміщується всередину, викликаючи підвищення вологості в глибших шарах. Це створює значний перепад вологості у виробі.

До завершення опромінення матеріал рівномірно прогривається, температурні перепади зменшуються, і волога починає інтенсивно рухатися до поверхні, де активно випаровується. Інтенсивність випаровування на цьому етапі зростає в десятки разів.

Сушіння за допомогою струмів високої частоти (СВЧ) [9].

СВЧ - сушіння здійснюється шляхом розташування матеріалу між двома електродами, до яких підводиться змінний струм високої частоти. Електричне поле, створене між електродами, змушує іони і електрони матеріалу змінювати напрямок руху синхронно із зміною полярності заряду електродів. Одночасно дипольні молекули починають обертатися, а неполярні молекули поляризуються внаслідок зміщення їхніх зарядів.

Ці процеси викликають появу електричних струмів у матеріалі, що супроводжується виділенням тепла. Тепло рівномірно прогриває матеріал, сприяючи переміщенню вологи до поверхневих шарів і її випаровуванню. Цей спосіб забезпечує рівномірне сушіння і скорочує час процесу.

При сушінні в полі струмів високої частоти (СВЧ) температура всередині матеріалу вища, ніж на його поверхні. Це сприяє інтенсифікації процесу сушіння, оскільки градієнти дифузії та термодифузії діють в одному напрямку.

Застосування такого методу забезпечує рівномірне прогрівання матеріалу по всьому об'єму. Внутрішні шари матеріалу нагріваються більше, ніж периферійні, через охолодження поверхні і випаровування вологи у навколишнє середовище. Завдяки цьому методу волога ефективніше переміщується до поверхні, прискорюючи процес сушіння.

Проте енерговитрати при використанні СВЧ-методу є відносно високими. Тому цей спосіб застосовують переважно для сушіння виробів, які схильні до розтріскування, чутливі до перегріву або мають інші особливості, що потребують делікатного підходу.

Сублімаційне сушіння [10].

При температурі нижче 0°C вільна волога в матеріалі замерзає, і процес випаровування здійснюється без її плавлення — шляхом сублімації. Основним механізмом видалення вологи є розвиток поверхні випаровування всередині матеріалу. Пара переноситься від поверхні випаровування через шар матеріалу шляхом дифузії, оскільки радіус капілярів менший за середню довжину вільного пробігу молекул.

Адсорбційно пов'язана волога, що перебуває у переохоложеному стані, видаляється завдяки переходу рідини в пар. Після завершення сублімації льоду сушіння продовжується при температурі вище 0°C .

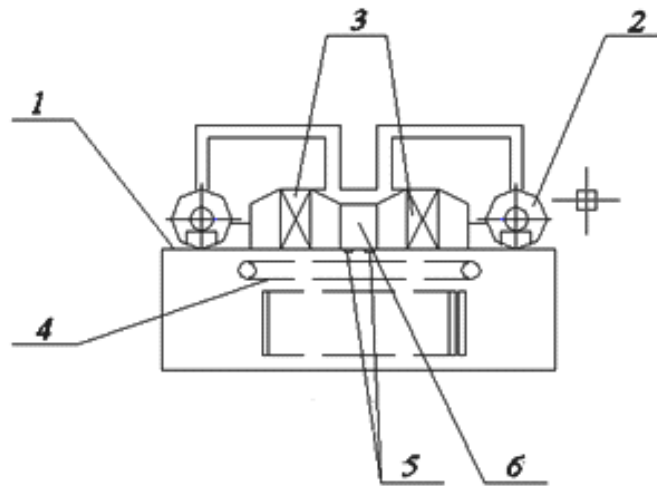
Процес сублімаційного сушіння включає три етапи:

- сублімація льоду, коли волога видаляється через випаровування льоду без плавлення;
- випаровування переохоложеної рідини всередині матеріалу;
- випаровування зв'язаної рідини при температурі вище 0°C до повного завершення сушіння.

Зазвичай під сублимацією розуміють випаровування твердого льоду, що знаходиться всередині матеріалу, без його переходу в рідкий стан.

1.3 Різновиди конвективних сушарок для легкої промисловості

Для сушіння шкіряного та хутрового напівфабрикату в промислових умовах широко застосовуються кільцеві та ежекційні сушарки. Зокрема, для обробки шкіри, яка використовується для виготовлення підошов взуття, ефективним є використання ежекційних сушарок типу ЕКС-62. Ці сушарки дозволяють здійснювати сушіння шкіри у вільно підвішеному стані, забезпечуючи рівномірне видалення вологи з матеріалу. Схему такої сушарки представлено на рисунку 1.1 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО]).



1- корпус; 2 - вентилятор відцентровий; 3 - калорифер; 4 –ланцюговий конвеєр; 5 – сопла; 6 – повітровхід.

Рисунок 1.1 – Ежекційна сушарка:

У таких сушарках напівфабрикат фіксується в спеціальних затискачах, які закріплені на поперечних стержнях. Відстань між затискачами становить 100 мм, а між стержнями – 200 мм. Затискачі автоматично відкриваються, коли ланцюг проходить через кінцеві зірочки конвеєра. Переміщення

напівфабрикату по довжині сушарки здійснюється дволанцюговим конвеєром.

Нагріте повітря подається в камеру через спеціальні коробки за допомогою відцентрових вентиляторів. З коробів тепловий носій виходить через сопла зі швидкістю 6-8 м/с, де змішується з повітрям із верхньої частини сушильної камери. Утворена повітряна суміш огортає напівфабрикат, забезпечуючи його сушіння.

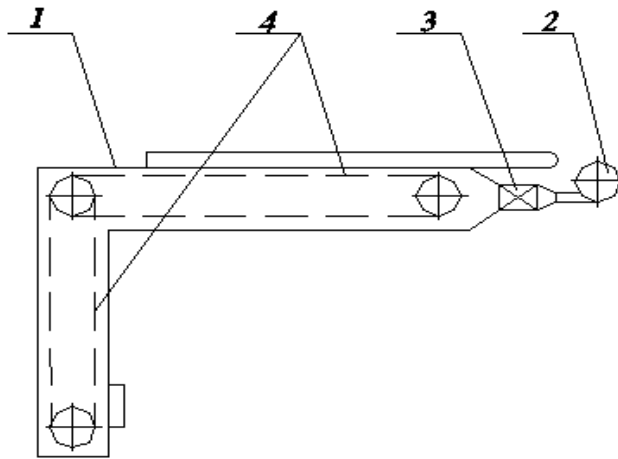
Відпрацьоване повітря частково видаляється з камери за допомогою вентилятора, розташованого поза сушаркою, а інша частина змішується зі свіжим повітрям, яке надходить через торцеві отвори сушарки і підігрівається в калориферах.

Ежекційна сушарка спроектована таким чином, що забезпечує дворазове змішування повітря: свіже змішується з відпрацьованим, а повітря, що ежектується, з повітрям із камери. Це створює більш м'які умови сушіння напівфабрикатів, що є важливим для збереження їх якості.

На взуттєвих фабриках широко використовуються Г-подібні сушарки конструкції Х.Б. Глаубермена. У таких сушарках калорифер та вентилятор розміщуються в кінці горизонтальної частини короба, яка протилежна до завантажувального люка (рисунок 1.2). Повітря, що нагнітається вентилятором, зі швидкістю 1-2 м/с проходить через калорифер, нагрівається до температури 50-100 °С і подається в сушильну камеру. Відпрацьоване повітря видаляється через патрубков [11].

У процесі роботи сушарки, коли повітря викидається в атмосферу, тиск у робочій камері поступово знижується. Це сприяє надходженню свіжого повітря через завантажувальний люк безпосередньо із приміщення цеху. Заготовки взуття розміщують у спеціальні люльки, які переміщуються за допомогою ланцюгового конвеєра, забезпечуючи їх рівномірне сушіння.

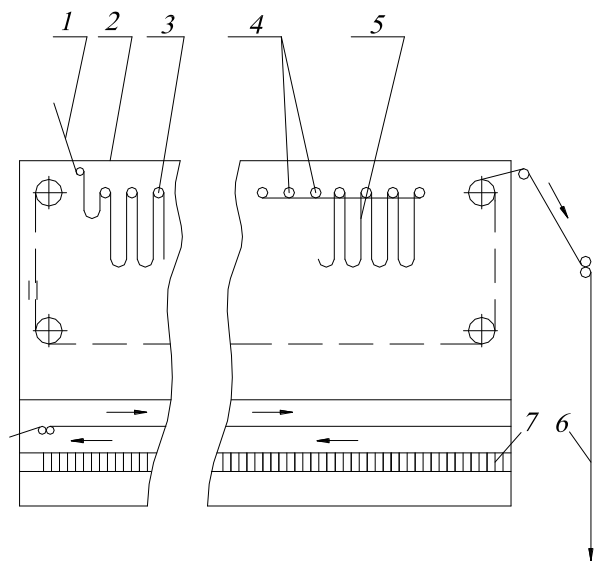
Дані сушарки широко застосовуються на багатьох взуттєвих фабриках завдяки їх високій ефективності та надійності.



1- корпус; 2 - вентилятор; 3 - калорифер; 4 –люк завантажувальний.

Рисунок 1.2 – Г - подібна сушарка конструкції Х.Б. Глаубермана:

Для сушіння плівкових матеріалів і штучної шкіри використовують петльові сушарки різних конструкцій (рисунок 1.3). Вони забезпечують якісне і рівномірне висушування цих матеріалів, відповідаючи вимогам сучасного виробництва.



1 - матеріал зволожений; 2 – корпус; 3 – ролики; 4 –конвеєр ланцюговий;
5 – петля полотна; 6 –матеріал висушений; 7 – калорифери.

Рисунок 1.3 – Петльова сушарка:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

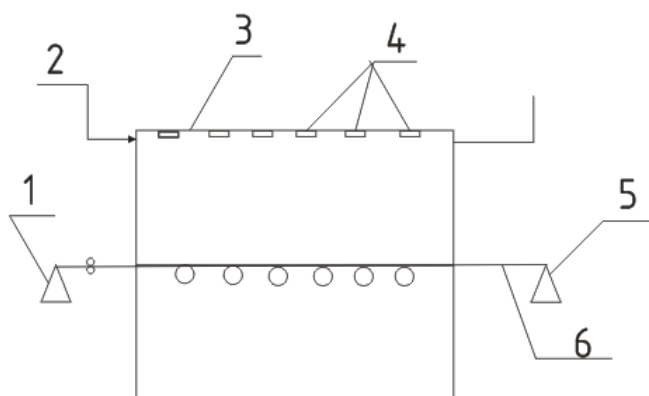
МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.

16

Схема сушарки з обдуванням через плоскі й круглі сопла передбачає початкову швидкість виходу повітря, яка не перевищує 100 м/с (рисунок 1.4). У цьому процесі тканина або плівковий матеріал за допомогою направляючих роликів подається в сушильну камеру установки.

Повітря, попередньо нагріте до температури 150–170 °С у калорифері, подається відцентровими вентиляторами в розподільчі короба. Далі через сопла воно обдуває матеріал із обох боків, забезпечуючи рівномірне та ефективне сушіння.



1- пристрій розмотуючий; 2 – пристрій для нанесення; 3 – камера; 4 – соплї; 5 - намотуючий пристрій; 6 – матеріал висушений

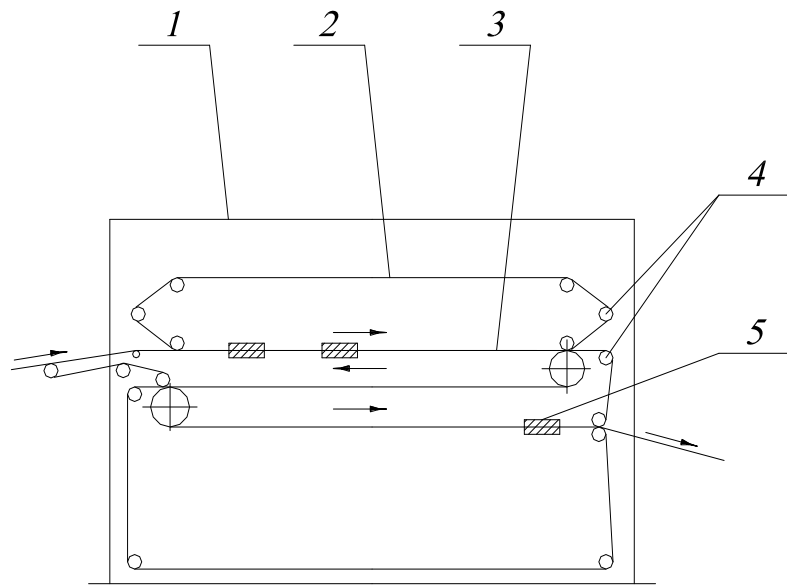
Рисунок 1.4 – Сушарка з обдуванням повітрям із сопел:

Для сушіння м'яких штучних шкір застосовуються сушарки, у яких переміщення матеріалу здійснюється за допомогою обертових роликів (рисунок 1.5). Такі сушарки виготовляються у двох варіантах: вертикальні, горизонтальні.

Кожен тип має свої переваги залежно від особливостей виробництва та властивостей матеріалів, що висушуються.

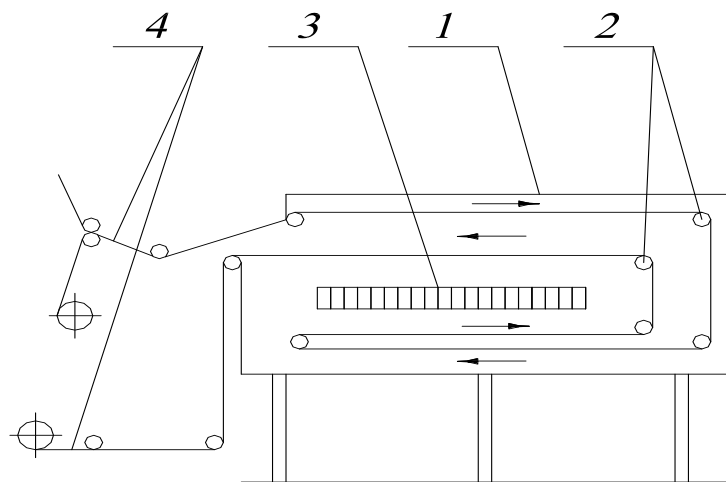
Для сушіння листів картону ефективним рішенням стали багатоярусні сушарки, у яких лист картону затискається між сітками або стрічками сукна (рисунок 1.6). Прикладом такого обладнання є сушарка типу «Тромаг», яка

забезпечує рівномірне сушіння листів завдяки багатоярусній конструкції та оптимальному розподілу теплового носія.



1- корпус; 2 – конвеєр; 3 – сітка; 4 –ролики направляючі;
5 – лист картону

Рисунок 1.5 – Багатоярусна сушарка для сушіння картону:



1- корпус; 2 – ролики; 3 - калорифер; 4 –матеріал висушений

Рисунок 1.6 – Горизонтальна сушарка з роликами, що повертаються:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

У багатоярусних сушарках передача листів картону з одного ярусу на інший відбувається таким чином, що кожен лист постійно перевертається, забезпечуючи рівномірний обдув гарячим повітрям, яке подається через сопла. Сушильна камера зазвичай розділена на три температурні зони: перша і остання зони мають нижчу температуру, ніж середня. Це дозволяє створювати циклічний режим сушіння, при якому чергуються етапи нагрівання і охолодження матеріалу. Такий підхід сприяє підвищенню швидкості сушіння у другому періоді та покращує якість готової продукції. Загальний час сушіння картону становить від 40 до 60 хвилин [11].

1.4 Графоаналітичний метод розрахунку витрат теплоти та повітря під час сушіння

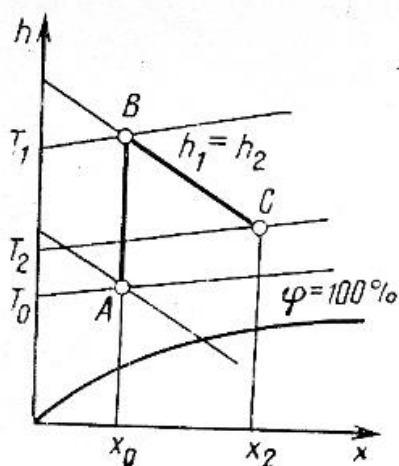
При визначенні витрат теплоти та повітря під час сушіння взуття, повсті, технічної шкіри або хутра найчастіше застосовується графоаналітичний метод із використанням діаграми $h-x$. Цей підхід не враховує кінетичні характеристики процесу, однак дозволяє оцінити енергетичні параметри сушіння. Під час розрахунків сушарок зазвичай задаються початковою температурою T_0 та відносною вологістю повітря (точка А) (рисунок 1.7, а). Температуру після калорифера T_1 (точка В) визначають, враховуючи технологічні вимоги, як максимально допустиму. Температура або відносна вологість повітря після сушіння (точка С) задаються виходячи з необхідних характеристик готової продукції.

Робоча лінія сушіння визначається умовами:

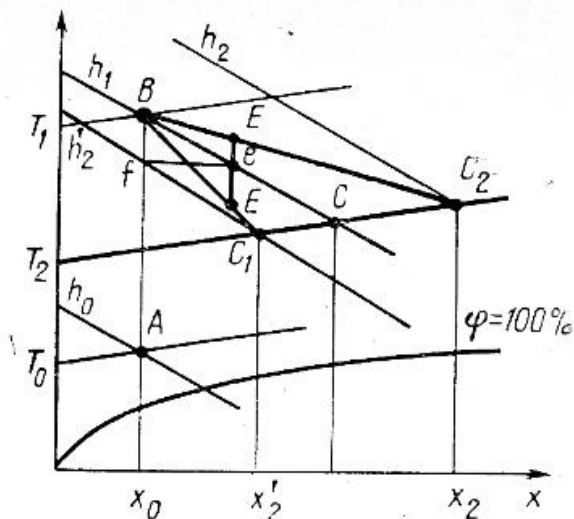
- $\Delta h=0$, тобто $h_1=h$;
- $h_2 < h_1$, якщо волога видаляється;
- $h_2 > h_1$, якщо відбувається підведення додаткового тепла.

На рисунку 1.7, б показано розташування робочої лінії для зазначених умов. Лінія ВС відповідає теоретичному режиму сушіння, де точка С з

параметром x_2 може бути визначена, оскільки робоча лінія проходить через $h_1=h_2=\text{const}$. Втрати тепла в навколишнє середовище компенсуються за рахунок додаткового теплопостачання.



а



б

h_0 і x_0 – ентальпія і вологовміст повітря, що поступає в сушарку, Дж/кг; кг/кг; h'_2 і x'_2 – ентальпія і вологовміст повітря, що виходить для дійсного сушіння за умови $\Delta < 0$; h_2 і x_2 ; h_2 і x_2 – ентальпія і вологовміст повітря, що виходить для дійсної сушки за умови $\Delta > 0$; а – діаграма $h - x$ для сушіння в сушарці дійсній; б – діаграма $h - x$ для сушіння в сушарці теоретичній.

Рисунок 1.7 – Діаграма $h - x$ для сушіння:

Лінії BC_1 і BC_2 на діаграмі відповідають режимам роботи реальних сушарок із різними питомими тепловими втратами. Лінія BC_2 відповідає випадку, коли $h_2 > h_1$, тобто при додатковому підігріванні в процесі сушіння, що спричиняє збільшення ентальпії повітря ($\Delta h > 0$). Лінія BC_1 описує більш поширений випадок, коли ентальпія повітря зменшується під час сушіння ($h_2 < h_1$).

Для визначення точок C_1 і C_2 , що відповідають реальному процесу сушіння, використовують наступний метод:

- через точку В проводять лінію $h_1 = \text{const}$;
- на цій лінії вибирають довільну точку e ;
- від точки e відкладають відрізок eE , спрямований угору або вниз залежно від знака $\Delta h \setminus h \Delta h$.

Довжина відрізка eE розраховується за рівнянням:

$$eE = ef \frac{\Delta}{M_h / M_x} \quad (1.1)$$

де: M_h, M_x - масштаби осей А і х;

ef - відрізок по горизонталі від точки e до лінії АВ, сушіння на діаграмі $h - x$.

Кінцевий пункт відрізка eE поєднують із точкою В прямою лінією, яка перетинає лінію, що відповідає заданій температурі T_2 (або заданій відносній вологості ϕ , визначаючи таким чином точку C_2 або C_1).

Коректність такої побудови впливає з наступного. Замінімо координати кінцевої точки (x_2, h_2) поточними координатами (x, h) які відповідають довільно обраній точці E , розташованій на лінії процесу сушіння в реальній сушарці. У такому разі отримаємо:

$$\frac{h - h_t}{x - x_0} = \Delta, \quad (1.2)$$

по діаграмі $h - x$ знаходимо, що:

$$h - h_1 = a_{eE} m_h, \quad x - x_0 = a_{ef} m_x,$$

де a_{eE} й a_{ef} - довжина відрізків eE і ef ;

m_h і m_x - масштаби вісей діаграми $h - x$.

Тобто отримаємо:

$$\frac{a_{eE}^{mh}}{a_{ef}^{mh}} = \Delta. \quad (1.3)$$

Відповідно:

$$a_{eE} = a_{ef}^{\Delta / m_h / m_x}. \quad (1.4)$$

Аналітичні розрахунки проводяться за допомогою рівняння теплового балансу. Перш за все, визначають кінцевий вологовміст повітря на виході із сушарки. Це здійснюється за рівнянням, яке враховує наступний вираз:

$$x_2 = \frac{x_1(\Delta - 1,93 \cdot 10^3 T_1 - 2493 \cdot 10^3) + 10^3(T_2 - T_1)}{\Delta - 1,93 \cdot 10^3 T_2 - 2493 \cdot 10^3}. \quad (1.5)$$

Після визначення значення x_2 (кінцевого вологовмісту повітря) по заданій температурі T_2 , знаходять ентальпію повітря h_2 на виході із сушарки, використовуючи діаграму або відповідні залежності.

Далі розраховують L і Q .

Розрахувавши x_2 , в подальшому по температурі T_2 визначають, ентальпію повітря на виході із сушарки. Далі розраховують L і Q .

1.5 Кінетика процесу сушіння

Для досягнення оптимального режиму сушіння, за якого тривалість процесу та енерговитрати будуть мінімальними, а якість висушеного матеріалу відповідатиме необхідним вимогам, проводять аналіз змін

середнього вологовмісту та середньої температури матеріалу. Це дозволяє дослідити кінетику процесу сушіння.

Характер кінетичних кривих визначається фізико-хімічними властивостями матеріалу та закономірностями тепломасообміну з навколишнім середовищем. Крива сушіння ілюструє залежність середньої вологості матеріалу від тривалості процесу, будуючись за результатами зважування матеріалу в різні моменти часу.

Процес сушіння можна розділити на два етапи:

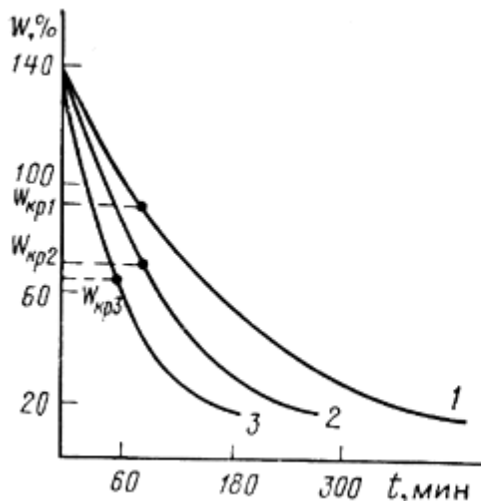
Перший період - зменшення вологості матеріалу від початкового значення до критичної), що відбувається за лінійним законом.

Другий період - поступове зниження вологості за асимптотичною кривою, яка наближається до рівноважної вологості. Це свідчить про припинення випаровування вологи, однак на практиці повної рівноваги зазвичай не досягають, і кінцева вологість перевищує рівноважну. Ця вологість залежить від технологічних вимог і умов сушіння.

На рисунках 1.8 і 1.9 зображені криві сушіння юхті хром танінного дублення та хутряної овчини при різних температурах. Як видно, температура значно впливає на кінцеву вологість матеріалу: зі збільшенням температури вологість знижується.

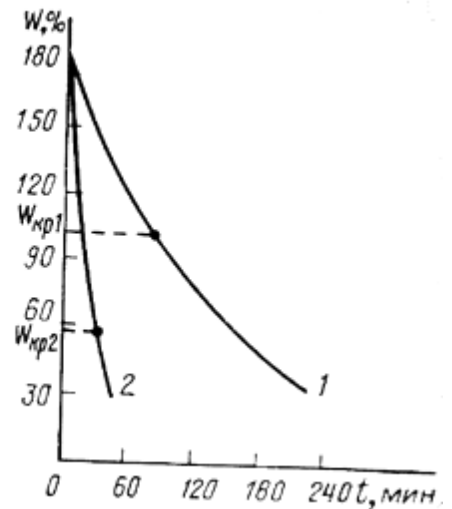
Для деяких матеріалів у другому періоді сушіння зміна вологості може відбуватися з різною інтенсивністю, що призводить до появи точки перегину на кривій. Ця точка відповідає другій критичній вологості.

Появу другої критичної точки пояснюють різними способами. Наприклад, за А.В. Ликовим, вона визначає момент переходу від видалення капілярної вологи до видалення гідратаційної вологи, яка фізико-хімічно зв'язана з матеріалом.



1 - 40; 2 - 60; 3 - 80; $W_{кр1}$, $W_{кр2}$, $W_{кр3}$ - критична вологість при режимах 1,2,3.

Рисунок 1.8 – Криві сушіння юфті хром таннідного дублення при температурі, °С:



1 - 40° С; 2 - 80° С.

Рисунок 1.9 – Криві сушіння хутрової овчини в псевдо розрідженому шарі при температурі °С:

Швидкість (інтенсивність) сушіння визначається як кількість води, яка видаляється за одиницю часу з одиниці площі поверхні матеріалу, що висушується:

$$V_c = \frac{dM_{вл}}{dSdt}$$

Швидкість сушіння також може бути виражена як зменшення вологості матеріалу за одиницю часу, у відсотках на секунду:

$$V_c = dW / dt \quad (1.6)$$

де S - поверхня матеріалу, яка висушується, m^2 .

Графічна залежність швидкості сушіння від вологості матеріалу, відома як крива швидкості сушіння (рис. 1.10), чітко визначає періоди

сушіння. Перший період відображається горизонтальним відрізком кривої, що свідчить про постійну швидкість сушіння. У другому періоді швидкість поступово зменшується, а при досягненні рівноважної вологості стає рівною нулю.

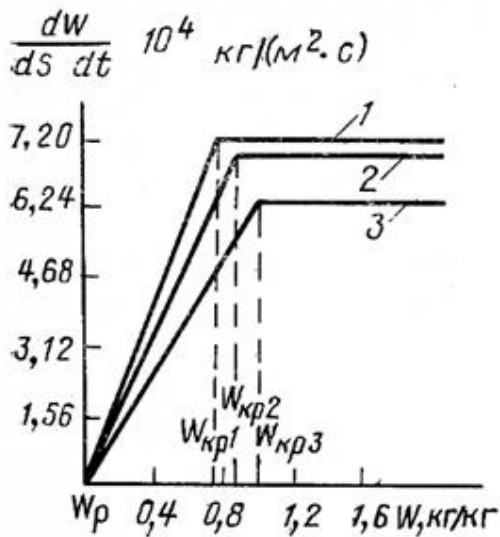
Вид кривої швидкості сушіння в другому періоді може відрізнитися залежно від: характеру зв'язку вологи з матеріалом; властивостей матеріалу; механізму переміщення вологи.

Наприклад, для тонких матеріалів із великою питомою поверхнею випаровування крива у другому періоді може бути прямою лінією (для паперу, тонкого картону) або мати форму кривої, опуклість якої спрямована до осі ординат (для тканини, шкіри) (рис. 1.10).

Для аналізу процесу сушіння важливо враховувати зміну температури матеріалу залежно від його вологості (температурна крива), оскільки якість сушіння значною мірою залежить від температури та тривалості її впливу [12].

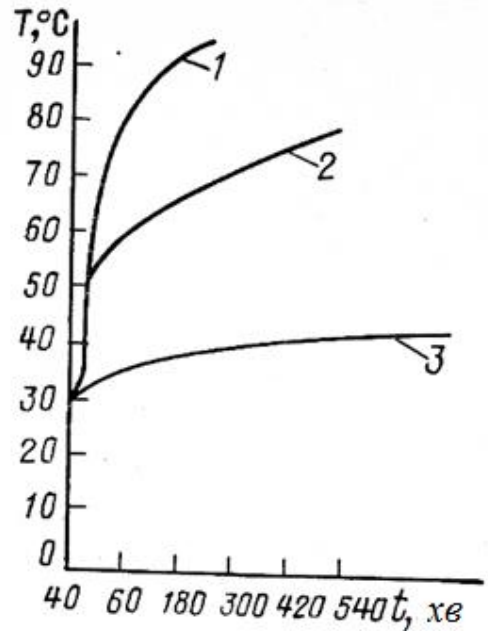
Температурні криві (рис. 1.11), отримані при конвективному сушінні, дозволяють визначити періоди сушіння без використання кривих вологості. Наприклад, при сушінні шару синтетичного латексу температура матеріалу в першому періоді трохи перевищує температуру мокрого термометра завдяки додатковому підведенню тепла випромінюванням. У міру підвищення температури процесу утворення плівки тривалість першого періоду зменшується, а температура матеріалу швидко зростає, наближаючись до температури навколишнього середовища.

Температурні криві, отримані під час сушіння шкіряного напівфабрикату в псевдо розрідженому шарі інертного теплоносія, демонструють зміну температури у різних шарах матеріалу протягом процесу сушіння. На початковому етапі, при зануренні напівфабрикату в киплячий шар, спостерігається швидке зростання температури в усіх шарах матеріалу, що відповідає короткому періоду прогрівання (рис. 1.12).



1 - 0,85 м/с; 2 - 0,5 м/с; 3 - 0,4 м/с $W_{кр1}$,
 $W_{кр2}$, $W_{кр3}$ - критична вологість при
 режимах 1,2,3.

Рисунок 1.10 – Вплив швидкості повітря
 на інтенсивність сушіння картону:

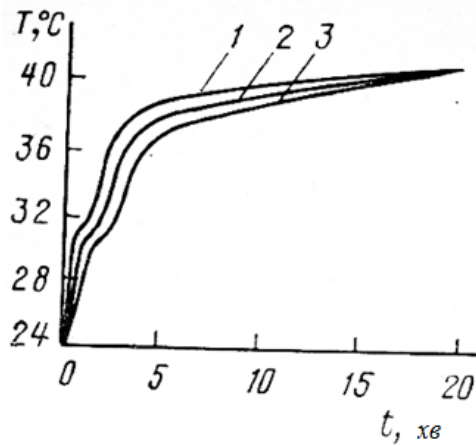


1 - 95; 2 - 74 і 3 - 50.

Рисунок 1.11 – Температурні
 криві конвективного сушіння
 латексу при температурі $^\circ\text{C}$:

Коли температура поверхні напівфабрикату досягає значення температури мокрого термометра, на температурних кривих з'являється горизонтальна ділянка. Після цього відбувається поступове підвищення температури у всіх шарах, і приблизно через 20 хвилин сушіння температура матеріалу стає рівною температурі псевдо розрідженого шару.

Порівняння температурних кривих із відповідними кривими сушіння показує, що тривалість періоду з постійною температурою є меншою, ніж тривалість першого періоду на кривих сушіння. Зростання температури матеріалу під час першого періоду сушіння зумовлене просуванням фронту випаровування всередину напівфабрикату.



1 – шар лицьовий; 2 – шар бахтармянний; 3 – шар внутрішній

Рисунок 1.12 – Температурні криві сушіння шкіряного напів фабрику в псевдо розрідженому шарі інертного теплоносія при температурі 20 °С:

З початком другого періоду сушіння шкіряного напівфабрикату спостерігається інтенсивне підвищення температури його бахтармяної поверхні, яка до кінця процесу сушіння досягає приблизно тієї ж температури, що й лицьова поверхня.

Для більшості матеріалів з волокнистою структурою, які широко використовуються у легкій промисловості, період падаючої швидкості сушіння розподіляється на дві стадії. На кожній з них зміна швидкості сушіння описується кривими, які, за методом А.В. Ликова, можна апроксимувати двома прямими відрізками, що проходять через точки W_P , W_{KP1} , W_{KP2} .

Тривалість процесу сушіння у цьому випадку визначається за допомогою наступного рівняння:

$$t = \frac{1}{V_C} (W_H - W_{KP1}) + \frac{2,3}{k_1} \lg(W_{KP1} - W_{KP2}) + \frac{2,3}{k_2} \lg \frac{W_{KP} - W_P}{W - W_P}, \quad (1.7)$$

де k_1 і k_2 - відносні коефіцієнти сушіння, що обумовлені по тангенсу нахилу до горизонталі кривих швидкості сушіння в другому періоді.

Характер кінетичних кривих сушіння матеріалів, таких як шкіра та картон, має відповідати основним положенням теорії сушіння. Для демонстрації застосування рівняння (1.7) було проведено порівняння експериментальних даних та розрахункових результатів тривалості сушіння картону.

Так, наприклад, тривалість сушіння картону при температурі 130 °С і швидкості повітря 1,31 м/с складає 12 хвилин, швидкість першого періоду при таких умовах є рівною $27,5 \cdot 10^{-5}$ кг/(м² · с) перша критична вологість = 67,2 %, друга критична вологість = 38,5 %.

Тривалість сушіння, розрахована за рівнянням (1.7), дорівнює 13 хвилин, тоді як експериментальне значення становить 12 хвилин. Такий метод дозволяє враховувати реальні умови сушіння для кожного матеріалу, базуючись на попередньо проведеному нескладному експерименті [12].

1.6 Висновки до першого розділу

У цьому розділі виконано аналіз технічної літератури, присвяченої розрахункам і дослідженням процесів сушіння. Розглянуто конструкції конвективних сушарок, їх різновиди та особливості. Проведено оцінку ефективності конструктивних рішень для забезпечення оптимальних умов сушіння, з урахуванням енергетичних витрат та характеристик оброблюваних матеріалів.

2 РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНВЕКТИВНОЇ СУШАРКИ

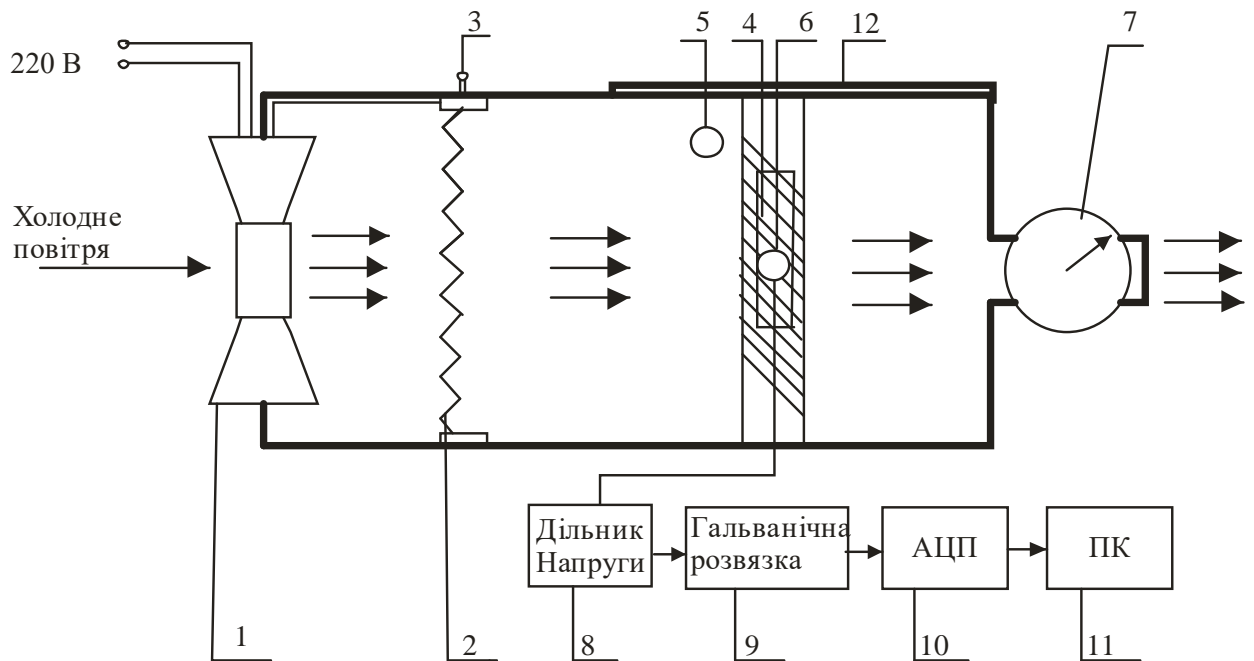
2.1 Конструктивні особливості та принцип дії розробленої конвективної сушарки

У цьому розділі описано розробку і виготовлення лабораторного стенда для дослідження процесу сушіння. Експериментальна установка для сушіння складається з двох ящиків: герметичного та термоізоляційного. Завдяки термоізоляції, температура всередині сушарки може досягати 135 °С без додаткових витрат енергії на нагрівання зовнішнього середовища.

Автоматизація процесу дослідження забезпечується завдяки використанню датчиків, які реєструють зміни фізичних параметрів і перетворюють їх у електричні сигнали [13]. Ці сигнали передаються через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) до комп'ютера, де обробляються за допомогою програмного середовища LabVIEW (рис. 2.1) (аркуш [МРМА24.00.00.000С3]) [14].

Установка складається з таких основних компонентів:

- електричний вентилятор (1), що розташований на вході.
- електричний нагрівач (2), виготовлений з ніхромового дроту, що активується за допомогою вимикача (3).
- касета з вологим матеріалом (4), яка розташовується на безпечній відстані від спіралі нагрівача.
- прилад для вимірювання витрати повітряного потоку – газовий лічильник (7), встановлений на виході установки.
- датчики температури (5, 6), які реєструють зміни температури.
- гальванічна розв'язка (9) і аналогово-цифровий перетворювач (10), які забезпечують передачу даних на комп'ютер (11) для подальшої обробки.



1 – вентилятор електричний; 2 – нагрівач електричний; 3 – вимикач; 4 – касета зі зволженим матеріалом; 5, 6 – датчики температури; 7 – газовий лічильник; 8 – дільник напруги; 9 – гальванічна розв’язка; 10 – АЦП; 11 – комп’ютер; 12 – кришка.

Рисунок 2.1 – Експериментальна установка:

Ця експериментальна установка дозволяє ефективно вивчати процес сушіння, забезпечуючи точний контроль і аналіз даних у реальному часі.

Експериментальна установка функціонує наступним чином. Після підключення до електричної мережі та активації блоку вимикачів (3), нагріте повітря спрямовується через касету із зволженим матеріалом. Далі воно проходить через випускний отвір і газовий лічильник, що фіксує витрати повітряного потоку.

Датчики температури здійснюють вимірювання температури всередині сушарки, а також температури повітря в матеріалі. Ці дані передаються на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), що забезпечує обробку і передачу інформації. Додатково через АЦП можна отримати показники з датчиків струму та напруги.

Уся інформація надходить на комп'ютер, де обробляється в програмному середовищі LabView, що дозволяє здійснювати аналіз і контроль процесу сушіння в реальному часі.

Електрична сушарка підключається до електромережі напругою 220В. Вентилятор сушарки активується за допомогою вимикача SV1. Після цього, за допомогою перемикачів SV2-SV4, можна вмикати відповідні нагрівальні елементи (ТЕНи) L1 - L3 для забезпечення необхідного рівня нагрівання.

Принципова електрична схема сушарки представлена на рисунку 2.2 (аркуш [МРМА24.00.00.000Е2]).

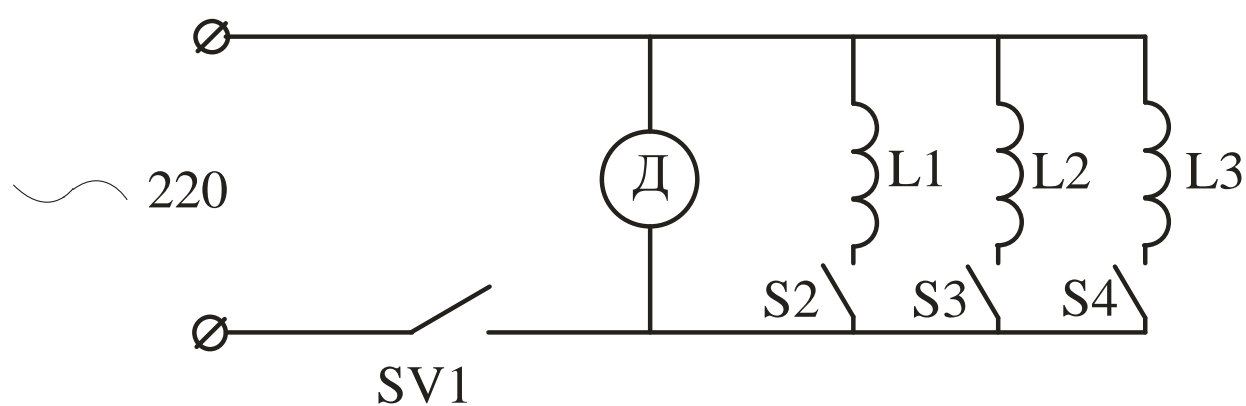


Рисунок 2.2 - Електрична схема сушарки

Загальний вигляд сушарки для сушіння текстильних матеріалів наведена на аркуші [МРМА24.00.00.000В3].

2.2 Вибір датчиків для вимірювання параметрів процесу сушіння текстильних матеріалів

Вибір датчиків для експериментальної установки здійснювався з урахуванням необхідних параметрів вимірювання, вартості та якості роботи.

Для вимірювання температури датчик підбирався відповідно до основного критерію - максимальної граничної температури, яку він може вимірювати.

Датчик струму обирався з акцентом на його надійність, точність роботи та прийнятну вартість, щоб забезпечити оптимальне співвідношення ціни та якості [15].

2.2.1 Датчик для вимірювання температури

Для дослідження кінематики процесу сушіння у шафі встановлено два датчики температури КТУ81-210 (позиції 5, 6 рис.2.1), які підключаються до аналогово-цифрового перетворювача [16]. Один датчик розміщено перед вологим матеріалом, а інший - безпосередньо всередині матеріалу.

Вибір датчиків температури здійснювався з урахуванням кількох критеріїв: опору, температурного діапазону та типу датчика. Для вирішення поставленої задачі найкраще підходять аналогові датчики температури повітря КТУ81-210. Загальний вигляд цих датчиків наведено на рис.2.3, а їх характеристики представлені в таблиці 2.1 [17].

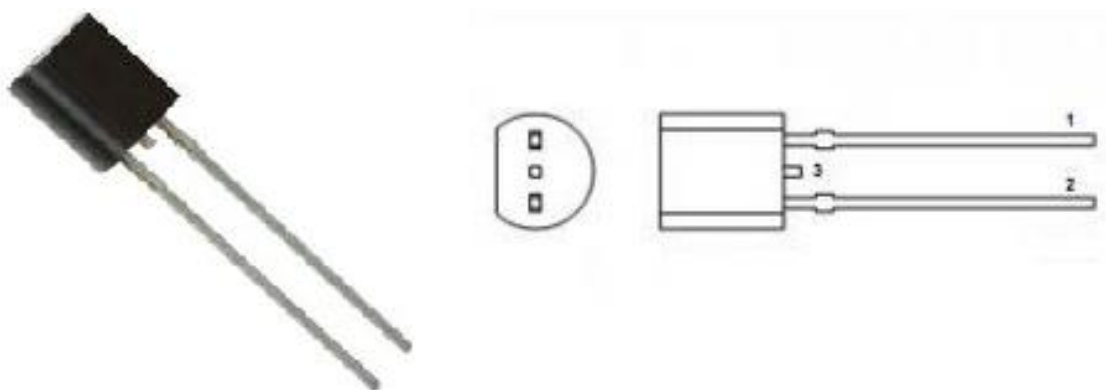


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд датчика КТУ 81-210

Таблиця 2.1 – Характеристика датчика температури КТУ 81-210

Температура навколишнього середовища		Температурний Коефіцієнт	КТУ 81-210			
(°C)	(°F)		(%/K)	Опір (Ω)		
		Мін.		Типовий	Макс.	
-55	-67	0,99	951	980	1009	$\pm 3,02$
-50	-58	0,98	1000	1030	1059	$\pm 2,92$
-40	-40	0,96	1105	1135	1165	$\pm 2,74$
-30	-22	0,93	1218	1247	1277	$\pm 2,55$
-20	-4	0,91	1338	1367	1396	$\pm 2,35$
-10	14	0,88	1467	1495	1523	$\pm 2,14$
0	32	0,85	1603	1630	1656	$\pm 1,91$
10	50	0,83	1748	1772	1797	$\pm 1,67$
20	68	0,80	1901	1922	1944	$\pm 1,41$
25	77	0,79	1980	2000	2020	$\pm 1,27$
30	86	0,78	2057	2080	2102	$\pm 1,39$
40	104	0,75	2217	2245	2272	$\pm 1,64$
50	122	0,73	2383	2417	2451	$\pm 1,91$
60	140	0,71	2557	2597	2637	$\pm 2,19$
70	158	0,69	2737	2785	2832	$\pm 2,49$
80	176	0,67	2924	2980	3035	$\pm 2,8$
90	194	0,65	3118	3182	3245	$\pm 3,12$
100	212	0,63	3318	3392	3466	$\pm 3,46$
110	230	0,59	3523	3607	3691	$\pm 3,93$
120	248	0,53	3722	3817	3912	$\pm 4,7$
125	257	0,49	3815	3915	4016	$\pm 5,26$

130	266	0,44	3901	4008	4114	± 6
140	284	0,33	4049	4166	4283	± 8,45
150	302	0,20	4153	4280	4407	± 14,63

2.2.2 Блок вимірювання електроенергетичних показників

Для створення стенда для дослідження режимів роботи операції сушіння було розроблено електричну схему пристрою для вимірювання напруги та струму (рис.2.4). У якості запобіжника у схемі використано діод КД522, який відкривається при напрузі 0,6 В.

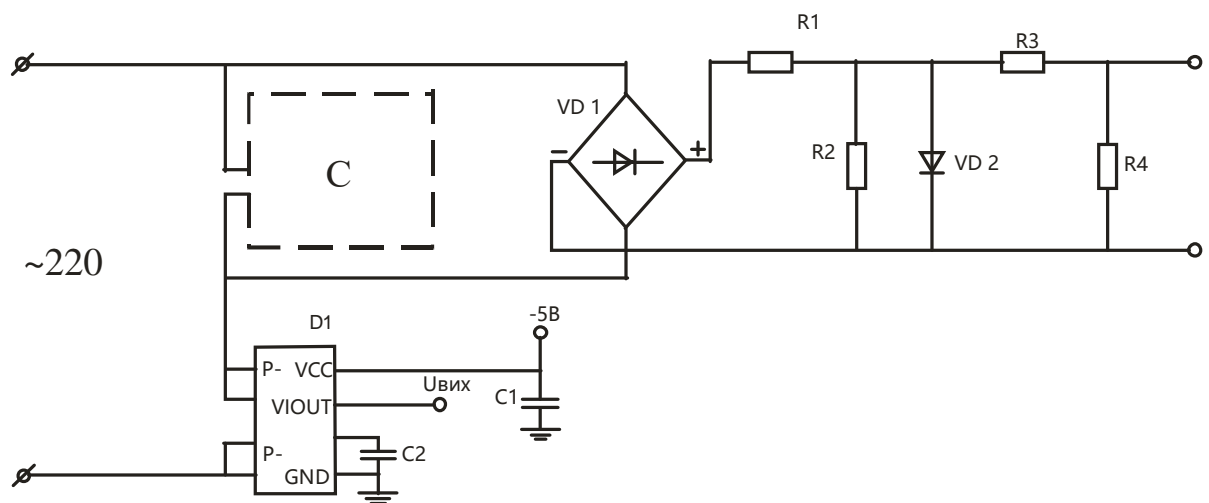


Рисунок 2.4 – Схема електрична пристрою вимірювання напруги і струму

Проведемо розрахунок основних компонентів електричної схеми пристрою визначення напруги. Згідно із законом Ома, падіння напруги (зменшення потенціалу під час переміщення заряду між двома точками електричного кола) на кожному резисторі пропорційне його опору та визначається за формулою:

$$U=I \times R \quad (2.1)$$

Для кожного резистора падіння напруги буде рівним:

$$U_1 = I \times R_1, \quad (2.2)$$

$$U_2 = I \times R_2, \quad (2.3)$$

$$U_3 = I \times R_3, \quad (2.4)$$

$$U_4 = I \times R_4. \quad (2.5)$$

Розділивши вираз для U_1 на вираз для U_2 і U_3 на U_4 було отримано:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}, \quad (2.6)$$

$$\frac{U_3}{U_4} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (2.7)$$

Виходячи з цього:

$$U_1 = 299,4 \text{ В};$$

$$U_2 = 0,6 \text{ В};$$

$$U_3 = 0,4 \text{ В};$$

$$U_4 = 0,2 \text{ В}.$$

Відношення напруг U_1 до U_2 і U_3 до U_4 в точності є рівною відношенню опорів R_1 до R_2 і R_3 до R_4 .

Отже:

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{299,4}{0,6} = \frac{R_1}{R_2},$$

$$\frac{0,4}{0,2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Резистори підбираються зі стандартного номінального ряду Е6. Згідно з розрахунками, обираємо резистор R_1 із значенням 300 кОм з допуском $\pm 20\%$, R_3 - із значенням 3,9 кОм з допуском $\pm 20\%$. Значення резисторів R_2 і R_4 розраховуються за допомогою таких формул:

$$U_{вих1} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \times U_{вх1}, \quad (2.8)$$

$$U_{вих2} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \times U_{вх2}, \quad (2.9)$$

$$U_{вих1} = 0,6 \text{ В},$$

$$U_{вх1} = 300 \text{ В},$$

$$U_{вих2} = 0,2 \text{ В},$$

$$U_{вх2} = 0,6 \text{ В}.$$

Виходячи з цього отримаємо:

$$0,6 = \frac{R_2}{R_2 + 300000} \times 300,$$

$$R_2 = 601,2 \text{ Ом.}$$

$$0,2 = \frac{R_4}{R_4 + 3900} \times 0,6,$$

$$R_4 = 1950 \text{ Ом.}$$

Вибираємо з номінального ряду опір резистора R_2 , що рівняється 560 Ом $\pm 20\%$ і резистора R_4 - 2 кОм $\pm 20\%$.

2.2.3 Датчик для вимірювання струму

Для більш автоматизованого дослідження процесу сушіння був використаний датчик струму ACS712ELECTR-20A-T, який дозволяє здійснювати контроль за струмом і отримувати цифрові значення, що спрощує подальші розрахунки, пов'язані з вимірюванням струму [18].

Принцип роботи датчика струму ACS712ELECTR-20A-T базується на ефекті Едвіна Хола [19]. Суть цього ефекту полягає в тому, що коли провідник, по якому протікає струм, розташовується в магнітному полі, на його краях виникає електрорушійна сила, яка спрямована перпендикулярно як до напрямку струму, так і до напрямку магнітного поля. Цей ефект показано на рисунку 2.5. Через тонку пластину напівпровідникового матеріалу, який називається елементом Хола, протікає струм

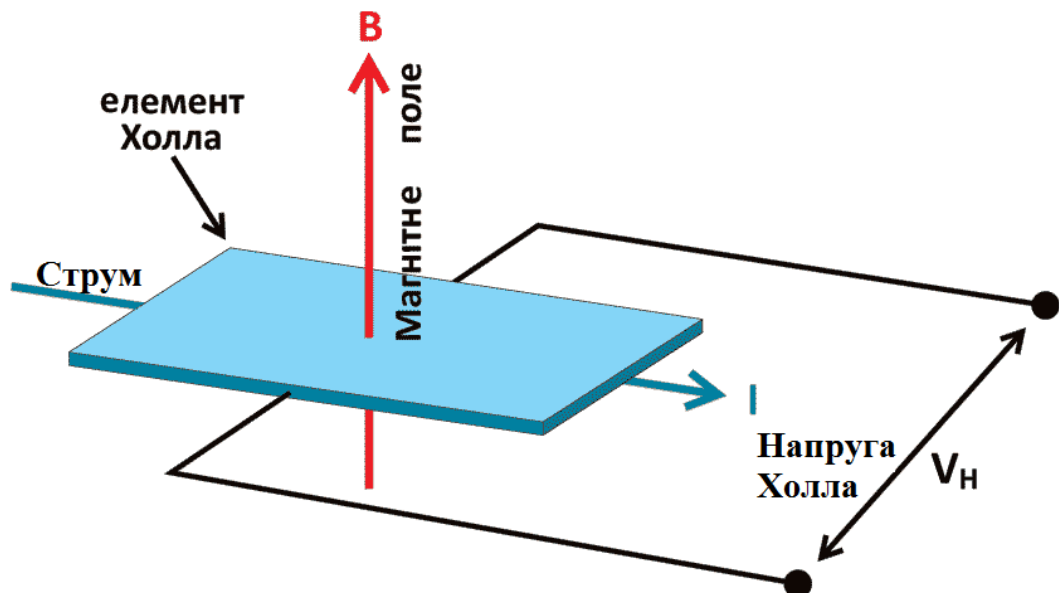


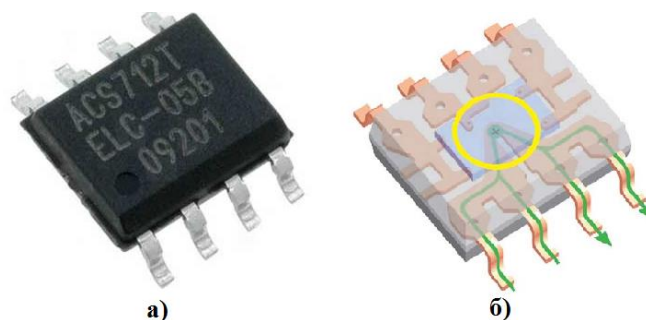
Рисунок 2.5 – Ефект Хола

У присутності магнітного поля на рухомі носії заряду (електрони) діє сила Лоренца, що змінює траєкторію руху електронів, що, в свою чергу, призводить до перерозподілу об'ємних зарядів в елементі Хола. Це викликає виникнення електрорушійної сили, яка пропорційна векторному добутку індукції B на щільність струму I і має значення порядку кількох мікрвольт [20].

Мікросхема ACS712ELECTR-20A-T випускається у компактному корпусі типу SOIC із 8 виводами, призначеному для поверхневого монтажу (рис. 2.6, а) [21]. Вона містить високоточний лінійний датчик Хола з низьким рівнем напруги зміщення та мідний провідник, розташований поблизу поверхні чипа, який виконує функцію сигнального шляху для струму (рис. 2.6, б).

Струм, що протікає через мідний провідник, створює магнітне поле, яке вловлюється інтегрованим у чип елементом Хола. Інтенсивність магнітного поля змінюється лінійно зі зміною сили струму. Вбудований формувач сигналу забезпечує фільтрацію та посилення напруги, створеної

чутливим елементом, до рівня, придатного для подальшої обробки аналогово-цифровим перетворювачем мікроконтролера [21].



а - мікросхема ACS712ELECTR-20A-T в корпусі SOIC;

б - внутрішня конструкція датчика (U – подібний мідний провідник, що проходить навколо елемента Хола).

Рисунок 2.6 – Датчик струму ACS712ELECTR-20A-T:

3.3 Вибір гальванічної розв'язки для експериментальної установки

Гальванічна розв'язка використовується в ситуаціях, коли декілька електричних кіл повинні взаємодіяти, але їхні «землі» мають різні потенціали [22]. Це дозволяє ефективно боротися з небажаними паразитними сигналами, що можуть проникати через спільні ділянки «земленого» провідника. Крім того, гальванічна розв'язка забезпечує безпеку, запобігаючи ризику ураження електричним струмом.

Гальванічна розв'язка моделі HL-7B30 має багатоканальні перетворювачі аналогових сигналів, які забезпечують індивідуальну ізоляцію до 1500 В [23]. Вона використовується для нормування сигналів постійної та змінної напруги і струму, а також для роботи з термопарами, термометрами опору, потенціометрами.

Конструктивно модулі виконані у вигляді блоків із гвинтовими з'єднаннями, що встановлюються в пластиковий корпус для монтажу на DIN-рейку (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Блок гальванічної розв’язки

Технічні характеристики гальванічної розв'язки HL-7B30 представлені в табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики гальванічної розв'язки HL-7B30

Технічні характеристики	Величина
Кількість каналів	1 – 4 , функція відмикання виходів
Діапазон частот	0..3 Гц / 0..10кГц
Похибка не лінійності не більше	0,1%
Основна похибка перетворення	$\pm 0,2 \dots \pm 0,5\%$
Напруга електричної мережі живлення	10..30 В
Блокування перешкоди загального вигляду не менше	100 дБ (50 Гц)
Потужність, що споживається не більше	0,3 Вт
Діапазон робочих температур	-10 .. + 70
Введення сигналів постійної напруги	0..100 мВ

2.4 Вибір аналогово-цифрового перетворювача для експериментальної установки

Сучасні технології збору даних активно застосовуються у багатьох галузях - від досліджень до автоматизації виробництва. Для збору даних використовуються комп'ютери з різними типами шин, такими як PCI, PXI, USB, Ethernet тощо. Деякі пристрої інтегруються в комп'ютер, тоді як інші використовуються для віддаленого збору даних через мережу Ethernet або порти [24].

Точність результатів залежить від типу сигналів: аналогових чи цифрових. Аналогові сигнали вимагають аналізу часової форми для оцінки частоти, пікових значень та інших характеристик. Для сигналів із повільною зміною важлива висока роздільна здатність, тоді як швидкі сигнали вимагають високої частоти дискретизації [24].

Синхронний обмін даними забезпечує високу швидкість передачі, але може бути ненадійним, тому часто використовується метод підтвердження. Асинхронний обмін з використанням керуючих сигналів підвищує надійність [25].

У багатьох випадках початок і завершення збору даних синхронізується із зовнішніми подіями за допомогою тригерів. Цифрові тригери узгоджують процедури збору даних із цифровими імпульсами, а аналогові тригери активують збір при досягненні заданого рівня напруги [25].

Цифрові інтерфейси в системах збору даних використовуються для керування процесами, генерації сигналів та взаємодії з периферійними пристроями. Для повільних процесів підходить асинхронний режим, який забезпечує низьку вартість обладнання [25].

Для забезпечення точності слабкі сигнали, наприклад, від термопар, потребують підсилення. Електрична ізоляція сигналів захищає комп'ютер від

високовольтних перехідних процесів, спричинених різницею потенціалів або паразитними контурами заземлення [25].

Для досліджень процесу сушіння використано USB-картку m-DAQ12. Її переваги включають безпечне підключення до працюючого комп'ютера через USB без зупинки системи, що є цінним для навчальних стендів. Підключення через Ethernet дозволяє ефективно збирати дані та керувати віддаленими об'єктами [26].

Проекти з використанням сучасних графічних інтерфейсів, таких як LabVIEW, полегшують інтеграцію і дозволяють швидко вносити зміни без залучення програмістів. Це сприяє адаптації систем до навчальних потреб [14, 27].

Мікросистема m-DAQ12 (рис.2.6) забезпечує широкий спектр функцій збору й обробки сигналів, підтримує 12-розрядний АЦП, кілька діапазонів напруги (± 10 В, ± 5 В, ± 2.5 В, ± 1.25 В), частоту дискретизації до 150 кГц у одноканальному режимі, та сумісна з багатьма зовнішніми пристроями [26]. Її компактний дизайн та висока точність роблять її універсальним рішенням для лабораторій і промислових умов [28].



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд мікросистеми m-DAQ12

Загальні технічні характеристики мікросистеми m-DAQ12 [26]:

- споживаний струм: до 250 мА (без навантаження);
- напруга живлення: через USB 2.0, підтримка HighSpeed (до 480 Мб/с);
- вологість: 5-90 % (без конденсації);
- робочий діапазон температур: 5 °С – 40 °С;
- температура зберігання: -30 °С – 70 °С;
- тип роз'єму: базова модель – DB25F, ЕОМ-версія – IDC-26;
- розміри: 60×100×28 мм, маса: до 0,35 кг.
- компактність і мала маса роблять пристрій зручним для мобільних і стаціонарних систем.

Характеристики аналогових каналів [26]:

- аналогові входи: 4 диференційних або 8 однопровідних із загальною землею;
- діапазон напруги: ± 10 В, ± 5 В, ± 2.5 В, ± 1.25 В;
- розрядність АЦП: 12 біт.

Частота дискретизації:

- багатоканальний режим: 65 Гц – 100 кГц;
- одноканальний режим: 65 Гц – 150 кГц;
- нелінійність перетворення: диференціальна – до ± 1.5 МЗР, інтегральна – до ± 1.5 МЗР;
- гранична вхідна напруга: ± 15 В відносно AGND;
- синфазне придушення (СММР):
- для ± 10 В: 92 дБ;
- для ± 5 В: 96 дБ;
- для ± 2.5 В, ± 1.25 В: 100 дБ.

Мікросистема забезпечує високу точність і стабільність вимірювань, що робить її придатною для лабораторних і промислових умов.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3.5 Вибір оптимального програмного забезпечення для збору та аналізу експериментальних даних

Підготовка сучасних інженерів неможлива без знань автоматизації, контролю фізичних процесів, вимірювання й обробки експериментальних даних. Володіння інформаційними технологіями є ключовим фактором для працевлаштування, особливо на підприємствах із впровадженням інноваційних технологій виробництва [29].

Якісна освіта забезпечує розуміння природи процесів, знання основ розрахунків, методів експериментів та аналізу даних. Інженер повинен володіти навичками роботи з виробничими засобами, системами збору та передачі даних для реальних об'єктів. Це вимагає постійного практичного навчання [29].

Більшість лабораторних баз в Україні застаріла і не відповідає сучасним вимогам. Методики вимірювань базуються на ручному зборі даних, що свідчить про фізичний і моральний знос обладнання. Необхідно створювати нові лабораторні комплекси із впровадженням сучасних інформаційно-вимірювальних систем [29].

Сучасні завдання виконуються за допомогою пристроїв, що підключаються до комп'ютера, таких як мультиметри, осцилографи, генератори сигналів, АЦП і ЦАП. Серед програмного забезпечення особливе місце займає LabVIEW – платформа для розробки віртуальних приладів, яка використовується у промисловості, освіті та науці [30].

LabVIEW – це інтуїтивно зрозумілий інструмент для вимірювань, аналізу й розробки. Завдяки графічній мові програмування G створення програм відбувається через побудову блок-схем, що скорочує час розробки. Платформа забезпечує великий набір функцій для збору даних і автоматизованого керування [30].

Основою вимірювальних систем є комп'ютер із платою АЦП/ЦАП, яка перетворює аналогові сигнали в цифрові для їх обробки або навпаки. Аналогові датчики перетворюють фізичні величини в електричні сигнали, які перед подачею на АЦП проходять модуль узгодження, що адаптує їх до відповідного формату [30].

Принципова схема блоку аналогового вводу наведена на рис.2.9.

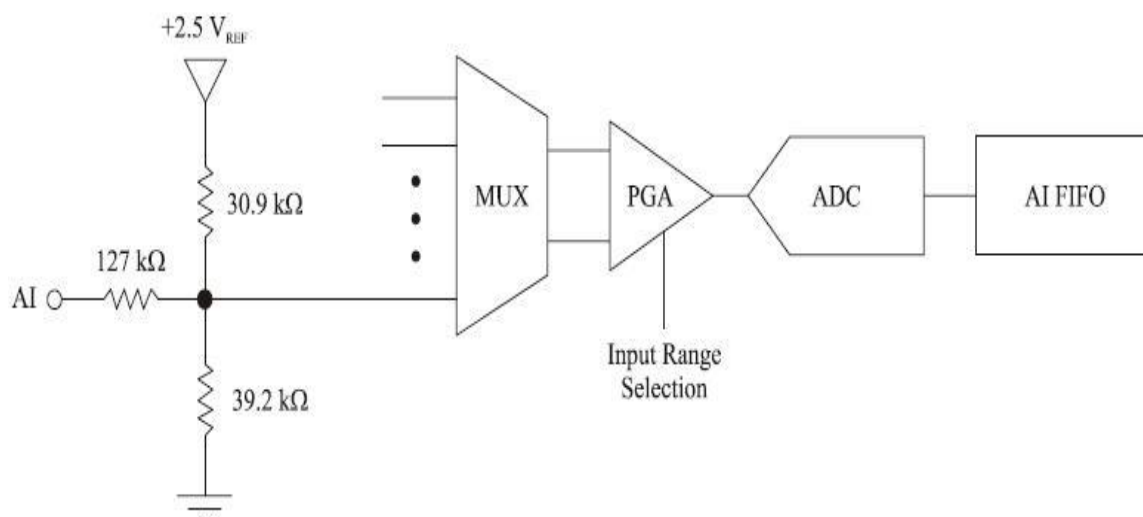


Рисунок 2.9 – Принципова схема блоку аналогового вводу

USB-пристрій збору даних оснащений аналогово-цифровим перетворювачем (ADC) для обробки сигналів. Канали аналогового введення по черзі підключаються до підсилювача з програмованим коефіцієнтом посилення (PGA) через мультиплексор.

Підсилювач PGA дозволяє налаштовувати коефіцієнт підсилення залежно від обраного режиму. У диференціальній схемі коефіцієнт може становити 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 або 20, тоді як у схемі із загальним дротом – фіксовано 1. Налаштування автоматично визначається на основі вхідного діапазону напруги, заданого в додатку A/D Converter [30].

Аналогово-цифровий перетворювач дискретизує вхідний аналоговий сигнал, перетворюючи його на цифровий код. Для уникнення втрати даних використовується буфер AI FIFO, який зберігає дані для подальшої обробки.

Буфер підтримує як одиничне, так і багаторазове перетворення, забезпечуючи точність і надійність збору даних [30].

2.6 Вибір апаратного забезпечення для обробки експериментальних даних

Встановлення вимірювальної техніки безпосередньо на об'єкті дослідження часто неможливе через великі розміри або складність об'єктів. Сучасні технології дозволяють створювати компактні пристрої, що замінюють об'ємне обладнання. Зниження вартості портативних пристроїв робить мобільні вимірювальні комплекси дедалі доступнішими та ефективнішими [26].

Сьогодні портативні комп'ютери активно використовуються у вимірювальних системах завдяки їх універсальності та мобільності. Для розширення можливостей таких пристроїв застосовують стандарти PCcard, USB, EPP та IEEE 1394 (FireWire). Ці інтерфейси забезпечують підключення додаткових модулів для збору даних, нормалізації сигналів і управління пристроями [26].

Портативні вимірювальні комплекси дозволяють виконувати широкий спектр завдань, зокрема аналіз сигналів, діагностику обладнання та керування технологічними процесами. Переваги таких систем включають можливість спостереження за сигналами, їх математичну обробку в реальному часі, запис результатів і друк [26].

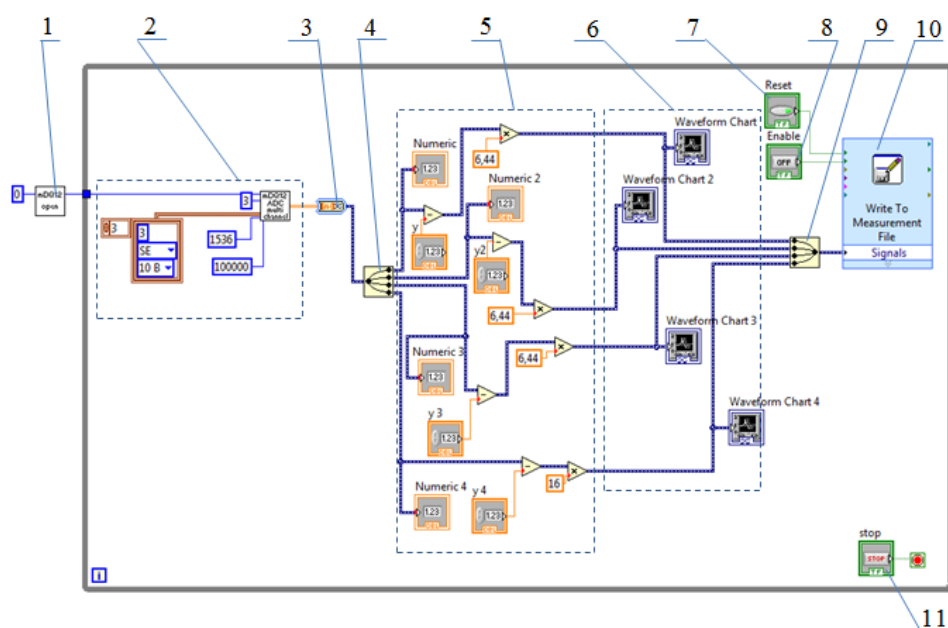
National Instruments розробила мобільні рішення серій DAQpad і DAQcard, які сумісні зі стаціонарними системами. Вони підтримують роботу з LabVIEW, LabWindows/CVI та ComponentWorks, забезпечуючи легке перенесення програм між стаціонарними та портативними платформами [26].

Комп'ютеризовані вимірювальні системи розширюють функціональні можливості користувачів, скорочують час розробки та підвищують якість

обробки даних. У наших експериментах використовується поєднання персонального комп'ютера, блоку гальванічної розв'язки та USB-перетворювача [26].

2.7 Побудова блок-діаграми віртуального приладу в програмному середовищі LabView

На початку виконання програма відкриває порт за допомогою модуля 1 (рис.2.10, аркуш [МРМА24.00.00.000ДІ2]).



1 – елемент керування портом АЦП; 2 – блок керування потоками даних з аналогово-цифрового перетворювача; 3 – елемент перетворення масиву значень в сигнал, що оброблюється; 4 – елемент розділення сигналу на окремі потоки; 5 – блок тарування сигналу; 6 – блок виведення сигналу на графічні індикатори; 7, 8 – кнопка управління записом у файл; 9 – елемент об'єднання оброблених потоків сигналу в один; 10 – блок запису даних в файл; 11 – кнопка зупинки виконання самої програми

Рисунок 2.10 – Блок-діаграма віртуального приладу в програмному середовищі LabView

Інформація про відкритий порт передається до блоку керування потоками даних з аналогово-цифрового перетворювача (2). Налаштування цього блоку здійснюється через відповідні елементи конфігурації, у яких вказуються такі параметри:

- кількість каналів АЦП, з яких потрібно зчитувати дані;
- розмір даних, що подаються у вигляді масиву з модуля 6;
- частота зчитування даних, які надходять на активні канали;
- параметри налаштування каналів, з яких отримуються дані.

Дані, що зчитуються, формуються у вигляді масиву. У спеціальному елементі перетворення цей масив перетворюється на потік даних. Це спрощує їх подальшу обробку, візуалізацію за допомогою графічних індикаторів у блоці 6, а також збереження для подальшого аналізу за допомогою блоку 9.

Оскільки дані зчитуються з чотирьох незалежних каналів, їх спочатку розділяють на два окремі потоки за допомогою елемента 4. Після цього кожен із потоків тарується та виводиться на графічні індикатори. Тарування здійснюється в блоці 5 шляхом виконання арифметичних перетворень із використанням відповідних коефіцієнтів. Для виставлення сигналу на нульове значення застосовується операція віднімання.

Після виконання всіх необхідних перетворень сигнали знову об'єднуються в один потік за допомогою елемента 9 і передаються до блоку 10 для запису значень у файл. Робота блоку запису керується кнопками 7 та 8. Для завершення виконання програми використовується кнопка 11 [26].

Лицьова панель віртуального приладу в програмі LabView представлена на рис.2.11.



Рисунок 2.11 – Лицьова панель віртуального приладу в програмі LabView

2.8 Опис експериментальної установки для дослідження текстильних матеріалів

На рис.2.12 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДІЗ]) зображено фото розробленої експериментальної установки для сушіння текстильних матеріалів.

До основних компонентів установки належать:

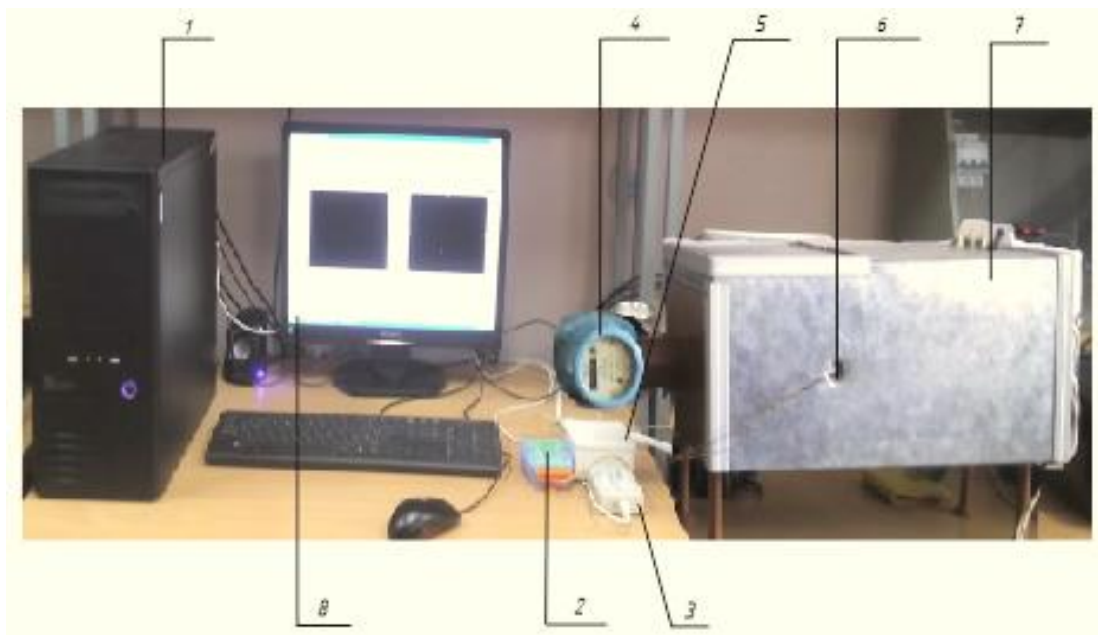
1-системний блок (1) – центральний елемент керування та обробки даних;

2-гальванічна розв'язка (2) – для безпечного обміну сигналами між пристроями з різними потенціалами;

3-аналогово-цифровий перетворювач (3) – для оцифрування аналогових сигналів;

4-газовий лічильник (4) – використовується для вимірювання витрат повітряного потоку;

- 5-дільник напруги (5) – регулює напругу для датчиків;
- 6-датчик температури (6) – вимірює температуру повітря або матеріалу;
- 7-сушарка (7) – пристрій для сушіння текстильних матеріалів;
- 8-монітор (8) – відображає дані та результати експериментів.



- 1 - системний блок, 2 - розв'язка гальванічна; 3 - АЦП; 4 - газовий лічильник;
 - 5 - дільник напруги, 6 - датчик температури; 7 - сушарка; 8 – монітор
- Рисунок 2.12 - Експериментальна установка для сушіння текстильних матеріалів:

2.9 Висновки до другого розділу

1. Для забезпечення вимірювання динамічних параметрів, які досліджуються за допомогою експериментального стенду, було ретельно підібрано технічні пристрої та вимірювальні елементи. Серед них: аналогово-цифровий перетворювач, блок гальванічної розв'язки, комп'ютер, дільник напруги, датчик струму та датчик температури. Такий вибір обґрунтований

технічними вимогами досліджуваного процесу та забезпечує ефективність виконання експериментів.

2. Завдяки оснащенню експериментального стенду сучасною технічною апаратурою та інтеграції програмного забезпечення **LabView**, досягається висока точність вимірювань, що відповідає сучасним стандартам наукових досліджень.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНВЕКТИВНОЇ СУШАРКИ

3.1 Розробка плану експериментальних досліджень процесу сушіння

Розроблено план експериментальних досліджень сушіння білизни [31]. Метою досліджу є визначення впливу змінних параметрів роботи сушарки на якісні та кількісні показники процесу сушіння, а також підбір оптимальних режимів для роботи з певними типами тканин.

Змінними параметрами є час сушіння, температура нагрівача та тип матеріалу. Вихідними параметрами визначено масу залишкової вологи в тканині, швидкість сушіння (г/сек) та витрати повітря, яке проходить через сушильну камеру.

Дослідження проводилися з урахуванням температури нагрівального елемента та часу сушіння. Варіювання цих параметрів здійснювалося шляхом зміни напруги живлення нагрівального елемента. Отримані результати дозволяють встановити залежності між вхідними параметрами та ефективністю сушіння для різних типів тканин.

3.2 Методологія виконання експериментальних досліджень процесу сушіння

Для експериментальних досліджень сушіння використовували текстильні матеріали. Методика проведення експериментів включає наступні етапи.

1. Зважування сухого зразка (приблизно 10-20 г) з наступним замочуванням його у ванні з водою.

2. Після насичення вологою матеріал злегка віджимають і поміщають на ваги, фіксуючи початкову масу зволоженого зразка.

3. За допомогою перемикачів встановлюють необхідний режим живлення нагрівального елемента, після чого сушильна установка прогрівається до сталої максимальної температури обраного режиму.

4. Зволожений зразок розміщують у сушильній камері установки.

5. У сушильну камеру встановлюють два датчики температури КТУ81-210: один для вимірювання температури всередині матеріалу, другий – для фіксації температури в камері.

6. Фіксують початкові показники витрат повітря за допомогою газового лічильника РЛ-6.

7. У програмному середовищі LabVIEW запускають запис процесу сушіння, натиснувши на кнопку 1 (рис. 3.1).

8. Зважують матеріал через одну хвилину.

9. Матеріал вважається висушеним тоді, коли його вага досягає значення початкового значення сухого матеріалу.

10. Зупинка запису процесу сушіння виконують натисканням кнопки 2 (рис. 3.1).

11. Повна зупинка запису процесу здійснюється кнопкою 1 (рис.3.1).

Ця методика дозволяє з високою точністю вимірювати параметри процесу сушіння та аналізувати результати.



1 – кнопка початку та завершення запису процесу сушіння;

2 – кнопка зупинки запису процесу.

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд робочих кнопок програми:

3.3 Калібрування датчиків для забезпечення точності вимірювань

У експериментальній установці застосовуються датчики, які генерують вихідну напругу, що відображається в робочому вікні програмного середовища LabVIEW [26]. Ця напруга відповідає вимірюваній фізичній величині, проте для отримання коректних значень фізичної величини на графіку датчики потребують тарування.

Тарування виконується шляхом застосування арифметичних перетворень з урахуванням відповідних коефіцієнтів тарування. Ці коефіцієнти дозволяють перевести значення напруги у відповідні одиниці вимірюваної фізичної величини, що забезпечує точність та зручність аналізу експериментальних даних.

3.3.1 Тарування датчиків температури

Під час експерименту температура вимірюється за допомогою термопари, а напруга – з датчиків. Для кожного значення напруги фіксується відповідна температура, після чого отримані дані заносяться до таблиці в MS Excel.

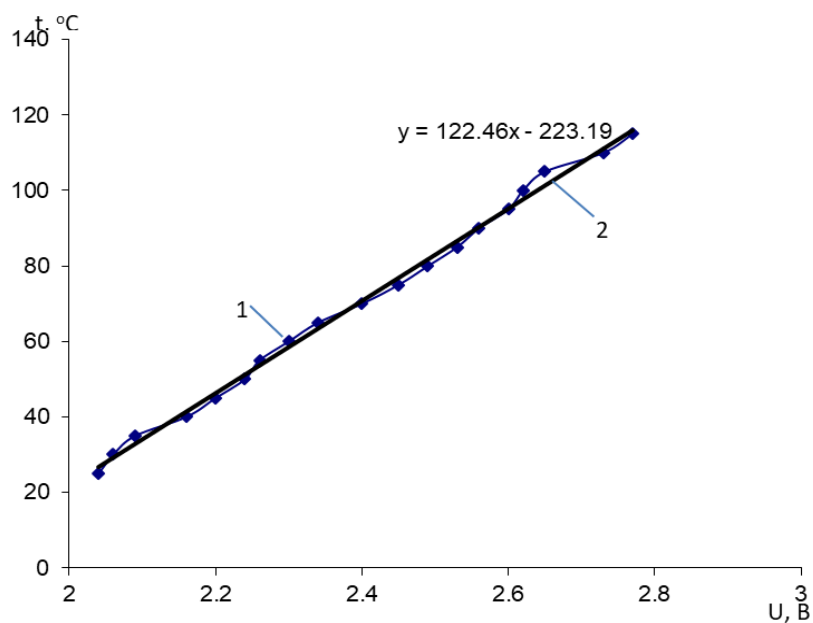
На основі цих даних будується графік залежності температури від напруги. Як правило, отримана залежність є майже лінійною.

Для визначення рівняння прямої, що відображає тарування датчика, використовується функція Microsoft Excel «побудова лінії тренда». Ця функція дозволяє не лише побудувати лінію тренда, але й отримати рівняння прямої, що визначає залежність температури від напруги, яке використовується для коректного перетворення сигналу датчика в температурні значення.

Дані для тарування датчиків температури наведено в табл.3.1, а графік побудови залежності рівня напруги від температури на рис.3.2.

Таблиця 3.1 – Дані для тарування датчиків температури

t, °C	U, В
25	2,04
0	2,06
5	2,09
0	2,16
5	2,2
0	2,24
5	2,26
0	2,3
5	2,34
0	2,4
5	2,45
0	2,49
5	2,53
0	2,56
5	2,6
00	2,62
05	2,65
10	2,73



1 – рівень напруги датчика; 2 – лінія тренде.

Рисунок 3.2 – Графік побудови залежності рівня напруги від температури:

3.3.2 Тарування датчика струму

Для вимірювання струму в експерименті використовується лабораторний автотрансформатор (ЛАТР). Одночасно з цим знімаються показники напруги з відповідного датчика. Для кожного значення струму фіксується відповідне значення напруги, яке потім заноситься до таблиці в програмному середовищі MS Excel.

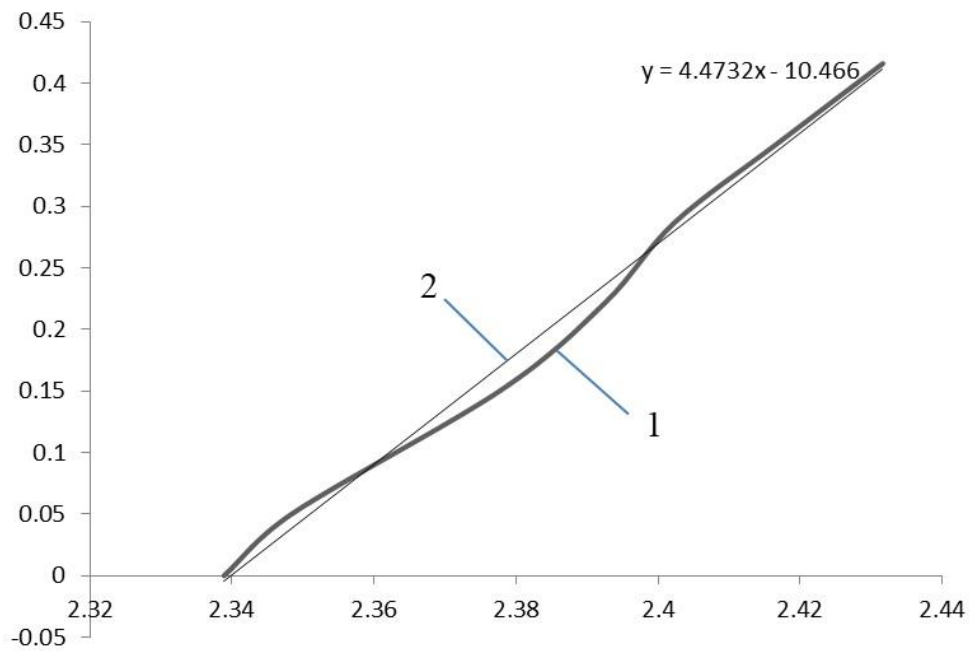
На основі отриманих даних будується графік залежності струму від напруги. Зазвичай ця залежність є практично лінійною.

Для визначення рівняння, яке описує цю залежність, використовується функція «побудова лінії тренда» в Microsoft Excel. Ця функція дозволяє додати на графік лінію тренда та отримати рівняння прямої, яке використовується для тарування датчика і перетворення його вихідного сигналу в значення струму.

Дані отримані для тарування датчика струму наведено в табл.3.2, а графік залежності рівня напруги від струму – на рис.3.3.

Таблиця 3.2 – Дані отримані для тарування датчика струму

X	Y
2,324219	0,051
2,363281	0,151
2,382812	0,222
2,392578	0,287
2,407227	0,352
2,416992	0,416



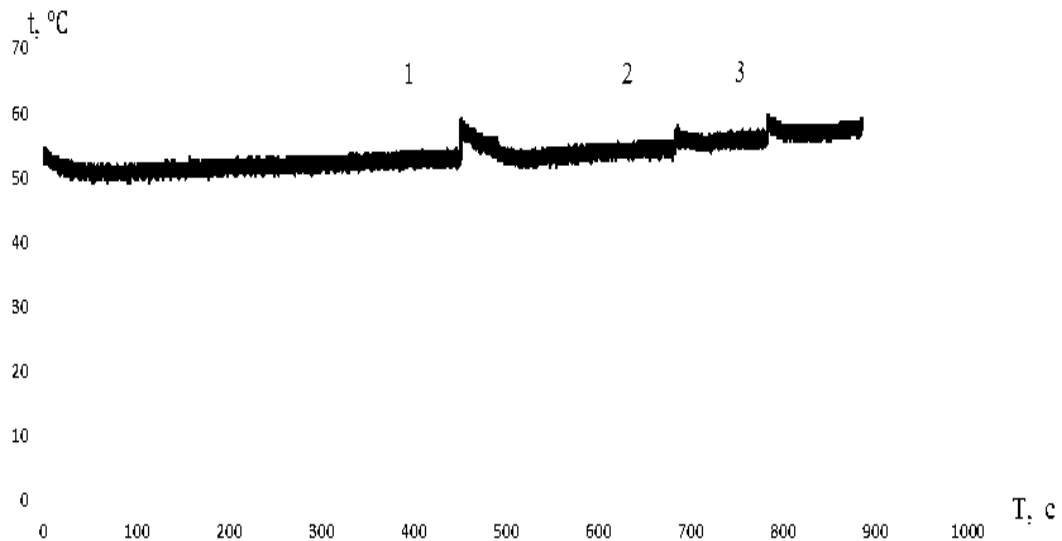
1 – рівень напруги датчика; 2 – лінія тренду

Рисунок 3.3 – Графік залежності рівня напруги від струму

3.4 Виконання експериментальних досліджень

Під час проведення експериментів було виконано аналіз процесу сушіння та визначено оптимальні температурні режими для різних типів тканин.

Дослідження сушіння пальтової тканини за умов використання одного нагрівального елемента (ТЕНу) продемонструвало, що цей температурний режим є неефективним. Причиною є недостатня температура, що призводить до значного збільшення тривалості процесу сушіння. Такий висновок підтверджується отриманими результатами, наведеними на графіку (рис. 3.4, аркуш [МРМА24.00.000.ДД]).



1,2,3 – планове зважування матеріалу.

Рисунок 3.4 – Графік процесу сушіння тканини (пальтова) при температурному режимі одного ТЕНу

Хоча цей температурний режим має низькі енергетичні витрати, значна тривалість сушіння робить його непридатним для промислового використання. У зв'язку з цим було проведено дослідження сушіння пальтової тканини за умов використання двох нагрівальних елементів (ТЕНів), результати якого представлені на графіку (рис. 3.5), а також за умов використання трьох ТЕНів, результати якого наведені на графіку (рис. 3.6).

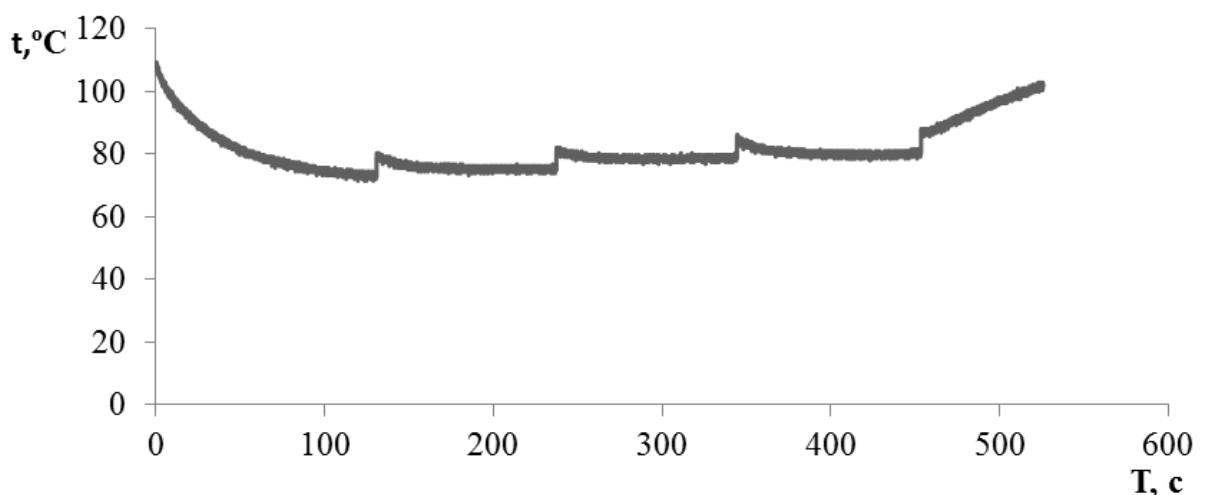


Рисунок 3.5 – Графік процесу сушіння тканини (пальтова) при температурному режимі двох ТЕНів

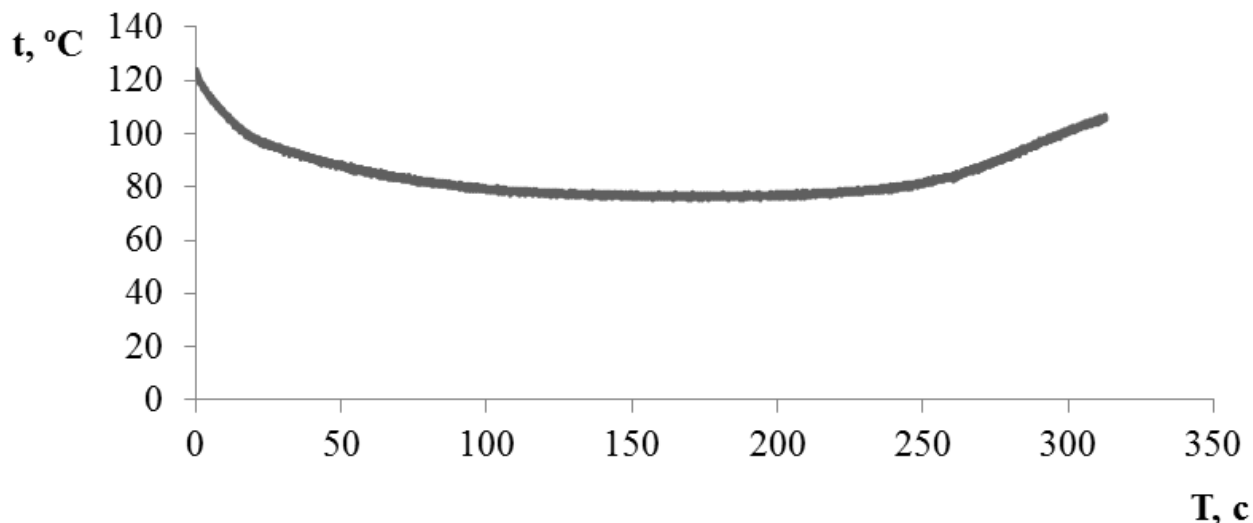
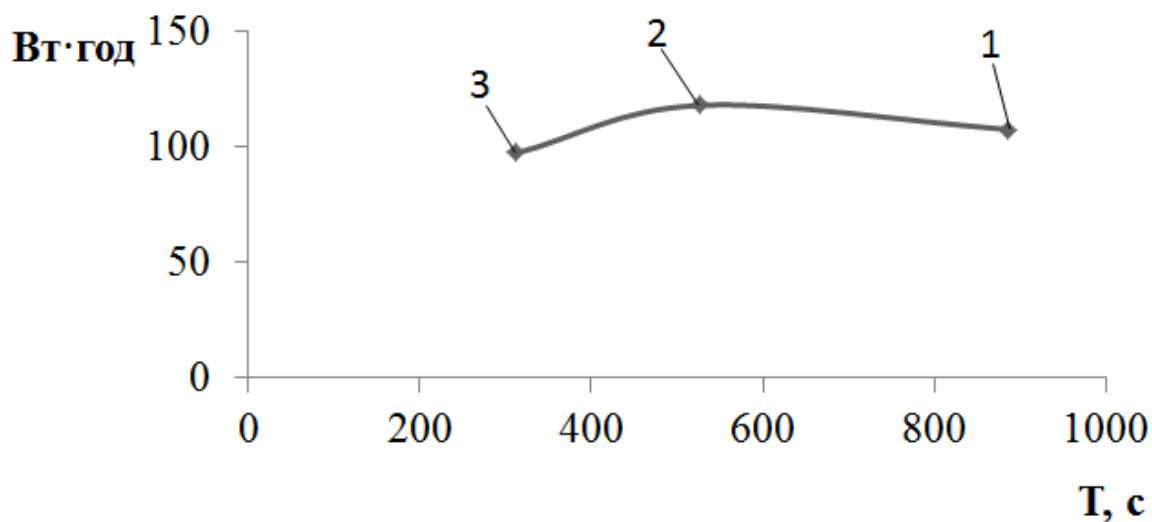


Рисунок 3.6 – Графік процесу сушіння тканини (пальтова) при температурному режимі трьох ТЕНів

Результати розрахунків підтвердили, що найефективнішим і найекономічнішим температурним режимом для сушіння пальтової тканини є використання трьох нагрівальних елементів (ТЕНів), як показано на графіку (рис. 3.7).



1,2,3 – температурні режими сушіння

Рисунок 3.7 – Графік залежності енергетичних витрат від часу для сушіння тканини (пальтової):

Проведені експерименти для бавовняної тканини показали, що при температурному режимі із застосуванням одного ТЕНа процес сушіння триває надто довго (рис. 3.8). Хоча цей режим характеризується низькими енергетичними витратами, він є малоефективним через значну тривалість сушіння.

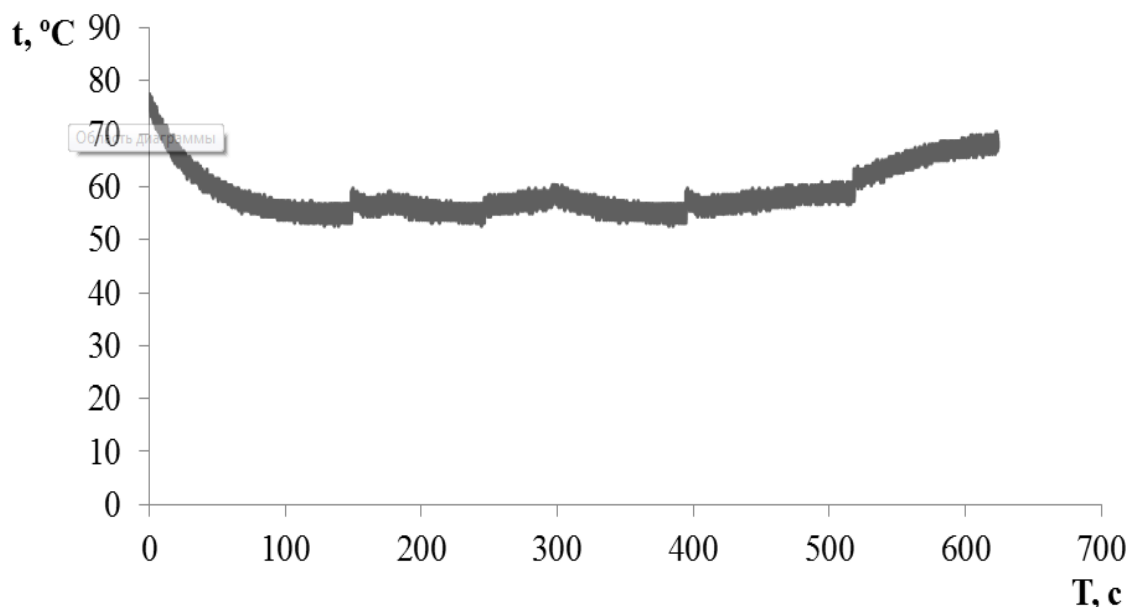


Рисунок 3.8 – Графік процесу сушіння тканини (бавовняної) при температурному режимі одного ТЕНу

Для бавовняної тканини найоптимальнішим виявився температурний режим із застосуванням двох ТЕНів. У цьому режимі процес сушіння триває помірний час, забезпечуючи баланс між ефективністю та низькими енергетичними затратами (рис. 3.9).

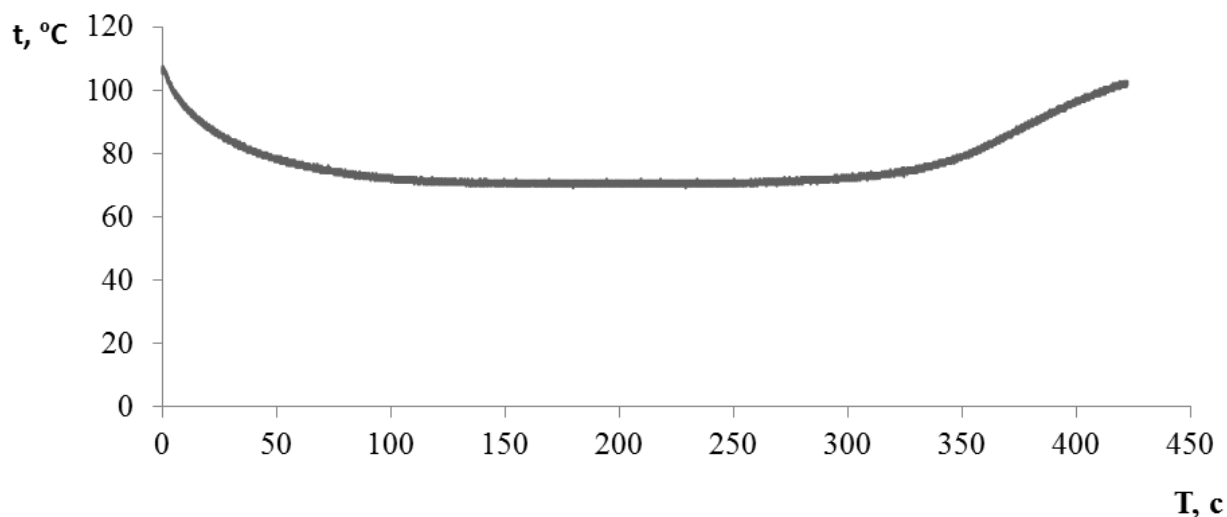


Рисунок 3.9 – Графік процесу сушіння тканини (бавовняної) при температурному режимі двох ТЕНів

Результати дослідження сушіння бавовняної тканини показали, що температурний режим із використанням трьох ТЕНів (рис. 3.10) є неефективним, оскільки не забезпечує оптимального співвідношення між тривалістю процесу та енергетичними затратами.

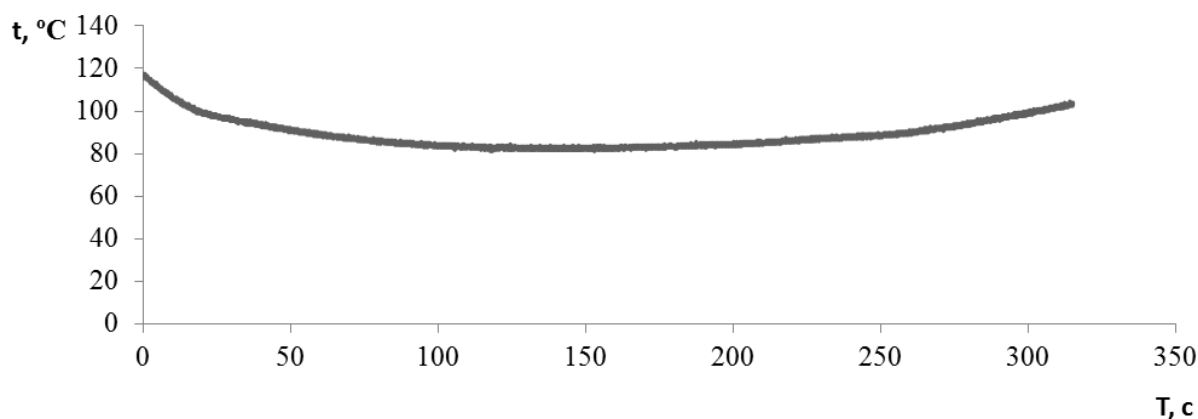
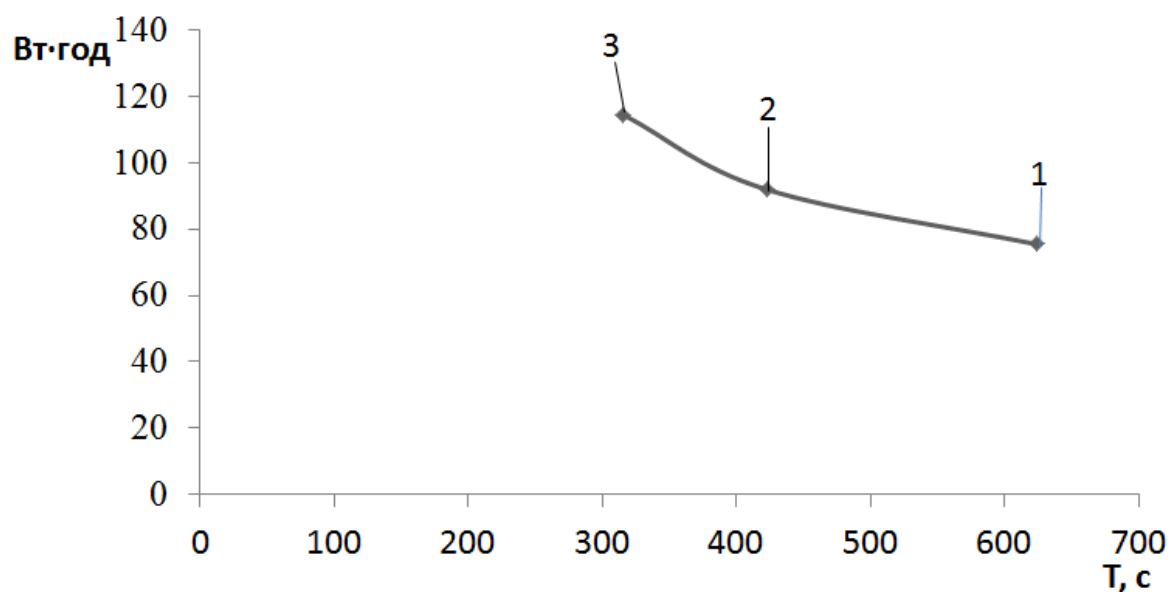


Рисунок 3.10 – Графік процесу сушіння пальтової тканини при температурному режимі трьох ТЕНів

Аналіз отриманих результатів експериментів і розрахунок оптимального режиму сушіння бавовняної тканини дозволив зробити

висновок, що найкращим є температурний режим із використанням двох ТЕНів (рис. 3.11). Застосування одного ТЕНа, хоч і є енергетично економним, вимагає занадто тривалого часу сушіння. Використання трьох ТЕНів, навпаки, призводить до надмірних енергетичних витрат. Тому режим із двома ТЕНами забезпечує оптимальний баланс між тривалістю процесу та енергоефективністю.



1,2,3 – температурні режими сушіння

Рисунок 3.11 – Графік залежності енергетичних витрат від часу для сушіння тканини (бавовняної):

Проведені експерименти зі сушіння лляної тканини в першому температурному режимі із використанням одного ТЕНа показали стабільно тривалий час виконання процесу (рис. 3.12).

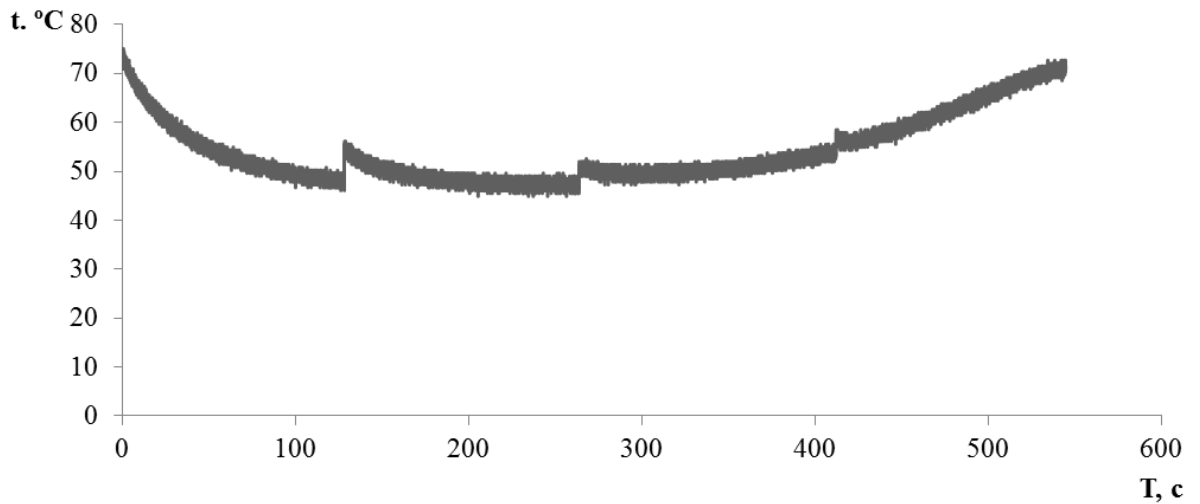


Рисунок 3.12 – Графік процесу сушіння тканини (ляна)
при температурному режимі одного ТЕНу

Під час дослідження температурного режиму із застосуванням двох ТЕНів було встановлено, що процес сушіння відбувається за відносно короткий час, а енергозатрати залишаються помірними (рис. 3.13).

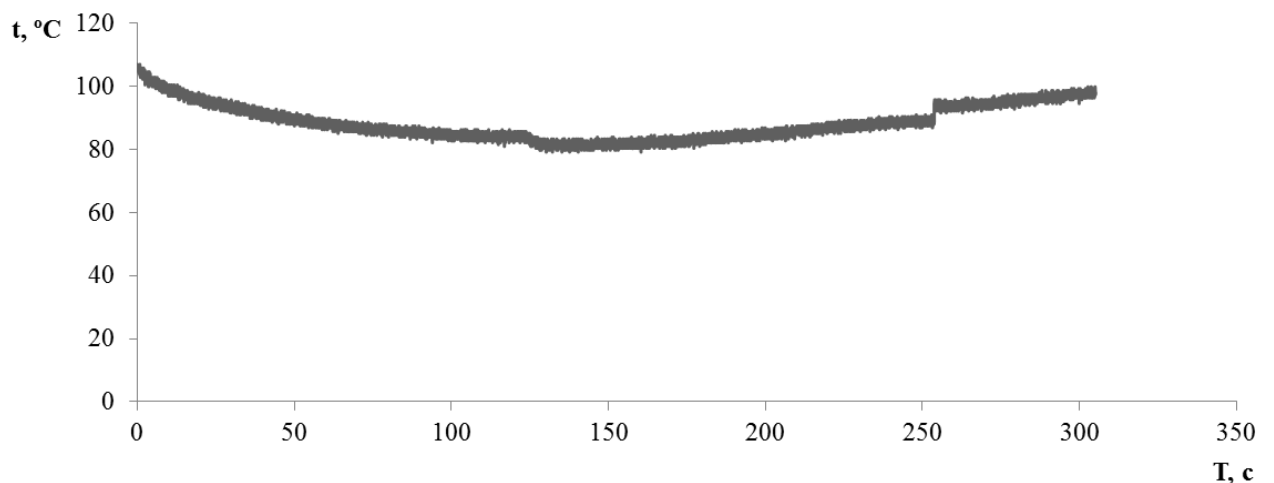


Рисунок 3.13 – Графік процесу сушіння тканини (ляної)
при температурному режимі двох ТЕНів

Дослідження температурного режиму сушіння ляної тканини із застосуванням трьох ТЕНів показало, що час сушіння є наближеним до

результатів, отриманих при використанні двох ТЕНів, однак енергозатрати значно зростають (рис. 3.14).

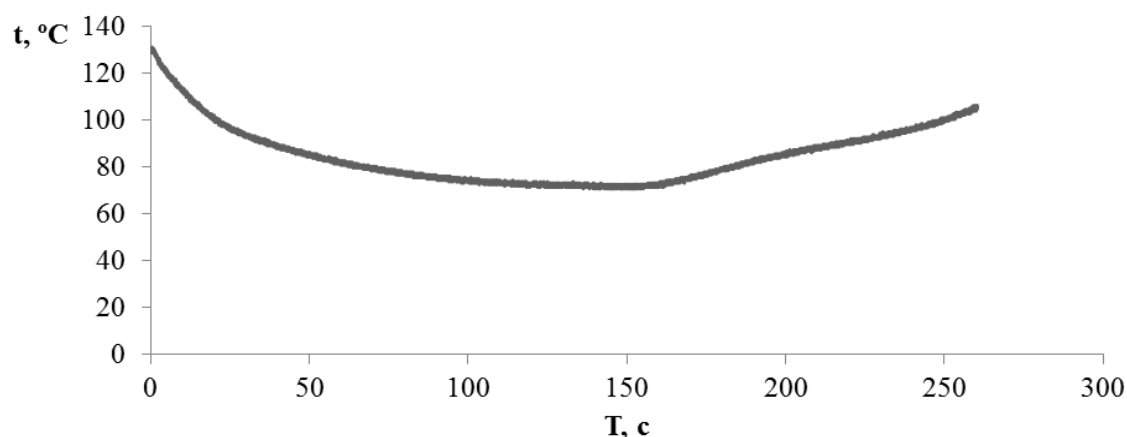
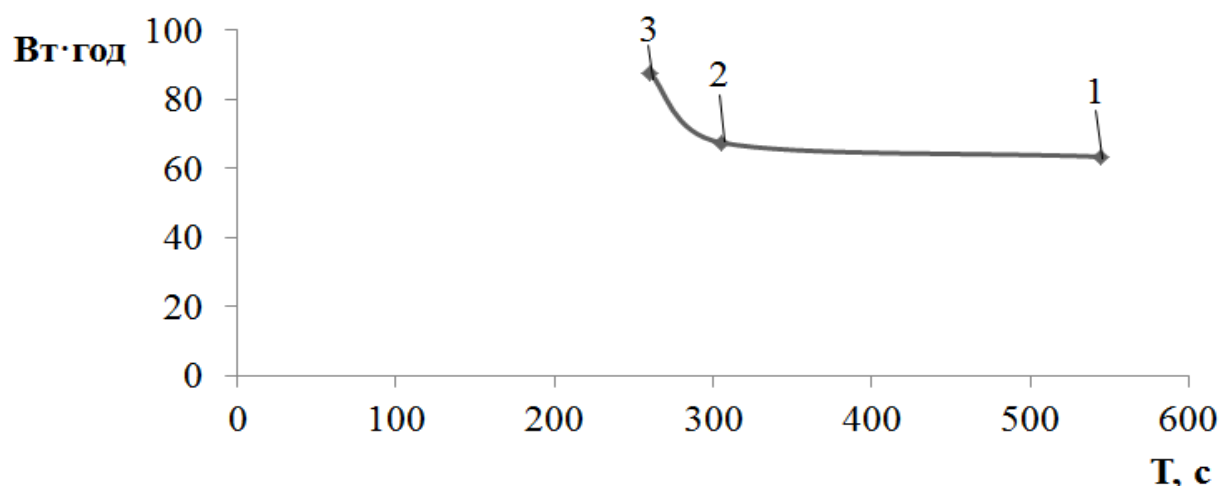


Рисунок 3.14 – Графік процесу сушіння тканини (ляної) при температурному режимі трьох ТЕНів

Аналіз даних, отриманих у результаті експериментів, дозволяє зробити висновок, що найефективнішим режимом для сушіння ляної тканини є другий режим із застосуванням двох ТЕНів. Цей варіант є найбільш оптимальним для даного типу тканини з точки зору співвідношення часу сушіння та енергозатрат (рис. 3.15).



1,2,3 – температурні режими сушіння.

Рисунок 3.15 – Графік залежності енергетичних витрат від часу для сушіння тканини (ляної):

3.5 Оцінка та узагальнення експериментальних результатів

Для проведення експериментальних досліджень було обрано три типи тканин: бавовняну, пальтову та лляну. Розмір зразків цих матеріалів становив 130×100 мм.

1. На сушарку надходить зволожена бавовняна тканина масою m_1 . Після завершення сушіння маса матеріалу становить m_2 . У такому разі масу видаленої вологи в процесі сушіння можна визначити за формулою:

$$m_{\text{вл.б}} = m_1 - m_2, \quad (3.1)$$

де $m_{\text{вл}}$ - маса вологи, що видалена;

m_1 - маса зволоженого матеріалу, $m_1 = 0,011$ кг ;

m_2 - маса матеріалу висушеного, $m_2 = 0,005$ кг ;

Відповідно буде:

$$m_{\text{вл.б}} = 0,011 - 0,005 = 0,006 \text{ кг.}$$

Тоді питомі затрати теплоти визначатимуться за формулою:

$$q_{\text{м.б}} = \frac{M_2 C_2 (T_{\text{к.м}} - T_{\text{п.м}})}{m_{\text{вл}}} \quad (3.2)$$

де $C_{2б}$ - питома теплоємність бавовни, $C_2 = 1.3$ Дж/кг·град;

$T_{\text{к.м}}$ - кінцева температура у матеріалі, $T_{\text{к.м}} = 103^\circ \text{C}$;

$T_{\text{п.м}}$ - початкова температура у матеріалі, $T_{\text{п.м}} = 77^\circ \text{C}$;

$$q_{m.e} = \frac{0,005 \times 1,3(103 - 77)}{0,0059} = 28,6 \text{ Дж/кг.}$$

Визначимо також питому витрату повітря що характеризує кількість повітря необхідну на видалення 1 кг вологи:

$$l_{\delta} = \frac{L}{W}, \quad (3.3)$$

де L - витрати кг сухого повітря, $L = 0,18 \text{ м}^3$, з посібника встановлюємо що 1 м^3 повітря = 1.29 кг;

W - кількість вологи, яка видалена із матеріалу, що дорівнює $m_{\text{вл.б}}$.

Відповідно отримуємо:

$$L = 0,18 \times 1,29 = 0,232 \text{ кг сухого повітря,}$$

$$l_e = \frac{0,232}{0,0059} = 39,356 \text{ кг.}$$

2. Для пальтової тканини, що складається з вовни (70%) та поліестеру (30%), маса видаленої вологи в сушарці визначається за формулою:

В сушарці маса видаленої вологи визначається за формулою:

$$m_{\text{вл.н}} = m_1 - m_2,$$

де m_1 - маса матеріалу зволоженого, $m_1 = 0,010$ кг;

m_2 - маса матеріалу висушеного, $m_2 = 0,04$ кг;

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$m_{вл.п} = 0,010 - 0,004 = 0,006 \text{ кг.}$$

Виходячи з цього питомі витрати теплоти складають:

$$q_{м.п} = \frac{M_{2п} C_{2п} (T_{к.м} - T_{п.м})}{m_{вл.м}},$$

де C_2 - питома теплоємність матеріалу (пальтового), відповідно складає $C_{вовна} = 1,3$, $C_{поліестр} = 0,8$, в співвідношенні відсотків складу матеріалу теплоємність тканини (пальтової) складає $C_n = 1,5$ Дж/кг·град;

$T_{к.м}$ - кінцева температура в матеріалі, $T_{к.м} = 102^\circ \text{C}$;

$T_{п.м}$ - початкова температура в матеріалі, $T_{п.м} = 77^\circ \text{C}$.

Відповідно можна записати:

$$q_{м.е} = \frac{0,004 \times 1,5 \cdot (102 - 77)}{0,0059} = 25,42 \text{ Дж/кг.}$$

Питомі витрати повітря, які характеризують кількість повітря, необхідного для видалення 1 кг вологи, визначаються за формулою:

$$l_n = \frac{L}{W},$$

де L - кількість витраченого кг сухого повітря, $L = 0,175 \text{ м}^3$;

W - кількість вологи видаленої з матеріалу, що дорівнює $m_{вл}$.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

З технічної літератури визначаємо, що 1 м^3 повітря = 1.29 кг. З цього випливає наступне:

$$L = 0,175 \times 1,29 = 0,225 \text{ кг сухого повітря.}$$

Відповідно отримаємо:

$$l_e = \frac{0,225}{0,0059} = 38,136 \text{ кг.}$$

3. Для визначення маси видаленої вологи в сушарці для лляної тканини використовують наступну формулу:

$$m_{\text{вл.л}} = m_1 - m_2,$$

де m_1 - маса матеріалу зволоженого, $m_1 = 0,007$ кг;

m_2 - маса матеріалу сухого, $m_2 = 0,003$ кг;

$$m_{\text{л}} = 0,007 - 0,003 = 0,004 \text{ кг.}$$

Відповідно питомі затрати теплоти знаходяться за формулою:

$$q_{\text{м.л}} = \frac{M_{2\text{л}} C_{2\text{л}} (T_{\text{к.л}} - T_{\text{п.л}})}{m_{\text{вл.л}}},$$

де C_2 - питома теплоємність матеріалу (льон), що складає

$$C_{\text{льон}} = 1,8 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град};$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$T_{к.м}$ - кінцева температура в матеріалі, $T_{к.м} = 104^{\circ} C$;

$T_{п.м}$ - початкова температура в матеріалі, $T_{п.м} = 71^{\circ} C$;

$$q_{м.е} = \frac{0,003 \times 1,8 \cdot (104 - 71)}{0,004} = 44,55 \text{ Дж/кг.}$$

Для визначення питомих витрат повітря, необхідних для видалення 1 кг вологи, використовується формула:

$$l_n = \frac{L}{W},$$

де W - кількість вологи видаленої з матеріалу, що складає $m_{вл}$;

L - витрати кг сухого повітря, $L = 0,18 м^3$, з технічної літератури визначаємо, що $1 м^3$ повітря = 1.29 кг.

Відповідно отримаємо:

$$L = 0,18 \times 1,29 = 0,2322 \text{ кг сухого повітря,}$$

$$l_e = \frac{0,2322}{0,004} = 58,05 \text{ кг.}$$

3.6 Теоретичний аналіз та розрахунок параметрів процесу

Питомі витрати теплоти для ідеальних умов роботи сушильної установки, без урахування втрат, визначаються за формулою:

для тканини (бавовна):

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$q_{м.а.б} = \frac{0,005 \times 1,3 \cdot (110 - 80)}{0,006} = 32,5 \text{ Дж/кг},$$

для тканини (пальтова):

$$q_{м.а.п} = \frac{0,004 \times 1,5 \cdot (110 - 80)}{0,006} = 30 \text{ Дж/кг},$$

для тканини (льон):

$$q_{м.а.л} = \frac{0,003 \times 1,5 \cdot (110 - 80)}{0,004} = 40,5 \text{ Дж/кг}.$$

Питомі витрати повітря, необхідні для видалення 1 кг вологи без урахування втрат, обчислюються за формулою:

для тканини (бавовна):

$$l_{а.б} = \frac{0,245}{0,006} = 40,83 \text{ кг},$$

для тканини (пальтова):

$$l_{а.п} = \frac{0,245}{0,006} = 40,83 \text{ кг},$$

для тканини (льон):

$$l_{а.л} = \frac{0,245}{0,004} = 61,25 \text{ кг}.$$

3.7 Розрахунок похибки експериментальних даних

Здійснимо озрахунок похибки питомої теплоти за формулою:

$$\delta_q = q_{m.a} - q_{m.e}; \Delta = \frac{\delta_q}{q_{m.e}} \times 100\%; \quad (3.6)$$

Підставивши значення отримаємо:

для тканини (бавовна):

$$\delta_{q.b} = 32,5 - 28,6 = 3,9; \Delta = \frac{3,9}{28,6} \times 100\% = 13,6\%$$

для тканини (пальтова):

$$\delta_{q.n} = 30 - 25,42 = 4,58; \Delta = \frac{4,58}{30} \times 100\% = 15,27\%$$

для тканини (льон):

$$\delta_{q.l} = 44,55 - 40,5 = 4,05; \Delta = \frac{4,05}{40,5} \times 100\% = 10\%$$

Розрахунок середньої похибки питомих витрат теплоти здійснюємо за наступною формулою::

$$\Delta_c = (\delta_{q.b} + \delta_{q.n} + \delta_{q.l}) / n_{\delta}; \quad (3.7)$$

де n_{δ} – кількість зразків, що випробовувалися;

$$\Delta_c = (13,6 + 15,27 + 10) / 3 = 12,96\% .$$

Розрахунок похибки питомих витрат повітря проводимо за наступним виразом:

$$\delta_l = l_a - l_e; \Delta = \frac{\delta_l}{l_e} / 100\%; \quad (3.8)$$

для тканини (бавовна):

$$\delta_{l.b} = 40,83 - 39,36 = 1,47; \Delta = \frac{1,47}{39,36} \times 100\% = 3,74\% ,$$

для тканини (пальтова):

$$\delta_{l.n} = 40,83 - 38,136 = 2,694; \Delta = \frac{2,694}{38,136} \times 100\% = 7,06\% ,$$

для тканини (льон):

$$\delta_{l.l} = 61,25 - 58,05 = 3,2; \Delta = \frac{3,2}{58,05} \times 100\% = 5,51\%$$

Розрахунок середньої похибки питомої витрати повітря здійснюємо за наступним виразом:

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta_c = (\delta_{l.б} + \delta_{l.п} + \delta_{l.л}) / n_{\delta l}, \quad (3.9)$$

де $n_{\delta l}$ – кількість експериментів, що були проведені;

$$\Delta_c = (3,74 + 7,06 + 5,51) / 3 = 5,44\%$$

3.8 Практичне впровадження та перевірка отриманих результатів

За результатами виконаної магістерської роботи були розроблені методичні вказівки для проведення лабораторної роботи з курсу «Хіміко-технологічні процеси та обладнання». Лабораторна робота охоплює всі основні етапи дослідження процесів сушіння, включаючи вимірювання параметрів, аналіз отриманих даних і визначення оптимальних режимів сушіння для різних матеріалів. Докладний опис лабораторної роботи, включаючи інструкції для студентів і необхідні експериментальні процедури, наведено в додатку Б.

У розділі "Мета" формулюється завдання, яке необхідно виконати в межах лабораторної роботи.

Розділ «Знати» містить інформацію про теоретичні знання, які студенту необхідно засвоїти для успішного виконання завдання.

У пункті «Уміти» зазначено практичні навички, які студент повинен освоїти, щоб виконати розрахунки основних параметрів досліджуваного процесу.

Розділ «Обладнання, матеріали, прилади, інструменти» перелічує всі необхідні елементи, що застосовуються під час проведення лабораторної роботи.

У пункті «Основні визначення і теорія процесу» наводиться теоретичне підґрунтя, яке розкриває основи досліджуваного процесу та ключові поняття.

«Порядок виконання роботи» докладно описує послідовність дій, які студент повинен здійснити для виконання завдання.

Розділ «Обробка результатів вимірювань» передбачає виконання всіх необхідних розрахунків для аналізу даних, отриманих під час роботи.

У розділі «Зміст звітної інформації» визначаються обов'язкові пункти, які мають бути включені до оформлення звіту.

«Контрольні питання» містять перелік питань, відповіді на які сприяють кращому розумінню теоретичного та практичного матеріалу, забезпечуючи якісне засвоєння теми.

Ця структура чітко окреслює кожен аспект лабораторної роботи, сприяючи її ефективному виконанню та глибокому засвоєнню матеріалу.

3.9 Висновки до третього розділу

1. Для визначення оптимальних умов сушіння зволжених тканин було виконано розрахунки питомих витрат тепла та повітря, необхідних для забезпечення ефективного процесу.

2. У ході досліджень для кожного типу тканини було визначено оптимальний температурний режим:

- пальтова тканина: найефективніший температурний режим досягається при використанні трьох ТЕНів;

- бавовняна тканина: оптимальним є температурний режим із застосуванням двох ТЕНів;

- лляна тканина: найкращий результат отримано при використанні двох ТЕНів.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено детальний огляд технічної літератури, присвяченої розрахункам і дослідженням процесів сушіння. Проведено аналіз конструкцій конвективних сушарок, який дозволив визначити основні принципи їх роботи.

При моделюванні технологічного процесу конвективного сушіння зволоженого матеріалу було аналітично описано основні параметри, зокрема питомі витрати тепла та повітря, необхідні для виконання процесу. Розроблена математична модель технологічного процесу сушіння зв'язує властивості матеріалу, параметри основних вузлів сушарки та показники якості операції сушіння.

На основі аналізу динамічних параметрів, які потрібно вимірювати на експериментальному стенді, обрано технічні пристрої та вимірювальні елементи, серед яких: аналогово-цифровий перетворювач, блок гальванічної розв'язки, комп'ютер, дільник напруги, а також датчики струму і температури.

Завдяки оснащенню експериментального стенду сучасним обладнанням і програмним забезпеченням LabVIEW, вдалося виконати вимірювання з високою точністю, що відповідає сучасним вимогам науки.

Для визначення оптимального температурного режиму сушіння зволожених тканин проведено серію розрахунків питомих витрат тепла та повітря. За результатами експериментів було визначено оптимальні режими для кожного типу тканини:

- пальтова тканина: оптимальний температурний режим при використанні трьох ТЕНів.

- бавовняна тканина: найкращий результат забезпечує температурний режим із застосуванням двох ТЕНів.

- льяна тканина: ефективний температурний режим досягається при задіяні двох ТЕНів.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сушіння [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D1%88%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F>

2. Сушіння [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://buklib.net/books/36205/>

3. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с. 4. Конспект лекцій до розділу «Теплові процеси» з курсу - Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів III–IV курсів усіх спеціальностей / Укл. О.С. Смірнова, С.О. Опарін, А.О. Черемисінова. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2013. – 106 с. 5. Вивчення класифікації, конструкції та принципу дії сушарок. Методичні вказівки для студентів спеціальність 181 «Харчові технології», - Таврійський державний агротехнологічний університет, 2017 – 17с.

6. Кущевський М.О., Сарана О.М., Кравцова Л.В. Лабораторний практикум з курсу «Матеріалознавство швейних виробів».– Хмельницький.: ТУП, 1997. – 72 с. 7. Види і способи сушіння [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9469361/page:41/>.

8. Терморадіаційна сушарка [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D1%83%D1%88%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%B0.

9. Сушка в електричному полі струмів високої частоти (ТВЧ) [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://stud.com.ua/158012/tehnika/sushka_elektrichnomu_poli_strumiv_visokoyi_chastoti#google_vignette.

10. Сублімаційна (Ліофільна) сушка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sublimat.com.ua/uk/sublimatsionnaja-sushilka%20-siriy>.

11. Обладнання хімічних виробництв : конспект лекцій / укладач М. П. Юхименко. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 119 с.

12. Коваленко І. В., Малиновський В.В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв / Методичні вказівки К.: Норіта-плюс, 2007 - 209 с.

13. Абракітов В. Е. Конспект лекцій з курсу «Автоматизація технологічних процесів» (для студентів 1 курсу денної форми навчання освітнього рівня «бакалавр» галузі знань 26 – Цивільна безпека спеціальності 263 – Цивільна безпека. Охорона праці) / В. Е. Абракітов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім.

О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 80 с. 14. Створення віртуальних приладів в середовищі LabVIEW [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / В. М. Головня; РТФ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 9,92 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 142 с. 15. Основи датчиків струму [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.x-fullstartech.com/info/the-basics-of-current-sensors-48462214.html>

16. Датчик температури аналоговий (термодатчик) КТҮ81/210.112 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=КТҮ81-210>.

17. КТҮ 81-210 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.testo-sensor.shop/en/ky-81-210>.

18. ACS712ELCTR-20A-T [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sea.com.ua/ua/elektronnye-komponenty/datciki-toka-na-effekte-holla/acs712elctr-20a-t/>.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк. 78
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

19. Датчик струму на основі ACS712 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://itmaster.biz.ua/directory/sensors/acs712.html>.

20. Технічна творчість: Збірник наукових праць./ Укл.: Скиба М.Є., Поліщук О.С., Онофрійчук В.І. Хмельницький: ХНУ, 2018. – № 3 - 91 с.

21. Коваленко М.А., Самойленко О.О. Розробка експериментального остенду для дослідження малопотужних машин постійного струму з електромагнітним збудженням. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019. № 3. С.87-93.

22. Гальванічна розв'язка [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%27%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%B0.

23. Гальванічна розв'язка аналогових сигналів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://old.holit.ua/download/common/catalog/control2003/2.pdf>.

24. Бантюков С. Є., Бізюк І. Г., Казанко О. В. Серія Комп'ютерні науки: Мережеві інформаційні технології: Навч. посібник. – Харків: УкрДУЗТ, 2024. – Ч. 1. – 120 с.

25. Арсенюк І.Р., Яровий А.А. Комп'ютерні мережі. Навчальний посібник. Частина 1. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 117с.

26. m-DAQ12 [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://edu.holit.ua/data_collection/m-daq12_424-04.html.

27. Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/BD4C18A5-888A-445A-A43F-C55938FA2AFF.pdf>.

28. Холіт Дейта Системс [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.holit.ua.

29. Шевченко В.В., Тимчик Г.С. Основи автоматизації технологічних процесів конспект лекцій. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 111с.

30. Методи та засоби експериментальних досліджень : навч. посіб. / Г.Б. Параска, Д.В. Прибега, П.С. Майдан. – Київ : Кондор-Видавництво, 2017. – 138 с.

31. Мотигін В.В., Павлов С.М. Планування експерименту в інженерних дослідженнях. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДГУ, 2002. – 82с.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		