

КРОШНИЙ ІГОР

Національний лісотехнічний університет України

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

Національний лісотехнічний університет України

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

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СУШИЛЬНОЇ КАМЕРИ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТУ SOLIDWORKS DESIGN STUDY

У статті розглядається оптимізація вхідних параметрів роботи сушильної камери та режиму її роботи за допомогою програмного забезпечення SolidWorks Simulation. Однією з основних задач під час проектування сушильних камер є забезпечення рівномірного розподілу температури в штабелі для досягнення ефективного сушіння матеріалів. У зв'язку з цим у цьому дослідженні визначено оптимальні параметри конструкції камери та її режиму роботи з метою забезпечення стабільних умов сушіння. Методологія включає створення 3D-моделі сушильної камери та її основних компонентів у SolidWorks, побудову чисельної сітки, проведення термічних аналізів у SolidWorks Simulation і використання модуля Design Study для оптимізації конструктивних параметрів і робочих режимів. Результати досліджень містять аналіз розподілу теплових потоків у штабелі, а також вимірювання температури в різних точках моделі. Це дозволяє оцінити температурні градієнти та їх залежність від параметрів оптимізації. Вимірювання температур здійснювалися за допомогою інструменту Prob, що враховує геометричні особливості та точне розташування вузлів на тетраедричних елементах чисельної сітки. Дослідження базується на інтегрованому підході до проектування сушильних камер із використанням SolidWorks та автоматизації процесу оптимізації через SolidWorks API. Для цього створено спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє користувачам вводити вхідні дані для моделювання, передавати параметри термічного аналізу у SolidWorks, а також виконувати обчислення у фоновому режимі. Функціонал розробленого ПЗ включає автоматизоване відображення результатів у спеціальному програмному вікні, що значно скорочує час отримання даних. Скорочення часу розрахунків досягається також за рахунок відмови від візуалізації проміжних процесів, що є важливим для подальшого вдосконалення технологічних процесів сушіння різних матеріалів.

Ключові слова: Програмне забезпечення, SolidWorks Simulation, Термічне дослідження, Сушіння деревини, Автоматизоване проектування.

KROSHNYI IGOR**RUBINSKYI YURIY**

Ukrainian National Forestry University

MODELING THE DRYING CHAMBER AND OPTIMIZATION OF INPUT PARAMETERS USING THE SOLIDWORKS DESIGN STUDY TOOL

This article describes the optimization of the drying chamber input parameters and its operation mode using SolidWorks Simulation software. One of the main tasks in the design of drying chambers is to ensure uniform temperature distribution in the stack to achieve efficient drying of materials. In this regard, this study determines the optimal parameters of the chamber design and its operating mode to ensure stable drying conditions. The methodology includes the creation of a 3D model of the drying chamber and its main components in SolidWorks, the construction of a numerical mesh, thermal analyses in SolidWorks Simulation, and the use of the Design Study module to optimize design parameters and operating conditions. The results of the research include an analysis of the distribution of heat flows in the stack, as well as temperature measurements at various points in the model. This allows us to estimate temperature gradients and their dependence on optimization parameters. The temperature measurements were performed using the Prob tool, which takes into account the geometric features and the exact location of the nodes on the tetrahedral elements of the numerical grid. The study is based on an integrated approach to designing drying chambers using SolidWorks and automating the optimization process through the SolidWorks API. For this purpose, specialized software was created that allows users to enter input data for modeling, transfer thermal analysis parameters to SolidWorks, and perform calculations in the background. The functionality of the developed software includes automated display of results in a special program window, which significantly reduces the time for obtaining data. Reducing the calculation time is also achieved by eliminating the visualization of intermediate processes, which is important for further improvement of drying processes for various materials.

Keywords: Software, SolidWorks Simulation, Thermal study, Wood drying, Computer-aided design.

Постановка проблеми

Сушильні камери відіграють ключову роль у багатьох промислових процесах, забезпечуючи ефективне видалення вологи з матеріалів за умов збереження їхньої якості та структурної цілісності. Ефективність та економічність цих камер значною мірою залежать від їх конструкції та робочих параметрів. Це призводить до зростання попиту на сучасні методи оптимізації як конструктивної конфігурації, так і режимів роботи сушильних камер. Водночас одним з основних завдань при проектуванні сушильних камер є досягнення рівномірного розподілу температури по штабелю з матеріалами. Така рівномірність необхідна для забезпечення стабільної швидкості сушіння, запобігання деградації матеріалу і збереження якості продукції. Традиційні методи проектування часто покладаються на емпіричні методи або спрощені аналітичні моделі, які не можуть повністю врахувати складну тепло

та гідродинаміку в камері. При цьому, останні досягнення в галузі автоматизованого проектування (САПР) і технологій моделювання надали потужні інструменти для подолання цих обмежень. Зокрема, SolidWorks Simulation з його можливостями аналізу методом скінченних елементів (FEA) забезпечує надійну платформу для проведення детального теплового аналізу та оптимізації проєктних параметрів. У цьому дослідженні розглядається застосування SolidWorks Simulation для комплексного аналізу та оптимізації конструкції і режимів роботи сушильних камер. Основною метою є досягнення рівномірного розподілу температури в штабелі матеріалу, що забезпечує підвищення ефективності процесу та якості продукції. Дослідження висвітлює переваги використання передових інструментів моделювання для подолання традиційних проєктних обмежень і вдосконалення промислових процесів сушіння.

Аналіз останніх публікацій

Застосування програмних засобів для проектування та моделювання промислових процесів, зокрема сушіння різних матеріалів, в останні роки набуло значного розвитку. Зростає кількість досліджень, які демонструють ефективність використання обчислювальних інструментів для оптимізації процесів сушіння. Наприклад, у дослідженні [1] для оптимізації параметрів процесу сушіння було використано платформу COMSOL Multiphysics. Отримані в результаті оптимальні конфігурації дозволили підвищити продуктивність і забезпечити рівномірну якість продукції протягом усіх циклів сушіння. Аналогічно, в роботі [2] представлено новий підхід до проектування гібридних сушарок із застосуванням програмних інструментів для моделювання та оптимізації. Їх методологія включала функціональний аналіз, математичне моделювання та віртуальне прототипування з використанням SolidWorks для САПР-моделювання та Matlab для чисельного моделювання. Інтеграція цих інструментів сприяла підвищенню ефективності проектування гібридних сушарок за рахунок оптимізації процесу від розробки концепції до реалізації.

В іншому дослідженні [3] увага була зосереджена на гібридних сонячних сушарках для сільськогосподарських пористих матеріалів. Чисельне моделювання процесів тепло- і масообміну в сонячних сушарках проводилося за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволило вибрати оптимальну конструкцію. Дослідження підкреслило вирішальну роль чисельного моделювання в підвищенні продуктивності та енергоефективності сушарки. Незважаючи на досягнення, продемонстровані в цих дослідженнях, залишається помітна прогалина в удосконаленні традиційних конструкцій сушильних камер. Існуючі дослідження в основному зосереджені на гібридних системах або нових методологіях сушіння, залишаючи поза увагою потенціал для вдосконалення традиційних сушильних камер. Усунення цієї прогалини має важливе значення для вдосконалення процесів сушіння, особливо для галузей промисловості, що залежать від стабільної якості продукції та енергоефективності.

Таким чином, **метою цього дослідження** є проведення комплексного аналізу процесів теплопередачі в традиційній сушильній камері за допомогою SolidWorks Simulation та здійснення оптимізації її вхідних параметрів та режимів роботи з використанням інструменту SolidWorks Design Study.

Огляд 3D-моделі сушильної камери

Процес сушіння [4] вимагає точного та ефективного контролю над усіма аспектами, включаючи температуру, вентиляцію та розподіл вологи в матеріалі. У цьому контексті 3D-модель сушильної камери виступає ключовим інструментом для аналізу, проектування та оптимізації режимів її роботи. Така модель не лише забезпечує візуалізацію конструкції сушильної камери, але й дозволяє аналізувати її елементи у тривимірному просторі, що є критично важливим для виявлення потенційних проблем у конструкції та визначення раціональних рішень для їх усунення. У даному випадку 3D-модель сушильної камери включає систему подачі повітря, яка забезпечує його рівномірний розподіл у сушильній камері, що вкрай необхідно для досягнення рівномірного сушіння пиломатеріалів. Окрім цього, в камері застосовано спеціальний осьовий вентилятор із системою підігріву повітря, яке циркулює у сушильній камері. Цей вентилятор не лише забезпечує активне перемішування повітря у сушильній камері але й виконує функції щодо контролю температури та швидкості руху повітря, що безпосередньо впливає на швидкість сушіння.

Також у камері розміщено штабель з пиломатеріалами, стіни та двері, які є основними конструктивними елементами сушильної камери. Вони визначають форму та розміри камери а також відіграють важливу роль у збереженні тепла. Для кращого розуміння конструкції сушильної камери та її компонентів можна розглянути зовнішній вигляд її 3D-моделі (див. рис. 1). Тут варто зазначити, що проста конструкція камери зумовлена необхідністю проведення оптимізації її конструкції з метою підвищення ефективності сушіння, рівномірного розподілу повітряних потоків і зменшення енергоспоживання. Такий підхід повинен вдосконалити процеси теплопередачі, рівномірність розподілу повітряних потоків та зменшити теплові втрати, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню продуктивності та економічності експлуатації камери.

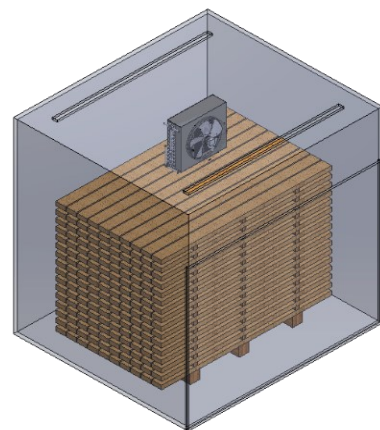


Рис. 1. Вигляд 3D моделі сушильної камери в ізометричному вигляді у ПЗ SolidWorks

Виконання теплового аналізу в SolidWorks Simulation

Проведення теплового аналізу в SolidWorks Simulation є важливим етапом для визначення теплових потоків у сушильній камері. На основі результатів цього аналізу можна оцінити, чи є конструкція сушильної камери та встановлений режим її роботи оптимальними [5].

Після вибору розробленої 3D-моделі сушильної камери та створення нового дослідження типу "Thermal study" необхідно задати вхідні параметри, які впливають на теплові процеси в камері. До цих параметрів належать: площа контакту між нагрівачами та конструкцією камери (Connections / Contact Set), розподілений тепловий опір між вибраними поверхнями (Thermal Resistance), тепла потужність нагрівачів (Thermal loads / Heat Power), конвекція для теплообміну із зовнішнім середовищем (Thermal loads / Convection) та температура навколишнього середовища (Bulk ambient temperature).

Щоб визначити розподілений тепловий опір між вибраними поверхнями [6], необхідно поділити товщину стінки на добуток коефіцієнта теплопровідності матеріалу та площі поверхні, через яку відбувається теплообмін. У цьому випадку тепло передається через стелю, товщина якої 0.2 м, площа – 4.6 м² (з центральним проходом шириною 1 м), а коефіцієнт теплопровідності – 0,07 Вт/(м·°C). Підставивши ці значення, отримуємо тепловий опір 0,621 (м²·°C)/Вт.

Для оцінки теплових втрат можна використовувати загальний розрахунок теплопередачі через стінки камери [7]. У цьому випадку висота сушильної камери становить 2.7 м, ширина – 2.4 м, довжина – 3.05 м. Товщина стінок, виготовлених з теплоізоляційного матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності 0.04 Вт/(м·°C), становить 0.2 м. Визначено, що різниця температур між внутрішнім середовищем камери та зовнішнім середовищем на початковому етапі становить приблизно 10°C, а площа стінок дорівнює 29.43 м². Отже, теплові втрати через стінки можна розрахувати наступним чином: $(0.04 * 29.43 * 10) / 0.2 \approx 58.86$ Вт.

Теплові навантаження під час сушіння залежать від різних факторів, таких як вологість матеріалу та кількість тепла, необхідного для випаровування одиниці води. У середньому для сушильної камери заданих розмірів ці значення становлять 150–300 Вт на один нагрівач. Враховуючи температурні різниці матеріалів у різних місцях штабеля [8], загальна потреба в теплі має бути в діапазоні 350–500 Вт, а для зручності можна прийняти 400 Вт. Також варто зазначити, що значення конвекції для теплообміну із зовнішнім середовищем [9] можна визначити за загальним рівнянням теплопередачі, розділивши загальну теплову потужність на добуток площі теплообміну та різниці температур. Якщо припустити, що початкова різниця температур невелика й становить приблизно 1°C, то конвекція дорівнюватиме приблизно 65 Вт/(м²·°C).

Варто зазначити, що дослідження проводилося за постійної швидкості сушіння та для матеріалів, параметри яких відрізняються від представлених у базі даних матеріалів SolidWorks. Зокрема для проведення досліджень було обрано три матеріали, які найчастіше використовуються для сушіння: дуб, бук та сосна. Їхні параметри взято з [10], де вони були сформовані за результатами реальних експериментальних вимірювань.

Після задання вхідних параметрів було створено спеціальну тетраедричну сітку для розрахунків. Це важливий етап, оскільки якісна сітка забезпечує точні результати. У більшості випадків SolidWorks Simulation автоматично створює тетраедричну сітку, однак в даному випадку її було налаштовано вручну. Зокрема для економії обчислювальних ресурсів під час проведення оптимізації конструкції камери, деякі компоненти 3D-моделі сушильної камери були виключені. У даному випадку залишено тільки осьовий вентилятор із системою нагріву, штабель, стіни, двері та стелю камери. Окрім цього, було застосовано технологію Control Mesh, яка дає змогу побудувати сітку у важкодоступних місцях 3D-моделі вентилятора, зокрема в місцях з'єднання труб системи нагріву. Ця технологія підвищує точність результатів завдяки створенню додаткових тетраедричних елементів, що особливо важливо для ділянок із заокругленими елементами, де необхідно підвищити щільність сітки для отримання точних результатів [11].

Після налаштування параметрів дослідження виконується розрахунок теплових процесів в сушильній камері, включаючи розподіл температур та теплового потоку у штабелі (див. рис. 2). Ця інформація дозволяє оцінити ефективність теплообміну та рівномірність прогріву матеріалів у сушильній камері. Отримані результати показали, що найвищий тепловий потік спостерігається у верхньому ряду штабеля і становить 162,41 Вт/м². Загалом було проведено п'ять різних досліджень із різною відстанню до джерела тепла.

Іншим дуже важливим етапом аналізу є вимірювання температури в різних точках штабелю за допомогою інструменту Prob. В даному випадку ці значення виміряно всередині штабеля у різних його рядках (див. рис. 3) відносно його висоти, що дає змогу простежити закономірності температурного розподілу.

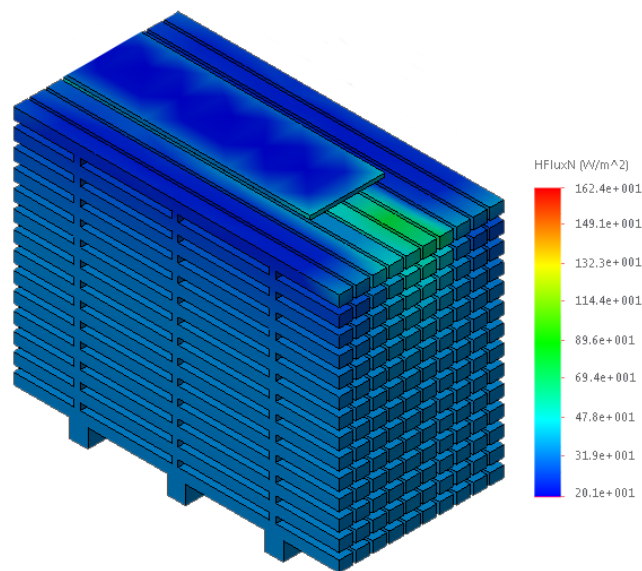


Рис. 2. Тепловий потік штабелю в його ізометричному вигляді

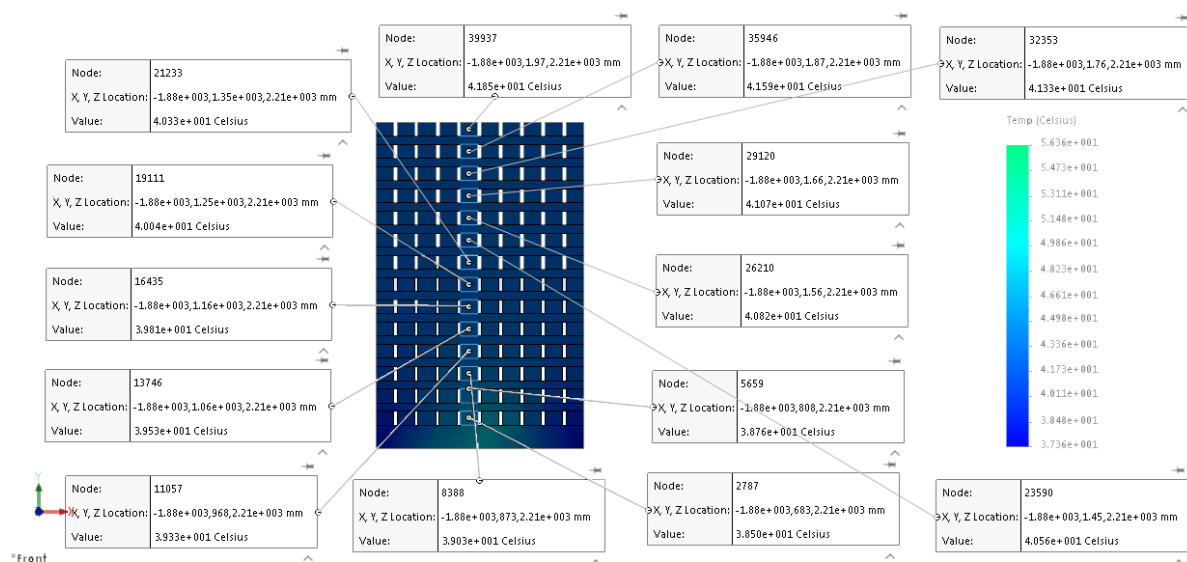


Рис. 3. Вибір точок для визначення зміни температури всередині штабелю відносно його висоти

На основі цих даних також було побудовано графік зміни температури (див. рис. 4), який демонструє тенденцію зниження температури від верхніх шарів до нижніх. Це явище пояснюється природною конвекцією, адже гаряче повітря піднімається вгору, забезпечуючи швидший прогрів верхніх рядків штабеля, тоді як нижні ряди прогриваються менш інтенсивно через менший доступ до джерела тепла. Варто зазначити, що висока різниця температур між верхніми та нижніми рядами штабеля може свідчити про нерівномірність теплообміну, що вимагатиме коригування параметрів сушіння. Однак в даному випадку, ця різниця не перевищує 4°C, що дає змогу стверджувати про коректність заданих параметрів.

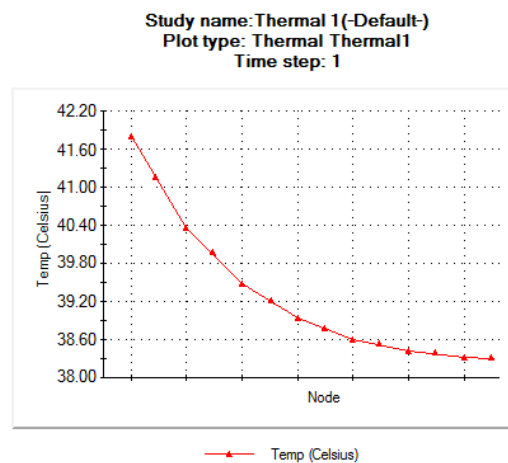


Рис. 4. Графік зміни температури відносно точок

Варто зазначити, що результати, представлені на рисунках 2-4, відображають стан системи після першої ітерації, що відповідає початковому інтервалу часу. Однак, щоб отримати більш повне розуміння динаміки теплових процесів, важливо оцінити зміни температури в часі. Для цього створено датчик для вузла №39937, який знаходиться у верхньому ряді штабелю. Згідно з рис. 3, значення його температури становить 41,85 °C. Однак згідно рис. 5, значення температури цього вузла на 10 ітерації моделювання становить 52,68 °C, що на 10,83 °C вище, ніж у початковій ітерації моделювання. При цьому, кожна ітерація становить 100 с. Такі результати підтверджують правильність заданих вхідних параметрів дослідження та свідчать про адекватність моделі у відтворенні теплових процесів у сушильній камері відносно часу.

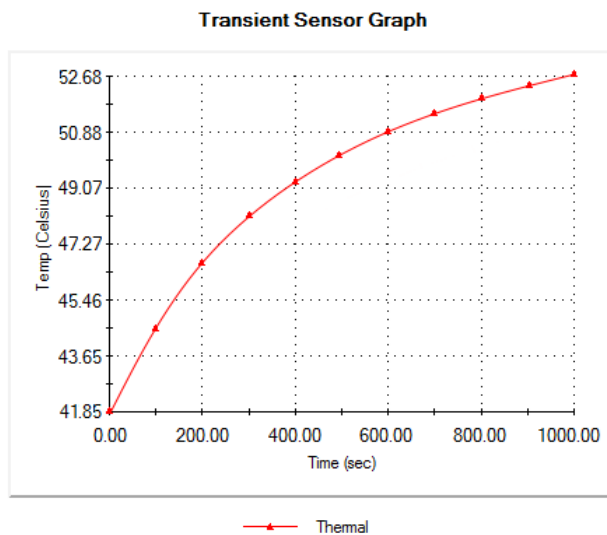


Рис. 5. Графік зміни температури протягом десяти ітерацій

Проведення дослідження в SolidWorks Design Study

З отриманих результатів розподілу температури і теплового потоку можна видно, що розподіл тепла в різних рядах штабелю не завжди нерівномірний. Тим не менш, різниця температур між верхнім і нижнім рядами матеріалів у штабелі іноді становить 3.5 °C, що вимагає коригування вхідних параметрів дослідження для оптимізації процесу сушіння. У цьому випадку пропонується використовувати спеціальний модуль «Design Study», який є потужним інструментом оптимізації різноманітних параметрів у середовищі SolidWorks [12]. Загалом планується проведення оптимізації потужності нагрівачів, конвекції та ширини вентиляційного каналу (див. рис. 6). Як було сказано вище, потужність обігрівачів вентилятора повинна становити приблизно 400 Вт, тому в якості параметрів оптимізації ці значення будуть варіюватися від 200 до 600 з кроком 100 Вт. Розраховані значення конвекції встановлено на рівні 80 Вт/(м²·°C), але для використання в «Проектному дослідженні» необхідно конвертувати ці значення в Cal/(см²·°C). При цьому, якщо ми використовуємо коефіцієнт перетворення для вимірювання теплової потужності з ватів на калорії за секунду, що становить приблизно 0,241 кал/с, тоді значення конвекції становитиме приблизно 0,001922 кал/(см²·°C). У зв'язку з цим, як параметри оптимізації, ці значення змінюватимуться від 0,0015 до 0,0025 з кроком 0,0002 кал/(см²·°C). Водночас ширина вентиляційного проходу буде варіюватися від 500 до 1500 з кроком 200 мм.

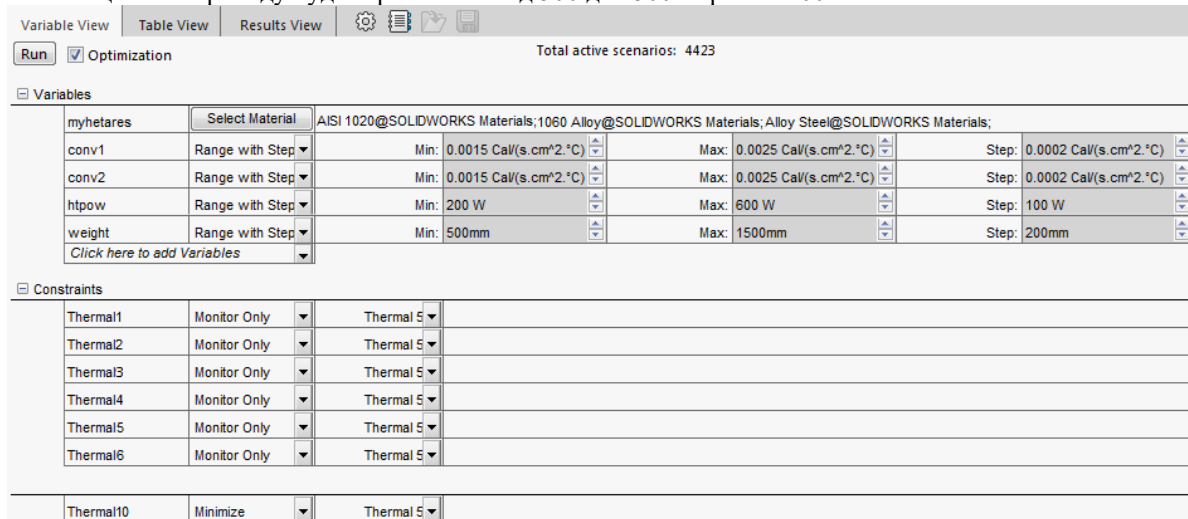


Рис. 6. Вікно введення параметрів оптимізації та задання їх меж

Загалом, програма пропонує 4423 можливих наборів параметрів дослідження, у зв'язку з чим усі розрахунки тривали близько 13 годин. В результаті розрахунків встановлено оптимальні вхідні параметри дослідження (див. рис. 7). Зокрема оптимальна потужність нагрівачів повинна складати 400 Вт, величина конвекції не перевищувати 0,0017 Кал/(см²·°C), що дорівнює 71,08 Вт/(м²·°C), ширина вентиляційного проходу 1100 мм. В даному випадку найкращим матеріалом для вентиляторів є «Алюмінієвий сплав типу 1060». Також варто відзначити, що під час розрахунків у режимі перегляду («Thermal1» – «Thermal6») відображалися значення температури в різних місцях штабелю. Місця

вибиралися відповідно до ряду пиломатеріалів з певною кратністю. У результаті вдалося встановити, що в разі використання оптимальних вхідних параметрів моделювання різниці температур між верхнім і нижнім рядами пиломатеріалів може не перевищувати 1 °С, що позитивно вплине на якість кінцевої продукції.

		Current	Initial	Optimal (1)	Scenario 1918	Scenario 2212
conv1		76.496000	66.760000	71.080000	78.128000	74.128000
conv2		76.496000	66.760000	71.080000	78.128000	74.128000
htpow		600 W	300 W	400 W	500 W	400 W
weight		1400mm	500mm	1100mm	1300mm	1200mm
myhetares	List of Materials	Alloy Steel @SOLIDWORKS Materials	1060 Alloy @SOLIDWORKS Materials	1060 Alloy @SOLIDWORKS Materials	Alloy Steel @SOLIDWORKS Materials	Alloy Steel @SOLIDWORKS Materials
Thermal1	Monitor Only	52.2502°C	36.9788°C	47.67°C	47.8066°C	49.4266°C
Thermal2	Monitor Only	50.1393°C	36.8251°C	47.4621°C	47.3169°C	48.0898°C
Thermal3	Monitor Only	48.515°C	36.909°C	47.2112°C	47.2209°C	47.8676°C
Thermal4	Monitor Only	46.6237°C	36.8833°C	47.006°C	47.1893°C	47.7892°C
Thermal5	Monitor Only	44.1231°C	36.8913°C	46.86°C	47.1875°C	47.7686°C
Thermal6	Monitor Only	42.8863°C	36.887°C	46.711°C	46.8501°C	46.8503°C
Thermal10	Minimize	42.8863°C	36.887°C	46.711°C	46.8501°C	46.8503°C

Рис. 7. Вибір оптимальних параметрів для теплового дослідження

Висновки

У цьому дослідженні проведено комплексний аналіз теплових процесів, що відбуваються в сушильній камері, за допомогою термічного аналізу SolidWorks Simulation. За результатами моделювання було виявлено, що тепловий потік у сушильній камері має нерівномірний розподіл, з найвищим значенням у верхньому ряду штабелю. Такий розподіл тепла може негативно вплинути на якість сушіння матеріалів і потребує подальшої оптимізації параметрів системи. У зв'язку з цим параметри дослідження були оптимізовані за допомогою інструменту SolidWorks Design Study, включаючи потужність нагрівачів на вентиляторі, конвекцію та ширину вентиляційного проходу. В результаті оптимізації вдалося визначити оптимальні значення вхідних параметрів. Варто також зазначити, що нерівномірний розподіл тепла в сушильній камері може бути пов'язаний з різницею теплообміну між верхнім і нижнім рядами пиломатеріалів. Однак завдяки оптимізації вхідних параметрів цю різницю вдалося знизити до прийнятного рівня, що підтверджує ефективність використання SolidWorks Simulation при розробці та аналізі теплових процесів у сушильних камерах.

Підсумовуючи варто зазначити, що отримані результати демонструють ефективність моделювання теплових процесів у складних системах, у тому числі в сушильних камерах, за допомогою потужного середовища SolidWorks Simulation. Високий рівень точності та можливість автоматизувати цей процес робить це програмне забезпечення потужним інструментом для інженерних та наукових досліджень. Крім того, було виявлено, що будь-який нерівномірний розподіл тепла в сушильній камері вимагає оптимізації вхідних параметрів дослідження для досягнення більш рівномірного нагріву матеріалів.

References

1. Jha, A., & Tripathy, P. (2021). Optimization of process parameters and numerical modeling of heat and mass transfer during simulated solar drying of paddy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106215>
2. Simo-Tagne, M., Zoulalian, A., Rémond, R., & Rogaume, Y. (2018). Mathematical modelling and numerical simulation of a simple solar dryer for tropical wood using a collector. *Applied Thermal Engineering*, 131, 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.014>
3. Komolafe, C. A. (2023). Numerical simulation of the 3D simultaneous heat and mass transfer in a forced convection solar drying system integrated with thermal storage material. *Journal of Solar Energy Engineering*, 145(5), 51–61. <https://doi.org/10.1115/1.4062484>
4. Keey, R. B. (2013). *Drying: Principles and practice*. Elsevier. Retrieved from <https://books.google.com.ua/books?id=2rkgBQAAQBAJ>
5. Sokolovskiy, 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.

6. Gori, V., Marincioni, V., Biddulph, P., & Elwell, C. A. (2017). Inferring the thermal resistance and effective thermal mass distribution of a wall from in situ measurements to characterise heat transfer at both the interior and exterior surfaces. *Energy and Buildings*, 135, 398–409. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.043>
7. Mirsadeghi, M., Costola, D., Blocken, B., & Hensen, J. L. (2013). Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 56(1–2), 134–151.
8. Motevali, A., Minaei, S., & Khoshtagaza, M. H. (2011). Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management*, 55(2), 1192–1199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.014>
9. Peeters, L., Beausoleil-Morrison, I., & Novoselac, A. (2011). Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations. *Energy and Buildings*, 43(9), 2227–2239. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.002>
10. Wehsener, J., Brischke, C., Meyer-Veltrup, L., Hartig, J., & Haller, P. (2018). Physical, mechanical and biological properties of thermo-mechanically densified and thermally modified timber using the Vacu 3-process. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 809–821.
11. Glodová, I., Lipták, T., & Bocko, J. (2014). Usage of finite element method for motion and thermal analysis of a specific object in SolidWorks environment. *Procedia Engineering*, 96, 131–135.
12. Chang, K. H. (2021). *Motion simulation and mechanism design with SOLIDWORKS motion 2021*. SDC Publications.