

РУБІНСЬКИЙ ЮРИЙ

Національний лісотехнічний університет України

<https://orcid.org/0009-0004-3111-7989>e-mail: yuriy.rubinsky@nltu.edu.ua**КРОШНИЙ ІГОР**

Національний лісотехнічний університет України

<https://orcid.org/0000-0003-0018-7998>e-mail: kroshny.igor@nltu.edu.ua

ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОНВЕКТИВНИХ СУШИЛЬНИХ КАМЕРАХ ЗАСОБАМИ SOLIDWORKS

У статті представлено інтегровану систему автоматизованого проєктування та моделювання фізичних процесів у конвективних сушильних камерах із використанням середовища SolidWorks. Актуальність дослідження зумовлена високою складністю та трудомісткістю ручного створення тривимірних моделей сушильних камер і штабелів деревини, що значно уповільнює процес інженерного проєктування та ускладнює подальший аналіз тепло- і масообміну. Запропонована система забезпечує наскрізну автоматизацію, яка охоплює етапи від задання вихідних параметрів деревини та геометрії штабеля до побудови готової тривимірної моделі сушильної камери і проведення розрахунків у середовищі SolidWorks Simulation. Розроблене програмне забезпечення створено мовою C# з використанням Windows Forms, що дало змогу реалізувати зручний графічний інтерфейс користувача для введення параметрів матеріалів, розмірів дощок, кількості рядів та характеристик самої камери. На основі введених даних автоматично генеруються макроси SolidWorks, які будують точні 3D-моделі штабелів і інтегрують їх у попередньо сформоване середовище сушильної камери. Це дозволяє значно скоротити час проєктування та зменшити кількість помилок, що виникають при ручному моделюванні. У моделі камери передбачено використання осьового вентилятора з водяним підігрівом, який забезпечує рівномірний розподіл повітряних потоків і стабільність температурного режиму. Застосування SolidWorks Simulation у поєднанні з автоматично згенерованими тривимірними моделями дає можливість виконувати детальні дослідження теплових та гідродинамічних характеристик процесу сушіння. Це відкриває шлях до точнішого аналізу рівномірності прогріву штабелів, визначення критичних зон із нерівномірним розподілом енергії та оцінки ефективності конструктивних рішень. Таким чином, запропонована система поєднує інструменти проєктування і комп'ютерного моделювання, створюючи універсальну основу для підвищення точності, швидкості й надійності інженерних розробок у галузі сушіння деревини.

Ключові слова: автоматизоване проєктування; C#; Windows Forms; теплообмін; гідродинамічні процеси.

RUBINSKY YURIY**KROSHNY IGOR**

Ukrainian National Forestry University

INTEGRATED SYSTEM FOR AUTOMATED DESIGN AND MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN CONVECTIVE DRYING CHAMBERS USING SOLIDWORKS

The article presents an integrated system for automated design and modeling of physical processes in convective drying chambers using SolidWorks. The relevance of the study is due to the high complexity and labor intensity of manually creating three-dimensional models of drying chambers and wood stacks, which significantly slows down the engineering design process and complicates further analysis of heat and mass transfer. The proposed system provides end-to-end automation, covering the stages from setting the initial parameters of the wood and the geometry of the stack to building a finished three-dimensional model of the drying chamber and performing calculations in the SolidWorks Simulation environment. The developed software was created in C# using Windows Forms, which made it possible to implement a convenient graphical user interface for entering material parameters, board dimensions, number of rows, and characteristics of the chamber itself. Based on the entered data, SolidWorks macros are automatically generated, which build accurate 3D models of stacks and integrate them into the pre-formed drying chamber environment. This significantly reduces design time and minimizes errors that occur during manual modeling. The chamber model includes an axial fan with water heating, which ensures uniform air flow distribution and stable temperature conditions. The use of SolidWorks Simulation in combination with automatically generated three-dimensional models makes it possible to perform detailed studies of the thermal and hydrodynamic characteristics of the drying process. This paves the way for a more accurate analysis of the uniformity of stack heating, the identification of critical areas with uneven energy distribution, and the evaluation of the effectiveness of design solutions. Therefore, the proposed system combines design and computer modeling tools, creating a universal basis for improving the accuracy, speed, and reliability of engineering developments in the field of wood drying.

Keywords: automated design; C#; Windows Forms; heat exchange; hydrodynamic processes.

Стаття надійшла до редакції / Received 13.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 21.11.2025

Постановка проблеми

Процеси конвективного сушіння деревини відіграють ключову роль у деревообробній промисловості, оскільки від рівномірності та якості сушіння залежить подальша міцність, стабільність та експлуатаційні характеристики готової продукції. Невірно підібрані режими сушіння чи нерівномірний розподіл температури та вологості всередині штабеля можуть призводити до виникнення внутрішніх напружень, тріщин, викривлень та інших дефектів, що знижує ринкову цінність матеріалу та збільшує виробничі втрати. Саме тому проєктування сушильних камер, а також дослідження фізичних процесів, які в них відбуваються, є надзвичайно важливими завданнями сучасної інженерної науки. Традиційний підхід до проєктування сушильних камер

передбачає створення тривимірних моделей вручну у середовищах CAD, таких як SolidWorks чи AutoCAD. Цей процес є складним і трудомістким, оскільки вимагає побудови кожної деталі та точного розташування багатьох елементів, зокрема окремих дощок у штабелі. У таких умовах значно зростає ймовірність помилок, особливо на етапах підготовки моделі до подальших інженерних розрахунків. Крім того, ручне створення моделей займає багато часу та обмежує можливість швидкого внесення змін або порівняння різних конструктивних рішень.

Ще однією проблемою є відсутність інтегрованих рішень, які б поєднували автоматизоване створення геометричних моделей із можливістю проведення числового аналізу фізичних процесів усередині сушильної камери. Хоча існують програмні комплекси для CFD-моделювання тепло- та масообміну, більшість із них орієнтовані на дослідження вже готових моделей і не мають інструментів для автоматичного генерування геометрії на основі заданих параметрів. Це обмежує гнучкість досліджень і ускладнює оптимізацію сушильних процесів. Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є розроблення інтегрованої системи, яка забезпечувала б автоматизоване проєктування тривимірних моделей штабелів деревини та конструкційних елементів сушильної камери, а також їхнє подальше використання у середовищі комп'ютерного моделювання фізичних процесів. Така система повинна значно зменшити кількість ручних операцій, підвищити точність побудови моделей і створити умови для швидкої перевірки та оптимізації параметрів сушіння.

Аналіз останніх публікацій

У сучасній науковій літературі тематика автоматизованого проєктування сушильних камер і моделювання фізичних процесів у них стає дедалі актуальнішою, особливо на тлі тенденції до цифрової трансформації в промисловості. Наприклад, у роботі [1] представлено підхід, який дозволяє користувачу вводити параметри геометрії та режимів сушіння, а програма, що працює через API SolidWorks, автоматично генерує 3D-модель та проводить теплові розрахунки у середовищі SolidWorks Simulation. Автори підкреслюють, що такий підхід значно зменшує втручання користувача і пришвидшує підготовку інженерних сценаріїв. Однак ця робота зосереджена переважно на тепловому аналізі й не охоплює повноцінну автоматизацію гідродинамічної частини або комплексну оптимізацію параметрів. Інший сучасний приклад це стаття [2], у якій запропоновано програмне забезпечення, яке поєднує автоматичне створення 3D-моделі сушильної камери через SolidWorks API та моделювання процесів на основі клітинних автоматів. У цій роботі проведено верифікацію з експериментальними даними, що підвищує надійність підходу. Проте використання клітинних автоматів має обмеження щодо деталізації гідродинамічних потоків у порівнянні з повноцінними CFD-методами. Досить показовим також є дослідження [3], у якому виконано тривимірне CFD-моделювання повітряних потоків і температурних полів усередині сушильної камери. Автори виявили наявність «холодних зон», що не прогриваються належним чином, і запропонували змінити конструкцію повітроводів або розташування штабелів. Це підтверджує ефективність CFD-аналізу як інструменту для вдосконалення конструкцій сушильних установок, проте такий підхід не вирішує завдання автоматизації побудови геометричних моделей. З іншого боку, загальні тенденції у сфері моделювання сушильних процесів окреслено в оглядовій статті [4], де розглянуто сучасні методи мультифізичного комп'ютерного аналізу з урахуванням тепло- і вологообміну. Автори наголошують, що хоча CFD-моделі демонструють високу точність, більшість практичних підходів обмежуються спрощеннями геометрії та граничних умов, що знижує можливості їхнього промислового застосування у складних тривимірних системах. Таким чином, аналіз літератури показує, що хоча існують роботи як з автоматизації CAD/CAE-моделювання, так і з CFD-аналізу сушильних камер, вузьким місцем залишається відсутність цілісної системи, яка б поєднувала автоматичне генерування 3D-моделей штабелів і камери, автоматизований тепловий і гідродинамічний аналіз, а також інтегровану оптимізацію параметрів. Отже, **мета цього дослідження** полягає у створенні інтегрованої системи, яка забезпечує наскрізну автоматизацію від введення параметрів геометрії до моделювання фізичних процесів у конвективних сушильних камерах за допомогою SolidWorks.

Автоматизоване проєктування 3D-моделей сушильних камер і штабелів деревини

Автоматизація процесу побудови тривимірних моделей є ключовим етапом у створенні інтегрованої системи дослідження фізичних процесів у конвективних сушильних камерах. Традиційний метод передбачає покрокове ручне моделювання геометрії елементів у CAD-середовищі, що вимагає значних витрат часу та підвищує ризик виникнення помилок при розташуванні багатьох об'єктів, зокрема дощок у штабелі. Запропоноване програмне забезпечення дозволяє значно зменшити кількість ручних операцій завдяки автоматизованому формуванню моделі з урахуванням параметрів, які користувач задає у графічному інтерфейсі. Загальну логіку роботи системи подано у вигляді блок-схеми (рис. 1). Розроблена система реалізована за допомогою мови програмування C# із використанням бібліотеки Windows Forms, що забезпечує зручний інтерфейс для введення вхідних даних. Користувач може визначити розміри дощок (довжину, ширину та товщину), їх кількість у ряді та кількість рядів у штабелі, а також геометричні параметри сушильної камери. Вигляд інтерфейсу введення параметрів наведено на рис. 2.

Після задання даних формується структура, яка передається у SolidWorks через макроси. Це дає змогу автоматично згенерувати точні тривимірні моделі штабелів деревини та розмістити їх у попередньо створеній моделі сушильної камери. Особливістю такого підходу є використання алгоритму параметричного побудови, який дозволяє змінювати конфігурацію моделей у реальному часі. Будь-яка зміна вхідних параметрів автоматично призводить до перебудови 3D-моделі, що значно спрощує процес проєктування й робить його адаптивним. Візуальний приклад автоматично сформованої 3D моделі сушильної камери з розташованим у ній штабелем наведено на рис. 3.

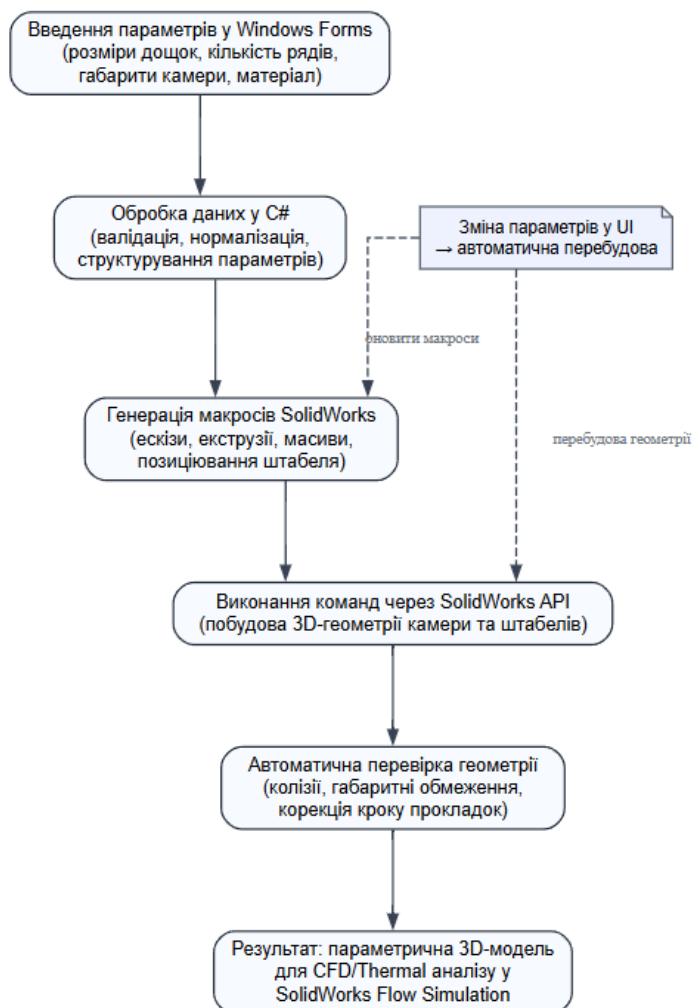


Рис. 1. Блок-схема алгоритму автоматизованого проєктування 3D моделей

Автоматизоване проєктування штабелю

Введіть кількість дощок в одному ряді: **10** та кількість рядів: **16** Загалом: **160** шт.

Геометричні параметри:

A	45	мм
B	100	мм
C	300	см
D	25	мм
E	80	мм
F	100	см
G	109,5	см
H	80	мм

Порода деревини: Дуб

Спроєктувати

Рис. 2. Інтерфейс введення геометричних параметрів штабелю

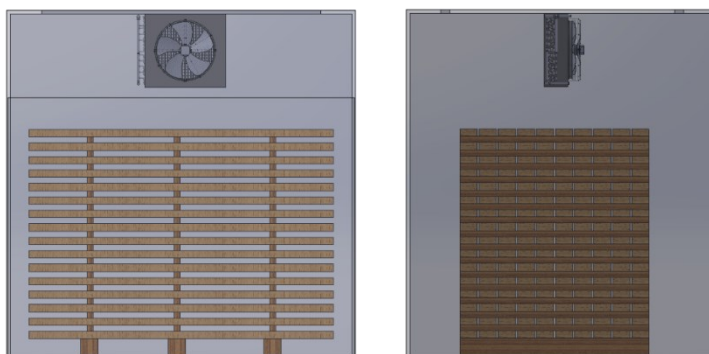


Рис. 3. Вигляд автоматично сформованої 3D моделі сушильної камери

Таким чином, автоматизоване створення моделей у SolidWorks забезпечує високу точність геометрії, скорочує час підготовки до експериментів і створює основу для подальшого моделювання тепло- та масообміну у SolidWorks Simulation. Завдяки поєднанню алгоритмічного підходу (рис. 1), зручного інтерфейсу користувача (рис. 2) та готової 3D моделі (рис. 3), інформаційна система демонструє своєрідну комплексність та значну ефективність у порівнянні з традиційними ручними методами.

Окрім цього, архітектура інформаційної системи має модульну структуру, що складається з інтерфейсного рівня (Windows Forms), модуля обробки даних, генератора макросів та інтеграційного рівня SolidWorks API (рис.4). Такий підхід дозволяє чітко розмежувати функціональність кожного компонента, спрощує підтримку системи та забезпечує можливість її розширення у майбутньому. Наприклад, модуль генерації макросів може бути адаптований для створення моделей інших типів штабелів чи сушильних камер без необхідності зміни користувацького інтерфейсу.

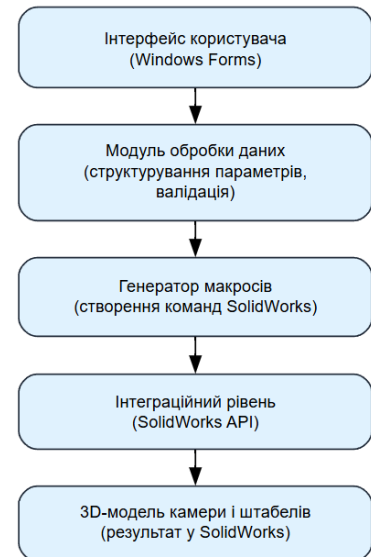


Рис. 4. Модульна структура ПЗ

Інтеграція з SolidWorks Simulation для моделювання фізичних процесів

Однією з головних цілей автоматизованого проектування є можливість використання створених 3D-моделей для аналізу фізичних процесів у конвективних сушильних камерах. Теплові та гідродинамічні явища, які відбуваються в таких системах, мають складний просторовий і часовий характер, що обумовлює необхідність застосування методів комп'ютерної гідродинаміки (CFD). Інтеграція автоматично згенерованих моделей у SolidWorks Simulation повинна забезпечити наскрізний процес дослідження, від введення геометричних параметрів до отримання карт розподілу температури та швидкостей повітряних потоків.

Таким чином, завданнями числового моделювання є аналіз розподілу температури у штабелі деревини, визначення характеру повітряних потоків у робочому об'ємі сушильної камери та оцінка ефективності роботи вентиляційної системи. Для цього формується розрахункова область, яка включає об'єм камери з розташованим у ній штабелем та каналами для циркуляції повітря. На поверхнях дощок задаються умови теплообміну, а вентилятор моделюється як джерело руху повітря з відповідною продуктивністю та напором. Джерело тепла реалізовано у вигляді водяного теплообмінника, що забезпечує нагрів циркулюючого потоку.

В даному випадку тепловий аналіз проведено в середовищі SolidWorks Simulation адже він надає можливість комплексного дослідження фізичних процесів у конвективній сушильній камері. Це дає змогу оцінити розподіл температури, теплових потоків та визначити ефективність роботи нагрівальної системи й вентиляції. Окрім цього, на основі результатів моделювання можна встановити, чи відповідає конструкція камери та обраний режим її роботи вимогам рівномірного сушіння і мінімізації теплових втрат [5].

Після вибору створеної автоматизованою системою 3D-моделі сушильної камери формується нове дослідження типу Thermal Study. У ньому задаються вхідні параметри, що визначають теплову поведінку моделі. Основними з них є: площа контакту між нагрівальними елементами та стінками камери (Connections / Contact Set), розподілений тепловий опір між поверхнями (Thermal Resistance), теплова потужність нагрівачів (Heat Power), конвекція для теплообміну із зовнішнім середовищем (Convection), а також температура навколишнього повітря (Bulk Ambient Temperature).

Для визначення розподіленого теплового опору між поверхнями [6] використовується співвідношення:

$$R = \delta / (\lambda \cdot A) \quad (1)$$

Де: δ – товщина стінки, λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, A – площа теплообмінної поверхні.

У нашому випадку тепло передається через стелю камери завтовшки 0,2 м, площею 4,6 м² (з урахуванням центрального проходу) і коефіцієнтом теплопровідності 0,07 Вт/(м·°C). Таким чином, тепловий опір становить приблизно 0,621 (м²·°C)/Вт. Для оцінки теплових втрат використано спрощений розрахунок теплопередачі через стінки [7]. За габаритами камери (висота - 2,7 м, ширина - 2,4 м, довжина - 3,05 м, товщина стінок - 0,2 м) та коефіцієнтом теплопровідності ізоляційного матеріалу 0,04 Вт/(м·°C) було визначено, що при різниці температур у 10°C і площі стінок 29,43 м² теплові втрати дорівнюють приблизно 58,86 Вт.

Загальні теплові навантаження сушильної камери залежать від вологості деревини та енергії, необхідної для випаровування води. Для камери зазначених розмірів середня теплова потужність одного нагрівача становить 150-300 Вт. Враховуючи неоднорідність прогріву матеріалу [8], сумарну теплову потужність системи можна прийняти на рівні 400 Вт. Значення коефіцієнта конвекції для теплообміну з навколишнім середовищем [9] визначено за загальним рівнянням теплопередачі:

$$h = Q / (A \cdot \Delta T) \quad (2)$$

Де: Q - теплова потужність, A - площа теплообміну, ΔT - різниця температур.

При початковій різниці температур 1°C отримаємо $h \approx 65$ Вт/(м²·°C). Для моделювання використовувалися три типи деревини – дуб, бук і сосна, параметри яких (густина, теплоємність, теплопровідність) взято з експериментальних даних [10]. Ці матеріали мають відмінні теплотехнічні властивості, тому їх порівняння дозволяє оцінити вплив вологості деревини на ефективність процесу сушіння.

На етапі підготовки розрахунку створюється спеціальна тетраедрична сітка. Якість сітки істотно впливає на точність результатів, тому, замість автоматичного генератора, у дослідженні застосовано ручне налаштування параметрів. Для зменшення обчислювальних витрат у моделі залишилися тільки ключові елементи: осьовий вентилятор із нагрівальною системою, штабель деревини, стінки, двері та стеля камери. У складних ділянках (з'єднання труб, місця переходів) використано технологію Control Mesh, яка забезпечує локальне згущення сітки [11]. Це підвищує точність у зонах із криволінійними поверхнями, де виникають концентрації теплових потоків.

Після налаштування сітки та граничних умов виконується розрахунок теплових процесів у всьому об'ємі камери. Отримано карти розподілу температури та густини теплових потоків у штабелі. Вони дають змогу оцінити рівномірність прогріву та ефективність теплообміну. Встановлено, що максимальні значення теплового потоку спостерігаються у верхньому ряді штабеля на рівні $162,4 \text{ Вт/м}^2$, що свідчить про інтенсивніший нагрів цієї зони. У середніх і нижніх шарах потік поступово знижується на 10-15 %, що підтверджує тенденцію до нерівномірного прогріву, характерну для конвективних сушильних камер.

Додатково за допомогою інструменту Probe виконано вимірювання температур у різних точках штабеля (рис. 5). Дані показали, що температура зростає від нижніх шарів до верхніх і стабілізується після досягнення режиму усталеного сушіння. Такі вимірювання дозволяють уточнити параметри теплових навантажень і скоригувати конструкцію системи нагріву для забезпечення рівномірного розподілу тепла в усьому об'ємі сушильної камери.

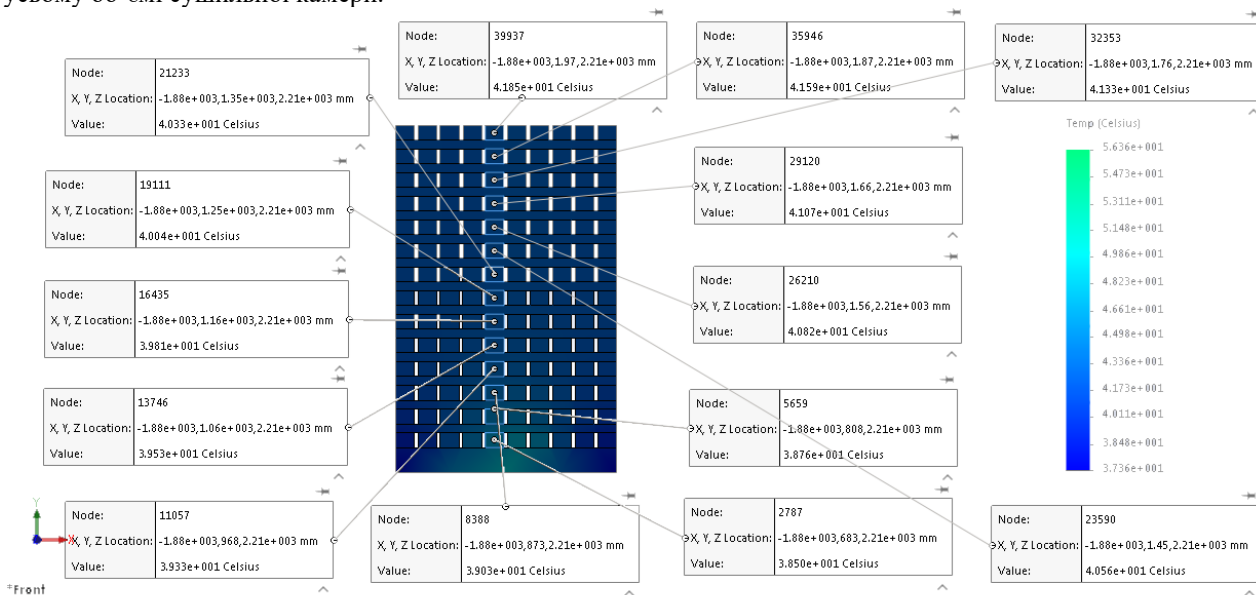


Рис. 5. Вимірювання температур у різних точках штабеля

На основі отриманих експериментальних даних побудовано графік зміни температури вздовж висоти штабеля (рис. 6), який відображає динаміку температурного розподілу в процесі сушіння.

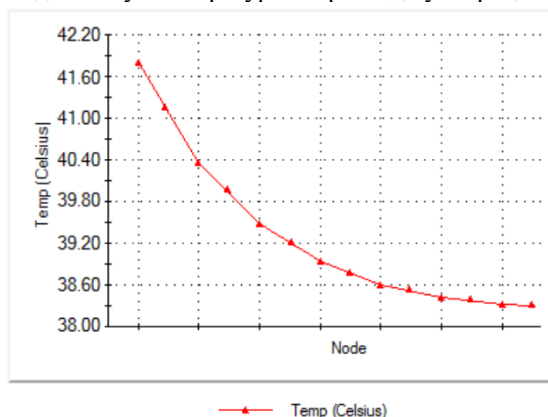


Рис. 6. Графік зміни температури вздовж висоти штабеля

Детальні розрахунки показали, що середня різниця температур між верхніми та нижніми шарами штабеля становить близько $3,7\text{--}4,0 \text{ }^\circ\text{C}$, що вважається прийнятним показником для камер такого типу. При значеннях понад $5\text{--}6 \text{ }^\circ\text{C}$ виникає ризик нерівномірного висушування деревини: у верхніх рядах процес може відбуватися надто швидко, спричиняючи утворення поверхневих тріщин, тоді як у нижніх рядах вологість знижується повільніше. Отримані результати свідчать про коректність заданих параметрів сушіння і адекватність моделі теплообміну, що підтверджує достовірність проведеного теплового аналізу.

Крім того, форма температурної кривої демонструє плавне зменшення температури без різких стрибків, що вказує на стабільний режим роботи вентилятора і нагрівальної системи. Такий характер розподілу підтверджує рівномірність циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі камери. Подібна тенденція спостерігалася й у попередніх дослідженнях [1-4], однак у даній роботі завдяки автоматизованому моделюванню вдалося кількісно оцінити цей ефект і визначити зони з найменшою ефективністю прогріву.

У перспективі ці результати можуть бути використані для автоматичної оптимізації режимів сушіння, зокрема для регулювання швидкості обертання вентилятора або температури теплоносія залежно від градієнта температури між шарами штабеля. Таким чином, побудований графік не лише підтверджує коректність моделі, але й виступає інструментом для подальшого удосконалення процесу.

Варто також зазначити, що результати, наведені на попередніх рисунках, відображають стан системи після першої ітерації розрахунку. Проте для повного розуміння динаміки теплових процесів необхідно дослідити зміну температури у часі, оскільки теплова рівновага в сушильній камері встановлюється поступово. З цією метою у SolidWorks Simulation було створено температурний датчик (probe) у вузлі № 39938, розташованому у верхньому ряді штабеля, тобто в зоні найінтенсивнішого нагрівання.

На початковому етапі (перша ітерація) температура цього вузла становила 41,85 °C, що відповідає моменту запуску вентилятора та початку циркуляції нагрітого повітря. Після проведення десятої ітерації моделювання, що відповідає проміжку приблизно 1000 с (по 100 с на ітерацію), температура у тій самій точці зросла до 52,68 °C. Отже, за час аналізу спостерігається приріст $\approx 10,8$ °C, який демонструє закономірне підвищення температури у верхній частині камери під час стабілізації теплового режиму.

Динаміка нагрівання, представлена на рисунку 7, чітко відображає поступовий вихід системи на усталений тепловий режим. Після п'ятої ітерації приріст температури сповільнюється, що свідчить про зменшення теплових градієнтів та досягнення стабільної циркуляції повітря. Такий характер поведінки повністю узгоджується з фізичною моделлю процесу конвективного сушіння, у якій рівновага між кількістю теплоти, що подається, та втратами через стінки досягається після 700-900 с.

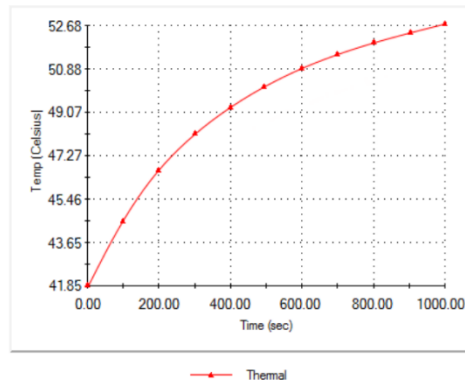


Рис. 7. Графік зміни температури у вузлі № 39938 (верхній ряд штабеля) протягом перших десяти ітерацій моделювання

Отримані результати підтверджують адекватність побудованої моделі та правильність заданих граничних умов. Фактична динаміка зміни температури відповідає очікуваному сценарію прогріву камери, що свідчить про достовірність математичного опису процесу. Такий часовий аналіз дає змогу не лише верифікувати модель, але й оптимізувати керування режимом сушіння, наприклад шляхом змінювання потужності нагріву чи швидкості обертання вентилятора на різних етапах прогріву, забезпечуючи енергоефективну роботу системи.

Верифікація результатів та практична значущість системи

Для підтвердження достовірності отриманих результатів проведено порівняльний аналіз тенденцій, виявлених у ході теплового моделювання, з даними, наведеними в наукових публікаціях і нормативних матеріалах щодо процесів конвективного сушіння деревини [12-15]. Хоча кількісна експериментальна перевірка в межах цього дослідження не проводилася, характер розподілу температурних полів та поведінка потоків повітря повністю узгоджуються з відомими фізичними закономірностями. Зокрема, спостережене зниження температури від верхніх шарів штабеля до нижніх на 3-4 °C відповідає типовим даним для камер періодичної дії, наведеним у [16-17].

Розрахункова динаміка підвищення температури у верхньому ряді штабеля протягом перших 10 ітерацій (приблизно 1000 с) також узгоджується з типовими перехідними процесами, описаними у працях [18-20], де час виходу на усталений режим становить ≈ 900 с. Така відповідність підтверджує адекватність прийнятої математичної моделі теплообміну та правильність вибору граничних умов у SolidWorks Simulation.

Крім того, результати CFD-аналізу відтворюють характерні для конвективних камер зони пониженої циркуляції повітря за штабелем, що відзначалися у попередніх експериментальних роботах [16-20]. Це свідчить про здатність моделі не лише якісно описувати теплові процеси, а й кількісно виявляти потенційні зони енерговтрат. Таким чином, отримані результати можна вважати верифікованими на рівні тенденцій і придатними для використання у подальших дослідженнях.

З практичної точки зору, розроблена система є ефективним інженерним інструментом для попереднього проектування сушильних камер і прогнозування ефективності їхньої роботи. Вона дозволяє без проведення

фізичного експерименту оцінити вплив геометрії камери, кількості рядів у штабелі, параметрів нагріву та швидкості повітряного потоку на рівномірність сушіння. Такий підхід зменшує витрати часу та матеріалів на етапі підготовки виробництва, а також може бути використаний у навчальному процесі під час підготовки фахівців з комп'ютерного моделювання технічних систем.

Висновки

У ході проведеного дослідження розроблено та реалізовано інтегровану систему автоматизованого проєктування і моделювання фізичних процесів у конвективних сушильних камерах на основі середовища SolidWorks. Система поєднує модульну архітектуру автоматизації побудови 3D-моделей із можливістю подальшого числового аналізу в SolidWorks Simulation та Thermal Study, що забезпечує наскрізний цикл від геометричного моделювання до теплотехнічного аналізу.

Запропонований підхід дозволив суттєво скоротити час створення тривимірних моделей сушильних камер і штабелів деревини із десятків хвилин до кількох секунд завдяки автоматизованій генерації макросів SolidWorks на основі вхідних параметрів, заданих у графічному інтерфейсі. Отримані параметричні моделі відзначаються точністю побудови та можливістю оперативної перебудови, що спрощує дослідження різних конфігурацій камер і режимів сушіння.

Інтеграція з SolidWorks Simulation дала змогу детально дослідити теплові та гідродинамічні процеси усередині сушильної камери. Визначено закономірності розподілу температурного поля та швидкості повітряних потоків, зокрема встановлено наявність зони помірного перегріву у верхніх рядах штабеля та поступове зниження температури до нижніх шарів. Різниця температур між крайніми шарами не перевищує 4 °C, що свідчить про достатню рівномірність прогріву матеріалу.

Проведений часовий аналіз динаміки нагріву показав, що камера досягає усталеного теплового режиму приблизно через 1000 секунд, що узгоджується з типовими даними для аналогічних систем. Це підтверджує адекватність математичної моделі та правильність обраних граничних умов. Отримані залежності можуть бути використані для оптимізації параметрів сушіння зокрема, для адаптивного регулювання потужності нагрівачів і швидкості обертання вентилятора залежно від теплового градієнта у штабелі.

Розроблена система має значний практичний потенціал. Вона може бути використана для проєктування сушильних установок різних типів, а також у науково-освітньому процесі для навчання методам CAD/CAE-моделювання тепломасообміну. Верифікація результатів на рівні тенденцій засвідчила відповідність отриманих розрахункових даних відомим фізичним закономірностям, що підтверджує достовірність моделі та її придатність для подальшого застосування у дослідницьких цілях.

Таким чином, розроблена інтегрована система поєднує переваги автоматизованого проєктування та високоточного числового моделювання, створюючи універсальне середовище для дослідження, оптимізації й візуалізації теплових процесів у конвективних сушильних камерах. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення моделі для врахування масообміну, вологості повітря та кінетики висихання деревини, що забезпечить ще глибше відтворення реальних фізичних умов.

Література

1. Machuga, O.S. Using Solidworks Simulation tool for automated design of drying chambers and study of their operation parameters / O.S. Machuga, T.V. Olyanyshyn // Scientific Bulletin of UNFU. – 2024. – Volume 34(2), March. – P. 109-115. – DOI: <https://doi.org/10.36930/40340214>.
2. Sokolovsky Ya. System for Automated Design by Physical Processes of 3D Models in a Drying Chamber for Hygroscopic Materials / Ya. Sokolovsky, O. Sinkevych // Acta Mechanica et Automatica. – 2025. – Volume 19, March. – P. 82-93. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2025-0011>.
3. Andres M. 3D Computational Fluid Dynamics Analysis of a Convective Drying Chamber / M. Andres, C. Andres, J. Carlos, N. Ratkovich // Food Process Engineering. – 2022. – Volume 10(12), December. – P. 2712. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10122721>.
4. Defraeye T. Advanced computational modelling for drying processes – A review // Applied Energy. – 2014. – Volume 131, October. – P. 323-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>.
5. Sokolovsky Ya. Software for Studying Wood Drying Chambers Based on SolidWorks Flow Simulation Experiment / Ya. Sokolovsky, O. Sinkevych, R. Voliansky // 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). – 2019, June. – P. 281-284. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8780040>.
6. Bergman, T. L. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons.
7. Dutta, B. K. (2023). Heat transfer: principles and applications. PHI Learning Pvt. Ltd.
8. Keey, R. B., Langrish, T. A., & Walker, J. C. (2012). Kiln-drying of lumber. Springer Science & Business Media.
9. Janna, W. S. (2018). Engineering heat transfer. CRC press.
10. Glass, S., & Zelinka, S. (2021). Moisture relations and physical properties of wood. Chapter 4 in FPL-GTR-282, 4-1.
11. Rudyk, O. Y. Application of mathematical modeling based on Solidworks simulation. / O.Y. Rudyk, B.M. Kovalets, V.A. Pungin, L.P. Sharavarskyi // II Всеукраїнська конференція «Інформатика, інформаційні системи та технології». – 2025, Квітень. – С. 18-20.
12. Elustondo, D. Advances in wood drying research and development. / D. Elustondo, N. Matan, T. Langrish, S. Pang // Drying Technology. – 2023. – Volume 41(6), May. – P. 890-914. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2205530>.

13. Suchomelová, P. Numerical simulations of coupled moisture and heat transfer in wood during kiln drying: influence of material nonlinearity / P. Suchomelová, M. Trcala, J. Tippner // *BioResources*. – 2019. – Volume 14(4), May, P. 9786-9805.
14. I.S. Mulyana. Thermal Distribution Analysis of a Corn Dryer Using CFD Simulation / Mulyana, I.S., Affandi, F. R. // *International Journal of Advanced Engineering and Technology*. – 2025. – Volume 1(1), May, P. 61-68. DOI: <https://doi.org/10.63956/ijaetech.v1i1.18>.
15. D. Cebulski, Application of CFD simulation to the design of an innovative drying chamber / Cebulski D., Cyklis, P. // *Journal of Energies*. – 2024. – Volume 17(13), July, P. 3338. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17133338>.
16. M. Vaz Jr. Conjugated heat and mass transfer in convective drying in compact wood kilns: A system approach. / Vaz, Jr. M., Zdanski, P.S.B., Cerqueira, R.F., Possamai, D.G. // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2013. – Volume 5, January, P. 538931. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/538931>.
17. J. Wehsener, J. Physical, mechanical and biological properties of thermo-mechanically densified and thermally modified timber using the Vacu 3-process / Wehsener J., Brischke, C., Meyer-Veltrup, L., Hartig, J., Haller, P. // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2018. – Volume 76, February, P. 809-821.
18. Koido K. Drying kinetics of wood chips with different thicknesses, initial moisture contents, and wood parts in a fixed-bed vertical forced convection dryer. / Koido, K., Kubota, A., Watanabe, K., Matsuda, Y., Fujimoto, K., Yanagida, T. // *Renewable Energy*. – 2025. – Volume 249, August, P. 123190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123190>.
19. Sokolovskyi, Y., Boretska, I., & Rozhak, P. (2013). Computer-aided design and research of chambers of wood drying by means of SolidWorks API and COSMOSFloWorks. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*, (17), 175-185.
20. R.P. Ramachandran. Computational fluid dynamics in drying process modelling – a technical review / Ramachandran R. P., Akbarzadeh, M., Paliwal, J., Cenkowski, S. // *Food and bioprocess technology*. – 2017. – Volume 11(2), December, P. 271-292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2040-y>.