

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри КСУ  
\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ  
\_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-професійної програми  
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»  
на тему: «Автоматизація сушіння деревини в конвективній камері»

Здобувача групи СУ.м-22

Сітало Максима Євгенійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Сітало Максим  
(підпис)

Керівник доцент, к.ф.-м.н. Павлов А.В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

## РЕФЕРАТ

Сітало Максим Євгенійович. Автоматизація сушіння деревини в конвективній камері. Кваліфікаційна робота магістра зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (дипломний проект). Сумський державний університет, Суми, 2023 р.

Робота присвячена дослідженню конвективної камери періодичної дії для сушіння деревини, а також розробці оптимальної системи керування вологістю сушильної камери. В наслідок чого було проаналізовано математичну модель та розроблено регулятор та програму визначення часу сушіння в залежності від початкових умов.

Робота містить 56 сторінок основного тексту, 24 рисунки, 4 таблиці, 1 додаток; список використаних джерел з 18 найменувань.

Ключові слова: сушіння, температура, вологість, вентиляція, виконавчий механізм.

## ABSTRACT

Maxim Yevgeniyovich Sitalo. Automation of wood drying in a convective chamber. Master's thesis in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies (diploma project). Sumy State University, Sumy, 2023.

The work is devoted to the study of a convective batch drying chamber for drying wood, as well as the development of an optimal humidity control system for the drying chamber. As a result, the mathematical model was analyzed and a controller and program for determining the drying time depending on the initial conditions were developed.

The paper contains 56 pages of the main text, 24 figures, 4 tables, 1 appendix, and a list of 18 references.

Keywords: drying, temperature, humidity, fans, actuator.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ.....	9
1.1 Всесвітня статистика використання деревини та виробів з неї.....	9
1.2 Технологічний процес камерного сушіння деревини.....	14
2. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ. ВИБІР КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ.....	21
2.1 Функціональні завдання керування технологічним процесом .....	21
2.2 Локальні контури управління технологічними параметрами .....	25
3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ.....	30
4. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧАСУ СУШІННЯ.....	36
5. РОЗРОБКА РЕГУЛЯТОРА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ В КОНВЕКТИВНІЙ КАМЕРІ.....	42
5.1 Теоретична частина .....	42
5.2 Практична частина.....	47
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57
ДОДАТОК А.....	59
ДОДАТОК Б .....	60

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СК – сушильна камера

СУ - система управління

АСУ – автоматизована система управління

ПЛК – програмований логічний контролер

ПЗ – програмне забезпечення

АРМ – автоматизоване робоче місце

САУ - система автоматизованого управління

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ПО – панель оператора

ВВ – ввід-вивід

ФСА - функціональна схема автоматизації

ІМП - інформаційно-матеріальні потоки

ККД – коефіцієнт корисної дії

## ВСТУП

Деревообробна промисловість, просякнута традиціями і майстерністю, зазнала глибокої трансформації з появою автоматизації. Інтеграція передових технологій у деревообробні процеси стала наріжним каменем сучасного виробництва. Однією з головних переваг автоматизації в деревообробці є її здатність значно підвищити ефективність і продуктивність. Автоматизація забезпечує такий рівень точності та узгодженості, якого важко досягти за допомогою ручних процесів. Технології з ЧПК роблять можливими складні конструкції та точне відтворення, гарантуючи, що кожен дерев'яний компонент відповідає точним специфікаціям. Ця точність особливо важлива при виготовленні складних або індивідуальних виробів з деревини. Усунення людських помилок при вимірюванні та управлінні сприяє підвищенню стандартів якості та однорідності на всій виробничій лінії.

Актуальність проблеми сушіння деревини в конвективних камерах обумовлена рядом факторів, які впливають на ефективність, якість та економічну складові процесу. Сушіння деревини є важливим етапом в виробництві дерев'яних матеріалів, таких як дошки, фанера, меблі, будівельний брус. Оптимізація конвективних камер дозволяє збільшити швидкість сушіння, зменшити витрати енергії та забезпечити більш ефективне виробництво. Оптимізація процесу сушіння дозволяє зменшити витрати на енергію та покращити продуктивність, що в свою чергу впливає на конкурентоспроможність виробників на ринку дерев'яних матеріалів.

Якщо проаналізувати актуальність проблеми сушіння деревини в конвективних камерах для України, то це питання стає ще більш значимим. Україна є однією з країн, де лісові ресурси відіграють важливу роль у національному господарстві. Ефективне сушіння деревини є ключовим етапом в переробці лісоматеріалів і може впливати на використання цих ресурсів. В наш час коли питання будівництва та відбудови будинків стає все більш гострим, будівельні матеріали та вироби з дерева мають великий попит. Тому актуальність їх ефективного виробництва все збільшується.

Сушіння деревини є фундаментальним процесом у деревообробній промисловості, що формує властивості та якість кінцевого продукту. Традиційно трудомісткий і тривалий процес, сушіння деревини зазнав значних змін з впровадженням автоматизації.

Автоматизація сушіння деревини призводить до зміни парадигми з точки зору ефективності та швидкості. Традиційні методи сушіння часто вимагали великої кількості ручної праці та тривалих термінів. Автоматизовані системи сушіння, оснащені датчиками і сучасними механізмами управління, дозволяють точно контролювати і регулювати температуру, вологість і потік повітря. Це призводить до значного скорочення часу сушіння, що дозволяє деревообробним підприємствам прискорити виробничий цикл і швидше задовольняти потреби ринку.

Якість деревини нерозривно пов'язана з точністю процесу сушіння. Автоматизовані системи сушіння деревини, що використовують передові технології, такі як датчики вологості та контури управління зі зворотним зв'язком, забезпечують високий рівень точності регулювання вмісту вологи в сировині. Ця точність є життєво важливою для запобігання таким дефектам, як викривлення, розтріскування або нерівномірне висихання. Узгодженість, досягнута завдяки автоматизації, сприяє рівномірній і надійній якості дерев'яних виробів, що є ознакою досконалості в деревообробній промисловості.

Активізація Індустрії 4.0 також відомої як Четверта промислова революція, може надати численні переваги для сушіння деревини. Використання IoT-технологій дозволяє підключати різноманітні пристрої та обладнання до Інтернету, що дозволяє вдало контролювати та керувати процесом сушіння деревини в режимі реального часу [1].

Автоматизація в сушінні деревини не тільки прискорює процес, але й оптимізує споживання енергії. Вдосконалені системи управління дозволяють ефективно використовувати джерела енергії, мінімізуючи відходи та зменшуючи вплив на навколишнє середовище. Автоматизація дозволяє регулювати параметри сушіння в режимі реального часу, реагуючи на зміни характеристик деревини або

зовнішніх умов. Така адаптивність підвищує загальну енергоефективність, що відповідає сучасним цілям сталого розвитку.

Проаналізувавши вищесказаний матеріал, можна поставити мету та завдання роботи.

Метою роботи є оптимальне керування параметрами всередині конвективної камери періодичної дії.

Щоб досягнути поставленої мети, були поставлені такі завдання:

- 1) аналіз технологічного процесу сушіння деревини;
- 2) математичне моделювання масообміну та масопереносу в процесі сушіння деревини;
- 3) виявлення критеріїв оптимальності параметрів температури та вологості під час сушіння деревини;
- 4) імітаційне моделювання системи автоматичного керування, що реалізує оптимальне значення вологості в конвективній камері періодичної дії;
- 5) створення мнемосхеми SCADA системи керування параметрами температури та вологості всередині сушильної камери періодичної дії.

Об'єктом дослідження є система автоматичного управління, що реалізує оптимальні параметри для сушіння всередині конвективної камери періодичної дії.

Предметом дослідження є модель системи керування технологічними параметрами всередині сушильної камери.

Наукова новизна:

- набули подальшого розвитку відомі математичні моделі масообміну та масопереносу в процесі сушіння деревини;
- розроблена програма для визначення оптимальної температури сушіння декількох порід деревини в залежності від початкових умов;
- побудована та скорегована імітаційна модель системи керування, що реалізує оптимальне керування параметрами в конвективній сушильній камері періодичної дії.

Теоретична значимість:

- проведені оціночні розрахунки параметрів моделі керування конвективної сушильної камери можуть бути використані для подальшого спрощення моделей камер сушіння, або подальших обчислень інших параметрів.

Практична цінність:

- оптимальне керування температурою та вологістю всередині конвективної камери підвищать рівень ефективності підприємств які займаються сушіння деревини, це дасть змогу отримувати більшу кількість готового продукту з заданою якістю. Все це позитивно по впливає на економічні показники підприємства та забезпечить пиломатеріалами потребуєчі галузі, зокрема будівництво, що є найбільш актуальним в наш час.



# 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

## 1.1 Всесвітня статистика використання деревини та виробів з неї

Деревина, універсальний і поновлюваний ресурс, який протягом століть був фундаментальною складовою людської цивілізації. У сучасну епоху попит на продукцію з деревини досяг безпрецедентного рівня, що зумовлено різноманітними галузями промисловості, споживчими вподобаннями та економічною діяльністю.

За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ПСО), світове виробництво промислового лісу-кругляка, що включає деревину, яка використовується для виробництва, будівництва та енергетики, досягло приблизно 1,7 мільярда кубометрів у 2020 році. Це свідчить про значний і сталий попит на деревину в різних секторах.

Будівельний сектор є основним драйвером попиту на продукцію з деревини. Деревина широко використовується для виготовлення будівельних конструкцій, підлогових покриттів та внутрішнього оздоблення. За даними галузевих аналітиків, у 2021 році світова будівельна галузь спожила понад 40% усієї деревини, заготовленої для промислових цілей. Особливо актуальним будівельний сектор є для України, адже зараз попит на будівельні матеріали з деревини зріс у геометричній прогресії.

Меблева промисловість є ще одним значним джерелом попиту на продукцію з деревини. Зі зростанням світового населення та урбанізацією попит на дерев'яні меблі різко зріс. У 2022 році світовий ринок меблів оцінювався приблизно в 500 мільярдів доларів США, а деревина була найпопулярнішим матеріалом.

Міжнародна торгівля відіграє ключову роль у задоволенні попиту на продукцію з деревини. Найбільшими експортерами деревини та виробів з неї є такі країни, як Китай, США та Канада. На динаміку ринку впливають такі фактори, як державна політика, економічні умови та технологічний прогрес.

За прогнозами світових експертів від організації I360 Research світовий ринок деревини та виробів з деревини буде збільшуватися приблизно на 4,36% кожного

року і в 2030 році досягне планки в 760,36 мільярдів доларів, що більш ніж на 30% більше ніж в 2022 році [2]. Ці дані продемонстровано на гістограмі 1.1.

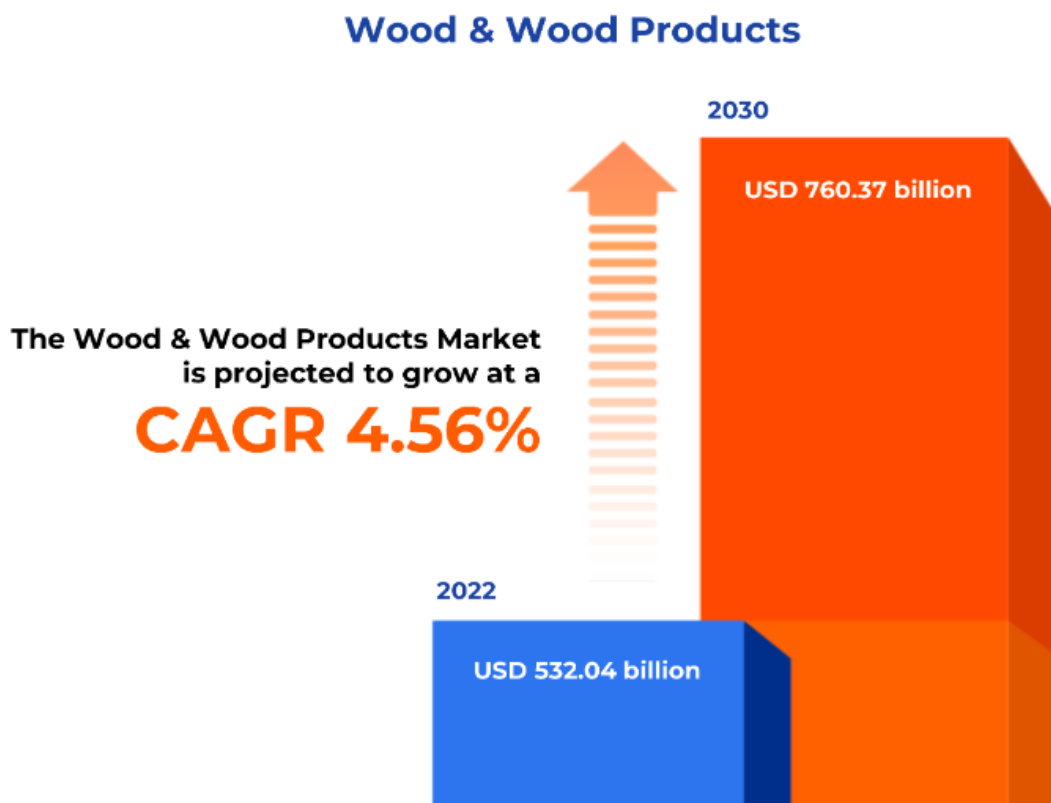


Рисунок 1.1 – Об’єм світового ринку деревини та виробів з деревини

Кожна країна використовує вироби з дерева, але на території деяких країн лісового масиву більше, а на деяких менше, тому існує експорт та імпорт товарів деревообробної промисловості.

Серед експортерів перше місце займає Китай, який є основним гравцем у деревообробній промисловості, експортуючи широкий спектр виробів з деревини, включаючи меблі, підлогові покриття та різні дерев'яні вироби. Китай займає 10% від світового експорту деревообробної промисловості. На другому місці Канада, яка є великим експортером пиломатеріалів та інших виробів з деревини, завдяки своїм величезним лісовим ресурсам. Канада займає 8,7% від світового експорту деревообробної промисловості. На третьому місці Німеччина, яка відома своєю високоякісною майстерністю в даній сфері, Німеччина є значним експортером

деревообробної продукції, включаючи меблі, дерев'яні інструменти та прецизійне обладнання. Ці та інші дані про головних експортерів деревообробної промисловості проілюстровано на гістограмі 1.2.

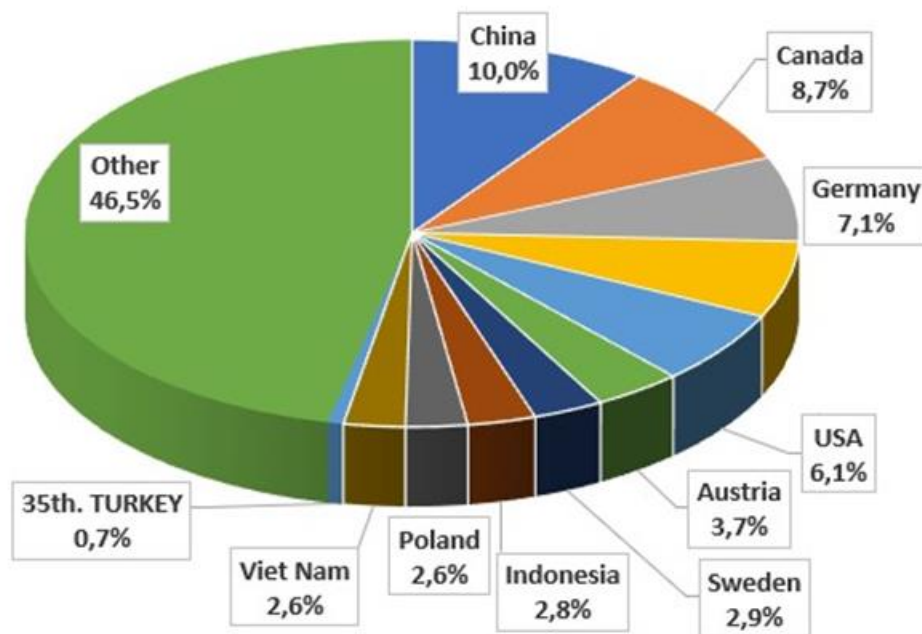


Рисунок 1.2 – Основні експортери деревообробної промисловості та їх частка від світового об'єму

Імпорт та експорт є невід'ємними частинами ринку та економіки в цілому. Серед головних імпортерів деревообробної промисловості є Китай. Незважаючи на те, що Китай є великим експортером, він також є значним імпортером продукції з деревини, щоб задовольнити потреби свого зростаючого виробничого та будівельного секторів, доля імпорту Китаю складає 15,4%. На другому місці за імпортом деревообробної промисловості є Сполучені Штати Америки. Сполучені Штати є великим імпортером продукції з деревини, включаючи пиломатеріали, меблі та різні вироби з деревини. Попит зумовлений будівельною галуззю, меблевим ринком та іншими виробничими секторами. Доля імпорту США складає 13,5%. Третє місце посідає Японія з долею імпорту 7,5%. Японія потребує різних порід деревини для будівництва, меблевої галузі та обробки, тому є великим

імпортером деревообробної промисловості. Японія має обмежені внутрішні лісові ресурси порівняно з її промисловими потребами. Гірський рельєф країни та дефіцит землі ускладнюють ведення великомасштабного лісового господарства. Як наслідок, Японія покладається на імпорт для задоволення попиту на різноманітну продукцію з деревини. Дерев'яне житло популярне в Японії, де традиційним дерев'яним конструкціям надається культурна перевага. Довговічність і естетична привабливість деревини сприяють її широкому використанню в житловому будівництві. Ця перевага призводить до постійної потреби в імпортній продукції з деревини. Ці та інші дані про головних імпортерів деревообробної промисловості проілюстровано на гістограмі 1.3.

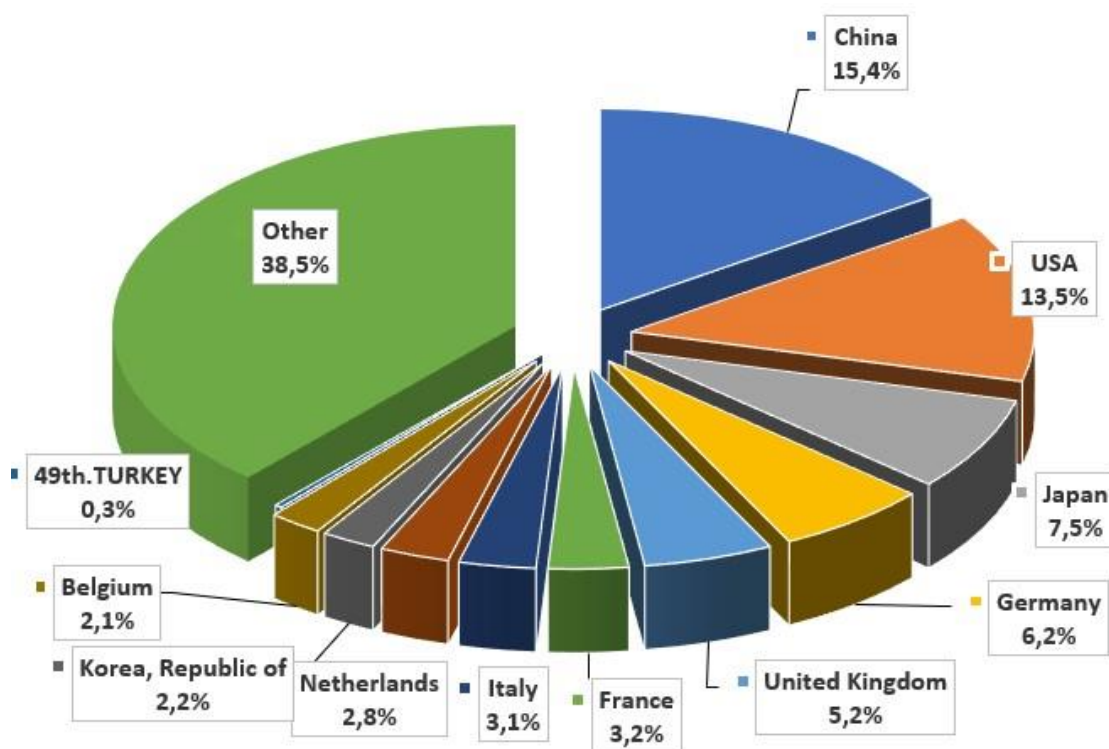


Рисунок 1.3 - Основні імпортери деревообробної промисловості та їх частка від світового об'єму

Одним із важливих продуктів з деревини є палети, які використовуються в багатьох галузях, в основному в теплоенергетиці. У сучасних реаліях палети з деревини залишаються важливим компонентом логістичних та виробничих

ланцюгів. Палети з деревини є екологічно чистим рішенням порівняно з іншими матеріалами, такими як метал або пластик. Деревина є відновлюваним ресурсом, і її використання виробляє менше викидів CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих речовин. Дерев'яні палети легко піддаються рециклінгу або можуть бути використані для виробництва інших дерев'яних виробів, зменшуючи відходи та сприяючи сталому використанню ресурсів. Палети з деревини, порівняно з альтернативними матеріалами, можуть бути менш вартісними, що робить їх економічно вигідними для багатьох підприємств. Підвищений інтерес до натуральних та естетичних матеріалів сприяє попиту на палети з деревини, які виглядають природно та впевнено вписуються в естетику сучасних виробничих та логістичних просторів. Світовий ринок палетів з деревини зростає, за прогнозами експертів до 2027 року ринок палет з деревини буде складати 110,56 мільярдів доларів, що на 19,95 мільярдів доларів більше ніж зараз у 2023 році. Тільки в 2020 році ринок палетів з деревини знизився в порівнянні з 2019 на 0,95 мільярдів доларів, а всі наступні роки показують приріст. Дані показники представлено на гістограмі 1.4.

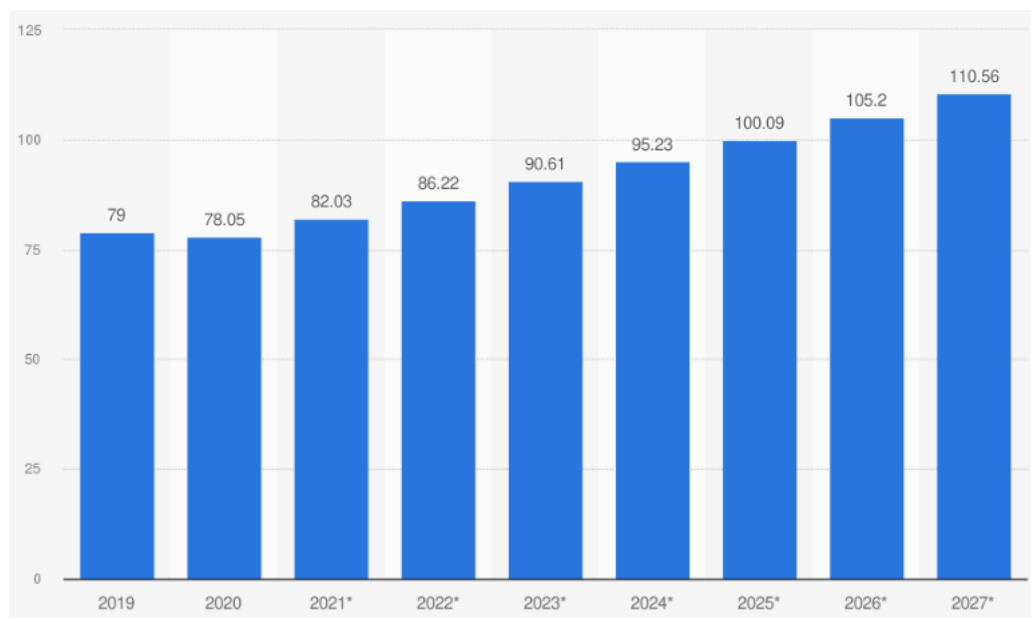


Рисунок 1.4 – Світовий ринок палет з деревини в мільярдах доларів

Зважаючи на зростаючий попит матеріалів з деревини, зростає і актуальність проблеми сушіння самих заготовок для подальшої обробки, а на цей процес

впливає багато факторів які треба враховувати, тому питання оптимізації цього процесу є дуже важливим

## 1.2 Технологічний процес камерного сушіння деревини

Камерне сушіння пиломатеріалів – це ключовий метод, при якому використовують спеціальні сушильні камери з належним обладнанням. Температуру, вологість і обіг повітря в цих камерах ретельно контролюють. Спочатку дошки однакової товщини і породи укладають у штабель. Способи укладання залежать від напрямку циркуляції сушіння. У камерах із протиточною циркуляцією дозволяють проміжки між дошками, тоді як для камер з поперечною реверсивною і протиточною прямолінійною циркуляцією вони ущільнюються.

Сушіння відбувається при конкретній температурі від 20°C до 100°C і вологості, які змінюються під час процесу сушіння. Температура повітря поступово підвищується, а вологість сушильного агента зменшується. Вибір режимів сушіння залежить від багатьох факторів, таких як порода деревини, товщина пиломатеріалів, кінцева вологість, якість матеріалів і тип сушильної камери.

Існують два типи режимів сушіння пиломатеріалів - низькотемпературний і високотемпературний, обрані відповідно до їх призначення. У низькотемпературних режимах для першої фази сушіння використовується вологе повітря з температурою менше 100°C. Залежно від вимог до пиломатеріалів, низькотемпературні режими поділяються на:

- М'які (М): забезпечують бездефектне сушіння зі збереженням фізико-механічних характеристик деревини та її кольору. Даний режим передбачає поступове вивільнення вологи зі штабелю для максимальної рівномірності близького до природного висушування, але в штучних умовах;

- Нормальні (Н): забезпечують бездефектне сушіння з можливою невеликою зміною кольору в ялинової деревини, але зі збереженням міцності. Даний режим характеризується збільшенням швидкості сушіння в порівнянні з попереднім режимом завдяки підвищенню початкової температури;

- Форсовані (Ф): дозволяють деревині залишатися міцною на згин, розтягання і стиск, але зі зниженням міцності на сколювання і розколювання на 14–18% і можливим затемненням через значне прискорення у вивільненні вологи шляхом великої температури та режимного випускання відпрацьованого повітря [3].

Кожен з цих режимів передбачає трипорядкову зміну параметрів сушильного агента, і перехід між кожним щаблем режиму може відбуватися тільки при досягненні певної вологості, яку передбачено відповідним режимом.

Щодо високотемпературних режимів сушіння для камер періодичної дії, вони включають дві фази, в яких параметри сушильного агента змінюються при досягненні деревиною перехідної вологості в 20%. Визначення конкретного високотемпературного режиму залежить від породи і товщини пиломатеріалів, і такі режими застосовуються для виготовлення не несучих елементів будівельних конструкцій, де допускається зниження міцності й затемнення деревини. Приклад сухої деревини при сушінні в високотемпературному режимі та низькотемпературному представлено на рис.1.5.



Рисунок 1.5 – Результат сушіння заготовок при високотемпературному режимі та при низькотемпературному

Перед початком сушіння, деревину нагрівають паром згідно вибраного режиму. Тривалість початкового нагрівання залежить від виду деревини. Після

нагрівання параметри сушильного агента піднімаються до першого етапу режиму, і лише після цього розпочинається сушіння пиломатеріалів за установленим режимом. Рівень температури та вологості повітря регулюються за допомогою подачі теплоносія від котла до камери сушіння шляхом обдуву калорифера і заслінок витяжних каналів, які впускають повітря та випускають відпрацьоване повітря.

Під час сушіння в деревині виникають залишкові внутрішні напруження, які усуваються через проміжну та кінцеву вологотеплообробку з підвищеними параметрами температури та вологості. Обробці піддаються пиломатеріали, які висушуються до оптимальної вологості та ті, що підлягають подальшій механічній обробці.

Проміжну вологотеплообробку виконують при переході між другим і третім етапами або між першим і другим при використанні високотемпературних режимів сушіння. Кінцеву вологотеплообробку проводять лише після досягнення деревиною необхідної кінцевої середньої вологості. Під час кінцевої вологотермообробки температуру у камері утримують на 9°C вище, ніж на останньому етапі режиму, але не більше 95°C. По завершенню кінцевої вологотеплообробки, пиломатеріали, які пройшли сушіння, витримують у камерах протягом 1,5–2,5 годин при параметрах, передбачених останнім етапом режиму, і тільки потім зупиняють процес у камерах.

Процедура сушіння партії пиломатеріалів розпочинається із завантаження в камеру матеріалу, який був правильно розміщений та закріплений, і завершується вивантаженням його після завершення повного циклу обробки.

З метою спрощення та кращого розуміння процесів, було розглянуто обробку, розділену на чотири етапи, під час яких властивості деревини та задачі установки сушіння деревини мають відмінності.

Етап перший - Попереднє нагрівання.

Деревина доставляється до місця сушіння та вивантажується до окремої зони де вона досягає температури навколишнього середовища по всій своїй масі та об'єму.



Важливо зауважити, що в країнах з помірним кліматом до яких входить Україна, або в приполярних регіонах, зимою температура може значно падати нижче нуля градусів. Для ефективного сушіння слід передбачити попереднє нагрівання деревини до проміжної температури, щоб уникнути раптових змін температури під час подальших операцій.

Процес підготовчого нагрівання розпочинається при досягненні позначки 25°C. Підігрівання від температури навколишнього середовища до температури підготовчого нагрівання має бути однорідним та повільним, оскільки деревина володіє високою теплоізоляційною властивістю, що ускладнює поглиблення тепла. Для уникнення значних відмінностей температури між зовнішнім шаром та серцевиною дошки важливо утримувати плавні перепади температури (не більше 8-13°C) після кожного підвищення температури. Після кожного зростання температури важливо забезпечити рівномірне прогрівання всього об'єму деревини. Температуру слід утримувати на постійному рівні протягом визначеного періоду, залежно від типу деревини та товщини шару, який проходить процес висушування [4].

Одиничний інтервал часу (одиниця товщини дошок  $h_o$ ) між двома тепловими стрибками можна вивести з таблиці 1.1:

Таблиця 1.1 – Залежність тривалості від щільності дерева

Питома щільність, дерева	$h_o^*$
до 400 кг/м <sup>3</sup>	1,4 години на см
від 400 до 550 кг/м <sup>3</sup>	1,9 години на см
від 550 до 750 кг/м <sup>3</sup>	2,4 години на см
понад 750 кг/м <sup>3</sup>	2,9 години на см

Коефіцієнт приросту залишається сталим при будь-якому збільшенні температури під час процесу сушіння.

Зазначення: при температурі деревини нижче нуля вільна вода всередині деревини перебуває в стані замерзання. У таких випадках слід особливо обережно розморожувати деревину.

Етап другий: випаровування за межами насичення волокон.

Після завершення фази попереднього нагрівання починається сушіння деревини. Цей етап спрямований на вилучення залишкової вільної води, що міститься в деревині.

Видалення вільної води є порівняно простою процедурою - деревина піддається швидкому висиханню, що вимагає обережності для підтримання оптимальних умов, а саме, уникнення надмірно високих температур і підтримання відносно підвищеного рівня вологості.

Фаза попереднього нагрівання завершується підвищенням температури деревини приблизно до  $25^{\circ}\text{C}$ . Початок процесу сушіння на цьому другому етапі передбачає підвищення температури в камері до певного значення, позначеного як  $T_1$ .

Варіабельність  $T_1$  залежить від типу матеріалу, в першу чергу від товщини пиломатеріалів під час фази сушіння. ( $T_1$  коливається в діапазоні  $35-65^{\circ}\text{C}$ , з переважаючим середнім значенням близько  $45^{\circ}\text{C}$ ). Підвищення температури від температури підготовки до  $T_1$  передбачає використання коефіцієнта підвищення ( $h_0 \times$  товщина), який був попередньо розрахований під час фази попереднього нагрівання [5].

Деякі тропічні породи дерев сприйнятливі до грибка, який утворює плями на деревині. Цей грибок процвітає в діапазоні температур  $T$  підготовче -  $T_1$ , особливо у вологому кліматі. Швидкий вихід за межі цього інтервалу стає обов'язковим. У таких випадках слід відмовитися від підвищувального коефіцієнта і відрегулювати температуру до заданого значення  $T_1$ .

Після досягнення  $T_1$  дуже важливо підтримувати постійну температуру протягом усієї фази. Процес сушіння за межами точки насичення волокон відбувається при стабільній температурі  $T_1$ . Враховуючи відносну легкість

процесу сушіння на цьому етапі, бажано, щоб градієнт сушіння не був надмірно високим.

Третя фаза: Перехідне потепління.

Після завершення другого етапу деревина втратила весь вміст вільної води, що зумовлює необхідність вилучення зв'язаної води на цьому етапі. Вивільнення вологи з деревини є значно складнішим завданням, що призводить до уповільнення темпів сушіння. На цьому етапі підвищена температура і знижена відносна вологість стають обов'язковими [6].

Насамперед, температуру підвищують до певного третього значення, позначеного як  $T_2$  ( $T_2$  коливається в межах  $55-75^{\circ}\text{C}$ , причому перевага надається температурі  $70^{\circ}\text{C}$ ).

Стадія четверта: Висушування нижче насичення.

Ця фаза відбувається послідовно при заданій температурі  $T_2$ .

П'ята фаза: Кондиціонування.

Щоб зрозуміти тонкощі сушіння деревини, уявіть собі пачку вологопоглинаючого паперу замість дошки. Обведіть пачку потоком гарячого і відносно сухого повітря, ефективно "ополіскуючи" верхні шари. Верхні аркуші висихають, поступово витягуючи вологу з нижніх шарів, що досягає кульмінації в центральних аркушах.

Зовні ця динаміка відображає "міграцію" вологи від серцевини до поверхні, яка постійно піддається впливу повітря, що висихає. Як наслідок, розподіл вологи по товщині пачки залишається нерівномірним, причому в центрі зберігається більше вологи, ніж на поверхні.

Це паралельне явище розгортається під час сушіння дерев'яної дошки.

У деревині з'являється різниця у вологості, яка посилюється зі збільшенням товщини дошки та прискоренням темпу сушіння (градієнту). Отже, вологість деревини розглядається як усереднений параметр.

Ця невід'ємна нерівномірність вмісту вологи між серцевиною та периферією спричиняє напруження в деревині, що часто знижує її міцність, а у важких випадках призводить до розтріскування. Щоб запобігти цьому, на етапі кондиціонування

відбувається рівномірний розподіл вологи по всій товщині дошки, що значно зменшує напруження.

Не менш важливою є підвищена температура деревини ( $T_2$ ) на завершальному етапі сушіння. Різкий перехід від  $T_2$  до температури навколишнього середовища (яка, як зазначалося раніше, може опускатися нижче нуля) може спровокувати термічний "шок" з непередбачуваними наслідками. Тому розумно поступово знижувати температуру деревини перед витяганням її з камери [7].

"Міграція" вологи від ядра до периферії триває і після кульмінації циклу сушіння, проявляючи певну інерційність. Водночас, початок охолодження деревини сприяє підвищенню рівня відносної вологості.

## 2. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ. ВИБІР КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ

### 2.1 Функціональні завдання керування технологічним процесом

Деревина з її розподіленими параметрами та складною структурою, зумовленою розмірами, неоднорідністю та пористістю, є енергоємним матеріалом. Отже, процес сушіння являє собою унікальний набір викликів, що вимагає швидкого, бездефектного сушіння з мінімальним споживанням енергії. Зазвичай пошук енергоефективного алгоритму сушіння, що забезпечує баланс між бажаною якістю та оптимальним часом, зводиться до вирішення проблеми нагріву. Саме на цей основний операційний процес витрачається ледь частина ресурсів у прагненні до ефективного сушіння деревини.

Для реалізації оптимального процесу сушіння з деревиною проводять таку послідовність підготовчих заходів: вирубування дерева, розпилювання на дошки певної довжини та нанесення покриття на поперечні зрізи. Після цього деревина проходить сортування за вологістю перед тим, як потрапити в сушильну камеру. Процес сушіння деревини розгортається в три фази та 5 етапів: початковий нагрів, стабілізація сушіння при заданій температурі та фаза, що характеризується послідовним зниженням температури сушіння. Процес сушіння завершується після завершення останнього етапу і вимкнення всіх виконавчих механізмів. Ефективне управління процесом сушіння вимагає введення наступних змінних характеристик процесу:

- 1) товщина дошки;
- 2) середня температура сушіння деревини,  $T_{set}$ ;
- 3) швидкість набору температури;
- 4) температура відключення котла,  $T_{off}$ ;
- 5) температура включення котла,  $T_{on}$ ;
- 6) аварійна температура завершення,  $T_{Alarm}$ ;
- 7) час, протягом якого вологість незмінна,  $T_{const}$ ;

- 8) поправочні коефіцієнти калібрування датчиків вологості,  $W$ , температури агента сушіння,  $T_1$ ,  $T_2$ ;
- 9) час відкриття та час закриття клапана  $T_{\text{valve}}$ ;
- 10) кількість вентиляторів циркуляції (від 1 до 4);
- 11) час затримки послідовного пуску вентиляторів;
- 12) час напрацювання вентиляторів до зупинки;
- 13) тип припливно-витяжної вентиляції: використання вентиляторів або шибєрних заслінок;
- 14) вибір схеми підігріву: електричний, водяний, змішаний.

В автоматизованій системі обов'язково має бути передбачений режим ручного керування сушінням, який надає оператору повноваження щодо критичних та аварійних вимкнень. Під час розробки автоматизованої системи управління ретельна компіляція вхідних і вихідних сигналів має першочергове значення.

Функціональні завдання управління сушінням деревини поширюються на контроль і оптимізацію різних параметрів, спрямованих на ефективний, точний і сталий процес сушіння. Виконання цих завдань управління часто полегшується завдяки використанню автоматизованих систем і передових технологій.

- 1) Контроль температури:

Мета: регулювання температури в сушильних камерах.

Завдання управління: автоматизовані системи регулюють нагрівальні елементи та подачу пари, щоб підтримувати бажаний рівень температури для оптимального сушіння.

- 2) Контроль вологості:

Мета: керування вмістом вологи в сушильному середовищі.

Завдання контролю: впровадження датчиків і системи контролю для регулювання рівня вологості, керуючи потоком повітря, подачею пари або механізмами відведення вологи.

- 3) Контроль повітряного потоку:

Мета: забезпечити рівномірний розподіл повітря для ефективного сушіння.

Завдання управління: використання автоматизованих вентиляторів та заслінок для контролю повітряного потоку в сушильних камерах, запобігаючи утворенню "мертвих зон" і сприяючи рівномірному висиханню всіх заготовок.

Таким чином, для початку необхідні три частини: камера сушіння, котел (який виробляє гаряче повітря для сушіння) і система вентиляції. Структурна схема з цих елементів виглядатиме таким чином (рис.2.1).



Рисунок 2.1- Структурна схема сушильного агрегату

Розглянемо кожен елемент більш детально:

Котел - є центральним компонентом у процесі сушіння деревини, який відповідає за вироблення тепла, необхідного для випаровування вологи з деревини. Він забезпечує енергію, необхідну для підвищення температури в сушильній камері. Котел слугує первинним джерелом енергії, забезпечуючи постійне та контрольоване постачання тепла для процесу сушіння. Модулюючи потужність

котла, оператори можуть точно контролювати температуру в сушильній камері, впливаючи на швидкість видалення вологи. Ефективна система котлів сприяє загальній енергоефективності процесу сушіння деревини, впливаючи на експлуатаційні витрати та екологічну стійкість.

Сушильна камера - це середовище, де відбувається власне процес сушіння. У ній розміщується деревина і забезпечується контрольований простір для заходу тепла і вилучення вологи. Сушильна камера призначена для ефективного видалення вологи з деревини, запобігання дефектам і забезпечення рівномірного висихання. Завдяки стінкам відбувається штучне відокремлення заготовок для точного висушування деревини до певного рівня вологості при максимально ідеальних умовах яких можна досягти на виробництві [8].

Система вентиляції відіграє вирішальну роль у регулюванні потоку повітря в сушильній камері, впливаючи на розподіл тепла і вологи по всій деревині. Система вентиляції забезпечує рівномірну циркуляцію нагрітого повітря навколо деревини, сприяючи рівномірному висиханню і запобігаючи локальним коливанням вмісту вологи. Запобігання утворенню мертвих зон: Ефективна вентиляція мінімізує ризик виникнення "мертвих зон" в камері, де циркуляція повітря може бути обмежена, що призводить до нерівномірного висихання. Добре спроектована система вентиляції сприяє підвищенню енергоефективності, оптимізуючи використання нагрітого повітря і полегшуючи видалення повітря, насиченого вологою[9].

Ці елементи взаємопов'язані і залежать один від одного для успішного виконання процесу сушіння деревини. Високопродуктивний котел забезпечує надійне і контрольоване джерело тепла, в той час як ефективна сушильна камера забезпечує необхідне середовище для видалення вологи. Система вентиляції доповнює ці елементи, сприяючи рівномірному розподілу тепла і забезпечуючи рівномірне сушіння по всьому штабелю деревини.

Це спрощена схема, але для подальших обчислень потрібна більш розгорнута схема, наприклад функціональна схема автоматизації (ФСА). Потім потрібно виділити основні контури керування, необхідні для побудови моделі з ФСА. Наступним кроком буде дослідження отриманої моделі. Це включатиме побудову



в середовищі Matlab, ідентифікацію об'єкта управління, встановлення налаштувань регулятора та вибір програмно-логічного контролера (ПЛК).

Згідно з функціональними завданнями керування, а також на основі структурної схеми сушильного агрегату було розроблено функціональну схему автоматизації (рис.2.2). Повна ФСА представлена в додатку А.

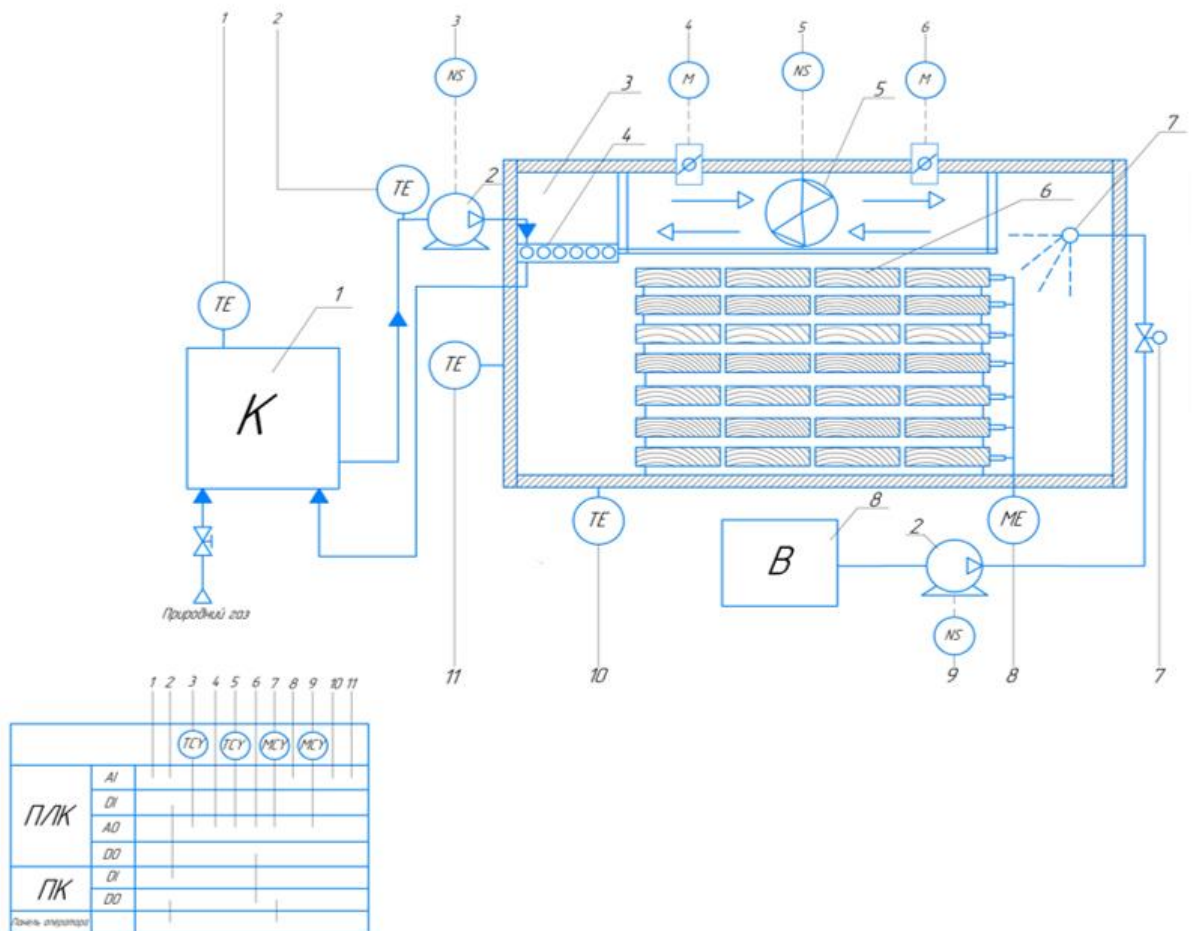


Рисунок 2.2 - Функціональна схема автоматизації сушіння деревини в конвективній камері

## 2.2 Локальні контури управління технологічними параметрами

Згідно з функціональною схемою автоматизації, можна виділити контури регулювання. найважливішим параметром при сушінні деревини є вологість, бо саме її ми виводим з штабелю деревини, а отже, і головними контурами керування будуть ті що пов'язані з вологою. Волога є одним з ключових факторів при сушінні

деревини і впливає на якість та характеристики сушеного матеріалу. Контрольована вологість дозволяє уникнути появи тріщин, вигинів та інших дефектів, які можуть виникнути внаслідок швидкого або нерівномірного сушіння. Збереження оптимального рівня вологості допомагає уникнути росту грибків, бактерій та комах, що може призвести до розкладу деревини. Висока вологість може призвести до розвитку цвілі та плісняви, що негативно впливає на якість та використання деревини. Визначення оптимального рівня вологості дозволяє оптимізувати швидкість сушіння та ефективно використовувати енергію [10].

Вологість деревини визначається у відсотках і вимірює кількість води в деревині відносно її сухої маси. Точний оптимальний рівень вологості може варіюватися залежно від конкретного застосування та вимог до якості деревини, але для багатьох виробничих процесів і будівельних застосувань прийнято використовувати стандартні рівні вологості.

Зазвичай вологість свіжозрубаної деревини може бути в діапазоні приблизно 30-60% від сухої маси, в залежності від виду деревини та умов обробки. Під час промислового сушіння для виробництва дерев'яних матеріалів часто встановлюють рівень вологості на рівні 8-15%. Для дерев'яних деталей, використовуваних у виробництві меблів, може бути важливим підтримувати рівень вологості в діапазоні 6-8%, щоб уникнути деформацій та змін розмірів. Точні значення вологості можуть залежати від таких чинників, як конкретний вид деревини, регіон збору, пори року та умови збирання. Щоб точно визначити вологість деревини перед сушінням у конкретних умовах, зазвичай використовують вологоміри та спеціальні інструменти для вимірювання вологості матеріалів. Згідно ФСА маємо два основних контури: контур подачі тепла (рис.2.3), контур зволоження деревини та виведення пари (рис.2.4).

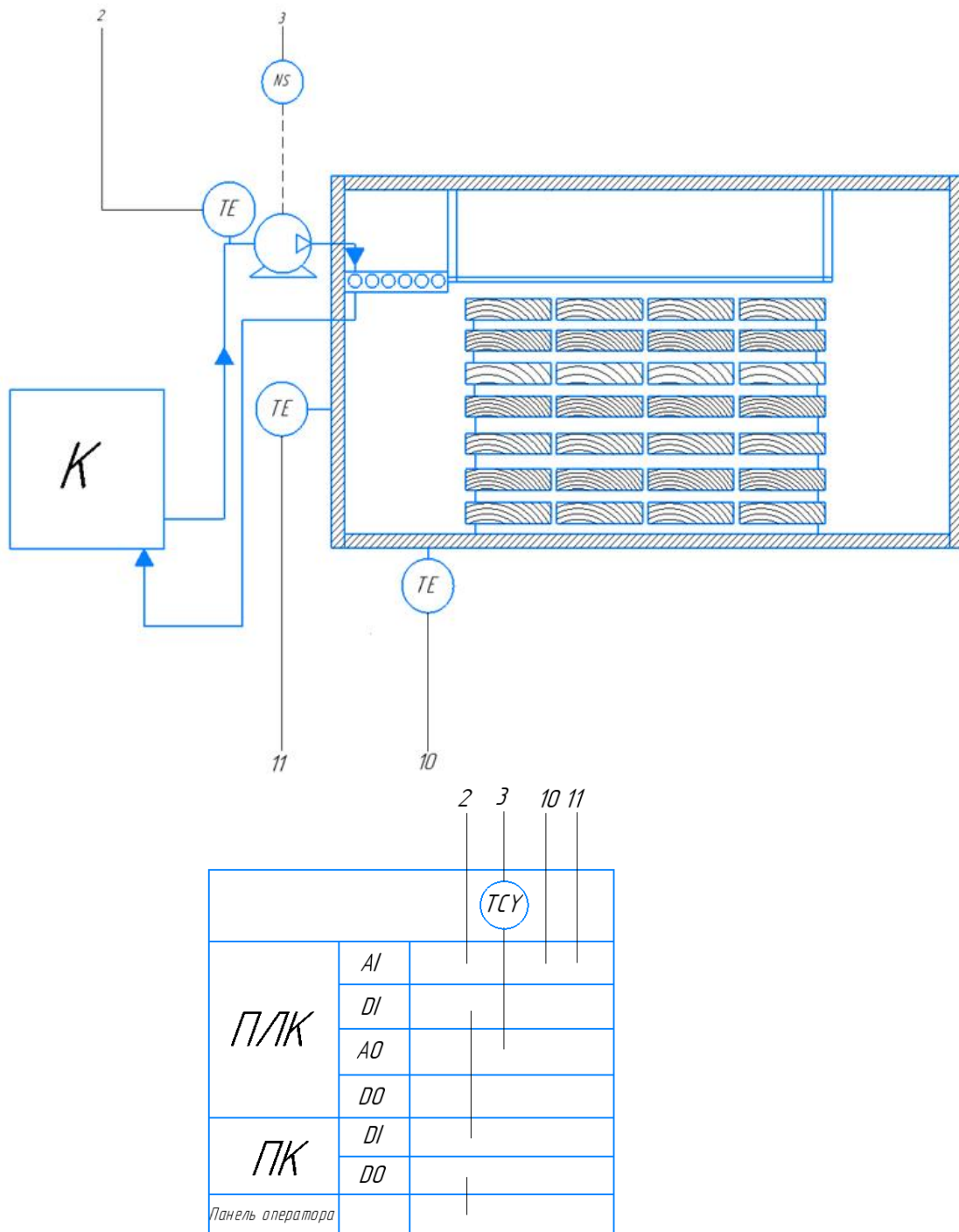
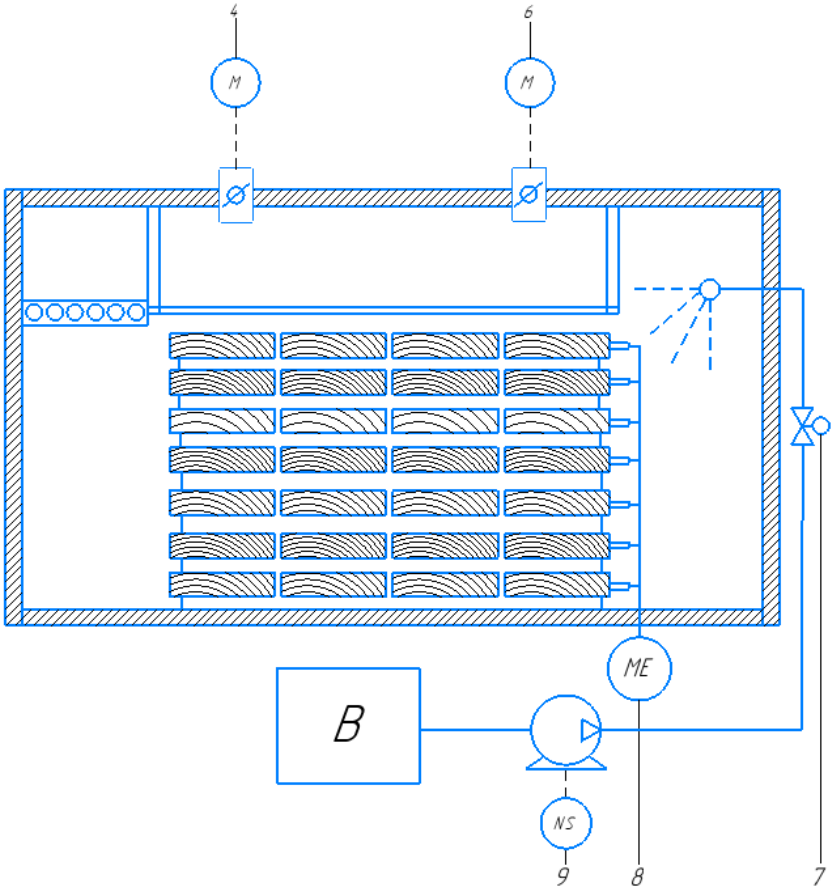


Рисунок 2.3 – Контур подачі тепла

Контур подачі тепла залежить від показів сухого та мокрого термометра всередині камери сушіння. За показами термометрів ТЕ 10 та 11 вирішується чи подавати тепло до камери та вмикати котел, якщо так, то вмикається насос через пристрій плавного пуску NS. Давачем ТЕ 2 контролюється температура теплоносія

який подається, щоб уникнути аварійних ситуацій чи не вірних параметрів температури теплоносія.



		4	6	7	8	9
ПЛК	AI					
	DI					
	AO					
	DO					
ПК	DI					
	DO					
Панель оператора						

Рисунок 2.4 – Контур зволоження деревини та виведення пари

Контур зволоження деревини та виведення пари базується на показах вологоміра який здійснює вимірювання вологи в штабелі деревини, якщо покази нижчі за потрібні, то вмикається насос 9 через пристрій плавного пуску NS та відкривається клапан 7 МСУ для подачі води з резервуару до розпилювача і штабель зволожується. Якщо покази вологоміра вищі за потрібні, то подається сигнал на приводи заслінок 4 та 6, які відкриваються на потрібний кут в залежності від вологості.

Через їх взаємозв'язок ці два контури будуть описані з точки зору їхньої одночасної роботи на двох прикладах: коли необхідно підвищити температуру або вологість, і навпаки. При необхідності підвищення температури сушильної камери необхідно вмикати котел та насос. Найважливіше пам'ятати, що існують параметри, які мають верхню та нижню межі, які не можна перевищувати або зменшувати занадто сильно, оскільки це призведе до нерівномірного кінцевого результату.

Основним параметром, обраним для розробки моделі, була вологість. Нашим критерієм оптимізації буде отримання точної вологості  $\pm 0,2\%$  з найменшими енерговитратами, оскільки для подальшого виробництва товарів з висушеної деревини потрібна гарна сировина. Щоб досягти цього, ми повинні підтримувати постійну похідну від швидкості випаровування. Але також треба сушити швидко для кількості та повільно для якості, тому потрібно знайти оптимальну точку. Для цього ми повинні використовувати регулятор, щоб знайти та підтримувати режим сушіння, який споживає найменшу кількість палива, а також прискорює процес.

Так як ці два контури взаємопов'язані, то їх можна описувати разом та робити оптимізацію для багатоконтурної системи регулювання.

### 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

Математичне моделювання сушіння деревини включає різні фізичні та термодинамічні принципи. Одна з найпоширеніших моделей базується на законі дифузії Фіка, який описує рух вологи в пористому середовищі, такому як деревина. Основна формула закону Фіка має вигляд:

$$\partial M / \partial t = D * \partial^2 M / \partial x^2 \quad (1)$$

Де:

$\partial M / \partial t$  - швидкість зміни вмісту вологи з часом.

D - коефіцієнт дифузії.

$\partial^2 M / \partial x^2$  - друга просторова похідна вологості.

Сформулюємо рівняння математичної моделі для сингулярної дошки, яку проілюстровано на рис.3.1. Початок системи координат довільно розміщено на площині симетрії дошки. Вісь x орієнтована перпендикулярно до поверхні дошки з найбільшою площею, в той час як координатна площина (y, z) перпендикулярна до осі x. Початковий момент сушіння визначається як  $\tau = 0$ . Стан сировини під час сушіння характеризується двома основними змінними: температурою (T) і вологістю (U). Зміна температури і вологості протягом процесу сушіння описується системою диференціальних рівнянь тепло- і масопереносу, як це описано в теорії сушіння.

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \tau} = D \nabla^2 u + D \delta_m \cdot \nabla T \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases} \quad (2)$$

де  $\nabla$  – оператор Лапласа;

a – коефіцієнт теплопровідності, м<sup>2</sup>/с;

D – коефіцієнт молекулярної дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$\delta_m$  – термоградієнтний коефіцієнт;

$\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення;

r – питома теплота пароутворення, кДж/кг;

c – масова теплоємність, кДж/(кг·К).

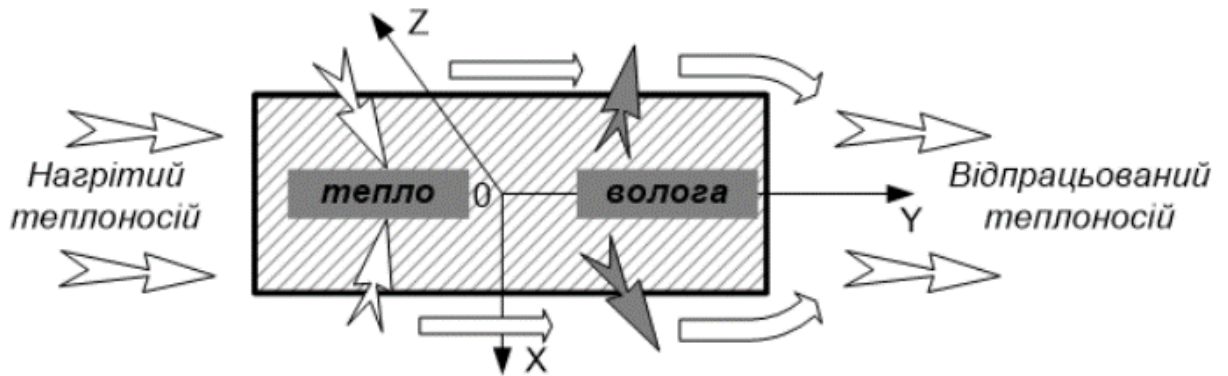


Рисунок 3.1 – Схема конвективного сушіння окремої дошки

Оскільки волога переважно мігрує в деревині вздовж осі  $x$ , дифундуючи в сушильний агент, а перенесення вологи вздовж осей  $y$  і  $z$  вважається незначним, ми робимо припущення, що температура і вологість залишаються незалежними від координат  $y$  і  $z$ . Отже, рівняння (2) можуть бути виражені в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial T} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D \delta_m \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x} \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases} \quad (3)$$

Враховуючи змінну в часі та природу коефіцієнтів, систему рівнянь можна переформулювати наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial T}(x, \tau) = D(\tau) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau) + D(\tau) \delta_m(\tau) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x}(x, \tau) \\ \frac{\partial t}{\partial \tau}(x, \tau) = a(\tau) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, \tau) + \frac{\varepsilon(x, \tau) r}{c(\tau)} \frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau) \end{cases} \quad (4)$$

Верхнє рівняння системи можна перефразувати еквівалентно, визнавши, що  $\varepsilon(x, \tau) \neq 1$  (де рівність означає, що волога не випаровується з поверхні деревини).

$$\frac{\partial u}{\partial T}(x, \tau) = \frac{D(\tau)}{1 - \varepsilon(x, \tau)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau) + \frac{D(\tau) \delta_m(\tau)}{1 - \varepsilon(x, \tau)} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x}(x, \tau) \quad (5)$$

Сформулюємо умови однозначності. Під час сушіння теплофізичні властивості сировини змінюються, і ми припускаємо, що ці зміни мають лінійну залежність від температури.

$$\begin{aligned} a &= a_0(u) + k_a T, \\ \lambda &= \lambda_0(u) + k_\lambda T, \\ c &= c_0(u) + k_c T, \end{aligned} \quad (6)$$

де коефіцієнти  $a_0, k_a, \lambda_0, k_\lambda, c_0, k_c$  набувають відповідних значень для кожного конкретного виду деревини.

В момент початку сушіння ( $\tau = 0$ ) вважатимемо температуру і вологовміст сталими.

$$T(x, 0) \equiv T_0, u(x, 0) \equiv u_0. \quad (7)$$

Враховуючи припущення, що площа торевої частини деревини значно менша за площу фронтальної поверхні, ми формулюємо граничні умови для  $x \pm \delta$ . По суті, ми розглядаємо задачу, подібну до задачі про нескінченну пластину товщиною  $2\delta$ .

Враховуючи, що вплив бародифузії та тепло-вологопровідності стає відчутним лише при температурах, що перевищують  $100^\circ\text{C}$ , ми вирішили не враховувати їхній вплив. Отже, для рівняння масопереносу встановлюємо граничні умови третього роду.

$$-\lambda_m(\delta, \tau) \frac{\partial u}{\partial x}(\delta, \tau) = \beta(\delta, \tau) \frac{\rho_s \rho_w (u(\delta, \tau) + l)}{\rho_w + \rho_s u(\delta, \tau)} (u(\delta, \tau) - d_{cp}) \quad (8)$$

де  $\lambda_m$  – коефіцієнт масопровідності, (кг/(м·с));

$\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, (м/с);

$\rho_w$  і  $\rho_s$  – густина вологи і абсолютно сухої речовини відповідно, (кг/м<sup>3</sup>);

$d_{cp}$  – вологовміст оточуючого середовища, (кг/кг).

Для отримання симетрії отримаємо таку «внутрішню» граничну умову

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, \tau) = 0 \quad (9)$$

Таким самим чином опишемо граничні умови для рівняння теплопередачі

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(\delta, \tau) + a(T(\delta, \tau) - T_{cp}) = \beta(\delta, \tau) r \frac{\rho_s \rho_w (u(\delta, \tau) + l)}{\rho_w + \rho_s u(\delta, \tau)} \varepsilon(\delta, \tau) (u(\delta, \tau) - d_{cp}) \quad (10)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, (Вт/(м·К));

$a$  – коефіцієнт тепловіддачі, (Вт/(м<sup>2</sup>·К)).

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = 0 \quad (11)$$

Наведемо формулювання рівнянь для окремих фаз процесу сушіння.

На початковій стадії сушіння (сушіння з постійною швидкістю) як тепловий потік, так і потік маси, що виходить з деревини, залишаються постійними,



враховуючи наявність вільної вологи на поверхні, що дозволяє вважати випаровування адіабатичним.

Враховуючи ці умови, а також початкові та граничні обмеження, чисельний розв'язок задачі передбачає розкладання  $T(x, \tau)$  та  $u(x, \tau)$ . Відкинувши компоненти зі степенями, що перевищують 2, як незначущі, і скориставшись симетрією задачі по  $x$  (завдяки симетрії пластини), отримано результуючі рівняння.

$$\begin{cases} T(x, \tau) \approx T_2(x, \tau) = T_0(\tau) + T_2(\tau)x^2 \\ u(x, \tau) \approx u_2(x, \tau) = u_0(\tau) + u_2(\tau)x^2 \end{cases} \quad (12)$$

Тоді рівняння теплопереносу з початковими умовами матиме вигляд

$$\begin{cases} \frac{\partial T_0}{\partial \tau}(\tau) + \frac{\partial T_2}{\partial \tau}(\tau)x^2 = 2a(\tau)(T_2(\tau) + 6T_4(\tau)x^2) \\ T_0(0) + T_2(0)x^2 = T_0 \end{cases} \quad (13)$$

Рівняння масопереносу

$$\begin{cases} \frac{\partial u_0}{\partial \tau}(\tau) + \frac{\partial u_2}{\partial \tau}(\tau)x^2 = \frac{2D(\tau)}{1-\varepsilon(x, \tau)}(u_2(\tau) + 6u_4(\tau)x^2) \\ \quad + \frac{2D(\tau)\delta_m(\tau)}{1-\varepsilon(x, \tau)}(T_2(\tau) + 6T_4(\tau)x^2) \\ u_0(0) + u_2(0)x^2 = u_0 \end{cases} \quad (14)$$

Крім того, граничні умови (9) і (8) необхідно включити в обидві системи відповідно. Прирівнювання коефіцієнтів при однакових степенях  $x$ , припускаючи, що  $\varepsilon(x, \tau) = 0$ , дає наступні системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_0}{\partial \tau}(\tau) = 2a(\tau)T_2(\tau) \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau}(\tau) = 12a(\tau)T_4(\tau) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u_0}{\partial \tau}(\tau) = 2D(\tau)u_2(\tau) + 2D(\tau)\delta_m(\tau)T_2(\tau) \\ \frac{\partial u_2}{\partial \tau}(\tau) = 12D(\tau)u_4(\tau) + 12D(\tau)\delta_m(\tau)T_4(\tau) \end{cases} \quad (16)$$

На етапі сушіння з постійною швидкістю відбувається зростання коефіцієнта теплопровідності,  $a$ , зумовлене підвищенням температури, частково компенсується зниженням внаслідок зменшення вологовмісту. Враховуючи, що випаровування на початковій стадії є адіабатичним, значення  $T_{ср}$  і  $u_{ср}$  постійні, а  $T_{ср} = T_m$ , де  $T_m$  – температура мокрого термометра. На другому етапі сушіння температура зростає до тих пір, поки не стане рівномірною по всьому перерізу

деревини. Отже, ліва частина рівняння (2) стає тотожно рівною 0. Підставивши відомі постійні значення в рівняння (3) і застосувавши граничні умови, задачу можна розв'язати чисельно. У цьому сценарії початкові умови для рівняння другого періоду сушіння отримуються з розв'язку рівняння для першого періоду. До кінця другого періоду температура залишається постійною і дорівнює температурі сухого термометра сушильного агента. Тоді задача переходить до побудови функції вологовмісту [11].

Оскільки температура вирівнюється по всій товщині, складова  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  з рівняння масопереносу пропаде, а рівняння набуде вигляду

$$\frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau)\varepsilon(x, \tau) = D(\tau) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, \tau) + \varepsilon(x, \tau) \frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau) \quad (17)$$

Або

$$\frac{\partial u}{\partial \tau}(x, \tau) = \frac{D(\tau)}{1-\varepsilon(x, \tau)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau) \quad (18)$$

Початкові умови набудуть вигляду

$$u(x, \tau_0) = C_0 + C_2 x^2 \quad (19)$$

де  $C_0$  і  $C_2$  можна знайти з середнього значення, визначеного експериментально

Пропишемо задачу масоперенесення зроблених припущень

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(x, \tau) = A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, \tau) \\ u(x, \tau_0) = C_0 + C_2 x^2 \\ \frac{\partial u}{\partial x}(\delta, \tau) = B \cdot u(\delta, \tau) \end{cases} \quad (20)$$

Система рівнянь (20) являє собою крайову задачу третього роду для рівняння теплопровідності. Для цього випадку ми застосуємо спеціалізований розв'язок, який є справедливим, зокрема, для випадків, коли  $Bi \gg 1$ . На початковій стадії сушіння чисельне розв'язання за допомогою математичного пакету Matlab систем рівнянь (13) і (14) виявляє залежність функцій температури і вологовмісту від часу, яка дуже нагадує лінійну рис.3.2. Для перевірки адекватності математичної моделі проведено порівняльний аналіз з експериментальними даними, наведеними в роботі [12] та проілюстровано на рис. 3.3.



Рисунок 3.2 - Залежність функцій температури і вологовмісту від часу згідно з математичною моделлю

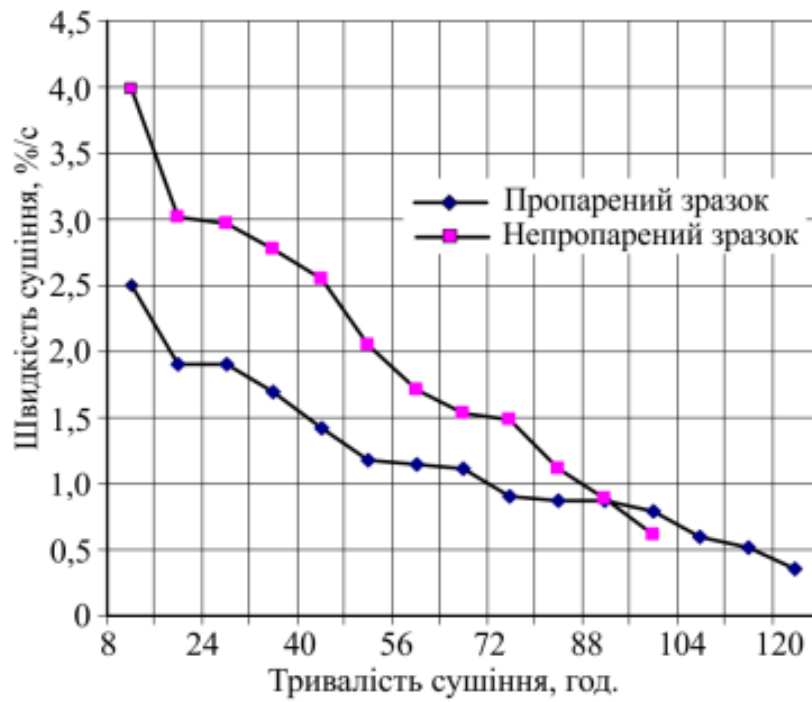


Рисунок 3.3 – Графік з експериментальних даних залежності швидкості сушіння від часу

#### 4. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧАСУ СУШІННЯ

В сучасному світі, де технології швидко розвиваються та впливають на всі аспекти життя, програмування стає не лише потужним інструментом, але й ключовою складовою для розвитку традиційних галузей, таких як деревообробна промисловість. Програмування узагальнюється як мова майбутнього, і в контексті деревообробної галузі це відкриває безліч можливостей для вдосконалення та оптимізації процесів.

Деревообробна промисловість, яка включає в себе лісозаготівельні операції, обробку деревини, виробництво меблів та інші аспекти, здебільшого спирається на традиційні методи. Проте, впровадження програмування в цю галузь відкриває шлях до більш ефективних та інноваційних рішень.

Однією з ключових переваг програмування в деревообробній промисловості є автоматизація та оптимізація виробничих процесів. Використання датчиків, IoT-технологій та алгоритмів штучного інтелекту дозволяє вдосконалити моніторинг лісозаготівельних операцій, визначати оптимальні шляхи для обрізання дерев, а також автоматизувати виробництво меблів. Це не лише збільшує продуктивність, але й зменшує витрати і допомагає зберігати природні ресурси.

Однак, разом з усією цією інноваційною активністю, важливо враховувати етичні аспекти та сталість використання лісових ресурсів. Програмування також може відігравати важливу роль у вирішенні проблеми лісового господарства та збереженні природи. Наприклад, використання алгоритмів для прогнозування темпів зростання лісів, визначення оптимального часу для заготівлі, та розробка систем управління для визначення раціонального використання лісових ресурсів може сприяти сталому лісовому господарству.

Крім того, програмування може бути важливим інструментом для впровадження концепції "Індустрії 4.0" в деревообробній промисловості. З'єднання реального виробництва з цифровими технологіями, такими як Internet of Things (IoT), штучний інтелект, інтелектуальні системи управління може створити гнучкі та адаптивні виробничі середовища.

Саме тому було розроблено програму для вибору оптимального часу сушіння деревини різних порід по введеним початковим та кінцевим даним. Програма базується на спрощеному евристичному підході для моделювання процесу сушіння деревини та визначення оптимального часу сушіння.

Для роботи програми потрібно ввести початкові умови:

початкова концентрація вологи в деревині  $W_{\text{п}}$ , %;

кінцева вологість готового продукту  $W_{\text{к}}$ , %;

температура теплоносія на вході  $t_1$ , К°;

температура теплоносія на виході  $t_2$ , С°;

температура повітря в початковий період часу  $t_{1\text{п}}$ , С°;

вологівміст повітря на вході у камеру  $d_1$ , г/кг;

товщина дошки  $s$ , мм;

тривалість сушіння при заданій товщині  $\tau$ , год ;

коефіцієнт нерівномірності швидкості сушіння  $K$ ;

середня густина матеріалу  $\rho_6$ , кг/м<sup>3</sup> [13].

Загальну тривалість сушіння, включаючи початковий прогрів і вологотеплообробку, знаходять з виразу

$$\tau = \tau_{\text{вих}} A_{\text{ж}} A_{\text{п}} A_{\text{о}} A_{\text{і}} A_{\text{т}} \quad (21)$$

$\tau_{\text{вих}}$  - це час, що витрачається на сушіння певного виду деревинних матеріалів, товщини ( $S_1$ ) і ширини ( $S_2$ ) в спеціальних камерах з примусовою реверсивною циркуляцією повітря середньої інтенсивності. Умови сушіння передбачають нормальний режим з розрахунковою швидкістю повітря 1 м/с і шириною стелажа 1,5...2 м. Перед початком процесу сушіння початкова вологість становить 60%. Сушіння завершується, коли вологість досягає 10%. Час сушіння,  $\tau_{\text{вих}}$ , визначається за таблицею 4.1.  $A_{\text{ж}}$  – коефіцієнт жорсткості обраного режиму сушіння. Для нормального режиму сушіння  $A_{\text{ж}} = 1$ . Коефіцієнт  $A_{\text{п}}$  - враховує характер і інтенсивність циркуляції повітря в камері. Цей коефіцієнт визначається за таблицею 4.2 залежно від добутку  $\tau_{\text{вих}}$  і  $A_{\text{ж}}$  і швидкості циркуляції. У даному випадку швидкість циркуляції повітря,  $\omega_{\text{п}}$ , становить 2 м/с.

Таблиця 4.1 - Вихідна тривалість сушіння деревини

Товщина пиломатеріалів S <sub>i</sub> , мм	Ширина пиломатеріалів S <sub>2</sub> , мм					
	30–	50–65	75–95	100–120	130–170	>170
Сосна, ялина, ялиця, кедр						
До 15	21	23	25	26	26	26
20	27	32	33	34	34	34
25	33	35	38	40	40	40
30	42	47	49	52	53	53
35	58	63	67	71	72	72
45	72	77	82	85	87	88
55	–	91	96	99	102	106
65	–	108	115	121	126	132
75	–	–	150	162	177	192
80	–	–	158	179	195	212
Береза, вільха						
До 15	34	35	35	37	38	38
20	42	43	45	45	47	48
25	51	52	53	55	57	57
30	62	68	75	80	84	87
35	83	86	89	93	94	95
45	95	97	99	102	106	109
55	–	112	126	138	147	157
65	–	156	184	210	229	248
80	–	–	370	426	462	515
Дуб, горіх, граб						
До 15	82	83	83	85	85	89
20	89	92	95	97	97	98

25	99	102	105	108	112	117
30	123	129	136	139	142	146
35	147	171	190	204	210	216
45	185	231	264	287	301	319
55	–	366	435	482	528	553
65	–	563	675	779	842	907
80	–	–	1081	1204	1344	1480

Тривалість процесу сушіння деревини залежить від великої кількості непостійних факторів, тому дані наведені в таблиці 4.1 для деяких видів деревини (таких як сосна, ялина, береза, дуб та ін.) є приблизними. Дані можуть корегуватися в залежності від умов та замірів контрольних сушінь на кожному окремому виробництві [14].

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнту  $A_{ж}$  для камер з реверсивною циркуляцією.

$\tau_{вих} A_{ж}$ , год	Швидкість циркуляції $\omega_{мат}$ , м/с							
	0,2	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0
15	3,07	1,72	1,00	0,74	0,60	0,51	0,47	0,45
30	2,34	1,59	1,00	0,77	0,63	0,56	0,53	0,51
50	1,97	1,53	1,00	0,80	0,68	0,62	0,59	0,57
75	1,71	1,38	1,00	0,81	0,74	0,70	0,67	0,66
105	1,58	1,33	1,00	0,85	0,80	0,78	0,76	0,71
145	1,30	1,18	1,00	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87
190	1,16	1,12	1,00	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93
>220	1,09	1,06	1,00	0,99	0,97	0,96	0,95	0,94

Коефіцієнт  $A_{ж}$ , залежить від початкової  $W_{п}$ , і кінцевої  $W_{к}$  вологості. Визначається з таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнту  $A_{ж}$ 

Початкова вологість $W_n, \%$	Кінцева вологість $W_k, \%$											
	22	20	17	15	13	11	10	9	8	7	6	5
130	1,08	1,13	1,17	1,24	1,33	1,43	1,48	1,54	1,60	1,66	1,74	1,84
115	1,00	1,07	1,13	1,21	1,29	1,36	1,42	1,48	1,54	1,60	1,69	1,79
100	0,95	1,00	1,05	1,13	1,21	1,30	1,36	1,42	1,49	1,56	1,63	1,74
95	0,88	0,94	1,00	1,06	1,15	1,24	1,29	1,35	1,42	1,50	1,56	1,65
85	0,81	0,87	0,93	1,00	1,10	1,19	1,24	1,30	1,36	1,45	1,52	1,61
75	0,73	0,79	0,85	0,93	1,00	1,09	1,14	1,20	1,26	1,33	1,41	1,50
70	0,68	0,75	0,81	0,86	0,97	1,04	1,09	1,15	1,22	1,29	1,36	1,45
65	0,63	0,69	0,76	0,83	0,92	1,00	1,05	1,10	1,17	1,24	1,31	1,40
60	0,58	0,64	0,68	0,76	0,84	0,93	1,00	1,05	1,11	1,19	1,26	1,36
55	0,52	0,58	0,64	0,72	0,80	0,88	0,93	1,00	1,06	1,13	1,20	1,30
50	0,45	0,51	0,58	0,65	0,74	0,83	0,88	0,94	1,00	1,07	1,14	1,23
45	0,38	0,44	0,48	0,58	0,66	0,76	0,81	0,85	0,94	1,00	1,07	1,15
40	0,30	0,36	0,44	0,51	0,58	0,67	0,73	0,79	0,85	0,93	1,00	1,09
35	0,21	0,26	0,33	0,40	0,49	0,58	0,63	0,69	0,74	0,83	0,91	1,00
30	0,16	0,20	0,28	0,36	0,44	0,54	0,59	0,65	0,72	0,79	0,87	0,97
26	0,11	0,17	0,22	0,30	0,39	0,48	0,53	0,58	0,65	0,72	0,80	0,89
24	0,07	0,12	0,19	0,27	0,34	0,42	0,47	0,52	0,59	0,66	0,74	0,83
22	–	0,07	0,14	0,23	0,29	0,39	0,44	0,48	0,55	0,62	0,69	0,79
20	–	–	0,08	0,15	0,22	0,31	0,38	0,42	0,47	0,54	0,63	0,74

Коефіцієнт  $A_n$ , враховуючий тривалість вологотеплообробки й кондиціонування деревини в камері, вибирають в залежності від категорії якості одержуваного продукту.

Коефіцієнт довжини  $A_T$  для заготовок знаходять залежно від відношення довжини матеріалу  $L$  до її товщини  $S_1$ ; для пиломатеріалів  $A_T = 1$ .

Розроблена програма на мові Python використовує формулу 21 як базову для подальшого проведення обчислень. Приклад коду програми представлено на рис.4.1.



```

def calculate_drying_time(tvih, Ar, Ac, Ak, Av, Ad):
     $\tau$  = tvih * Ar * Ac * Ak * Av * Ad
    return  $\tau$ 

# Calculate vapor pressure at the initial air temperature
p1 = 610.7 * math.exp((17.38 * t1p) / (t1p + 239.7))

# Calculate vapor pressure at the initial moisture concentration in wood
p2 = p1 * (initial_moisture / 100.0)

# Calculate moisture content in air at the outlet
moisture_air_outlet = moisture_air_inlet - (p2 - p1) / (R * t1)

# Calculate drying coefficient
drying_coefficient = drying_rate_coefficient * (t2 - t1) / (moisture_air_outlet - moisture_air_inlet)

```

Рисунок 4.1 – частина коду програми для визначення часу сушіння

Для прикладу роботи програми було обрано такі умови, представлені на рис.4.2

```

# Given values
tvih = 50
Ar = 1
Ac = 0.71
Ad = 1
Ak = 3
Av = 1.25

```

Рисунок 4.2 – Довільні початкові умови

Результатом роботи програми є виведення на екран значення в годинах часу сушіння, даний результат представлено на рис.4.3

The drying time of wood is: 133.125

Рисунок 4.3 – Результат роботи програми

## 5. РОЗРОБКА РЕГУЛЯТОРА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ В КОНВЕКТИВНІЙ КАМЕРІ

### 5.1 Теоретична частина

Сушіння деревини - це складний процес, на який впливають різні зовнішні та внутрішні фактори. Обидва типи факторів відіграють вирішальну роль у визначенні швидкості та якості сушіння деревини. Розглянемо основні зовнішні і внутрішні фактори:

Зовнішні фактори:

1. Температура:

2. Вологість:

3. Циркуляція повітря:

- Ефект: хороша циркуляція повітря покращує видалення вологи з поверхні деревини, сприяючи більш рівномірному висиханню.

4. Вентиляція:

- Ефект: належна вентиляція допомагає підтримувати сприятливе середовище для сушіння, запобігаючи накопиченню вологого повітря навколо деревини.

5. Складування в штабелі:

- Ефект: розташування деревини під час сушіння впливає на потік повітря і розподіл вологи. Правильне укладання зводить до мінімуму дефекти сушіння.

6. Спосіб сушіння:

- Вплив: різні методи сушіння по-різному впливають на швидкість сушіння та якість деревини.

7. Погодні умови:

- Вплив: на сушіння впливають і погодні умови, адже система вентиляції найчастіше використовує повітря з навколишнього середовища для охолодження матеріалу.

8. Порода деревини:

- Вплив: різні породи деревини мають унікальні характеристики сушіння, деякі з них потребують особливих умов для оптимального висихання.

Внутрішні фактори:

1. Початковий вміст вологи:

- Вплив: вологість деревини на початку процесу сушіння впливає на загальний час сушіння.

2. Структура деревини:

- Вплив: анатомічна структура деревини, включаючи її щільність і розмір пор, впливає на те, як розподіляється і видаляється вода під час сушіння.

3. Товщина деревини:

- Вплив: товста деревина сохне довше, і ризик появи дефектів зростає. Для товстої деревини потрібна правильна техніка сушіння.

4. Стан деревини:

- Ефект: стан деревини (зелена, частково витримана або повністю витримана) впливає на те, як вона реагує на сушіння.

5. Серцевина проти заболоні:

- Вплив: серцевина і заболонь можуть мати різні характеристики сушіння через різну пористість і проникність.

6. Обробка деревини:

- Вплив: певна обробка деревини (наприклад, консерванти, покриття) може впливати на процес сушіння.

Під час роботи сушильна установка стикається з динамічними змінами не тільки основних параметрів управління, таких як подача газу і зміна "вхідної потужності" (мається на увазі швидкість подачі матеріалу в піч), але і з різними зовнішніми факторами. Ці фактори включають регулювання подачі повітря для підтримки відповідної температури агента сушіння гарячим повітрям і врахування коливань вмісту вологи у вхідному матеріалі, який може коливатися в межах певних порогових значень. Крім того, подача повітря має вирішальне значення для забезпечення оптимального горіння газового котла біля сушильної камери.

Спрощене представлення функціональної схеми наведено на рисунку, що ілюструє взаємопов'язану природу цих багатогранних експлуатаційних змінних (рис.5.1).

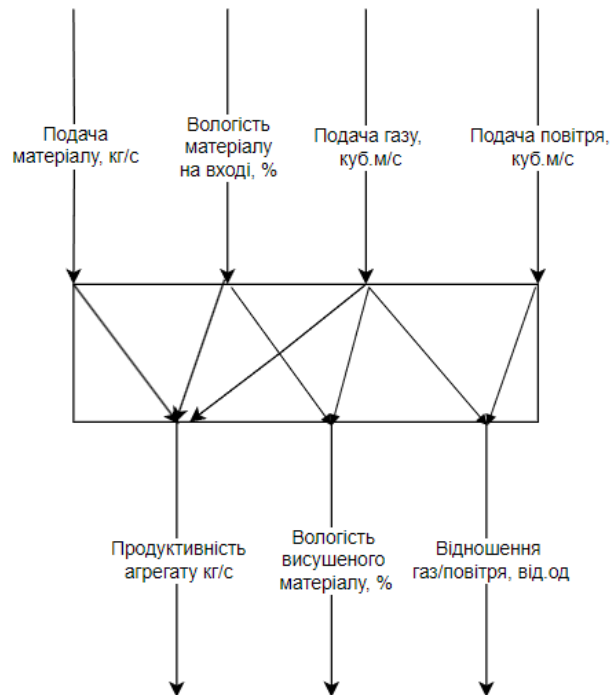


Рисунок 5.1 - Спрощена функціонально технологічна схема конвективного сушильного агрегату

Очевидно, що ефективність сушильної установки відповідає швидкості подачі матеріалу на сушку, віднятій від кількості видаленої вологи:

$$Pr(Q, Vl_{вх}, Vl_{вих}) = Q \cdot (1 - Vl_{вх} + Vl_{вих}) \quad (22)$$

де:

$Pr$  – продуктивність агрегату, кг/с;

$Q$  – темп подачі матеріалу в сушарку, кг/с;

$Vl_{вх}$  - вологість матеріалу на вході в сушарку, від. одиниці;

$Vl_{вих}$  - вологість матеріалу на виході із сушарки, від. Одиниці [15] .

Розглянемо технологію сушіння через призму управління цим технологічним процесом. Основним завданням сушильної установки є досягнення необхідного обсягу належним чином висушеного матеріалу, який в даному випадку є штабель деревини, або бажаної безперервної продуктивності. У типовому сценарії сушарка

інтегрована в технологічний процес, і її продуктивність визначається кількістю матеріалу, що подається на сушіння, параметром, визначеним на попередніх технологічних етапах. В автономному режимі продуктивність сушарки задає оператор. Отже, що стосується внутрішнього управління самим процесом сушіння, то подача матеріалу і, відповідно, тісно пов'язана з нею продуктивність сушарки не можуть бути внутрішньо відрегульовані; натомість інші процеси повинні адаптуватися до встановленої ззовні продуктивності сушильного агрегату. Це означає, що на продуктивність сушарки впливають різні фактори. Швидкість подачі матеріалу в сушильну установку діє як збурення для всіх внутрішніх компонентів, які забезпечують безпосереднє функціонування систем управління сушаркою. Отже, з точки зору управління та оптимізації процесу сушіння, основною технологічною вхідною величиною сушильного агрегату і основною технологічною вихідною величиною є продуктивність сушарки [16].

Аналогічна ситуація виникає з вологістю матеріалу на вході в сушарку. На цей параметр впливають попередні технологічні процеси, він не піддається прямому регулюванню при управлінні сушильною установкою, і, таким чином, вологість матеріалу на вході стає збуренням з точки зору процесу управління сушінням. Сушильну установку, що розглядається як об'єкт керування вологістю матеріалу на виході, можна представити за допомогою наступної структурно-функціональної моделі, зображеної на рис. 5.2.



Рисунок 5.2 - Структурно-функціональна модель сушильної установки

Припустимо, що сушильний агрегат знаходиться в середині технологічного ланцюга, а це означає, що швидкість подачі деревини на сушіння диктується попередніми умовами. За таких обставин можна стверджувати, що управління продуктивністю сушильного агрегату здійснюється за допомогою розімкненої автоматизованої системи управління (АСУ) з жорстким рівнем контролю. Багатовимірна система керування сушильною установкою зі зворотнім зв'язком проілюстрована на рис 5.3.

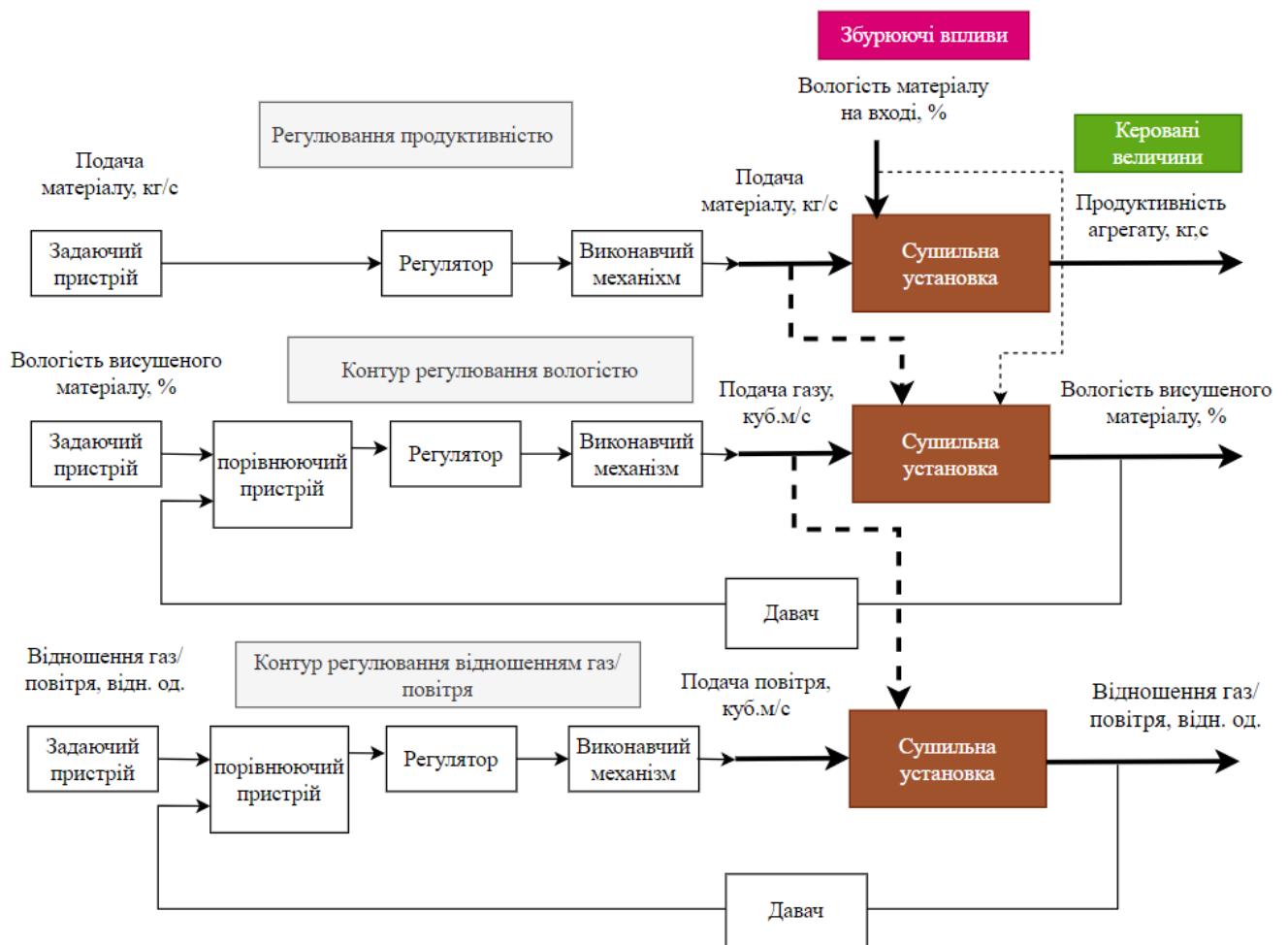


Рисунок 5.3 - Багатовимірна система керування сушильною установкою

Таким чином, модель сушильної установки та її системи керування передбачає використання подвійної автоматизованої системи управління (АСУ). Первинна АСУ відповідає за подачу необхідної кількості газу для процесу сушіння матеріалу, в той час як вторинна АСУ підтримує оптимізацію сушіння шляхом подачі необхідного повітря для горіння газового паливника. Слід зазначити, що

друга САУ виконує допоміжну роль по відношенню до першої. Таким чином, для ефективного управління сушінням використовується основна САУ, що регулює вологість матеріалу на виході, і додаткова САУ, що контролює співвідношення газ/повітря. Крім того, для підвищення ефективності та забезпечення оптимальної роботи сушарки застосовуються різні додаткові системи регулювання та контролю. Однак основна увага в цій роботі зосереджена на контролі заданого параметра вологості [17] модель якої проілюстровано на рис.5.4.

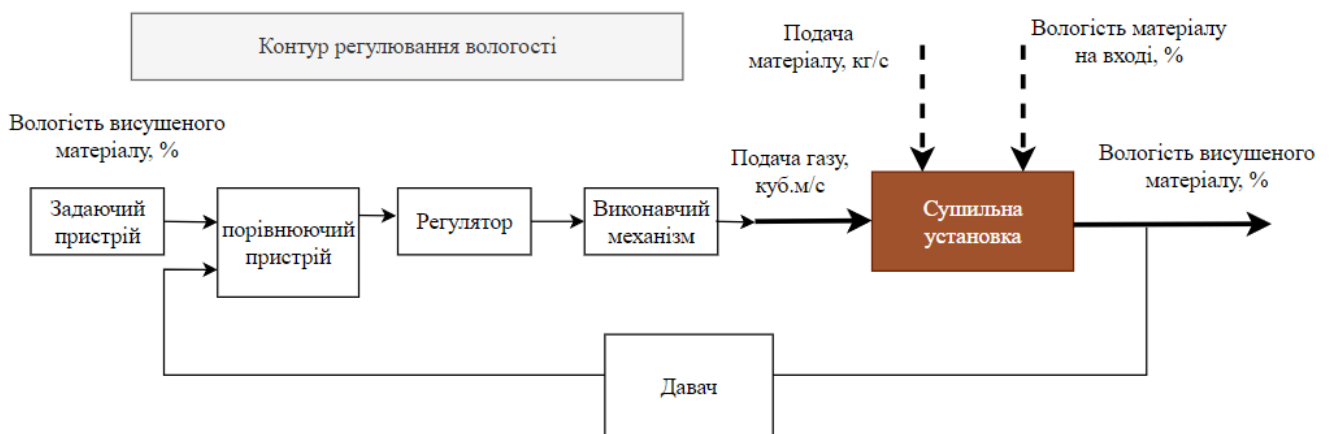


Рисунок 5.4 - Модель курування вологістю сушильної установки в залежності від вологості по відхиленню

## 5.2 Практична частина

В першому наближенні об'єкт управління ОУ (сушильна установка) описується передатною функцією :

$$W_{об} = \frac{k_{об} \cdot e^{-\tau_0 p}}{T \cdot p + 1} \quad (23)$$

$k_{об}$  – коефіцієнт передачі об'єкта регулювання;

$\tau_0$  – стала запізнення об'єкта регулювання;

$T$  – постійна часу об'єкта регулювання.

Розрахуємо  $k_{об}$ , використовуючи формулу :

$$k_{об} = \frac{k_k F_k}{k_k F_k + k_{ог} F_{ог} + \alpha F_d} = \frac{60,5 \cdot 40,0}{60,5 \cdot 40,0 + 1,84 \cdot 242,5 + 174 \cdot 165,5} = 0,0764 \quad (24)$$

де  $k_k$  – коефіцієнт теплопередачі калориферу,  $k_k = 60,5 \text{ Ват/м}^2\text{С}$ ;

$F_K$  – поверхня калорифера,  $F_K = 40,0 \text{ м}^2$ ;

$k_{ог}$  – середній коефіцієнт теплопередачі огорожень  $k_{ог} = 1,84$ ;

$F_{ог}$  – поверхня огорожень  $F_{ог} = 242,5 \text{ м}^2$

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну в процесі сушіння

$\alpha = 174 \text{ Ват/год} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}$ ;

$F_D$  – поверхня об'єкту сушіння,  $F_D = 165,5 \text{ м}^2$ .

Постійна часу об'єкта буде рівна:

$$T = \frac{c_M m_M}{k_k F_k} + \frac{c_M m_M}{k_k F_k + k_{ог} + \alpha F_D} = 2,53 \quad (25)$$

Згідно характеристик лісосушильної камери вибираємо, що відношення

$\tau_0/T = 0,27$ . Тоді  $\tau_0 = 0,27 \cdot T = 0,683 \text{ хв}$ .

Розробимо спрощену модель контуру автоматичного регулювання вологістю по відхиленню [18] представлена на рис. 5.5.

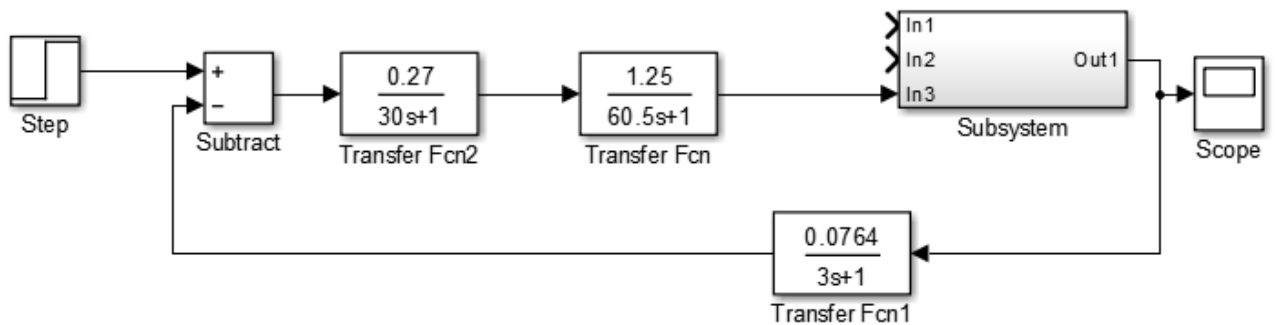


Рисунок 5.5 - Модель контуру автоматичного регулювання вологою по відхиленню

Включаючи дані про початкову та кінцеву вологість, а також інформацію про подачу матеріалу, яка слугує нашим збуренням, модель набуває вигляду, показаного на рисунку 5.6.



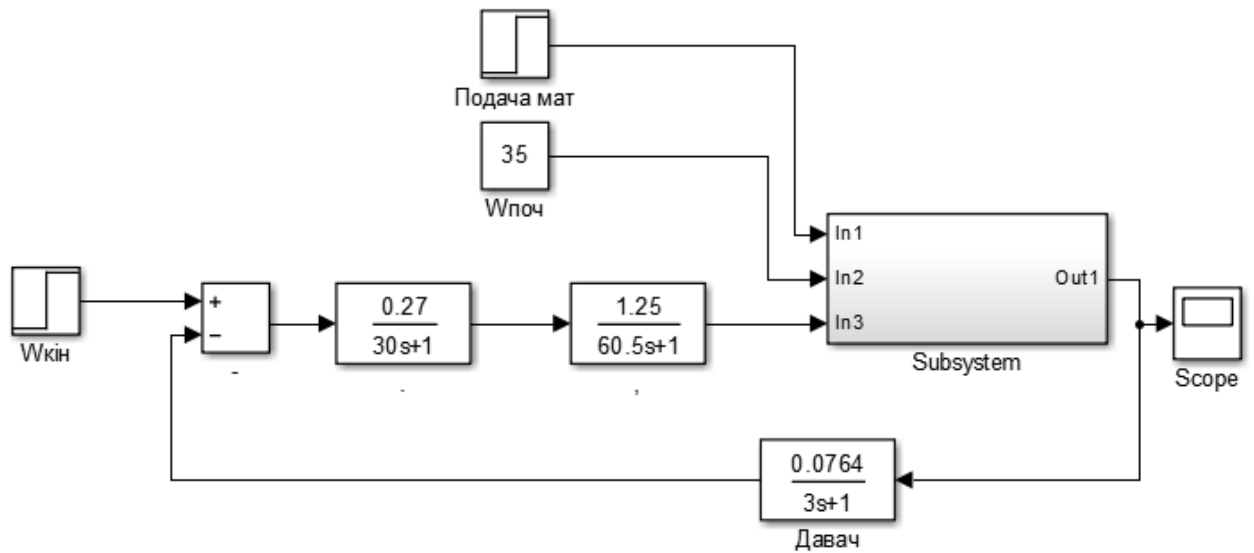


Рисунок 5.6 – Модель контуру регулювання зі збуреннями від початкової та кінцевої вологи без регулятора

Моделюємо процес перехідного процесу по заданій початковій вологості як показано на рис. 5.7.

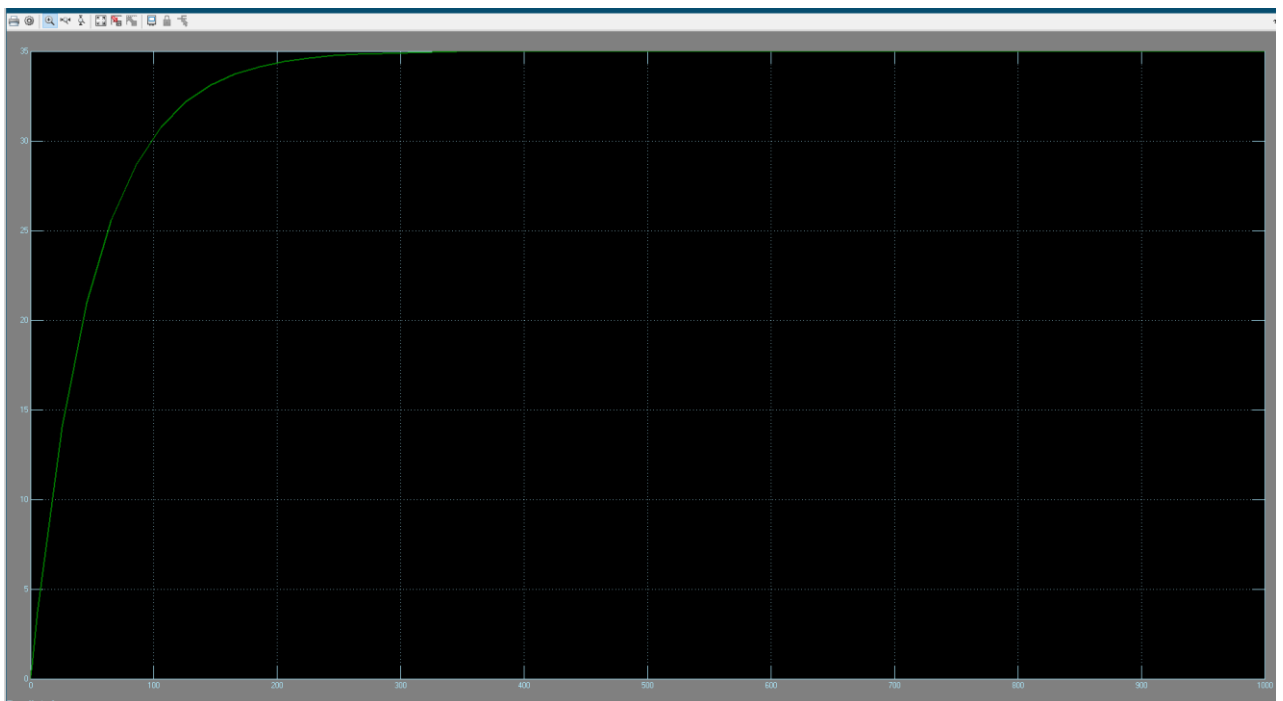


Рисунок 5.7 - Перехідна характеристика моделі без регулятора

Як можна побачити з характеристики тривалість перехідного процесу становить 6 хвилин, а це є поганим показником, який можна покращити, тому було вирішено додати в систему ПД регулятор

Пропорційно-Інтегрально-Диференційний (ПІД) регулятор є ефективним засобом автоматичного керування процесом сушіння деревини. Цей регулятор використовує тривалий досвід інженерів та технологів для забезпечення оптимального управління параметрами сушіння. Давайте розглянемо, як працює такий регулятор:

Пропорційна (P) частина:

Відповідає за реакцію на поточні зміни в системі.

Настройка коефіцієнта пропорційності визначає чутливість регулятора до поточних помилок між бажаною і фактичною вологою деревини.

Інтегральна (I) частина:

Враховує кумулятивну помилку в часі.

Забезпечує компенсацію залишкових помилок і підтримує систему у стабільному стані довгий час.

Диференційна (D) частина:

Зменшує реакцію на швидкі зміни в системі.

Допомагає уникнути перерегулювання та підтримує більш плавну роботу регулятора.

У контексті сушіння деревини, ПІД регулятор може використовуватися для управління температурою та вологістю повітря, що використовується у сушильній камері. Регулятор може автоматично адаптувати умови сушіння, забезпечуючи ефективність процесу та якість готової деревини. В нашому випадку ПІД регулятор ми використовуємо для управління вологою.

Після додавання ПІД регулятора модель систему набуває вигляду представленого на рис.5.8.

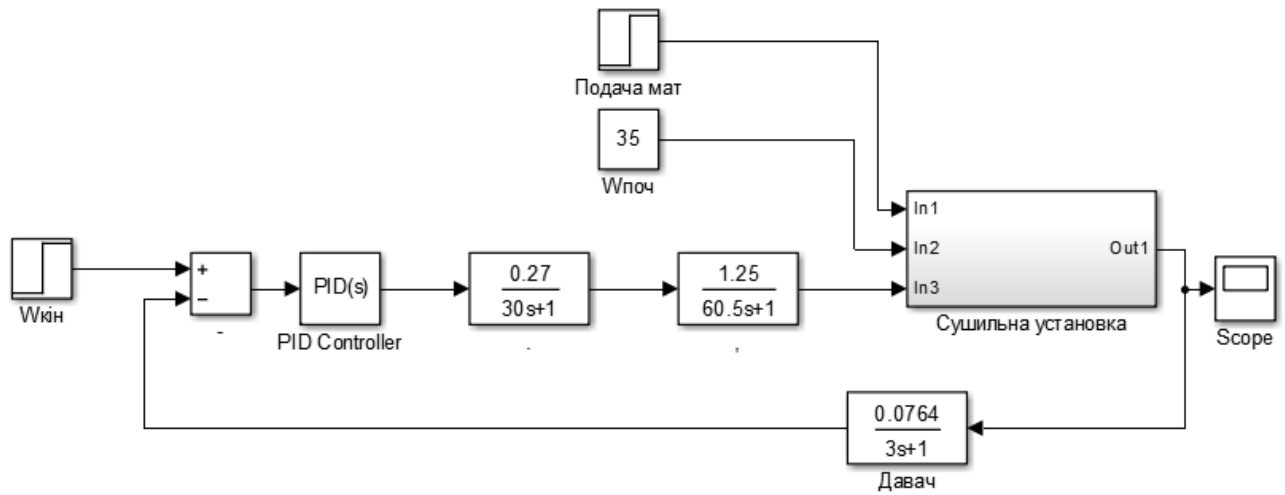


Рисунок 5.8 - Модель контуру управління вологою з ПІД регулятором

Моделюємо перехідну характеристику системи з неналаштованим ПІД регулятором, даний перехідний процес представлений на рис.5.9.



Рисунок 5.9 – Перехідний процес моделі з неналаштованим ПІД регулятором

Даний перехідний процес відбувається з великим перерегулюванням, що складає 57% від номінального значення, а також з відчутними коливаннями від потрібної величини, тому треба налаштувати ПІД регулятор на оптимум

Оптимальні для цього процесу параметри налаштувань ПІД-регулятора:  $K_p = 1,33$ ;  $K_i = 0,01423$ ;  $K_d = 0,9107$ . Перехідний процес з налаштованим ПІД регулятором представлено на рис.5.10.



Рисунок 5.10 – Перехідний процес моделі з налаштованим ПІД регулятором

З рис. 5.10 можна зробити висновок, що час перехідного процесу зменшився до 2,2 хвилин, що майже в 3 рази швидше ніж без ПІД регулятора.

Для аналізу перехідного процесу з використанням ПІД-регулятора визначимо перерегулювання  $\sigma$  розробленого ПІД-регулятора за перехідною характеристикою, яку безпосередньо наведено на рис. 5.11.

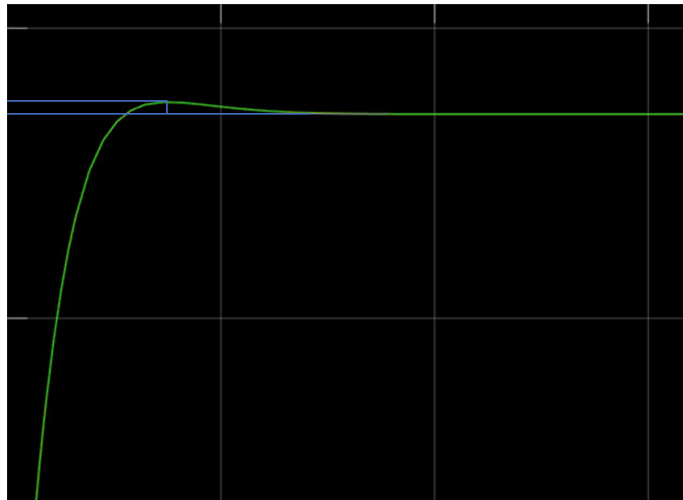


Рисунок 5.11 – Перерегулювання перехідного процесу

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} = \frac{35,93 - 35}{35} = 0,0265 \quad (26)$$

Аналіз результатів обчислень показує, що перерегулювання становить приблизно 2,65%, що свідчить про успішне функціонування оптимізації контролера.

Щоб оцінити роботу системи під впливом зовнішніх збурень, ми піддамо її активним збуренням. Результуючий перехідний процес проілюстровано на рисунку 4.11, який демонструє реакцію системи на ці зовнішні впливи.

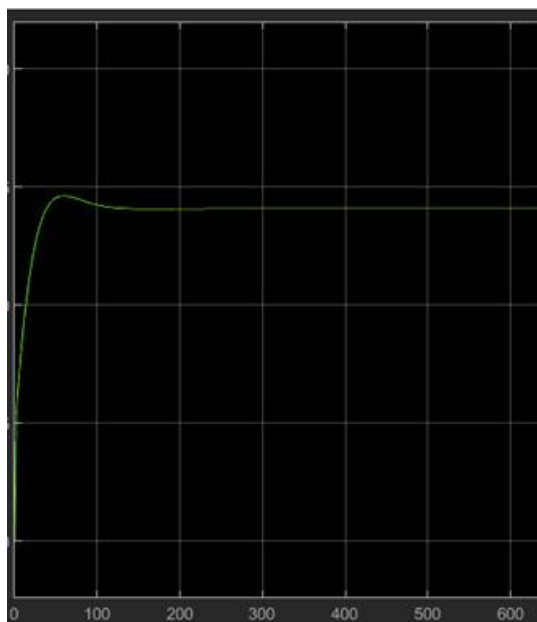


Рисунок 5.12 – Перехідна характеристики з налаштованим ПД-регулятором та активними збуреннями

Спостерігаючи за даними, ми помічаємо появу незначних коливань у часовому поясі між 130 та 230 секундами. Відсоток перерегулювання дещо збільшився до 4,3%. Однак після цього періоду система демонструє стабільність, а контролер вправно справляється зі збуреннями в системі. Такі загальні показники свідчать про успішну оптимізацію системи.

## ВИСНОВКИ

Це дослідження заглиблюється в технологічні тонкощі сушіння деревини, зосереджуючись на оптимізації конвективної сушильної камери періодичної дії як ключового елемента. Дослідження вивчає процес сушіння деревини різних категорій та видів деревини та різні конвективні режими сушіння, визначаючи два основні контури управління: контур подачі тепла та контур зволоження та виведення пари. Встановлено критерії оптимізації системи керування.

Сформульовано комплексну математичну модель сушіння деревини після детального аналізу технологічного процесу. Математична модель ґрунтується на законі Фіка та принципах теплообміну та масоперенесення в деревині. Модель підкреслює необхідність оптимізації через внутрішні процеси в деревині, зокрема, зменшення небажаних напружень, які часто виникають при неправильному технологічному процесі, та при швидкому сушінні, що в результаті призводить до високого відсотка браку в кінцевому продукті.

На основі математичної моделі було розроблено програму на мові Python. Ця програма визначає час сушіння штабелю деревини на основі вхідних даних, які включають початкову і кінцеву вологість, геометричні параметри деревини, спираючись на експериментальні дані виведені для кожного виду деревини та в залежності від обраного режиму сушіння, де по обраним коефіцієнтам програмний код вираховує потрібну тривалість сушіння в залежності від введених даних, повний список яких описано в розділі 4.

Розроблено імітаційну модель системи керування сушильною установкою, розглянуто теоретичну і практичну складову питання. Виділено контур управління вологістю як основний для отримання якісного кінцевого продукту. Використовуючи пакет Simulink, який входить до програмного середовища Matlab було змодельовано імітаційну модель керування вологістю із зворотнім зв'язком, було встановлено, що перехідний процес потребує оптимізації. Було застосовано ПІД регулятор для оптимізації перехідного процесу. Завдяки ПІД регулятору перехідний процес став швидшим майже в 3 рази та стабільнішим, було перевірено

значення перерегулювання, яке становить 2,65%, що в повній мірі задовольняє поставлені умови. Перевірено реакцію системи на активні збурення та здатність системи їх утримувати у стабільному положенні.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ramos MM, Carra CA. Trends and opportunities of industry 4.0 in wood manufacturing processes. In M. Gong, Engineered Wood Products for Construction; 2021. DOI: 10.5772/intechopen.99581. University of New Brunswick.
2. 360iResearch. Wood & Wood Products Market by Type Global Forecast 2023-2030 / research journal, 2023. С – 3-25.
3. Abdulah L. Suhendang E. Purnomo H. Matangaran R. J. The role of urban household wood product consumption on forest management and its impact: a system modelling simulation approach in Bogor City / Article, 2021. С - 1-12.
4. Білей П.В., Соколовський І.А., Павлюст В.М., Кунинець Є.П. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів. Науково-практичне видання, друге, доповнене і перероблене.–Ужгород: Карпати, 2010.–140 с.
5. Губер Ю.М. Рекомендації з технології сушіння пиломатеріалів у конвективних сушарках. - Львів: РВВ НЛТУ України, 2003. – 28с.
6. Goldhahn, C.; Cabane, E.; Chanana, M. Sustainability in wood materials science: An opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. Philos. Trans. R. Soc. A 2021,379, 20200339.
7. Thybring, E.E.; Fredriksson, M. Wood modification as a tool to understand moisture in wood. Forests 2021,12, 372.
8. Fu, Z.; Wang, H.; Li, J.; Lu, Y. Determination of Moisture Content and Shrinkage Strain during Wood Water Loss with Electro-chemical Method. Polymers 2022,14, 778.
9. Automation of the drying process of agricultural raw materials to obtain products of high nutritional value I V Altukhov, S M Vykova, G V Lukina and V D Ochirov 2020.
10. Електропривод і автоматизація: Навчальний посібник / О.Ю.Синявський, П.І Савченко, Ю.М. Лавріненко та ін.; За ред. О.Ю.Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.
11. Fredriksson, M.; Rüggeberg, M.; Nord-Larsen, T.; Beck, G.; Thybring, E.E. Water sorption in wood cell walls–data exploration of the influential physicochemical characteristics. Cellulose 2023,30, 1857–1871.

12. Роқун, Р. Основні технології пропарювання та сушіння деревини. Науковий вісник НЛТУ України, 27(1), 2017. С - 168-171.
13. Сушильна камера Incoplan 3000 [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://leadermash.ru/product/derevoobrabotka/sushilnye-kamery-i-kotly/sushilnye-kamery-incoplan-topline-konvektivnogo-tipa/sushilnaya-kamera-incoplan-sm3000-40m3/>.
14. Uduak Umoh, Udoinyang G. Inyang, and Emmanuel E. Nyoho. Interval Type-2 Fuzzy Logic for Fire Outbreak Detection. International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI). August 2019. Vol.8. No.3. pp. 27–46.
15. Gao, Y.; Zhou, Y.; Fu, Z. Interdependence of shrinkage behavior between wood macroscopic and cellular level during moisture content loss. Dry Technol. 2022,40, 3241–3248.
16. Herrera-Díaz, R. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine / R. Herrera-Díaz, V. SepúlvedaVillarroel, N Pérez-Peña, L. Salvo-Sepúlveda, C. Salinas-Lira, R. Llano-Ponte, R.A. Ananías. // Drying Technology 36(5), 537–544 (2018). <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1342094>.
17. Сичевский, В.А. Моделирование технологического процессу конвективной сушки пиломатериалів / В.А. Сичевский // Науковий журнал// Серія фізико-технічних наук. 2018. Т. 63. № 4. С. 424- 434.
18. Zukunftsinstitut Osterreich GmbH (2017). The future of timber construction – CLT [pdf]. Available: <https://www.clt.info/wp-content/uploads/2017/06/Stora-Enso-The-future-of-timber-construction-EN.pdf>.