

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**«Дослідження температурного впливу сонячного випромінювання на
металеву пластину в середовищі SolidWorks»**

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва)

Володимир ВАЛЬОРНИЙ

(Ім'я та прізвище)

Керівник: Ігор СТУКАЛЕЦЬ

(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

Освітній ступінь «Бакалавр»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри машинобудування

(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.

«___» _____ 202__ р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Вальорному Володимирі Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження температурного впливу сонячного випромінювання на металеву пластину в середовищі SolidWorks»

Керівник роботи: Стукалець Ігор Геннадійович, к. т. н., доцент
Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/К-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 5.12.2025 року

3. Вихідні дані: металева пластина, призначена для використання в якості абсорбера геліосушарок; матеріал пластини – мідь, алюміній; час проведення експерименту – літній період; місце проведення досліджень – м.Львів.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Проаналізувати стан в теорії та практиці використання металевих пластин в якості абсорберів геліосушарок та сонячних колекторів.
2. Вивчити теоретичні та практичні аспекти використання теплопровідності металевих пластин в геліосушарках.
3. Розробити методику проведення аналізу теплового впливу сонячного випромінювання на металеву пластину в середовищі САІР SolidWorks.
4. Виконати інженерний аналіз відповідно до запропонованої методики.
5. Виконати аналіз отриманих результатів.
6. Запропонувати заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час заходів, пов'язаних з виконанням роботи.
7. Розробити висновки і пропозиції.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу та графічної частини кваліфікаційної роботи

1. Ілюстраційна частина – презентація результатів роботи з висвітленням таких питань:

Практика використання металевих пластин в геліосушарках; методика проведення досліджень; отримані результати досліджень; висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1-3	Стукалець І. Г. к.т.н., доцент кафедри машинобудування			
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки			

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Поз. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	Виконання 1-го розділу	28.02.2025-4.04.2025	
2.	Виконання 2-го розділу	7.04.2025-2.05.2025	
3.	Виконання 3-го розділу	5.05.2025-6.06.2025	
4.	Виконання 4-го розділу	1.09.2025-17.10.2025	
5.	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та ілюстраційної частини. Завершення роботи в цілому	20.10.2025-28.11.2025	

Студент _____ Володимир ВАЛЬОРНИЙ
(підпис)

Керівник роботи _____ Ігор СТУКАЛЕЦЬ
(підпис)

Дослідження температурного впливу сонячного випромінювання на металеву пластину в середовищі SolidWorks.

Вальборний Володимир Романович. – Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025. 58 с.

Кваліфікаційна робота: 58 с. текст. част., 27 рис., 3 табл., 22 бібліогр. джерел, презентаційний матеріал у форматі *.ppsx.

Виконано дослідження температурного впливу сонячного випромінювання на металеву пластину. Розглянуто варіант виконання пластини з міді та алюмінію розміром 1000×2000 мм. Дослідження виконано в середовищі *SolidWorks Flow Simulation* для умов міста Львова у літній період.

За результатами проведеного імітаційного комп'ютерного експерименту одержано значення коефіцієнта теплопередачі для міді та алюмінію для заданих умов досліджень, отримано залежності значень коефіцієнта теплопередачі від товщини пластини в діапазоні 0,5...2 мм., а також від величини шорсткості поверхні пластини в діапазоні 100...400 мкм. Встановлено значення середньої температури поверхні пластини для кожного з варіантів аналізу. Побудовано епюри розподілу температур по поверхні пластини.

Розроблено рекомендації щодо доцільності використання мідної та алюмінієвої пластин в заданому діапазоні товщин в якості абсорбуючих елементів геліосушарок та геліоколекторів.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. СТАН ПИТАННЯ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1. Практика використання металевих пластин в якості абсорберів	9
1.2. Конструктивні особливості металевих пластин для абсорберів.....	11
1.3. Застосування металевих пластин у геліосушарках	14
1.4. Застосування металевих пластин у геліоколекторах	15
1.5. Сонячне випромінювання та робота металевого абсорбуючого елемента	16
1.6. Теплопровідність і теплопередача металевої пластини.....	19
2 МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1. Аналіз теплопередачі <i>CFD</i> -методом в середовищі <i>Solidworks Flow Simulation</i>	23
2.2. Побудова тривимірної моделі пластини в середовищі <i>CAD</i> -модуля <i>SolidWorks</i> , призначення матеріалу.....	31
2.3. Створення конфігурацій моделі пластини	32
2.4. Методика проведення дослідження впливу сонячного випромінювання на металеву пластину.....	35
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ	40
3.1. Аналіз збіжності результатів	40
3.2. Результати визначення значень коефіцієнта теплопередачі й температури поверхні пластини	41
3.3. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі й температури поверхні пластини в залежності від її товщини і шорсткості поверхні	43
3.4. Узагальнення результатів досліджень	44

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ

СИТУАЦІЯХ..... 46

4.1. Загальні положення..... 46

4.2. Вимоги безпеки перед початком роботи..... 50

4.3. Вимоги безпеки під час виконання роботи 50

4.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи..... 51

4.5. Вимоги безпеки в аварійній ситуації 52

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ 54

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК..... 56

ВСТУП

Одним із перспективних джерел відновлюваної енергії є сонячна енергія. Нагрівання води сонячною енергією для побутового використання є одним із найуспішніших та найдодатливіших застосувань сонячної енергії. Інші сфери застосування сонячної енергії включають сонячне сушіння, виробництво електроенергії за допомогою фотоелектричних елементів, сонячне охолодження та холодильне обладнання, сонячну дистиляцію та приготування їжі на сонячній енергії. Сонячна радіація, яка є значною мірою присутньою в Україні, є однією з сфер, на якій слід зосередитися серед відновлюваних джерел енергії, і її можна використовувати для нагрівання води як для побутових, так і для промислових цілей, сушіння фруктів та овочів тощо. Сільськогосподарську та іншу продукцію сушать сонцем і вітром просто неба вже тисячі років. Мета полягає або в тому, щоб зберегти їх для подальшого використання, як у випадку з фруктами; або як невід'ємна частина виробничого процесу, як у випадку з деревиною, тютюном. У промислово розвинених регіонах і секторах сушіння на відкритому повітрі зараз значною мірою замінено механізованими сушарками з котлами для нагрівання вхідного повітря та вентиляторами для його прокачування з високою швидкістю. Механізоване сушіння швидше, ніж сушіння на відкритому повітрі, використовує набагато менше площі та зазвичай дає продукт кращої якості.

Сонячні сушарки для фруктів – це прості пристрої для нагрівання фруктової стружки за допомогою сонячної енергії, які використовуються в багатьох сферах, що потребують низької або помірної температури нижче. Процеси сушіння відіграють важливу роль у збереженні сільськогосподарської продукції. «Сонячне сушіння» в контексті цього технічного завдання стосується методів використання сонячної енергії для сушіння, але виключає «сушіння на сонці» просто неба. Низка конструкцій геліосушарок технічно перевірена, і містить абсорбер, який, як правило, являє собою лист металу з певними конструкційними характеристиками та експлуатаційними властивостями матеріалу, які потребують обґрунтування.

Аналіз теплових колекторів загалом та абсорберів зокрема можна провести експериментально та шляхом комп'ютерного моделювання явищ теплопередачі в системі за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. У сучасних сонячних теплових системах, таких як геліосушарки та геліоколектори, ключовим елементом є абсорбер, який забезпечує ефективне перетворення сонячного випромінювання в теплову енергію. Металеві пластини широко використовуються в цих конструкціях завдяки своїм унікальним фізико-технічним властивостям, що робить їх ідеальним матеріалом для виконання функції абсорбера. Вони забезпечують високу теплопровідність, механічну міцність та довговічність, що є критично важливим для стабільної роботи геліосистем у різних кліматичних умовах. Ефективне поглинання та перетворення сонячної енергії металевими пластинами сприяє підвищенню продуктивності геліосушарок, що застосовуються для сушіння сільськогосподарської продукції, а також інших технологічних процесів, пов'язаних з використанням тепла. У цій роботі розглядаються особливості використання металевих пластин як абсорберів у сонячних системах, аналізуються їхні властивості та вплив на ефективність роботи геліосушарок і подібних пристроїв [2, 11-13].

Мета досліджень кваліфікаційної роботи – дослідити температурний вплив сонячного випромінювання на металеву пластину в середовищі системи автоматизованого проектування *SolidWorks* для розроблення рекомендацій щодо геометричних параметрів пластини з урахуванням географічного розташування.

Об'єкт досліджень – визначення коефіцієнта теплопередачі алюмінієвої та мідної пластин під дією сонячного випромінювання; можливості модуля *SolidWorks Flow Simulation* для проведення аналізу теплопередачі.

Предмет досліджень – вплив сонячного випромінювання в умовах Львівщини на значення коефіцієнта теплопередачі пластин з алюмінію та міді в залежності від їх товщини.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Практика використання металевих пластин в якості абсорберів

Металеві пластини широко застосовуються в конструкціях геліосушарок, геліоколекторів та інших сонячних теплових системах як основний елемент, що виконує функцію абсорбера сонячної енергії. Абсорбер – це компонент, який поглинає сонячне випромінювання і перетворює його в теплову енергію, яку далі використовують для сушіння фруктів, нагрівання води або інших технологічних процесів. Металеві пластини завдяки своїм фізико-технічним властивостям є ідеальним матеріалом для таких задач.

Основними функціями металевих пластин як абсорберів є поглинання сонячного випромінювання, перетворення світлової енергії у теплову, передача тепла робочому середовищу.

Металеві пластини, зазвичай виготовлені з алюмінію або міді, мають високу теплопровідність і можуть бути покриті спеціальними селективними шарами, які підвищують їх здатність поглинати сонячне світло. Ці покриття зменшують відбивання і збільшують поглинання в діапазоні видимого та інфрачервоного спектра.

Поглинута сонячна енергія швидко перетворюється в тепло, яке передається металу. Завдяки високій теплопровідності металу тепло рівномірно розподіляється по всій поверхні пластини, що забезпечує ефективний нагрів робочого середовища (повітря, води або теплоносія).

Металеві пластини часто інтегрують в системи теплопередачі – наприклад, з трубками, по яких циркулює вода або повітря. Тепло від пластини передається теплоносію, що забезпечує нагрівання і подальше використання енергії.

Перевагами використання металевих пластин у геліосистемах є висока теплопровідність, механічна міцність і довговічність, легкість обробки і формування, можливість нанесення селективних покриттів.

Метали, особливо мідь і алюміній, мають теплопровідність у десятки разів вищу за інші матеріали, що забезпечує швидкий і ефективний теплообмін.

Металеві пластини витримують значні механічні навантаження, вплив вітру, температурні коливання та інші зовнішні фактори, що робить їх надійними у довгостроковій експлуатації.

Метал легко піддається штампуванню, гнуттю, свердлінню, що дозволяє створювати пластини різної форми та розмірів, оптимізовані для конкретних конструкцій геліоколекторів і геліосушарок.

Металеві поверхні можна покривати спеціальними селективними шарами (наприклад, чорним хромом, оксидом титану), які значно підвищують коефіцієнт поглинання сонячної енергії і знижують теплові втрати.

Металеві абсорбери застосовують у різних галузях, зокрема:

- Сонячні геліоколектори для нагрівання води. Використовуються в побутових і промислових системах гарячого водопостачання, басейнах, теплицях.
- Геліосушарки для сільського господарства. Сушіння зерна, фруктів, овочів, деревини з використанням нагрітого повітря, що проходить через металеві абсорбери.
- Промислові теплові системи. Використання сонячної енергії для технологічного нагріву в харчовій, хімічній, текстильній промисловості.
- Сонячні теплові системи для опалення. Металеві абсорбери застосовуються в системах опалення будівель, де теплоносієм є вода або повітря.
- Концентраційні сонячні колектори. Металеві пластини з селективними покриттями використовуються як приймачі концентрованого сонячного випромінювання, що дозволяє досягати високих температур.

1.2. Конструктивні особливості металевих пластин для абсорберів

Абсорбувальний елемент, наприклад, геліосушарки (рис.1.1) виконується як теплопоглинальна панель, призначена для перетворення сонячного випромінювання на теплову енергію та передачі її повітряному потоку. Конструкція абсорбера формується з матеріалів із високою теплопровідністю та стабільними оптичними характеристиками в сонячному діапазоні. Найчастіше в якості матеріалу для металевих пластин абсорберів використовують алюміній, мідь та сталь.

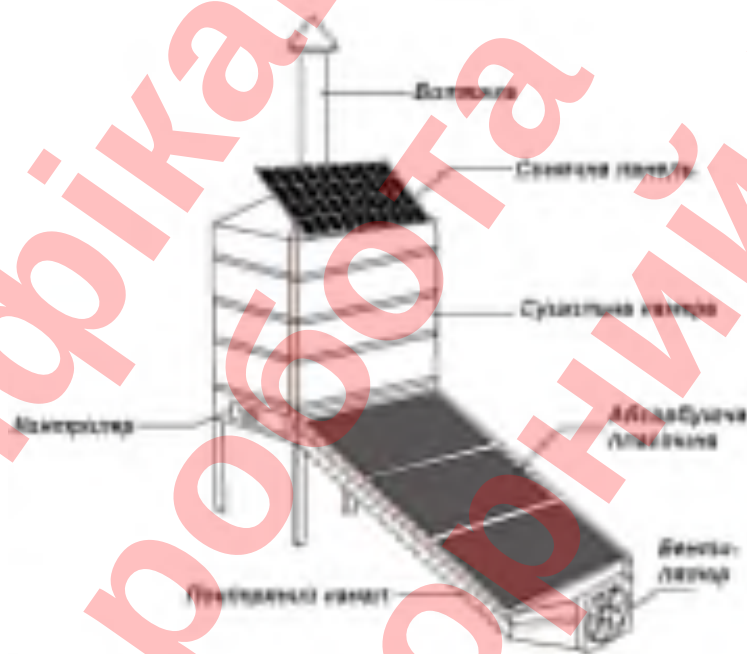


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема геліосушарки

Матеріал і властивості пластин. Алюміній – легкий, корозійностійкий, дешевший за мідь, але має нижчу теплопровідність. Використовують алюміній марки EN AW-1050, EN AW-3003 або аналогічні. Такий матеріал має високу теплопровідність 200–230 Вт/м·К, малу масу, володіє корозійною стійкістю.

Мідь має найкращу теплопровідність, але дорожча і важча, потребує захисту від корозії. Максимальна теплопровідність міді 380–400 Вт/м·К.

Сталь з покриттям – використовується рідше, через нижчу теплопровідність, але має високу міцність. Використовують сталь оцинковану або чорну сталь з термостійким покриттям. Перевага сталі – механічна міцність і доступність, але нижча теплопровідність.

Форма і структура пластин. Пластини можуть бути плоскими або ребристими (з ребрами жорсткості або канавками), що збільшує площу теплообміну. Інтеграція з трубками для теплоносія: пластини часто мають вбудовані канали або кріплення для трубок, по яких циркулює вода або повітря.

Покриття пластин. Поверхні металевих пластин, які використовують у геліосушарках та колекторах, покривають спеціальними покриттями – селективними покриттями, що мають високий коефіцієнт поглинання (до 95%) і низький коефіцієнт випромінювання, що зменшує теплові втрати та захисними лакофарбовими покриттями для підвищення корозійної стійкості. Селективні покриття – це спеціальні шари, нанесені на поверхню металевих пластин, які мають властивість максимально поглинати сонячне випромінювання і мінімізувати теплові втрати за рахунок випромінювання.

В якості покриттів використовують:

- Селективні покриття ($TiNO_x$, *Bluetec*, чорний хром) – одне з найпоширеніших селективних покриттів. Має високу поглинальну здатність (понад 90%) і низький коефіцієнт випромінювання. Використовується в промислових геліоколекторах. Коефіцієнт поглинання 0,90–0,95.
- Селективні покриття оксид титану (TiO_2) на основі оксидів металів. Забезпечує хорошу селективність і стійкість до корозії. Часто застосовується у поєднанні з іншими шарами.
- Селективні покриття *Tinox* і *Sunselect*. Це комерційні селективні покриття, які поєднують високу теплову ефективність з довговічністю. Вони створюють тонкі багат шарові структури, що підвищують поглинання і знижують теплові втрати.

- Селективні покриття – нітрид титану (TiN) і карбід титану (TiC). Використовуються для підвищення зносостійкості і корозійної стійкості, зберігаючи при цьому хороші селективні властивості.
- Термостійкі матові фарби чорного кольору на кремнієвій чи полімерній основі: коефіцієнт поглинання 0,80–0,90;
- Оксидні покриття для алюмінію або сталі (анодування/фосфатування) для підвищення теплообміну та адгезії фарби.

Товщина шару селективного покриття становить 5–25 мкм, а термостійкої фарби – 20–60 мкм.

Товщина матеріалів. Для різних матеріалів пластин застосовують різні товщини, виходячи з властивостей матеріалу та вимог до міцності конструкції.

Для листа алюмінієвого або сталевого:

- типова товщина: 0,4–0,8 мм.
- для підвищених навантажень або промислових сушарок може застосовуватися 1,0 мм.

Для мідного листа:

- 0,3–0,5 мм, завдяки високій теплопровідності не потребує більшої товщини.

Геометричні розміри пластин абсорберів. Розміри пластин, які використовуються в абсорберах, визначаються продуктивністю геліосушарки та параметрами сушильної камери.

Загальна площа абсорбера може становити:

- для малих побутових сушарок: 0,5–1,5 м²;
- для фермерських сушарок: 2–6 м²;
- для промислових систем: 10 м² і більше.

Модульні розміри листів пластин бувають:

- 500×1000 мм
- 1000×2000 мм
- Інші параметри – відповідно до конструктивного виконання.

Нанесення селективних покриттів виконується різними методами:

- Гальванічне покриття – нанесення чорного хрому або інших металевих шарів електрохімічним способом.
- Плазмове напилення – створення тонких шарів оксидів або нітрیدів на поверхні.
- Хімічне осадження з парової фази (CVD) – для формування багатошарових селективних покриттів.
- Фізичне осадження з парової фази (PVD) – для нанесення металевих і керамічних шарів.

Для захисту металу від корозії застосовують лакофарбові покриття або анодування (для алюмінію) [2, 4, 11-13, 16, 18].

1.3. Застосування металевих пластин у геліосушарках

Геліосушарки використовують сонячну енергію для сушіння сільськогосподарської продукції, деревини, харчових продуктів тощо. Металеві пластини в таких системах виконують роль абсорбера, що нагріває повітря, яке потім подається у сушильну камеру (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Використання алюмінієвої фольги в якості абсорбера геліосушарки

Пластини розташовуються під прозорим покриттям (склом або полікарбонатом), що створює парниковий ефект. Нагріте повітря циркулює

через сушильну камеру, прискорюючи процес сушіння. Металеві пластини забезпечують стабільне і рівномірне нагрівання, що важливо для якісного сушіння без перегріву.

1.4. Застосування металевих пластин у геліоколекторах

Геліоколектори – це пристрої для збору і перетворення сонячної енергії у теплову, яка використовується для нагрівання води або інших теплоносіїв.

Металеві пластини служать основою для поглинання сонячного світла. Вони з'єднані з системою трубок, по яких циркулює вода або антифриз. Завдяки високій теплопровідності металу тепло швидко передається теплоносію. Селективні покриття на пластинах підвищують ефективність колектора, зменшуючи втрати тепла.



Рисунок 1.3 – Приклад використання металевих абсорберів у геліоколекторах для нагрівання води

Металеві пластини є ключовим елементом у конструкції геліосушарок і геліоколекторів завдяки своїм унікальним властивостям: високій теплопровідності, міцності, можливості нанесення селективних покриттів і легкості обробки. Вони забезпечують ефективне поглинання сонячної енергії і її перетворення у теплову, що робить їх незамінними у сучасних сонячних теплових системах. Розвиток технологій селективних покриттів і матеріалів лише підсилює їхню роль у підвищенні ефективності геліосистем [2, 4, 11-13, 16, 18].

1.5. Сонячне випромінювання та робота металевого абсорбуючого елемента

Сонячна радіація (випромінювання) є одним з видів відновлювальних джерел енергії. Так, у світі широкого використання набули сонячні сушарки для сушіння плодів (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Зони світу з найбільшою кількістю публікацій та найпоширеніші типи сушених продуктів

В Україні протягом останніх років набуває популярності тема сушіння фруктів, а також наукових підходів до обґрунтування конструкцій та параметрів геліосушарок.

Серед варіантів відновлюваної енергії сонячна енергія виділяється як найпоширеніша. Сонячне світло, яке щодня досягає Землі, перевершує всі інші джерела енергії на планеті, приблизно в 10 000 разів перевищуючи поточне споживання енергії людством.

Коли сонячне випромінювання проходить через атмосферу, частина його поглинається або розсіюється хмарами, молекулами повітря, аерозолями та водяною парою. В результаті пряме нормальне випромінювання являє собою сонячне випромінювання, яке безпосередньо досягає поверхні Землі (рис. 1.5).

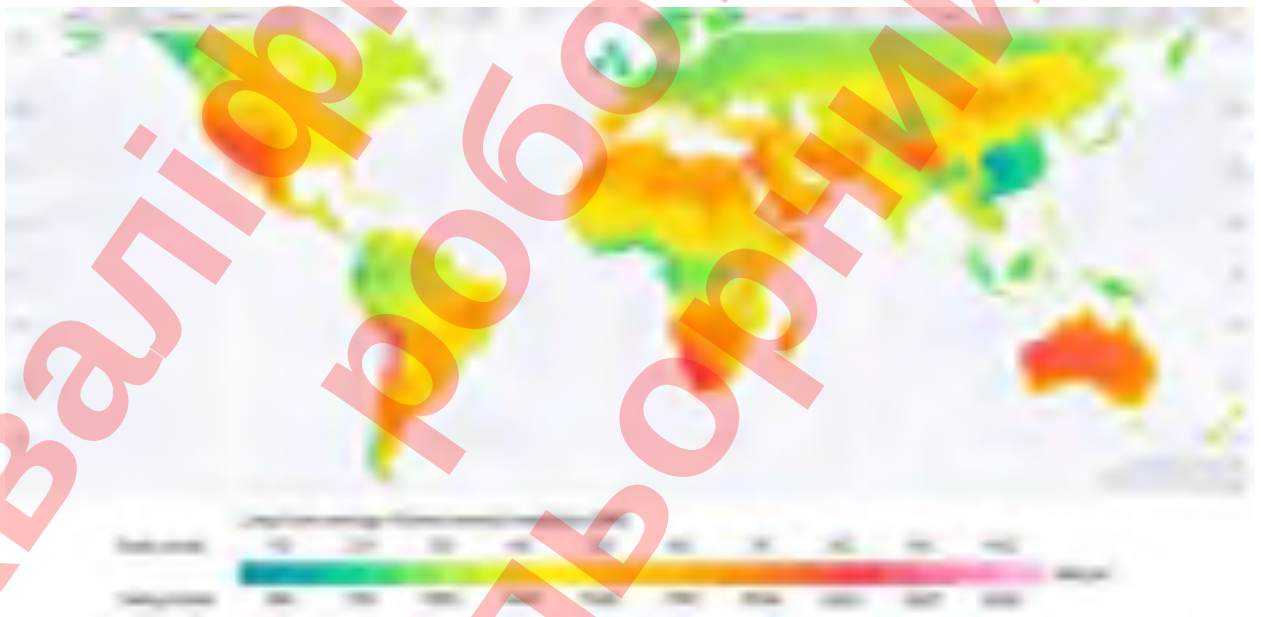


Рисунок 1.5 – Карта сонячних ресурсів прямого нормального опромінення

У ясний день, опівдні, пряме променеве випромінювання на поверхні Землі може досягати приблизно 1000 Вт/м^2 . На збір сонячної енергії впливають такі фактори, як місцезнаходження, пора року, час доби та погодні умови [20].

Для визначення величини сонячного енергетичного потоку, що сприймається абсорбуючою поверхнею, необхідно враховувати характер добового та сезонного переміщення Сонця відносно небосхилу (рис. 1.6). Це зумовлено тим, що інтенсивність надходження сонячного випромінювання істотно залежить від просторового положення світила на небесній сфері, а також від геометричної орієнтації приймальної площини.



Рисунок 1.7 – Переміщення Сонця по небосхилу та визначення положення точки А відносно сонячних променів

Під час розрахунку кількості сонячної енергії, яка досягає поверхні, слід визначити кути падіння сонячних променів на площину для відповідних умов місцевості (рис. 1.6) [5, 12, 20].

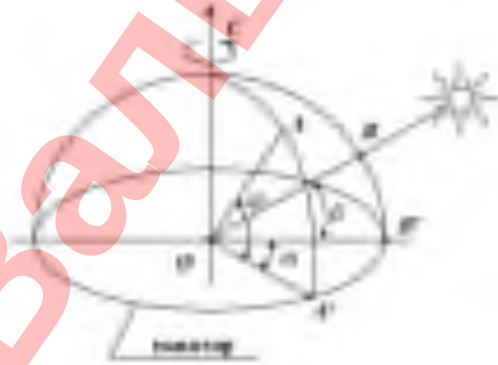


Рисунок 1.7 – Кути, які задають положення точки на земній поверхні

1.6. Теплопровідність і теплопередача металевої пластини

Теплопровідність характеризує механізм перенесення теплової енергії всередині матеріального середовища, що відбувається внаслідок мікроскопічного переміщення його частинок за наявності неоднорідного розподілу температури в тілі. Відповідно до положень гіпотези Фур'є, кількість теплової енергії dQ_t (Дж), яка проходить крізь елементарну ділянку ізотермічної поверхні площею dF (m^2), протягом малого інтервалу часу dt (с), є прямо пропорційною значенню температурного градієнта dt/dn :

$$dQ_t = -\lambda \frac{dt}{dn} dF dt$$

де λ , Вт/(м·К) – теплопровідність матеріалу – фізичний параметр речовини, який характеризує її здатність проводити теплоту.

Теплопередачею називають процес переносу теплоти від однієї речовини до іншої, і характеризується коефіцієнтом теплопередачі k (Вт/($m^2 \cdot K$)).

Теплопередача в металевій пластині відбувається завдяки руху теплової енергії від більш нагрітого боку до холоднішого. Метали, завдяки своїй кристалічній структурі та високій теплопровідності, ефективно передають тепло. Основним механізмом є теплопровідність, коли енергія переноситься через коливання атомів і рух вільних електронів у металі.

У процесі теплопередачі температура пластини змінюється поступово, утворюючи градієнт температури між двома її поверхнями. Цей градієнт є рушійною силою, що змушує теплову енергію рухатися від гарячої сторони до холодної. Важливо враховувати товщину пластини, її матеріальні властивості, а також умови навколишнього середовища, які можуть впливати на швидкість і ефективність теплопередачі.

Коефіцієнт теплопередачі металевої пластини характеризує здатність матеріалу передавати теплову енергію через свою товщу. Цей параметр визначає, скільки тепла проходить через одиницю площі пластини за одиницю

часу при різниці температур між її поверхнями. Величина коефіцієнта залежить від теплопровідності металу, товщини пластини та умов теплообміну на її поверхнях.

У фізичному сенсі коефіцієнт теплопередачі відображає інтенсивність теплового потоку, що виникає внаслідок температурного градієнта. Чим вищий цей коефіцієнт, тим ефективніше тепло передається через матеріал. Для металевих пластин, які мають високу теплопровідність, значення коефіцієнта зазвичай досить велике, що робить їх ефективними провідниками тепла.

В інженерних розрахунках коефіцієнт теплопередачі використовується для прогнозування температурних режимів, оптимізації конструкцій і вибору матеріалів, що забезпечують необхідний рівень теплового обміну. Врахування цього показника допомагає створювати більш ефективні системи охолодження та теплоізоляції.

Так, наприклад, для мідної пластини товщиною 0,5 мм, розташованої горизонтально і підданої сонячному тепловому випромінюванню в місті Львові в полудень червня, значення теплопередачі буде визначатися кількома ключовими факторами, а саме:

- Властивостями міді. Мідь має високу теплопровідність, приблизно $390 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, що забезпечує швидкий і ефективний перенос тепла через товщу пластини. Тонка товщина 0,5 мм сприяє мінімальному опору теплопередачі всередині матеріалу.
- Умовами навколишнього середовища. Для прикладу, о 12 годині дня в червні у Львові сонячне випромінювання є інтенсивним, що створює значний тепловий потік на поверхню пластини. Середня сонячна радіація в цей час може досягати близько $800\text{-}1000 \text{ Вт/м}^2$. Це призведе до нагрівання верхньої поверхні пластини.
- Тепловим градієнтом і конвекцією. Внаслідок нагрівання верхньої поверхні пластини температура на ній буде вищою, ніж на нижній, що створить температурний градієнт. Тепло буде передаватися через пластину від гарячої сторони до холоднішої. Зовнішні умови, такі як температура

повітря, швидкість вітру і конвекція, також впливатимуть на швидкість відведення тепла з поверхні.

- Значення коефіцієнта теплопередачі. Загальний коефіцієнт теплопередачі для такої системи залежатиме від теплопровідності міді, товщини пластини та коефіцієнтів конвекції і випромінювання на поверхнях. Для тонкої мідної пластини цей коефіцієнт буде досить високим, що забезпечує ефективний тепловий обмін.

Як бачимо, значення коефіцієнта теплопередачі пластини, а отже й ефективність її роботи в якості абсорбера, залежить від багатьох факторів. Тому для оцінки їх впливу на значення коефіцієнта теплопередачі варто застосовувати відомі статистичні кліматичні та погодні дані, а також сучасні системи автоматизованого проектування, які дають змогу проводити такі дослідження. Однією з таких систем є *SolidWorks*, принцип роботи з якою буде описано в наступних розділах кваліфікаційної роботи.

Коефіцієнт теплопередачі через металеву пластину визначається за формулою:

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_{plast.} + R_{поверхн.}},$$

де U – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

R_{total} – загальний тепловий опір, (м²·К)/Вт;

$R_{plast.}$ – тепловий опір самої пластини, (м²·К)/Вт;

$R_{поверхн.}$ – сумарний тепловий опір поверхневих шарів (конвекція, радіація), (м²·К)/Вт;

Тепловий опір пластини:

$$R_{plast.} = \delta / \lambda,$$

де δ – товщина пластини, м;

λ – теплопровідність матеріалу пластини, Вт/(м·К).

Якщо врахувати теплові опори з обох боків пластини (конвекція, радіація), то:

$$R_{total} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2},$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі (конвекції) з обох боків пластини, Вт/(м²·К).

Тоді

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Ця формула використовується для розрахунку загальної теплової провідності через металеву пластину, враховуючи як теплопровідність самого металу, так і тепловіддачу на поверхнях.

Коефіцієнт теплопередачі U показує, скільки тепла проходить через одиницю площі пластини за одиницю часу при різниці температур 1 К [3, 5, 15, 18].

2 МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Аналіз теплопередачі CFD-методом в середовищі *Solidworks Flow Simulation*

Основним методом для виконання аналізу теплопередачі засобами комп'ютерного моделювання є метод *CFD* (*Computational Fluid Dynamics* – обчислювальна гідродинаміка) у *SolidWorks* – це чисельний метод для моделювання й аналізу потоків рідин і газів, який реалізований у модулі *SolidWorks Flow Simulation*. Цей інструмент інтегрований безпосередньо в середовище *3D CAD SolidWorks* і дозволяє інженерам проводити детальний аналіз гідродинаміки, теплових процесів і взаємодії потоків з твердими тілами.

Донедавна комерційне програмне забезпечення, доступне для *CFD*, зазвичай було орієнтоване на спеціалістів, що обмежувало його широке використання. Окрім того, що ці інструменти були дорогими, вони були або складними, громіздкими або трудомісткими у використанні. Як результат, інженерний аналіз для таких застосувань, як теплопередача, традиційно проводився фахівцями в аналітичних відділах, окремо від основних відділів проектування та розробки.

Тому для тестування або перевірки своїх конструкцій інженерам-механікам доводилося покладатися на створення фізичних прототипів та їх тестування на випробувальному стенді. Але цей трудомісткий підхід часто призводив до неповних результатів, обмежених показниками в окремих місцях, що ускладнювало ретельне розуміння та характеристики основної теплової поведінки.

На щастя, з'явилися нові інструменти, які вбудовують повний спектр аналізів потоків, включаючи моделювання теплопередачі, в основні середовища *3D CAD*, такі як рішення *SOLIDWORKS* для *3D*-проектування. Інженерна технологія *SolidWorks Flow Simulation* спеціально розроблена для інженерів-механіків-конструкторів. Завдяки *SolidWorks Flow Simulation* немає потреби наймати чи навчати спеціалістів з *CFD*, передавати аналіз

консультантам на аутсорсинг або проводити випробування на дорогих фізичних прототипах.

Натомість, інженер-конструктор зі стандартною підготовкою в компанії будь-якого розміру може використовувати свої наявні знання для успішного проведення аналізу теплопередачі, і все це в звичному для нього середовищі *3D CAD. SolidWorks Flow Simulation* може підвищити продуктивність проєктування та може значно зменшити кількість фізичних прототипів, необхідних для тестування. Не менш важливо, що це спонукає інженерів досліджувати набагато більше сценаріїв «що, якщо», щоб удосконалити свої проєкти.

Звичайно, завжди існуватимуть кілька дуже вимогливих застосувань, де потрібні більш розширені знання *CFD* для точного налаштування параметрів сітки та вирішувальної програми, щоб дійти до розв'язку. Однак, виведення *CFD* з виключної сфери діяльності спеціалістів та впровадження його в мейнстрім за допомогою *SolidWorks Flow Simulation* дозволяє інженерам-конструкторам без спеціальної підготовки з *CFD* аналізувати проблеми приблизно на 25-35 відсотків часу швидше, ніж це було б зайнято при використанні традиційних інструментів. Це пропонує конструкторам фундаментальний прорив в ефективності проєктування.

Програмне забезпечення *SolidWorks* для машинобудівного проєктування та *SolidWorks Flow Simulation CFD* забезпечують повне інженерне середовище для оцінки теплопередачі, поєднуючи всі фази аналізу в одному пакеті: від твердотілого моделювання до постановки задачі, її вирішення, візуалізації результатів, оптимізації проєкту та звітності. За допомогою *SolidWorks Flow Simulation* конструктори можуть зосередитися на детальному аналізі розподілу температури в рідинних та твердих частинах свого виробу. Це включає можливість аналізу складних фізичних процесів, таких як теплопровідність, теплоконвекція, спряжена теплопередача між рідинами, навколишніми твердими матеріалами, випромінювання, нагрівання та багато інших,

використовуючи сценарії «що, якщо», а потім інженери можуть швидко змінювати та оптимізувати геометрію проекту в 3D CAD-інструменті.

SolidWorks Flow Simulation працює з усіма трьома режимами теплопередачі – теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням, тому він може аналізувати широкий спектр застосувань. Типові застосування температурного аналізу включають теплообмінники, охолодження пристроїв для лиття під тиском, стерилізацію в харчовій промисловості, сонячні станції, лазерні системи, проектування гальм та багато інших. У випадку теплообмінника інженери можуть не тільки оцінити ефективність з теплової сторони, але й передбачити падіння тиску через теплообмінник. Поєднання цих параметрів в одній моделі допомагає розробити кращий продукт заздалегідь.

Щоб використовувати програмне забезпечення *SolidWorks Flow Simulation*, все, що потрібно інженеру, це знання MCAD-системи та фізики продукту. Після встановлення *SolidWorks Flow Simulation*, усі меню та команди, необхідні для виконання повного CFD-аналізу потоку, створюються в системі меню *SolidWorks*. Ця повна взаємодія між *SolidWorks* та *SolidWorks Flow Simulation* робить його надзвичайно простим у використанні. Згідно з даними компанії *Dassault Systemes*, фактично, більшість конструкторів повідомляють, що вони можуть використовувати *SolidWorks Flow Simulation*, витративши менше 8 годин на навчання.

Відправною точкою будь-якого аналізу теплопередачі є визначення загальних граничних умов проблеми. *SolidWorks Flow Simulation* пропонує майстер для керування налаштуванням, включаючи вибір властивостей матеріалу. *SolidWorks Flow Simulation* дозволяє конструктору використовувати існуючі 3D-моделі CAD для аналізу, без необхідності експортувати або імпортувати додаткові дані, що заощаджує значну кількість часу та зусиль. Вбудований набір інструментів *SolidWorks Flow Simulation* може використовувати щойно створену або існуючу 3D-геометрію CAD та

інформацію про твердотілу модель для моделювання конструкцій в реальних умовах.

Після створення моделі її потрібно розбити на сітку. Розробка сітки – одна з тих навичок, які раніше відділяли фахівців з *CFD* від інженерів-механіків. За допомогою *SolidWorks Flow Simulation* сітки створюються автоматично та за лічені хвилини, на відміну від багатьох годин виснажливого розподілу областей та комірок. *SolidWorks Flow Simulation* фактично створює адаптивну сітку, яка зменшує розмір комірок, збільшуючи роздільну здатність аналізу, щоб забезпечити точніші результати моделювання у складних областях моделі.

Розв'язок складних задач теплопередачі.

Під час аналізу теплопередачі важливо побудувати обчислювальну сітку, або комірку, для відображення складної геометрії системи або пристрою. Хоча сітка проста за концепцією, вона є основою для складних розрахунків *CFD*. Поверхня пристрою розділяється на крихітні прямокутні комірки, кожна з яких розділяється на тверді та рідкі об'єми, які аналізуються дискретно. Потім процес створює підсумковий результат, який включає всі комірки.

SolidWorks Flow Simulation надає широкі можливості візуалізації того, що відбувається з тепловіддачею конструкції, надаючи інженеру цінну інформацію, яка може допомогти у прийнятті рішень щодо проектування. Можливості візуалізації дозволяють користувачам ретельніше досліджувати конструкцію.

Один із способів дослідження температурного поля – використовувати діаграму розрізу, яка зображує розподіл тепла на площині через модель, як показано на рис. 2.1. Діаграму розрізу результатів можна відобразити з будь-яким параметром результатів, а представлення можна створити у вигляді контурної діаграми, ізоліній або у вигляді векторів. Його також можна створювати в будь-якій комбінації, наприклад, величина швидкості та вектори

швидкості. Окрім розрізів, можна легко відобразити поверхневий графік для будь-якої конкретної грані, а також автоматично для всієї моделі.

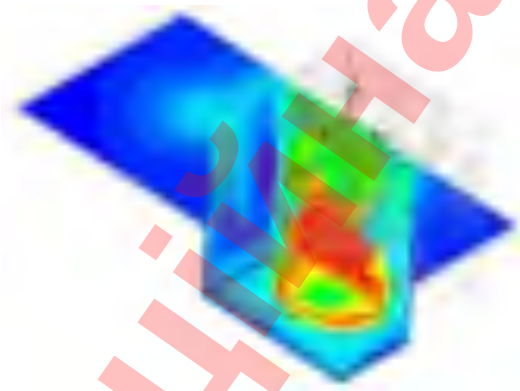


Рисунок 2.1 – Приклад використання діаграми розрізу для представлення розподілу температур всередині світлодіодної лампи в середовищі *SolidWorks Flow Simulation*

Вирішення задач розподілу тепла – це ітеративний процес. Після перегляду початкових результатів аналізу, більшість конструкторів хочуть модифікувати свої моделі, щоб дослідити різні сценарії. *SolidWorks Flow Simulation* спрощує проведення цих аналізів «що, якщо». Конструктори можуть досліджувати альтернативні варіанти проєктування, виявляти недоліки проєктування та оптимізувати продуктивність продукту до створення детальних проєктів або фізичних прототипів. Це дозволяє інженеру-конструктору швидко та легко визначити, які проєкти є перспективними, а які навряд чи будуть успішними.

Щоб вивчити альтернативи, у *SolidWorks Flow Simulation* можна створити кілька клонів твердотільної моделі, які автоматично зберігають усі дані аналізу, такі як джерела тепла та інші граничні умови. Коли інженер змінює твердотілу модель, її можна негайно проаналізувати без необхідності повторного застосування граничних умов та властивостей матеріалу.

У традиційному програмному забезпеченні *CFD* після кожної геометричної зміни необхідно відтворювати сітку, що зазвичай вимагає

тривалого ручного втручання. На відміну від цього, програмне забезпечення *SolidWorks Flow Simulation* негайно працює зі зміненою геометрією, автоматично створюючи нову сітку та працюючи з раніше визначеними граничними умовами. Таким чином, крок від зміненої геометрії до запуску вирішувальної програми та аналізу результатів значно прискорюється.

Програмне забезпечення також допомагає в параметричному аналізі, наприклад, багаторазовому виконанні аналізу, наприклад, з різними розмірами вентиляційних отворів для визначення оптимальної конструкції розподілу тепла. Таким чином, *SolidWorks Flow Simulation* прискорює ітеративний процес проєктування, дозволяючи інженерам швидко та легко впроваджувати знання, отримані в результаті аналізу, у вдосконалений проєкт.

Перевірка та верифікація.

SolidWorks Flow Simulation надає надійні можливості для перевірки проєктів.

Перед випуском нової версії *SolidWorks Flow Simulation* інженери-дослідники перевіряють її за допомогою набору з 300 тестів. На основі цього ретельного набору перевірок *SolidWorks Flow Simulation* пропонує 26 навчальних прикладів тестування, готових до негайного використання.

Наприклад, розробники можуть використовувати ці приклади тестування для перевірки відомого тесту теплопередачі для CFD: моделювання примусового повітряного охолодження пластинчастого ребристого радіатора, розміщеного в аеродинамічній трубі (рис. 2.2).

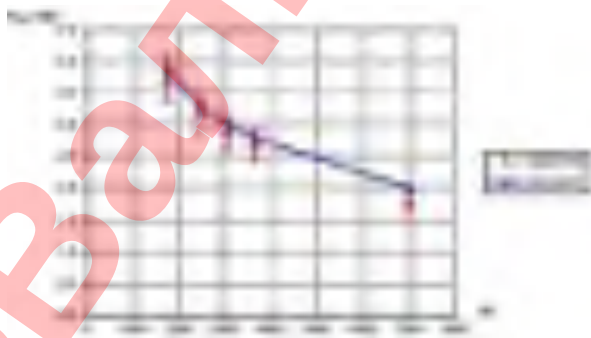


Рисунок 2.2 – Залежність термічного опору радіатора від числа Рейнольдса у порівнянні з експериментальними даними

Комунікація.

Після отримання результатів інженер-проектувальник повинен повідомити про свої висновки іншим.

SolidWorks Flow Simulation повністю інтегрований з *Microsoft Word* та *Excel*, що дозволяє інженерам створювати звітні документи та збирати важливі дані в графічному вигляді з будь-якого проекту *SolidWorks Flow Simulation*. Крім того, він автоматично створює електронні таблиці *Excel*, що підсумовують результати аналізу; таким чином, останній крок у будь-якому аналізі – створення звітів – стає легким.

Використовуючи *SolidWorks Flow Simulation*, інженер-проектувальник може створити налаштований звіт, включаючи граничні умови, властивості матеріалів, визначення сітки та графіки результатів, який автоматично зберігається в документі *Word*. Цей звіт є цінним активом проекту та часто архівується системою управління даними.

Наступний рівень комунікації – це можливість повідомляти результати моделювання у 3D, щоб це було більш інтуїтивно зрозуміло для всіх зацікавлених сторін та колег. Найкращий спосіб повідомляти про результати у 3D – це використовувати *eDrawings* (рис. 2.3), інструмент 3D-комунікації *SolidWorks*. Інженери-розробники можуть зберігати результати *CFD* у 3D, щоб їхні колеги могли переглядати їх на будь-якому пристрої.



Рисунок 2.3 – Результат комунікації в *eDrawings*

Завдяки *SolidWorks Flow Simulation* інженери можуть зосередитися на покращенні продуктивності та функціональності продукту, не вдаючись до штатних спеціалістів з гідродинаміки. Відомо безліч реальних прикладів, які демонструють ефективність *SolidWorks Flow Simulation* у допомозі конструкторам дотримуватися стислих термінів, досягати вищої якості результатів або мінімізувати витрати.

Теплові ефекти в інженерії часто визначаються низкою складних фізичних процесів, таких як теплопровідність, теплова конвекція, спряжений теплообмін між рідинами, навколишніми твердими матеріалами та випромінювання. У поєднанні зі складною геометрією реального світу, необхідність точного прогнозування *CFD* є критично важливою для забезпечення продуктивності продукту, і її може бути надзвичайно важко оцінити або розрахувати вручну.

SolidWorks Flow Simulation визначає гарячі точки, кількісно визначає теплову ефективність та забезпечує рівномірний розподіл тепла для пристроїв теплопередачі, таких як печі, теплообмінники, а також електронні механізми охолодження. Крім того, *SolidWorks Flow Simulation* працює одночасно з процесом розробки продукту та без клопоту з «брудною геометрією» та генерацією сітки за допомогою традиційних інструментів *CFD*.

Маючи 20-річну історію, *SolidWorks Flow Simulation*, завдяки одночасному інженерному підходу, дає кожному інженеру-виробнику можливість оцінити, як їхні проекти працюватимуть у реальному світі; а аналіз під час проєктування дозволяє впевнено приймати критичні рішення щодо проєктування [17, 21, 22].

2.2. Побудова тривимірної моделі пластини в середовищі CAD-модуля *SolidWorks*, призначення матеріалу

Тривимірну твердотілу модель пластини виконуємо у CAD-модулі *SolidWorks*. Для цього у площині «Зверху» створюємо визначений ескіз у формі прямокутника з розмірами сторін 1000×2000 мм. (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Створення визначеного ескізу моделі пластини

З використанням операції «Видавлювання» з вкладки «Елементи» виконуємо видавлювання прямокутника на задану товщину – 0,5 мм. Отримуємо тривимірну модель пластини.

Матеріал призначаємо, вибравши у дереві конструювання пункт «Матеріал» та у діалоговому вікні підбираємо матеріал – мідь (рис. 2.5).

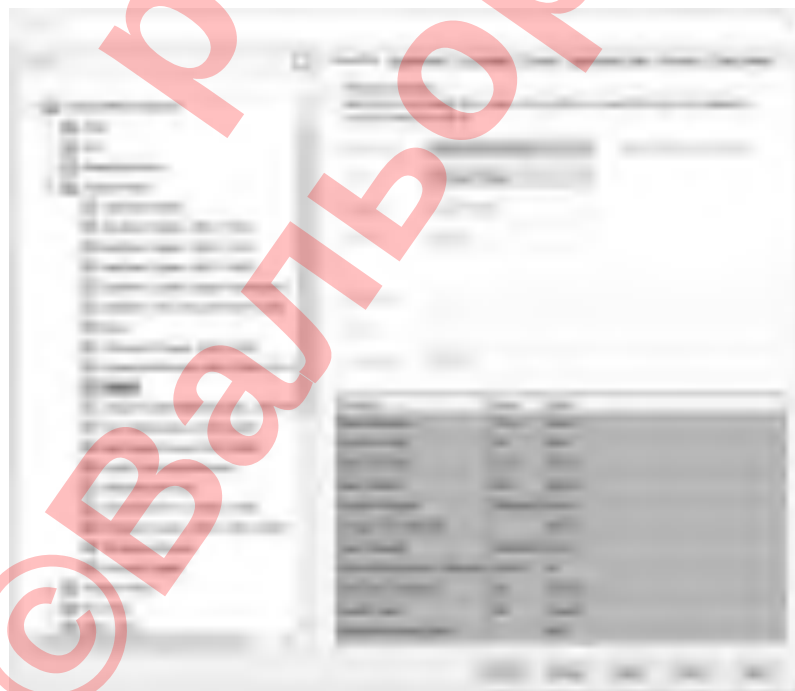


Рисунок 2.5 – Діалогове вікно призначення матеріалу моделі пластини

У вкладці «Властивості» перевіряємо властивості вибраного матеріалу, зокрема значення коефіцієнта теплопровідності, яке дорівнює 390 Вт/(м·К).

2.3. Створення конфігурацій моделі пластини

Оскільки *SolidWorks* є провідним програмним забезпеченням для тривимірного моделювання, яке широко застосовується в інженерії, машинобудуванні, промисловому дизайні та інших технічних галузях, то однією з ключових функцій цього програмного продукту є можливість створення та управління конфігураціями моделей. Конфігурації у *SolidWorks* дозволяють ефективно керувати варіантами однієї і тієї ж деталі без необхідності створення окремих файлів для кожного варіанту.

Конфігурації дозволяють інженерам створювати кілька варіантів однієї деталі в межах одного файлу моделі. Це значно скорочує час розробки, оскільки не потрібно повторно моделювати схожі елементи, а лише змінювати параметри, такі як розміри, форми, матеріали або інші властивості. Такий підхід підвищує продуктивність праці та зменшує ймовірність помилок.

У багатьох інженерних задачах необхідно розробити деталі з різними розмірами або функціональними характеристиками, які відповідають різним умовам експлуатації. Конфігурації дозволяють зберігати всі варіанти в одному файлі, що спрощує аналіз і порівняння різних варіантів конструкції.

SolidWorks базується на параметричному підході, де геометрія моделі визначається параметрами. Конфігурації розширюють цей підхід, дозволяючи змінювати параметри для кожного варіанту окремо, зберігаючи при цьому зв'язок між ними. Це забезпечує гнучкість у проєктуванні та можливість швидко адаптувати модель до нових вимог.

Конфігурації також дозволяють автоматично генерувати різні кресленики для кожного варіанту деталі, що спрощує підготовку конструкторської документації. Це особливо важливо при серійному виробництві, де одна базова модель може мати декілька модифікацій.

Замість зберігання численних окремих файлів для кожного варіанту, конфігурації дозволяють централізовано управляти всіма варіантами в одному файлі. Це знижує ризик втрати даних, полегшує архівування та пошук потрібної інформації.

Конфігурації в *SolidWorks* є потужним інструментом, що забезпечує ефективне управління варіантами тривимірних моделей деталей. Вони сприяють оптимізації процесу проектування, підвищенню гнучкості та точності інженерних рішень, а також полегшують підготовку виробничої документації. Використання конфігурацій є невід'ємною складовою сучасного параметричного моделювання, що відповідає вимогам інноваційного та ефективного інженерного проектування.

Для того, щоб дослідити пластини, виконані з різних матеріалів, створюємо другу конфігурацію моделі та налаштовуємо її параметри. Для цього активуємо вкладку «Конфігурації» та додаємо другу конфігурацію з назвою «2.Алюміній», попередньо перейменувавши стандартну конфігурацію і задавши їй ім'я «1.Мідь» (рис. 2.6).

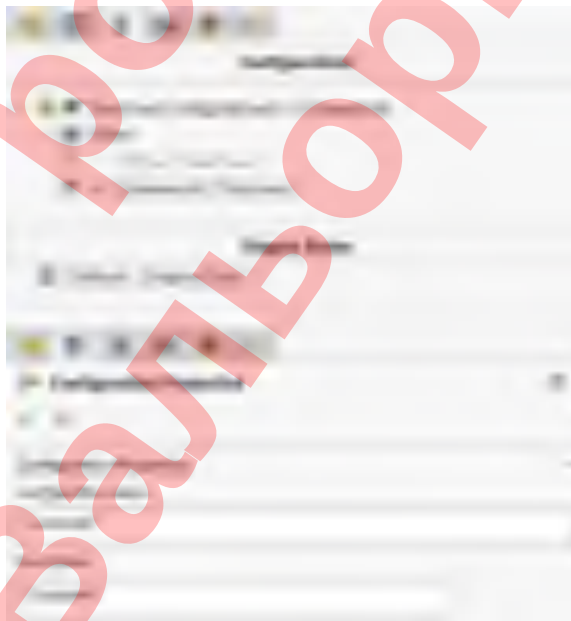


Рисунок 2.6 – Створення нової конфігурації моделі пластини

Активувавши другу конфігурацію моделі, призначаємо матеріал – алюміній, вибравши з переліку стандартних матеріалів SolidWorks алюміній марки 1060-H12 з коефіцієнтом теплопередачі $230 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ (рис. 2.7).

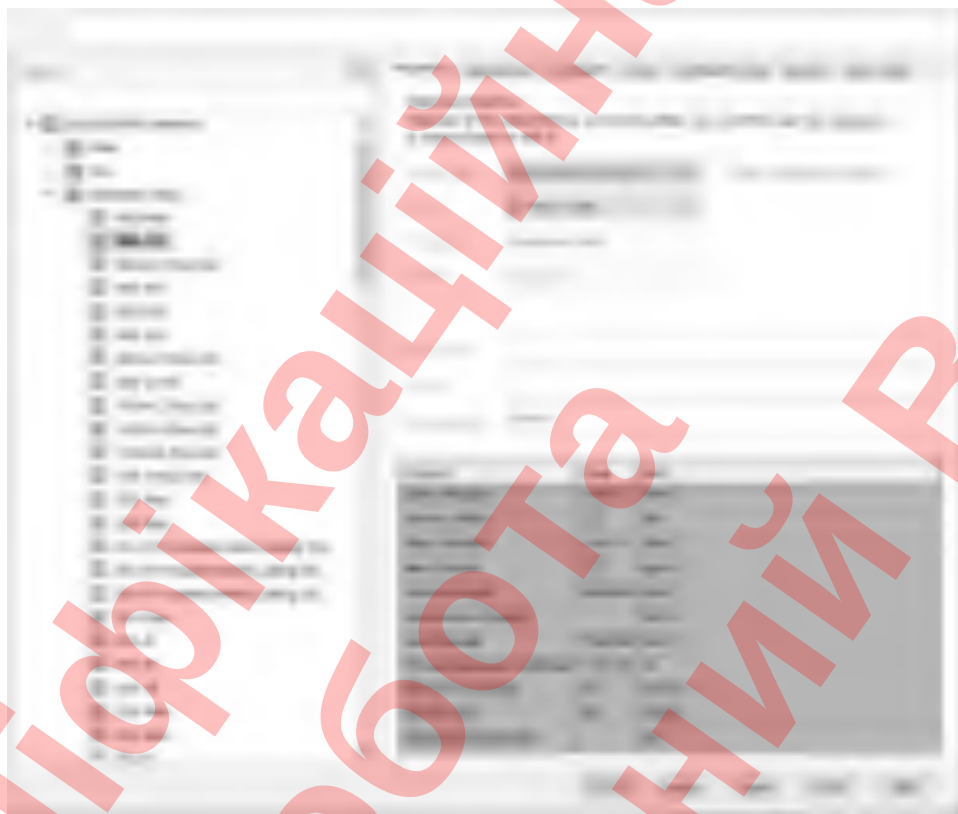


Рисунок 2.7 – Призначення матеріалу другій конфігурації моделі пластини

В дереві конструювання перевіряємо налаштування матеріалів для двох конфігурацій моделі (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Налаштування параметра «Конфігурації матеріалу»

В результаті виконаних дій отримуємо тривимірну розрахункову модель пластини у двох конфігураціях з різними матеріалами, готову для подальших досліджень [21].

2.4. Методика проведення дослідження впливу сонячного випромінювання на металеву пластину

Дослідження процесу нагрівання пластини за допомогою сонячного випромінювання у *SolidWorks Flow Simulation* з урахуванням широти міста Львова та температури навколишнього середовища виконуємо наступним чином.

На початку дослідження потрібно визначитися з місцем розташування пластини, значенням температури навколишнього середовища, дати й часу проведення досліджень.

Місце проведення експерименту приймаємо згідно з завданням – м. Львів. Широта міста Львова становить приблизно $49^{\circ}50'$ північної широти.

Дата проведення досліджень – 6 червня 2025 року.

Температуру повітря в тіні визначаємо за даними інтернет-ресурсу Метеопост [19], який дає змогу переглядати фактичну погоду на певну дату та містить архів метеоданих по містах України. Так, згідно ресурсу Метеопост, визначено, що станом на 12.00 год. у Львові була безхмарна погода і температура в тіні $+29^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.9).

Враховуючи, що температура в тіні становить $+29^{\circ}\text{C}$, а в дослідженні пластина перебуватиме на сонці й на відкритому повітрі, приймаємо значення температури навколишнього середовища $+39^{\circ}\text{C}$.

Вихідні дані дослідження зведено в табл. 2.1.

Запускаємо модуль *Flow Simulation*: у меню *SolidWorks* обираємо *Tools* → *Flow Simulation* → *Project*.

У діалоговому вікні налаштування параметрів досліджень вмикаємо параметр *Radiation* для моделювання теплового випромінювання і задаємо

значення температури навколишнього середовища $+39^{\circ}\text{C}$. Вибираємо тип випромінювання. Для сонячного випромінювання вибираємо *Solar Radiation* і вносимо відповідні значення параметрів локації, часу й дати (рис. 2.10). Це дозволить програмі розрахувати кут падіння сонячних променів.

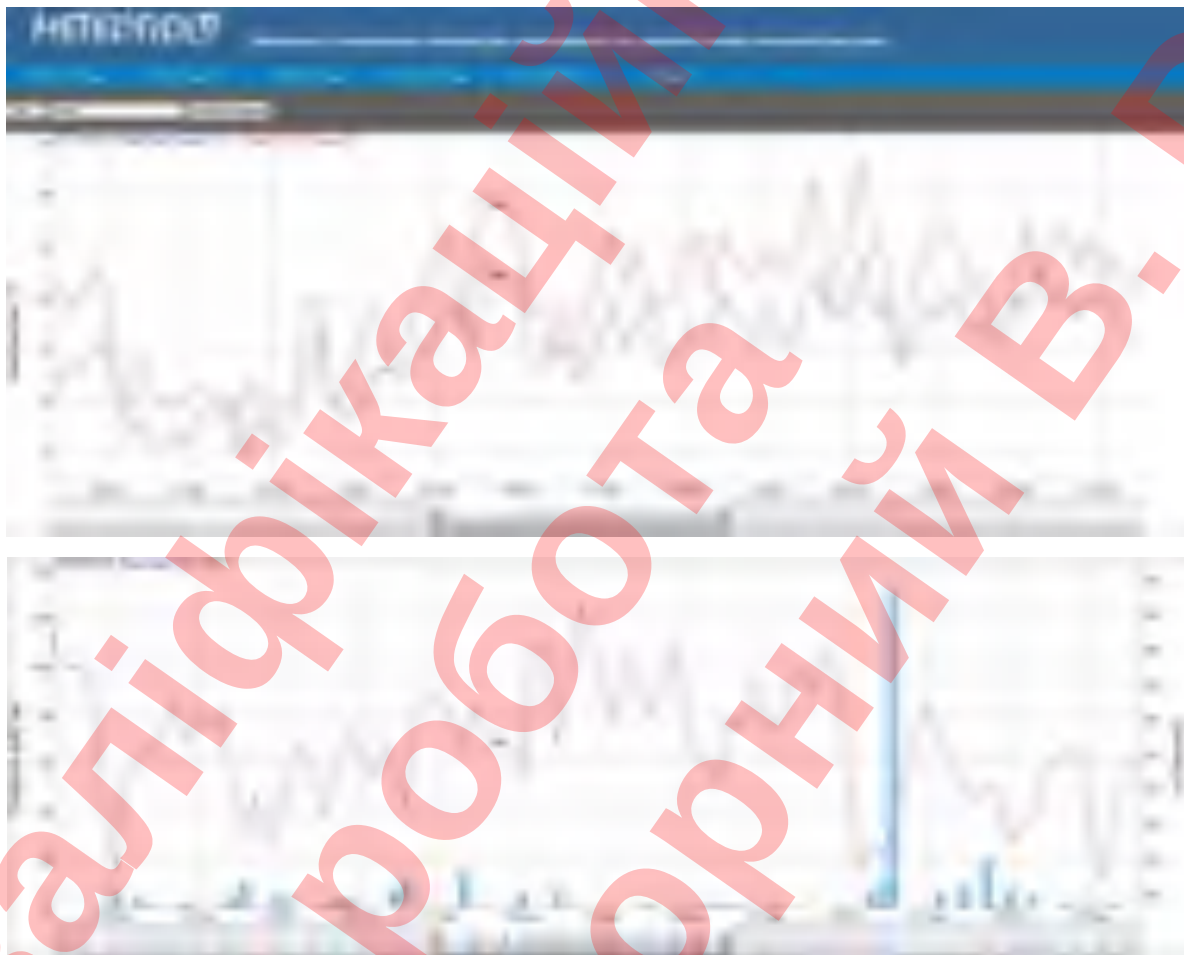


Рисунок 2.9 – Метеодані ресурсу Метепост у Львові
станом на 6 червня 2025 року

Таблиця 2.1 – Вихідні дані дослідження

Параметр	Значення
Дата досліджень	6 червня 2025 р.
Час досліджень	12.00 год.
Географічні координати місця проведення досліджень	м. Львів, $49^{\circ}50' \text{ N}$
Температура навколишнього середовища	$+39^{\circ}\text{C}$

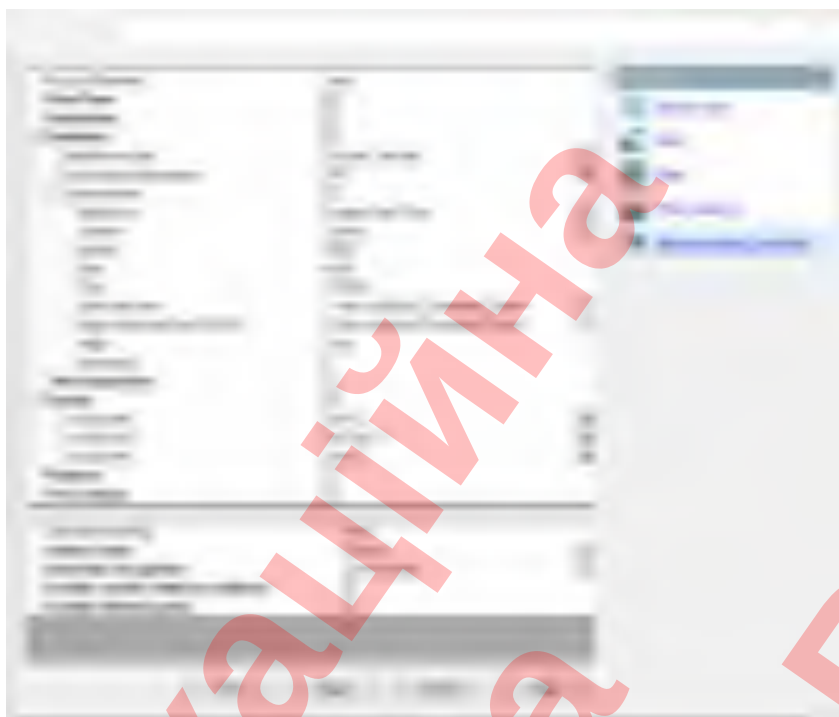


Рисунок 2.10 – Вікно налаштувань проєкту

Встановлюємо умови конвекції – вказуємо швидкість і температуру повітря, що оточує пластину. Встановлюємо орієнтацію пластини відносно сторін світу (північ, південь).

Визначаємо розміри розрахункової області (*Computational Domain*). Для цього вказуємо розмір області навколо пластини, достатній для моделювання (рис. 2.11). Область має бути достатньо великою, щоб уникнути впливу граничних умов на результати.



Рисунок 2.11 – Задання розмірів розрахункової області

Задаємо властивості матеріалу пластини, імпортуючи його в проєкт з моделі. Переконаємось, що матеріал має коректні теплові характеристики (теплопровідність, теплоємність, щільність) (рис. 2.12). В налаштуваннях параметрів проєкту вказуємо шорсткість поверхні пластини 100 мкм.



Рисунок 2.12 – Перевірка коректності властивостей імпортованого матеріалу

Встановлюємо задачі інженерного аналізу – значення коефіцієнта теплопередачі, температуру поверхні пластини тощо. Встановлюємо розмір сітки (рис. 2.13). Розмір сітки встановлюємо, виходячи з міркувань точності одержаних результатів і тривалості процесу моделювання.



Рисунок 2.13 – Встановлення розміру сітки

Запускаємо симуляцію, натиснувши кнопку *Run*. Під час розрахунку можна моніторити зміну температури пластини в реальному часі.

В результаті проведення дослідження можна відстежувати побудову графіка збіжності результатів. Графік збіжності в *SolidWorks* – це інструмент,

який використовується для візуалізації процесу збіжності розрахунків у чисельних методах, зокрема у методі скінченних елементів та методі скінченних об'ємів під час проведення інженерних досліджень.

Графік збіжності показує, як змінюються результати розрахунку (наприклад, напруження, деформації, сили) у міру ущільнення сітки або ітераційного процесу. Він допомагає інженеру оцінити, чи досягнуто стабільного рішення, тобто чи зміни результатів стають незначними при подальшому уточненні моделі.

Після запуску дослідження користувач може переглянути графік збіжності, який відображає зміну обраних параметрів по ітераціях або рівнях адаптації сітки.

Графік допомагає прийняти рішення про достатність точності моделі або необхідність подальшого уточнення. Він має й практичне значення:

- **Контроль якості розрахунку.** Графік збіжності дозволяє переконатися, що результати моделювання є надійними і не залежать від випадкових похибок сітки чи подальших ітерацій процесу.
- **Оптимізація часу розрахунку.** Якщо графік показує, що результати стабілізувалися, немає сенсу робити додаткове уточнення сітки чи виконувати додаткові ітерації, що економить ресурси.
- **Підвищення точності.** Якщо графік показує нестабільність, це сигнал до необхідності покращення моделі або сітки, виконання додаткової ітераційної процедури.

Графік збіжності в *SolidWorks* – це важливий інструмент для контролю і візуалізації процесу збіжності чисельних розрахунків у симуляціях, що дозволяє інженерам приймати обґрунтовані рішення щодо точності і надійності моделі.

Після завершення розрахунку потрібно виконати аналіз результатів. Можна візуалізувати температурний розподіл по поверхні пластини та інші результати дослідження, побудувавши відповідні епюри.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Аналіз збіжності результатів

Одержані результати дослідження експортовано в *Microsoft Excel*, а також отримано графіки збіжності результатів для обох варіантів виконання пластини – з міді та алюмінію (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Графіки збіжності результатів визначення температури поверхні пластин



Рисунок 3.2 – Графіки збіжності результатів визначення коефіцієнта теплопередачі пластин

З графіків бачимо, що збіжність результатів аналізу досягнуто, а отже й потреби в подальших ітераціях чи ущільнення сітки немає.

3.2. Результати визначення значень коефіцієнта теплопередачі й температури поверхні пластини

Визначено коефіцієнт теплопередачі пластини для варіантів виконання з міді та алюмінію, а також значення середньої температури поверхні пластини (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Результати визначення коефіцієнта теплопередачі й середнього значення температури поверхні пластини

Коефіцієнт теплопередачі U пластини товщиною 0,5 мм становить:

- мідь – $U=4,703 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- алюміній – $U=4,594 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Середня температура поверхні пластини товщиною 0,5 мм становить:

- мідь – $U=83,43 \text{ }^\circ\text{C}$;
- алюміній – $U=84,13^\circ\text{C}$.

Побудовано графіки розподілу температури по поверхні пластини (рис. 3.4).

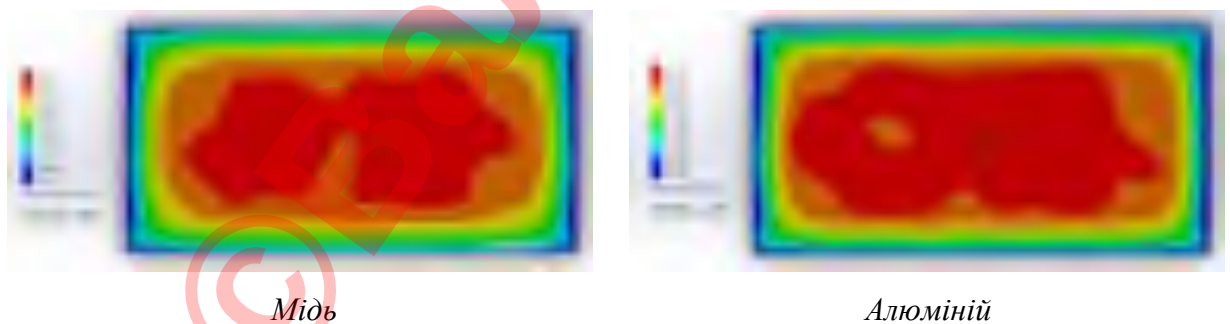


Рисунок 3.4 – Графіки розподілу температури по поверхні пластини

З рис. 3.4 можна оцінити нерівномірність розподілу температури по поверхні пластини.

Візуалізовано картину теплопередачі від пластини до навколишнього середовища (рис. 3.5).

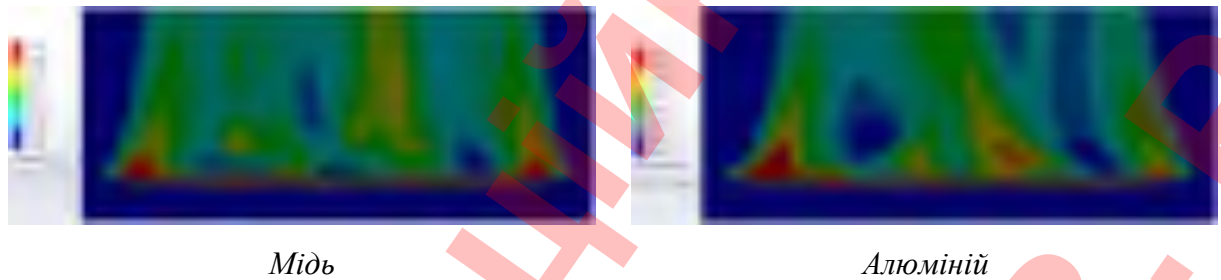


Рисунок 3.5 – Візуалізація картини теплопередачі від пластини до навколишнього середовища

Візуалізовано та анімовано картину руху повітряних мас між пластиною та навколишнім середовищем (рис. 3.6).



Рисунок 3.5 – Візуалізація картини руху повітряних мас між пластиною та навколишнім середовищем

3.3. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі й температури поверхні пластини в залежності від її товщини і шорсткості поверхні

Проведено параметричне дослідження в середовищі *SolidWorks Flow Simulation*, яке полягало у визначенні залежності коефіцієнта теплопередачі від товщини пластини. Змінним входним параметром прийнято товщину пластини, яка становила 0,5; 1; 1,5; 2 мм. Шорсткість поверхні прийнято 100 мкм. Так, за результатами аналізу, отримано значення коефіцієнта теплопередачі й температури поверхні пластини та побудовано графіки їх залежностей від товщини пластини (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Графіки залежності значення коефіцієнта теплопередачі від товщини пластини

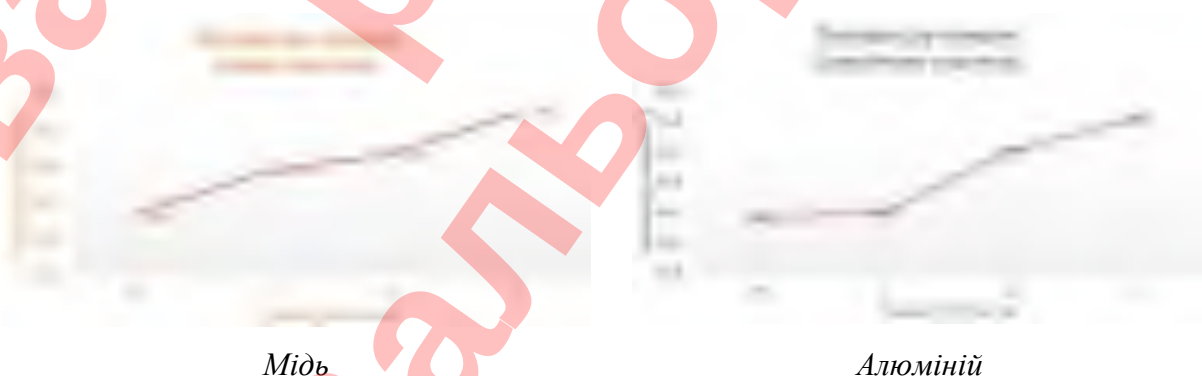


Рисунок 3.7 – Графіки залежності температури поверхні пластини від її товщини

При збільшенні товщини пластини температура її поверхні зростає практично лінійно, однак зменшується коефіцієнт теплопередачі як для міді, так і для алюмінію.

Визначено коефіцієнт теплопередачі за різних значень шорсткості поверхонь (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта теплопередачі в залежності від параметра шорсткості поверхні

Шорсткість поверхні, мкм		100	200	300	400
Коефіцієнт теплопередачі U , Вт/(м ² ·К)	Мідь	4,70	4,72	4,68	4,72
	Алюміній	4,65	4,64	4,62	4,65

Як бачимо з таблиці 3.1, зміна шорсткості поверхні в діапазоні 100...400 мкм практично не впливає на коефіцієнт теплопередачі. Це говорить про те, що в дослідженні варто було б приймати ширший діапазон значень шорсткостей, однак вони б вийшли за межі значень, які прийнятні для поверхонь абсорберів.

3.4. Узагальнення результатів досліджень

Узагальнені результати дослідження температурного впливу сонячного випромінювання на лист з міді та алюмінію зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Узагальнені результати досліджень

Параметр	Матеріал пластини	
	Мідь	Алюміній
Товщина матеріалу, мм	0,5	
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	390	230
Коефіцієнт теплопередачі U , Вт/(м ² ·К)	4,703	4,594
Температура поверхні пластини, °С	84,43	84,13
Вартість листа 1000×2000×0,5 мм, грн/лист	8100	850

На підставі досліджень температурного впливу сонячного випромінювання на металеву пластину товщиною 0,5 мм. встановлено, що,

незважаючи на дещо вищу температуру поверхні алюмінію, мідь має вище значення коефіцієнта теплопередачі. Порівнюючи вартість листа міді (8100 грн) і листа алюмінію (850 грн), для проектування абсорбуючих елементів доцільніше використовувати алюмінієвий лист за умов товщини 0,5 мм, розмір листа 1000×2000 мм.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Тема кваліфікаційної роботи передбачає роботу інженера з використанням комп'ютерної техніки та спеціалізованих комп'ютерних програм. Оскільки робота інженера-конструктора передбачає моделювання процесів з використанням системи автоматизованого проєктування, то цей розділ кваліфікаційної роботи викладемо у вигляді інструкції з охорони праці під час роботи інженера з використанням комп'ютерної техніки.

4.1. Загальні положення

Дія інструкції поширюється на всі підрозділи підприємства, де виконують роботи з персональним комп'ютером (ПК).

Інструкція розроблена відповідно до Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Держпраці від 29.01.1998 № 9, Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Держпраці від 26.01.2005 № 15, Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями, затверджених наказом Мінсоцполітики від 14.02.2018 № 207, Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98, затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 № 7, Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом ДСНС від 25.01.2012 № 67 (НПАОП 0.00-7.11-12).

За цією інструкцією працівника, який використовує персональний комп'ютер (далі — користувач), інструктують перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім через кожні 6 місяців (повторний інструктаж). Результати інструктажу заносять до Журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці на робочому місці (у журналі має бути підпис особи, яка інструктує, та користувача).

Користувач зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я довколишніх при виконанні будь-яких робіт, а також під час перебування на території підприємства.

До роботи на персональному комп'ютері допускають осіб, які пройшли інструктажі з питань охорони праці та пожежної безпеки.

Користувач зобов'язаний:

- виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку;
- не допускати за своє робоче місце сторонніх осіб;
- не виконувати вказівок, які суперечать правилам охорони праці та пожежної безпеки;
- знати правила надання домедичної допомоги;
- знати розташування та вміти користуватись первинними засобами пожежогасіння;
- вміти працювати з ПК.

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть впливати на користувача:

- підвищений рівень статичної електрики;
- нерівномірність розподілу яскравості в полі зору;
- підвищена яскравість світлового зображення;
- ураження електричним струмом;
- напруження зору та уваги;
- тривалі статичні навантаження.

У приміщеннях із ПК має бути природне і штучне освітлення.

При розміщенні робочих місць необхідно унеможливити пряме засвічування екрана природним освітленням.

При природному освітленні слід передбачити наявність сонцезахисних засобів (плівка, жалюзі, штори тощо).

Світлові відблиски із клавіатури, екрана та інших частин ПК у напрямку очей користувача неприпустимі.

Основним обладнанням робочого місця є ПК або ноутбук, монітор, клавіатура, маніпулятор, робочий стіл, стілець (крісло).

При розміщенні елементів робочого місця слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- можливість огляду простору поза межами робочого місця;
- можливість робити записи, розміщувати на робочому столі

документацію та матеріали, які використовує користувач.

Розміщення елементів робочого місця не має заважати рухам та переміщенню для експлуатування ПК.

Монітор встановлюють так, щоб відстань від поверхні екрана до очей користувача була 600-700 мм залежно від розміру екрана.

Клавіатуру розміщують на робочому або окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача. Положення клавіатури та кут її нахилу залежить від побажання користувача (як правило, в межах 5-15°). Не допускати хитання клавіатури.

Конструкція робочого столу має бути такою, щоб оптимально розмістити на робочій поверхні обладнання, що використовують, з урахуванням кількості, розмірів, конструктивних особливостей і характеру його роботи.

Крісло має забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій та можливість зміни пози. Тип робочого крісла обирають залежно від характеру та тривалості роботи.

Раціональна поза користувача:

- ступні розташовані на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна зорієнтовані у горизонтальній площині;
- верхні ділянки рук вертикальні;
- кут ліктьового суглоба у межах 70–90°;

- зап'ястя зігнуті під кутом не більше ніж 20° ;
- нахил голови у межах $15-20^{\circ}$, а часті її повороти виключені.

Для забезпечення оптимальної робочої пози користувача необхідно:

- засоби праці, з якими користувач має тривалий або найбільш частий зоровий контакт, розмістити у центрі зони зорового спостереження та моніторного поля;
- забезпечити відстань близько 500 мм між найважливішими засобами праці, з якими користувач працює найчастіше.

ПК встановлювати на рівній твердій поверхні (столі). Не дозволено встановлювати ПК та оргтехніку на хитких підставках чи на похилій поверхні.

ПК не встановлювати впритул до стіни, перегородки тощо. Не допускати загородження вентиляційних отворів ПК сторонніми предметами.

Розетка біля ПК має бути в доступному місці, щоб в аварійних випадках можна було своєчасно його відімкнути. Не рекомендовано використовувати подовжувачі.

Під час переміщення ПК, периферійних пристроїв витягти вилку живлення з розетки.

Не допускати ушкодження чи модифікування шнура живлення. Заборонено ставити важкі речі на шнур живлення, тягнути чи надмірно перегинати його, скручувати та зав'язувати шнур живлення у вузол.

ПК під'єднувати до електромережі лише за допомогою справних штепсельних з'єднань та електророзеток заводського виробництва.

Штепсельні з'єднання та електророзетки мають бути зі спеціальними контактами для під'єднання нульового захисного провідника. Їхня конструкція має забезпечувати з'єднання нульового захисного провідника раніше, ніж з'єднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднань при вимкненні має бути зворотнім.

Заборонено під'єднувати електрообладнання до звичайної двошнурової електромережі.

За невиконання цієї інструкції працівники несуть відповідальність згідно з чинним законодавством.

4.2. Вимоги безпеки перед початком роботи

Оглянути робоче місце і навести на ньому лад; впевнитись, що на ньому немає сторонніх предметів, все обладнання і блоки ПК з'єднані з системним блоком з'єднувальними шнурами.

Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі. Монітор не має стояти на краю стола. Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран – під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз; при цьому екран має бути трохи нахиленим – нижній край ближче до користувача.

Перевірити загальний стан апаратури, справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана.

Вставити вилку в розетку і впевнитися, що вона міцно тримається. Заборонено вставляти і виймати вилку мокрими руками.

Відрегулювати та зафіксувати висоту крісла та зручний для користувача нахил спинки.

За потреби приєднати до комп'ютера необхідну апаратуру (принтер, сканер тощо). Усі кабелі, що з'єднують системний блок із іншими пристроями, вмикати та вимикати лише при вимкненому комп'ютері.

Відрегулювати яскравість свічення, контрастність монітора.

Про всі виявлені несправності інформувати керівника робіт і не братися до роботи, доки їх не буде усунено.

4.3. Вимоги безпеки під час виконання роботи

Під час роботи на ПК:

- стійко встановити клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання, водночас передбачити можливість її поворотів та переміщень;

- якщо в конструкції клавіатури не передбачено простору для упору долонь, клавіатуру розміщують на відстані не менше 100 мм від краю столу в оптимальній зоні моніторного поля;
- під час роботи на клавіатурі сидіти рівно, не напружуватися;
- щоб зменшити несприятливе навантаження на користувача при роботі з комп'ютерною мишею (вимушена поза, необхідність постійно контролювати якість дій), забезпечити велику вільну поверхню столу для переміщення комп'ютерної миші та зручного упору ліктьового суглоба;
- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати пил із поверхонь апаратури спеціальними серветками.

При роботі з ПК заборонено:

- самостійно розбирати та ремонтувати системний блок (корпус ноутбука), монітор, клавіатуру, комп'ютерну мишу тощо;
- встромляти сторонні предмети до вентиляційних отворів ПК, ноутбука або монітора;
- ставити на системний блок ПК та периферійні пристрої металеві предмети, ємкості з водою (вази, горщики для квітів, склянки), оскільки через потрапляння води у середину апарата може статися пожежа або ураження електрострумом.

Тривалість безперервної роботи за ПК не має перевищувати 2 год. Після цього необхідно зробити 15-хвилинну перерву.

Якщо виник зоровий дискомфорт або інші неприємні відчуття, необхідно зробити нетривалу перерву.

Для зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі доцільно під час декількох перерв виконувати комплекс вправ.

4.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

Зберегти інформацію.

Вимкнути ПК, монітор чи ноутбук.

Вимкнути стабілізатор, якщо комп'ютер під'єднаний до мережі через нього.

Прибрати робоче місце.

4.5. Вимоги безпеки в аварійній ситуації

Аварійні та небезпечні ситуації під час виконання роботи на ПК можуть виникнути у разі: короткого замикання, перевантаження блоку живлення системного блоку, перегрівання, пожежі, поломки крісла тощо.

У разі виникнення аварії або ситуації, що може привести до аварії, нещасного випадку, негайно від'єднати ПК від електромережі, повідомити про інцидент керівникові.

Не допускати в небезпечну зону сторонніх осіб.

Якщо стався нещасний випадок, зберегти обстановку в робочій зоні та устаткування у такому стані, в якому вони були на момент події (якщо це не загрожує життю і здоров'ю інших працівників і не призведе до більш тяжких наслідків). Поінформувати про подію керівника робіт (іншу відповідальну особу підприємства) та в подальшому керуватися його вказівками. Вжити заходів, щоб запобігти подібним випадкам у подальшому.

У разі виникнення пожежі (ознак горіння), повідомити керівнику та, за потреби, викликати оперативно-рятувальну службу за телефоном 101 або 112 (назвати адресу та місце виникнення пожежі, наявність людей, повідомити своє прізвище) та вжити можливих заходів для евакуювання людей, гасіння (локалізації) пожежі наявними засобами пожежогасіння. Пам'ятати, що гасіння електротехнічних пристроїв, які перебувають під напругою, виконувати лише після їх попереднього від'єднання від електромережі. Гасити за допомогою вуглекислотних або порошкових вогнегасників, а в окремих випадках – сухим піском.

За потреби надати потерпілому домедичну допомогу згідно з інструкцією, що діє на підприємстві. У разі подальшого погіршення

самопочуття потерпілого, не припиняючи надання домедичної допомоги, викликати за телефоном «103» швидку медичну допомогу; виконувати вказівки керівника робіт для ліквідації небезпеки [1, 6-8, 10, 14].

Кваліфікаційна
робота
© Вальорний В. Р.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Вивчаючи питання стосовно температурного впливу сонячного випромінювання на металеву пластину, нами проаналізовано сфери практичного застосування таких пластин, зокрема в конструкціях абсорберів геліосушарок та геліоколекторів. Основними функціями металевих пластин як абсорберів є поглинання сонячного випромінювання, перетворення світлової енергії у теплову, передача тепла робочому середовищу. Найпоширенішими матеріалами для абсорбуючих пластин є мідь та алюміній завдяки високій теплопровідності. Металеві пластини є ключовим елементом у конструкції геліосушарок і геліоколекторів завдяки своїм унікальним властивостям: високій теплопровідності, міцності, можливості нанесення селективних покриттів і легкості обробки. Під час розроблення конструкції геліосушарок та розрахунку їх параметрів потрібно виконувати розрахунки з врахуванням багатьох факторів, зокрема кліматичних.

Одним з методів розрахунку і дослідження процесів теплопередачі є чисельний метод з використанням систем автоматизованого проєктування. Система автоматизованого проєктування *SolidWorks*, а саме модуль *Flow Simulation* дає змогу виконувати дослідження такої складності.

В роботі у середовищі *SolidWorks Flow Simulation* виконано дослідження теплового впливу на металеву пластину розміром 1000×2000 мм, товщиною 0,5 мм, виконану з міді та алюмінію. Географічне місце проведення досліджень – м. Львів, дата й час досліджень – 6 червня 2025 року, 12.00 год. за температури на сонці $+39^{\circ}\text{C}$. Для мідної пластини товщиною 5 мм. в результаті аналізу отримано значення теплопередачі $U=4,703 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, тоді як для алюмінієвої – $U=4,594 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Мідна пластина у порівнянні з алюмінієвою має кращі показники теплопередачі.

Як для міді, так і для алюмінію при збільшенні товщини пластини температура її поверхні зростає, однак коефіцієнт теплопередачі зменшується.

Шорсткість поверхні в діапазоні 100...400 мкм. Практично не впливає на коефіцієнт теплопередачі.

Враховуючи вартість мідного листа 1000×2000×0,5 мм – 8100 грн/лист, алюмінієвого – 850 грн/лист, доцільніше використовувати алюмінієві пластини в якості абсорбуючих елементів для сонячних установок, не зважаючи на дещо гірші показники теплопровідності.

Результати аналізу в системі автоматизованого проєктування *SolidWorks* показали, що система дає адекватні результати, що підтверджені попередніми дослідженнями, а також дає змогу проводити широкий спектр досліджень, пов'язаних з тепловим аналізом процесів, проведення натурних експериментів для яких є ускладненим кліматичними факторами.

В роботі розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час проведення експериментів та моделювання процесів з використанням комп'ютерної техніки.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Городецький І., Тимочко В., Магац М. та ін. Аналіз стану виробничого травматизму як передумова управління процесами формування небезпечних подій. *Вісник Львівського НУП. Серія Агроінженерні дослідження*. Львів, 2023. № 27. С. 127–137. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
2. Коваленко І. В. Процеси та апарати хімічної технології. Методичний посібник з курсу лекцій, практичних та самостійних робіт студентів. – К. : НТУУ «КПІ». - 2003. -160 с.
3. Константінов С. М. Тепломасообмін: Підручник.-К. ВПІ ВПК: «Політехніка»: Інрес. – 2005. - 304 с.
4. Коробка С. В., Стукалець І. Г., Бабич М. І., Баранович С. М., Скляр О. Г., Болтянський Б. В., Скляр Р. В. Впровадження геліосушарок для виробництва висушених сільськогосподарських продуктів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. Кюрчев В. М. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 2. С. 83-99. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-7>.
5. Огренич Е. В., Поспеева І. Є. Теплопередача в РЕА. Конспект лекцій з дисципліни «Тепломасообмін в радіоелектронних апаратах» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання, частина 1 – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 76 с.
6. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В.О., Городецький І. М. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посібн. / за ред. І.П.Пістуна. Ч. І. Львів: Тріада плюс, 2017. 620 с.
7. Пістун І. П., Тимочко В.О., Городецький І. М., Березовецький А. П. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посібн. / за ред. І.П.Пістуна. Ч. II. Львів: Тріада плюс, 2015. 224 с.

8. Пістун І.П., Березовецький А.П., Городецький І.М. Охорона праці на автомобільному транспорті: *навч. посіб.* Львів: Тріада плюс, 2009. 320 с.
9. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів : ЛНУП, 2022. – 109 с.
- 10.Тимочко, В., Городецький І., Бурнаєв О. та ін. Оцінка професійного ризику працівників під час обслуговування та ремонту електричного обладнання. *Вісник Львівського НАУ. Серія Агроінженерні дослідження.* 2024. №28. С. 227–235. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
- 11.El-Sebaei and S. M. Shalaby, “Solar drying of agricultural products: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 37–43, 2012.
- 12.O. Adelaja and B. I. Babatope, ‘Analysis and Testing of a Natural Convection Solar Dryer for the Tropics’, *J. Energy*, vol. 2013, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1155/2013/479894.
- 13.V. Suresh, Y. Shireesha, T. S. Kishore, G. Dwivedi, A. T. Haghighi, and E. R. Patro, “Natural energy materials and storage systems for solar dryers: State of the art,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 255, p. 112276, 2023
- 14.Dmytriv, V., Dmytriv, I., Horodetskyi, I., Hutsol, T., Kukharets, S., Cesna, J., Bleizgys, R., Pietruszynska, M., Parafiniuk, S., Kubon, M., & Horetska, I. (2024). A Method for Simulating the Positioning Errors of a Robot Gripper. *Applied Sciences*, 14(14), 6159. <https://doi.org/10.3390/app14146159>.
- 15.John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V. A Heat Transfer Textbook. Режим доступу <https://ahtt.mit.edu/wp-content/uploads/2019/08/AHTTv500.pdf> - 696 p.
- 16.Kasner R., Walichnowska P., Korobka S., Shchur T., Stukalets I., Syrotyuk S., Babych M., Ptashnyk V., Tomporowski A., Kruszelnicka W. Analysis of the Design and Technological Parameters of the Designed Solar Dryer with a Heat Pump. *Advances in Science and Technology Research Journal*, Politechnika Lubelska, Volume 18, Issue 7, Pages 18 – 32, DOI:10.12913/22998624/192263.

17. Introduction to Computational Fluid Dynamics (Dmitri Kuzmin)
<http://www.mathematik.uni-dortmund.de/kuzmin/cfdintro/cfd.html>.
18. S. Korobka, M. Tolstushko, I. Stukalets, V. Sheichenko, N. Tolstushko. Study of energy-efficient characteristics of transparent enclosing constructions of solar dryers based on glass units. Engineering for rural development. Jelgava, 21.-23.05.2025. P. 1019-1026. Jelgava, 21.-23.05.2025.
19. Метеопост. Статистика погоди. Кліматичні дані за роками та місяцями. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://meteopost.com>.
20. Глобальний сонячний атлас [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://globalsolaratlas.info/map>.
21. Solidworks [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
22. Solidworks Simulation CFD [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solidworks.com/>