

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Модернізація хлібопекарської печі марки ПХС-25М

Виконав: здобувач вищої освіти	6	курсу, групи	МОм-61
спеціальності	133 «Галузеве машинобудування» (шифр і назва спеціальності)		
		Карпюк Т.О. (підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Вітенько Т.М. (підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Ворощук В.Я. (підпис)	(прізвище та ініціали)
В.о. зав. кафедри		Ворощук В.Я. (підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		Кухтин М.Д. (підпис)	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра обладнання харчових технологій

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри ОХ

Ворошук В.Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«__»

2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

здобувачу вищої освіти

Карпюку Тарасу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модернізація хлібопекарської печі марки ПХС-25М

Керівник роботи Вітенько Тетяна Миколаївна, д.т.н. професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від 12.12.2025р № 4/7-998

2. Термін подання завершеної роботи 26 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Технічний паспорт та інструкції з експлуатації, монтажу та технічного обслуговування і ремонту хлібопекарської печі марки ПХС-25М

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд виробництва хліба та відповідного обладнання. Аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи. 2. Вибір та обґрунтування теоретичних та експериментальних методів і засобів досліджень. 3. Математичне моделювання пекарної камери хлібопекарної печі марки ПХС-25М. 4. Результати досліджень. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 5.1 Розроблення заходів з охорони праці і техніки безпеки. 5.2. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Хлібопекарська піч марки ПХС-25М. Вигляд загальний. (1 фА1)

Хлібопекарська піч марки ПХС-25М. Кінематична схема. (0,5 фА1)

Хлібопекарська піч марки ПХС-25М. Структурна схема. (0,5 фА1)

Привідний механізм хлібопічки ПХС-25М. Складальне креслення(1фА1)

Результати дослідження (1фА1)

Математична модель процесу тепло-масообміну (1фА1)

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кравець О.І. – к.т.н., доцент Стручок В.С. – ст. викладач		
Нормоконтроль	Ворошук В.Я. – к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання _____ 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітки
1.	<i>Вступ</i>	до 01.10.2025р.	
2.	<i>Розділ 1. Огляд виробництва хліба та відповідного обладнання. Аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи</i>	до 15.10.2025р.	
3.	<i>Розділ 2. Вибір та обґрунтування теоретичних та експериментальних методів і засобів досліджень</i>	до 25.10.2025р.	
4.	<i>Розділ 3. Математичне моделювання пекарної камери хлібопекарної печі марки ПХС-25М</i>	до 01.11.2025р.	
5.	<i>Розділ 4. Результати досліджень</i>	до 05.11.2025р.	
6.	<i>Розділ 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.</i>	до 10.11.2025р.	
7.	<i>Загальні висновки</i>	До 13.11.2025р.	
	<i>Графічна частина</i>		
8.	<i>1. Хлібопекарська піч марки ПХС-25М. Вигляд загальний. (1 фА1)</i>	до 15.11.2025р.	
9.	<i>2. Хлібопекарська піч марки ПХС-25М. Кінематична схема. (0,5 фА1)</i>	до 20.11.2025р.	
10.	<i>3. Хлібопекарська піч марки ПХС-25М. Структурна схема. (0,5 фА1)</i>	до 20.11.2025р.	
11.	<i>4. Привідний механізм хлібопічки ПХС-25М. Складальне креслення(1фА1)</i>	до 25.11.2025р.	
12.	<i>5. Результати дослідження (1фА1)</i>	до 25.11.2025р.	
13.	<i>6. Математична модель процесу тепло-масообміну (1фА1)</i>	до 01.12.2025р.	

Здобувач

_____ (підпис)

Карпюк Т.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Вітенько Т.М.
(прізвище та ініціали)

Анотація

Модернізація хлібопекарської печі марки ПХС-25М. Карпюк Тарас Олександрович.

Виконано комплексну аналітичну роботу, що включає: оцінку сучасного стану експлуатації хлібопекарної печі ПХС-25М, огляд наукової літератури та патентних джерел, вибір та обґрунтування теоретичних і експериментальних методів досліджень, аналіз похибок експериментальних вимірювань, обґрунтування актуальності проведених досліджень, а також формулювання мети та завдань роботи.

Розроблено заходи із модернізації печі ПХС-25М та підвищення продуктивності та надійності роботи обладнання.

Проведено розробку математичної моделі процесу тепло- та масообміну в пекарній камері печі ПХС-25М, виконано її розрахунок і здійснено детальний аналіз отриманих результатів, що дозволяє оцінити ефективність модернізації та визначити оптимальні режими роботи печі.

Ключові слова: піч, моделювання, модернізація, тепло-масообмін.

Abstract

Modernization of the PHS-25M Bread-Baking Oven. *Karpiyuk Taras Oleksandrovykh*

A comprehensive analytical study was carried out, including an assessment of the current operational state of the PHS-25M bread-baking oven, a review of scientific literature and patent sources, the selection and substantiation of theoretical and experimental research methods, an analysis of experimental measurement errors, justification of the relevance of the conducted research, as well as the formulation of the aim and objectives of the study.

Measures for the modernization of the PHS-25M oven were developed, aimed at increasing the productivity and operational reliability of the equipment.

A mathematical model of the heat and mass transfer processes in the baking chamber of the PHS-25M oven was developed. The model was calculated and a detailed analysis of the obtained results was performed, making it possible to evaluate the effectiveness of the proposed modernization and to determine optimal operating modes of the oven.

Keywords: oven, modeling, modernization, heat and mass transfer.

Зміст

Вступ.....	8
1. Огляд виробництва хліба та відповідного обладнання. Аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи.....	10
1.1. Огляд сучасного виробництва хліба з використанням конвеєрних газових печей.....	10
1.2. Сучасні тенденції щодо підвищення ефективності хлібопекарських печей.....	17
1.3. Аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи.....	18
1.4. Мета і задачі роботи.....	22
2. Вибір та обґрунтування теоретичних та експериментальних методів і засобів досліджень	23
2.1. Інструменти теорії подібності	23
2.2. Теореми подібності.....	26
2.3. Визначення похибки експериментальних даних	33
2.4. Обґрунтування актуальності досліджень, формулювання мети та задачі роботи.....	35
3. Математичне моделювання пекарної камери хлібопекарної печі марки ПХС-25М.....	37
3.1 Постановка задачі моделювання	37
3.2. Отримані математичні рівнянь теплових процесів	39
3.3 Математичне моделювання теплових процесів у камері печі.....	43
3.4. Огляд отриманої математичної моделі	44
4. Результати досліджень.....	49
4.1 Завдання досліджень.....	49
4.2. Програмне забезпечення дослідження.....	49

4.3 Програма розрахунку тепло-масообміну.....	50
4.4 Висновки до розділу	56
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	57
5.1. Охорона праці.....	57
5.1.1. Аналіз умов праці у харчовій галузі за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища.....	57
5.1.2. Основні причини травматизму в харчовій галузі. Динаміка травматизму	60
5.1.3. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів підприємств харчової промисловості.....	62
5.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	64
5.2.1. Планування заходів з питань цивільного захисту на підприємствах харчової та переробної промисловості	64
5.2.2. Зони ураження під час техногенних вибухів. Методи розрахунку характеристик зон ураження.....	67
Висновки	72
Перелік посилань.....	73
Додатки.....	75
Специфікації	79

Вступ

Актуальність теми

Сучасне харчове виробництво характеризується високими вимогами до продуктивності, енергоефективності та надійності технологічного обладнання, зокрема хлібопекарських печей. Підвищення ефективності роботи печі безпосередньо впливає на стабільність і рівномірність випікання продукції, зменшує витрати енергії та часу на технологічний цикл, а також скорочує простої обладнання під час експлуатації та технічного обслуговування.

Хлібопекарські печі, зокрема модель ПХС-25М, широко використовуються на сучасних хлібозаводах, проте їх конструктивні особливості і стандартні режими роботи не завжди забезпечують оптимальні умови для рівномірного прогріву продукції та раціонального використання палива. Це призводить до підвищеного енергоспоживання, нерівномірного розподілу температур у пекарній камері та додаткових витрат на обслуговування та ремонт обладнання.

В умовах сучасного виробництва особливо актуальним є впровадження модернізаційних заходів із використанням математичного моделювання процесів тепло- та масообміну. Такі підходи дозволяють дослідити вплив конструктивних змін на процес випікання, визначити оптимальні режими роботи печі, підвищити її продуктивність, стабільність температурного поля і надійність роботи всього технологічного обладнання.

Таким чином, проведення дипломної роботи, спрямованої на підвищення ефективності хлібопекарської печі, є надзвичайно актуальним. Реалізація запропонованих заходів дозволить не лише підвищити економічність виробництва та скоротити витрати енергії, а й забезпечити стабільну якість хлібобулочних виробів на сучасних підприємствах харчової промисловості, що є ключовим фактором конкурентоспроможності продукції.

Мета і завдання роботи

Метою роботи є підвищення ефективності роботи хлібопекарної печі марки ПХС-25М.

Завдання:

- огляд виробництва хліба та відповідного обладнання;
- аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи;
- розроблення заходів для модернізації;
- математичне моделювання пекарної камери хлібопекарної печі марки ПХС-25М.

Об'єкт дослідження – процес випікання хліба

Предмет дослідження – параметри тепломасообміну в камері печі

1. Огляд виробництва хліба та відповідного обладнання. Аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи

1.1. Огляд сучасного виробництва хліба з використанням конвеєрних газових печей

Сучасне промислове виробництво хліба базується на застосуванні безперервних механізованих ліній, ключовим елементом яких є конвеєрна газова хлібопекарська піч. Використання такого типу печей зумовлене їх високою продуктивністю, стабільністю теплового режиму та можливістю тонкого регулювання процесу випікання залежно від виду хлібобулочних виробів.

Технологічний процес виробництва хліба розпочинається з підготовки сировини, яка здійснюється із застосуванням силосів для зберігання борошна, оснащених системами пневмотранспорту, аерації та контролю рівня. Для забезпечення стабільності рецептури використовуються автоматичні вагові та об'ємні дозатори сухих і рідких компонентів.

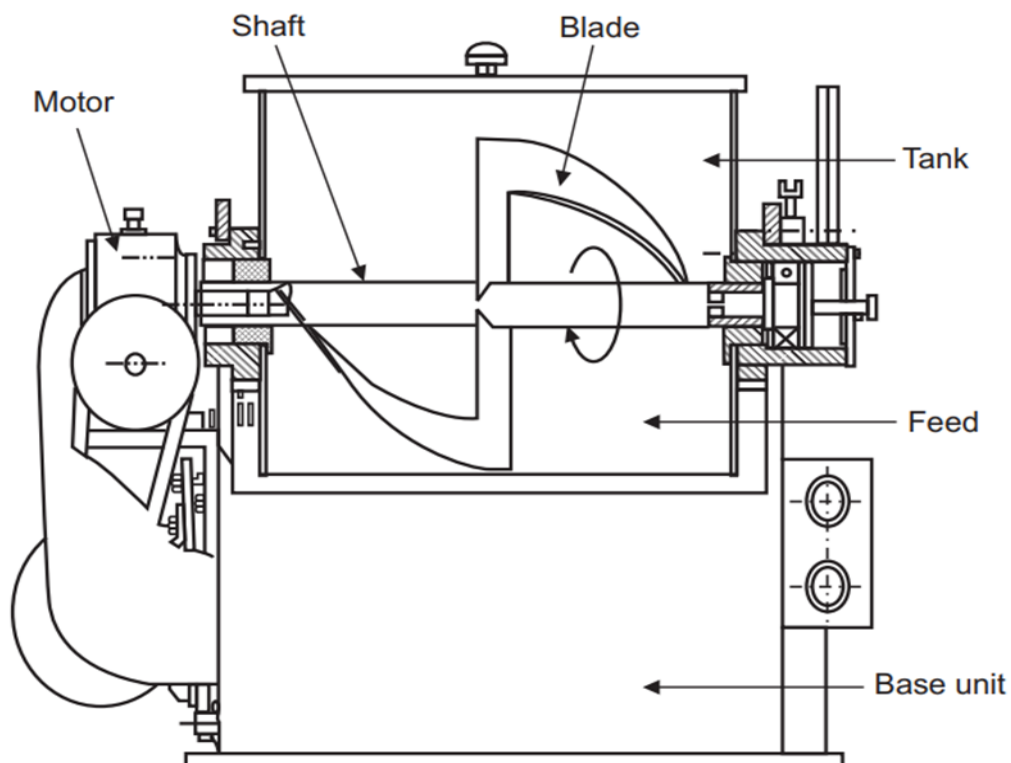


Рисунок 1.1. Тістомісильна машина безперервної дії

Підготовлені інгредієнти подаються до тістомісильної машини (рис. 1.1.), яка є частиною загальної лінії виробництва.

Замішування тіста здійснюється у спіральних тістомісильних машинах періодичної або безперервної дії, обладнаних частотно-керованими електроприводами та системами контролю температури тіста. Така конструкція дозволяє забезпечити однорідність структури тіста та оптимальні умови для подальшого бродіння. З тістомісильного відділення тісто подається до тістодільних машин (рис. 1.2), які здійснюють точний поділ тіста на заготовки заданої маси.



Рисунок 1.2. Тістодільна машина

Після ділення тістові заготовки проходять через округлювальні та формувальні машини (рис. 1.3), що забезпечують стабільну геометрію виробів і рівномірний розподіл газової фази в тісті. На цьому етапі формується поверхнева структура заготовок, що суттєво впливає на характер тепломасообміну під час випікання.

Підготовлені заготовки надходять у камери вистоювання, які є обов'язковим елементом лінії при використанні конвеєрних печей. Проофери забезпечують підтримання температури 35–40 °С та відносної вологості 75–85 %, що створює оптимальні умови для завершення процесів ферментації та наростання об'єму заготовок.



Рисунок 1.3. Округлювальна машина

Автоматичні системи керування дозволяють узгодити тривалість вистоювання зі швидкістю руху конвеєра печі, що забезпечує синхронність роботи всієї лінії.

Ключовим елементом технологічної лінії є конвеєрна газова хлібопекарська піч, у якій випікання здійснюється в безперервному режимі. Піч складається з теплоізовованого корпусу, газових пальників, системи подачі повітря та пари, а також металевого або сітчастого конвеєра, що транспортує заготовки через зони печі. Принципова схема конвеєрної газової печі наведена на рис. 1.4.

Газові пальники забезпечують інтенсивний і рівномірний тепловий потік, а зональне регулювання температури дозволяє формувати оптимальний профіль випікання. На початковій ділянці печі здійснюється подача пари, що сприяє утворенню еластичної скоринки та інтенсивному підйому тіста. У наступних зонах відбувається формування структури м'якуша та стабілізація готового виробу. Важливою перевагою газових конвеєрних печей є можливість рекуперації тепла від відхідних газів, що істотно підвищує енергоефективність виробництва.

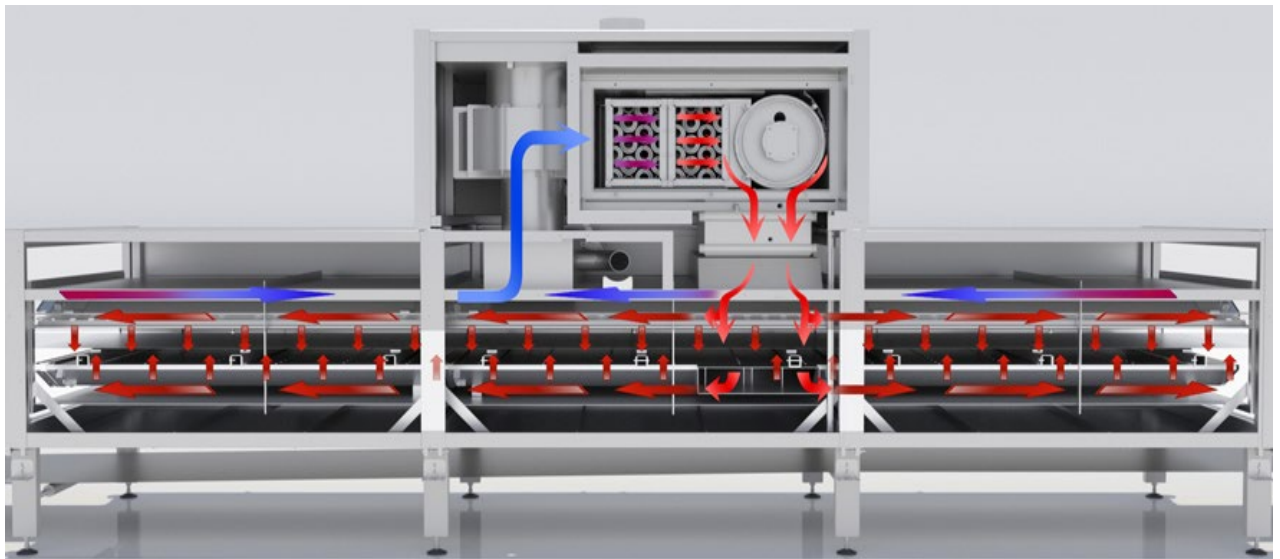


Рисунок 1.4. Принципова схема конвеєрної газової печі

Після виходу з печі хліб надходить на систему охолодження, яка зазвичай реалізується у вигляді багатоярусних конвеєрів із примусовою вентиляцією. Охолодження є необхідним для стабілізації структури м'якуша та запобігання конденсації вологи під час пакування. Завершальним етапом є автоматичне пакування та маркування готової продукції.

Уся технологічна лінія, включно з конвеєрною газовою піччю, функціонує під управлінням централізованої системи автоматизації на базі PLC-контролерів. Це забезпечує безперервний контроль температурних режимів, швидкості конвеєра, витрат газу та параметрів мікроклімату, що є вирішальним чинником стабільності якості хліба.

Таким чином, використання конвеєрної газової печі в сучасному виробництві хліба дозволяє реалізувати безперервний високопродуктивний процес випікання з точним керуванням тепловими режимами, що в поєднанні з автоматизованими вузлами підготовки тіста забезпечує високу якість та економічну ефективність виробництва.

Енергетичний аналіз використання конвеєрної газової печі в лінії виробництва хліба.

У широкому технологічному циклі лінія виробництва хліба є енергоємним об'єктом, причому основну частину енергії споживає саме піч. За класичними розрахунками, 40–50 % від загальних витрат теплової енергії підприємства припадає на роботу печей, а ще 20–30 % — на створення та утримання парового / високовологісного середовища всередині камери випікання. Такий розподіл енергоспоживання є характерним для промислових хлібозаводів із традиційними печами (які включають конвеєрні газові) і визначає стратегічні напрями енергозбереження — зокрема, оптимізацію теплового балансу печі та обмеження втрат тепла.

Основні енергетичні показники

Для газових конвеєрних печей типовий витрата природного газу (або LPG) становить приблизно 0.6–1.3 м³ природного газу на метр довжини конвеєра в годину залежно від конструкції та ступеня навантаження. Це відповідає нормам для середньої пропускної здатності тунельної печі (500–1 500 кг/год виробу).

У масштабах великого потоку це може означати кілька тисяч кубометрів газу на добу при одно- або двозмінній роботі лінії. Частина енергії ефективно передається заготовкам хліба, але значна частина — витрачається на нагрів повітря, втрати через стінки, вентиляцію та вихлопні гази.

Загальні дослідження показують, що теплові втрати через продування і вентиляцію печі можуть складати до ~60 % від усього теплового потоку у традиційних печах без рекуперації тепла; це характерно і для багатьох печей,

що не мають сучасних теплоізоляційних рішень або систем утилізації теплоти відхідних газів.

Також кілька джерел подають, що втрата тепла через пару та відпрацьовані гази часто перевищує корисні витрати, що підкреслює важливість контролю випаровування і раціонального використання пари в процесі випікання.

Тепловий баланс і втрати

У тепловому балансі конвеєрної газової печі розрізняють такі складові:

Корисне тепlopостачання виробу — енергія, що передається безпосередньо заготовкам хліба для випікання та випаровування вологи.

Втрати тепла в відхідні гази — значна частина енергії, що виходить через димову трубу як тепловий потік у навколишнє середовище.

Втрати через ізоляцію корпусу — якщо теплоізоляція недостатня, зовнішні стінки печі віддають тепло у приміщення.

Втрати на вентиляцію та продування — повітря, яке витікає або надходить у піч без рекуперації, забирає частину теплоти.

Аналітичні дослідження показують, що частина енергії, що йде на утворення пари, може бути більшою, ніж безпосередньо передана тісту, особливо якщо пара формується без урахування точного контролю вологості та тимчасових режимів.

Потенціал підвищення ефективності

Сучасні технічні рішення, що дозволяють суттєво знизити питомі енергетичні витрати конвеєрних газових печей, включають:

Теплоізоляція корпусу та дверей — сучасні багатошарові утеплювачі з керамічних і волокнистих матеріалів здатні зменшити тепловтрати на 10–40 %, порівняно з традиційними конструкціями.

Рециркуляція та зональне управління полум'ям — дозволяє регулювати частоту й інтенсивність горіння в різних ділянках печі відповідно до фактичного навантаження, що знижує витрати палива й покращує якість випікання.

Системи збору та утилізації тепла відхідних газів — рекуператори можуть передавати тепло від димових газів у нагрівачі повітря або води, що зменшує загальне споживання газу до 4–10 % і більше при комплексному застосуванні.

Автоматизовані системи моніторингу й оптимізації — інтелектуальні SCADA/APC-системи можуть знизити витрати природного газу до ~20 % шляхом адаптації робочих режимів до змінного навантаження без шкоди для якості продукції.

Оптимізація управління парою — контролюючи подачу пари тільки у необхідні часові інтервали, можна скоротити надлишкові теплові витрати і зменшити втрати через продування.

Енергетична ефективність і експлуатаційні витрати

За даними промислових джерел, енергетичні витрати в хлібопекарських печах (у яких більшість — газові тунельні) часто становлять основний внесок у загальні енерговитрати підприємства, до того ж коефіцієнт використання печі (ефективний час роботи) може бути низьким без оптимального планування графіка випікання, що підвищує питомі витрати тепла при холостому ході.

Наприклад, у порівнянні з іншими типами печей, такі технології як тунельні газові печі зазвичай мають нижчі питомі витрати енергії на одиницю продукції, ніж традиційні печі без тунелю (з deck-конфігурацією). Згідно з даними практичних керівництв, тунельні печі споживають приблизно 0.6–0.8 therms ($\approx 0.6\text{--}0.8\text{ м}^3$ природного газу) на кожні 100 фунтів випеченої продукції, що знаходиться нижче за показники більшості інших типів печей.

Таким чином у системі промислового виробництва хліба конвеєрна газова піч є ключовим елементом з точки зору енергетичних витрат. Ефективність її роботи визначає не тільки якість випічки, але й виробничі та експлуатаційні витрати підприємства. Основними втратами енергії є теплові потоки від вентиляції, ізоляційні втрати й випаровування пари; втрати, що перевищують корисну частину енергії, створюють резерви для впровадження

модернізаційних рішень, таких як теплоізоляція, рекуперація відхідних газів та автоматизоване управління енергетичними режимами. Акцент на енергетичній оптимізації конвеєрної газової печі дозволяє досягти значного зниження собівартості одиниці продукції та підвищення енергоефективності всього виробництва.

1.2. Сучасні тенденції щодо підвищення ефективності хлібопекарських печей

У сучасних умовах підвищення ефективності хлібопекарських печей є ключовою задачею для зниження енерговитрат у виробництві хліба. Аналіз робіт із ефективності показує, що значні втрати теплової енергії (до 60 %) відбуваються через вентиляцію пекарної камери разом із паром і відхідними газами, що визначає орієнтацію досліджень на зниження тепловтрат та підвищення коефіцієнта корисного використання тепла [1].

Одним із напрямів підвищення ефективності є оптимізація режимів роботи печей із рециркуляцією продуктів згоряння, де вибір раціонального режиму забезпечує мінімальні питомі витрати палива при заданій продуктивності [2; 3]. Такий підхід пов'язаний з управлінням температурою відпрацьованих газів та є важливою складовою економії енергії.

Наукові роботи також розглядають раціональні режими функціонування печей та їх вплив на питомі витрати палива: встановлено залежність питомої витрати від продуктивності та температури відпрацьованих газів, що дозволяє оптимізувати експлуатацію печей [4]. Формалізація цих залежностей є підґрунтям для розробки автоматизованих систем керування енергоресурсами.

Сучасні тенденції включають застосування систем рекуперації теплоти відхідних газів і конвекційних потоків, метою яких є попередній підігрів повітря чи інших технологічних потоків із використанням тепла, що втрачається, замість його викиду у навколишнє середовище. Технічні рекомендації щодо рекуперації підкреслюють важливість окремого відведення пари й газів для раціонального використання вторинної теплової енергії [5].

Окремі міжнародні дослідження підтверджують перспективу утилізації відхідного тепла з пекарських печей для підігріву повітря, води чи навіть вироблення електроенергії з використанням органічних циклів (наприклад, ORC), що може сприяти суттєвому скороченню споживання природного газу та зниженню викидів CO₂ у виробництві хліба [6].

Таким чином, сучасні тенденції щодо підвищення ефективності хлібопекарських печей включають комплекс заходів — від оптимізації теплових режимів і раціонального вибору робочих режимів до впровадження рекуперації відхідного тепла та автоматизованого керування — що створює передумови для енергозбереження та підвищення енергоефективності виробництва.

1.3. Аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи

Вихідну інформаційну базу для виконання даної роботи становлять такі матеріали:

технічний паспорт і експлуатаційна документація хлібопекарської печі ПХС-25М, призначеної для випікання хліба та хлібобулочних виробів, що містять відомості щодо підготовки обладнання до монтажу, проведення обкатки, режимів роботи, технічного обслуговування, а також комплект креслень основних вузлів, деталей і загального компоновання;

- опис технологічного процесу виробництва хліба із зазначенням регламентованих технологічних параметрів;
- машинно-апаратні та технологічні схеми хлібопекарного виробництва;
- чинні нормативні документи;
- спеціалізовані науково-технічні та довідкові джерела.
- Будова та принцип роботи печі

Хлібопекарна піч ПХС-25М є конвеєрною газовою піччю з безперервною дією. Основним функціональним елементом є пекарна камера 2,

обладнана запобіжними клапанами 3 та системою газоходів 10, 11, 13, 16, 18, які забезпечують рівномірний тепловий обігрів робочого об'єму.

Теплозабезпечення камери здійснюється за допомогою двох газових пальників 4 із змішувальними камерами та інжекційною подачею газу. Продукти згоряння відводяться через витяжну трубу 5, патрубки 6 та димові канали 7.

Переміщення виробів у процесі випікання забезпечується стрічковим подом 1, виконаним зі сталеві спіраль-но-стрижневої сітки. Конвеєр закріплений на приводному механізмі, що приводиться в рух електродвигуном і складається з привідного та натяжного барабанів. Натяжний барабан оснащений регульовальним пристроєм, який дозволяє коригувати положення сітчастої стрічки шляхом зміни натягу її лівої або правої частини. Для контролю правильності роботи конвеєра передбачений сигналізатор, який спрацьовує у разі порушення допустимих зазорів між краями стрічки та стінками пекарної камери.

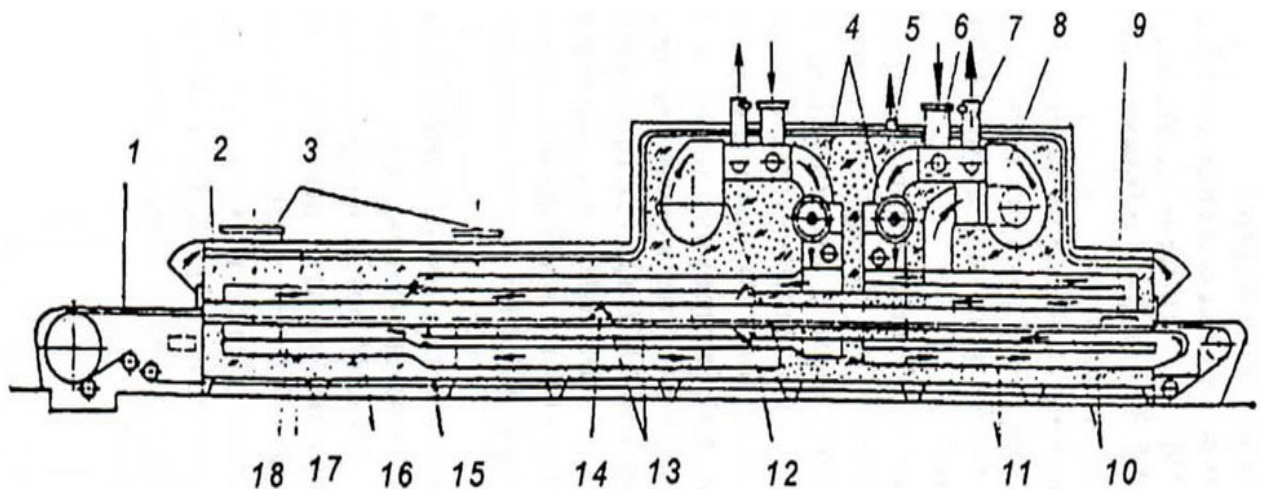


Рисунок 1.1. Схема печі ПХС-25М

1 — сітчаста стрічка; 2 — камера; 3 — запобіжні клапани; 4 — пальники;

5 — витяжний трубопровід; 6 — патрубки; 7 — димові труби; 8 — вентилятор; 9 — парозволожувальний вузол; 10, 11, 13, 16, 18 — канали; 12, 15 — шибери; 14 — отвір; 17 — труби

Очищення сітчастого поду здійснюється за допомогою металевої круглої щітки з вантажним притискним механізмом. Привід щітки реалізований через електродвигун потужністю 0,25 кВт з частотою обертання 1480 об/хв, черв'ячний редуктор і дві ланцюгові передачі.

Корпус печі має каркасну конструкцію та облицьований сталевими панелями з теплоізоляційним шаром із мінеральної вати. Внутрішній простір печі поділений на дев'ять секцій. Для візуального контролю процесу випікання і стану конвеєра у бокових стінках передбачені оглядові люки. Температурний режим у пекарній камері контролюється трьома манометричними термометрами. Над завантажувальним і розвантажувальним отворами встановлені витяжні парасолі, з'єднані з димовідвідною системою.

У зоні завантаження виробів змонтовано зволожувальний пристрій, що включає перфоровані трубки, водовідділювачі, вентилі та манометр і підключений до заводської парової мережі. Для обмеження надмірного повітрообміну в пекарній камері передбачені два внутрішні поворотні фартухи. Видалення надлишкової вологи здійснюється через два витяжні отвори, сполучені з вентиляційною системою підприємства.

Піч оснащена двома незалежними системами обігріву: права система обслуговує основну зону випікання, ліва — зону допікання виробів. Елементи обігрівальної системи, що працюють в умовах підвищених температур, виготовлені з жаростійких сталей. Для зниження температури газів, які надходять у канали, застосовується їх часткова рециркуляція.

Рух конвеєрного поду печі здійснюється від електродвигуна через систему передавання, що включає дві клинопасові передачі, ланцюговий варіатор швидкості, комбінований редуктор та кінцеву зубчасту передачу. Конструкцією приводу передбачено можливість ручного керування. Використання варіатора забезпечує плавне регулювання тривалості процесу випікання в широкому діапазоні — від 12 до 72 хв.

Конструктивно піч ПХС-25М виконана у вигляді восьми секцій, які формують внутрішній об'єм робочої камери та систему зовнішніх порожнин,

призначених для циркуляції теплоносія. По днищу пекарної камери безперервно рухається сітчастий транспортер, тоді як у каналах між секціями циркулюють продукти згоряння палива. Секції з'єднані між собою фланцевими з'єднаннями, при цьому герметизація каналів здійснюється за схемою «шип–паз» із застосуванням ущільнювального шнура.

Подача горючого газу здійснюється до інжекційних пальників середнього тиску, у топках яких відбувається його згоряння. Продукти згоряння, попередньо змішані з рециркуляційними газами, через патрубки надходять у нагрівальні канали першої зони, а далі транспортними газоходами — у канали другої зони обігріву. Після часткового охолодження газу відводяться по каналах до вентиляторів рециркуляції відповідних зон, звідки через нагнітальні патрубки подаються до димових труб і камер змішування. Для забезпечення продувки газопроводів у нагнітальних та усмоктувальних патрубках встановлені шиберы. Захист печі від руйнування у разі вибухонебезпечних ситуацій забезпечується вибуховими клапанами.

З метою підвищення безпеки експлуатації пальникових пристроїв система газопостачання оснащена автоматичним відсічним клапаном, який припиняє подачу газу у разі згасання полум'я, зупинки рециркуляційних вентиляторів або виникнення інших аварійних режимів. Разом з тим наявність окремих конструктивних недоліків печей типу ПХС ускладнює підтримання оптимальних режимів випікання окремих видів хлібобулочних виробів, що може негативно впливати на їх якість. Хоча піч ПХС-25М нині не випускається, значна кількість таких агрегатів продовжує експлуатуватися на хлібопекарських підприємствах.

Номінальна продуктивність печі ПХС-25М при випіканні нарізних батонів з пшеничного борошна першого ґатунку масою 0,4 кг становить 11,6 т/добу, а при випіканні формового хліба масою 1,0 кг — 17,5 т/добу. Питома витрата природного газу при виробництві нарізних батонів складає 43 м³/т, а у разі використання рідкого (дизельного) палива — 34 кг/т.

Технічна характеристика печі марки ПХС-25М наступні. Пекарна камера печі має загальну довжину 12 м. Корисна площа поду становить 25 м², що забезпечує необхідні умови для безперервного процесу випікання хлібобулочних виробів. Номінальна продуктивність печі залежить від асортименту продукції та коливається в межах 15–17 т/добу для хлібобулочних виробів загального призначення. При випіканні нарізних батонів продуктивність складає 14–15 т/добу. Питома витрата палива при роботі печі становить 36–40 нм³/т у разі використання природного газу та близько 33 кг/т при застосуванні дизельного палива. Встановлена електрична потужність обладнання дорівнює 12 кВт. Габаритні розміри печі складають 14 568 × 3 360 × 2 590 мм. Маса агрегату з урахуванням термоізоляції становить 26,5 т. Для теплоізоляції використовується мінеральна вата марки 150, загальна маса ізоляційного шару — 12 т. Піч обладнана двома пальниковими пристроями, що забезпечують необхідний тепловий режим у зонах випікання та допікання.

1.4. Мета і задачі роботи

Метою кваліфікаційної роботи є модернізація хлібопекарної печі тунельного типу ПХС-25М.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи хлібопекарної печі марки ПХС-25М.

Завдання:

- огляд виробництва хліба та відповідного обладнання;
- аналіз вихідних даних для виконання кваліфікаційної роботи;
- розроблення заходів для модернізації;
- математичне моделювання пекарної камери хлібопекарної печі марки ПХС-25М.

2. Вибір та обґрунтування теоретичних та експериментальних методів і засобів досліджень

2.1. Інструменти теорії подібності

Сутність теорії подібності може бути всебічно та коректно розкрита лише після введення базових уявлень про подібність фізичних явищ і про узагальнені, тобто безрозмірні, параметри, за допомогою яких описуються технологічні процеси. Фізичні явища вважають подібними у тому випадку, коли відношення між відповідними величинами, що їх характеризують, залишаються сталими для всіх порівнюваних систем або режимів.

У теорії подібності розрізняють кілька основних видів подібності, а саме: геометричну, часову, подібність фізичних величин, а також подібність початкових і граничних умов протікання процесу.

Геометрична подібність апаратів або систем, у яких реалізується певний процес, має місце тоді, коли відношення всіх відповідних лінійних розмірів двох порівнюваних об'єктів є сталою величиною. При цьому обов'язковою умовою є рівність відповідних кутів, що забезпечує однакову форму апаратів у масштабованому вигляді. Таким чином, геометрична подібність означає, що всі лінійні розміри одного апарата пропорційні відповідним розмірам іншого, тобто:

$$l_1^{11}/l_1^1 = l_2^{11}/l_2^1 = \dots = K_l \quad (2.1)$$

де K_l -- константа геометричної подібності

Часова подібність має місце у тому випадку, коли відношення між відповідними інтервалами часу перебігу процесу залишається сталим. При цьому подібними вважають такі часові проміжки, протягом яких у порівнюваних системах відбувається завершення однакових за фізичною сутністю стадій процесу. Отже, часову подібність забезпечено тоді, коли масштаб часу є постійним для всіх характерних етапів перебігу процесу.

Кількісно умову часової подібності описують відповідним співвідношенням між характерними інтервалами часу порівнюваних процесів:

$$\tau_1^{11} / \tau_1^1 = \tau_2^{11} / \tau_2^1 = \tau_3^{11} / \tau_3^1 = \dots = K_\tau \quad (2.2)$$

де K_τ - константа подібності за часом;

$\tau_1^1, \tau_2^1, \tau_3^1$ - періоди часу у першому процесі, с;

$\tau_1^{11}, \tau_2^{11}, \tau_3^{11}$ - періоди часу у другому процесі, який є подібним по відношенні до першого, с.

Якщо $K_\tau = 1$, це означає, що процеси проходять одночасно або синхронно.

Подібність фізичних величин, що описують перебіг процесу, має місце за умови, коли відношення відповідних значень цих величин для подібних процесів у просторі та часі залишається сталим. При цьому обов'язковим є дотримання геометричної та часової подібності. Інакше кажучи, для кожної пари однойменних фізичних параметрів їх відносні значення не змінюються в процесі масштабування системи, що дозволяє вважати відповідні процеси фізично подібними.

Аналітично умову подібності фізичних величин можна подати у вигляді сталого співвідношення між відповідними параметрами подібних процесів:

$$\rho_1^1 / \rho_1^{11} = \rho_2^1 / \rho_2^{11} = \rho_3^1 / \rho_3^{11} = \dots = K_\rho \quad (2.3)$$

де $\rho_1^1, \rho_2^1, \rho_3^1$ – значення фізичних величин (у цьому конкретному прикладі – густини) у 1-му процесі;

$\rho_1^{11}, \rho_2^{11}, \rho_3^{11}$ – їхні значення у 2-му процесі, який є подібним по відношенні до першого;

K - константа подібності певної фізичної величини (у цьому конкретному прикладі – густини).

Подібність початкових і граничних умов означає, що відношення основних параметрів, які характеризують стан системи на початку процесу та на її межах, для натурального об'єкта і моделі залишаються сталими. Іншими словами, для коректного відтворення процесу в моделі необхідно забезпечити одночасне дотримання геометричної, часової та фізичної подібності саме для початкових і граничних умов перебігу процесу.

У разі виконання цих вимог відношення відповідних величин у межах кожної з порівнюваних систем — як натурної, так і модельної — набувають сталого безрозмірного характеру. Це означає, що співвідношення геометричних параметрів, часових інтервалів і фізичних констант у межах однієї системи є тотожними відповідним співвідношенням у подібній системі. Таким чином, для подібних процесів справедливим є рівність відповідних безрозмірних комплексів:

$$l_1^{11} / l_2^{11} = l_1^1 / l_2^1 = inv = idem = i, \quad (2.4)$$

Термін інваріантний означає «незмінний» або «той самий» у межах порівнюваних подібних систем. Величину 1 називають інваріантом геометричної подібності, оскільки вона зберігає сталу числову величину для всіх геометрично подібних об'єктів. За аналогічним принципом визначають інваріанти часової подібності, а також інваріанти подібності фізичних величин.

Інваріанти подібності, що утворені відношенням простих однорідних величин, називають симплексами. Якщо ж інваріанти подібності подані у вигляді відношень складних різнорідних фізичних величин, їх визначають як критерії (або ознаки) подібності.

Критерії подібності являють собою безрозмірні узагальнені параметри процесу, які формуються з розмірних фізичних величин і відображають різні аспекти досліджуваного явища. Виведення критеріїв подібності здійснюється на основі рівнянь, що описують фізичну природу процесу, зокрема рівнянь руху, теплопереносу, масообміну або енергообміну.

Будь-яка комбінація критеріїв подібності також є критерієм подібності, оскільки зберігає безрозмірний характер і інваріантність для подібних процесів. Зазвичай критерії подібності позначаються першими літерами прізвищ учених, які зробили вагомий внесок у розвиток відповідних галузей науки, наприклад, критерії Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта тощо.

2.2. Теореми подібності

Теорія подібності виступає універсальним методологічним інструментом фізичного та математичного моделювання, який забезпечує науково обґрунтований зв'язок між результатами експериментів, отриманих на моделях, та характеристиками реальних інженерних систем. Її концептуальна основа сформована трьома базовими теоремами, що регламентують принципи вибору параметрів дослідження, способи узагальнення експериментальних даних і правила перенесення отриманих закономірностей на промислові апарати та технологічні процеси. З практичної точки зору ці теореми дозволяють визначити, які фізичні змінні є визначальними для опису процесу, у якій безрозмірній формі доцільно представляти результати вимірювань, а також за яких умов можливе коректне масштабування системи від моделі до прототипу.

Ключову роль у теорії подібності відіграє перша теорема, відома як теорема Ньютона, яка формалізує поняття фізичної подібності між різними системами. У класичному трактуванні Ньютона стверджується, що для подібних явищ характерною ознакою є чисельна рівність критеріїв подібності, які відображають співвідношення між основними фізичними чинниками процесу. У більш узагальненій інтерпретації, запропонованій М. Кирпичовим, ця умова формулюється через індикатор подібності, що для подібних систем набуває одиничного значення, підтверджуючи ідентичність масштабних співвідношень.

Зміст першої теореми подібності має чітко виражений прикладний характер, оскільки вона визначає сукупність фізичних величин, які повинні бути експериментально виміряні для коректного опису процесу. До цієї сукупності належать змінні, що формують визначальні критерії подібності — безрозмірні комплекси, які акумулюють у собі вплив геометричних, динамічних, теплових та масообмінних параметрів. Забезпечення однакових значень таких критеріїв для модельної та натурної систем є необхідною передумовою досягнення фізичної подібності та надійного перенесення результатів досліджень.

Методологічною базою першої теореми подібності слугує другий закон Ньютона, який встановлює фундаментальний зв'язок між прикладеними силами, масою системи та її прискоренням. У межах теорії подібності цей закон розглядається як умова рівноваги між інерційними та силовими складовими руху, що дає змогу шляхом безрозмірного аналізу виділити інваріантні співвідношення між фізичними параметрами. Саме ці співвідношення лежать в основі формування критеріїв подібності, які зберігають свою чисельну сталість при зміні масштабів системи.

Таким чином, перша теорема подібності виконує системоутворюючу функцію в теорії моделювання, визначаючи принципи вибору вимірюваних параметрів, побудови безрозмірних узагальнень та забезпечення адекватності модельних експериментів при аналізі складних технічних і технологічних процесів.

$$f = m \times a = m \frac{dv}{d\tau} \quad (2.5)$$

Відзначимо у двох подібних системах дві частки, що рух яких є подібним. Припустимо, що у натурі на частку маси m_1 діє сила f_1 , яка призводить до руху даної частки з прискоренням, рівним $dv_1/d\tau_1$:

$$f_1 = m_1 \frac{dv_1}{d\tau_1} \quad (1.6)$$

Для моделі даний вираз буде:

$$f_2 = m_2 \frac{dv_2}{d\tau_2} \quad (1.7)$$

Константи подібності:

$$K_f = f_1/f_2; K_m = m_1/m_2; K_v = v_1/v_2; K_\tau = \tau_1/\tau_2;$$

Поділимо рівняння (2.6) і (2.7) обох систем одне на інше, буде:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{dv_1}{dv_2} \cdot \frac{d\tau_2}{d\tau_1} \quad (2.8)$$

Відносні прирости фізичних величин, що формують константи подібності, за умови малості їх змін можуть бути замінені відношеннями самих відповідних величин. За таких припущень диференціальні позначення втрачають принципове значення і можуть бути опущені, внаслідок чого аналіз переходить від диференціальної форми до алгебраїчних співвідношень. У результаті отримуємо:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{m_1 v_1 \tau_2}{m_2 v_2 \tau_1} \quad \text{або} \quad K_f = \frac{K_m K_v}{K_\tau}$$

Таким чином:

$$C = \frac{K_f K_\tau}{K_v K_m} = 1 \quad (2.9)$$

Величину C , утворену з констант подібності, прийнято називати індикатором подібності. Підставляючи в рівняння (2.9) константи подібності у вигляді відношень відповідних фізичних величин та розподіляючи їх так, щоб у лівій частині залишилися величини натури, а в правій — величини моделі, отримуємо наступне співвідношення:

$$\frac{f_1 \tau_1}{m_1 v_1} = \frac{f_2 \tau_2}{m_2 v_2} \quad (2.10)$$

У результаті цього отримаємо безрозмірний комплекс величин, з однаковими значеннями для натури та моделі. Цей комплекс це число Ньютона:

$$\frac{f \tau}{m v} = idem = Ne \quad (2.11)$$

Знаючи, що $\tau = l/v$, буде:

$$\frac{f \cdot l}{m \cdot v^2} = Ne \quad (2.12)$$

Таким чином, стає очевидним, що у правильно організованих експериментах доцільно вимірювати лише ті фізичні величини, які входять до складу критеріїв подібності конкретного досліджуваного процесу.

Друга теорема подібності, відома як теорема Федермана–Бекінгема, стверджує, що будь-яка залежність між змінними, які характеризують певне явище, може бути представлена у вигляді залежності між відповідними критеріями подібності, тобто у формі узагальненого або критеріального рівняння. Іншими словами, якщо під час експерименту одержано залежність між кількома фізичними або геометричними параметрами процесу, її завжди можна виразити через критерії подібності, складені з тих самих величин.

Ця теорема визначає методологію обробки експериментальних даних, підкреслюючи доцільність представлення результатів у формі узагальнених критеріальних співвідношень, які інтегрують вплив усіх ключових факторів процесу. При цьому число подібності, що включає досліджувану величину, слід розглядати як функцію інших критеріїв, які відображають різні сторони або аспекти процесу.

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad (2.13)$$

Теорія подібності не дозволяє заздалегідь визначити конкретний вигляд функціональної залежності між критеріями подібності — це встановлюється експериментально шляхом обробки результатів досліджень. Водночас вона надає важливі практичні рекомендації щодо того, між якими критеріями слід шукати взаємозв'язок під час аналізу експериментальних даних. Як правило, у процесі обробки результатів дослідів загальна залежність набуває вигляду степеневі функції, що дозволяє узагальнити і систематизувати отримані закономірності.

$$\pi_1 = A \cdot \pi_2^m \cdot \pi_3^n \cdot \pi_4^p \dots, \quad (2.14)$$

де A , m , n , p — константи (дослідні величини), що були отримані у процесі обробки результатів дослідів.

Методику визначення дослідних величин можна пояснити використовуючи наступний приклад.

Розглянемо наступний вираз:

$$y = f(x) = A \cdot x^n \quad (2.15)$$

Після логарифмування буде рівняння прямої у логарифмічних осях координат:

$$\lg(y) = \lg(A) + n \cdot \lg(x) \quad (2.16)$$

За результатами експериментальних вимірювань, де для кожного значення змінної x визначено відповідне значення y , логарифмічні координати використовують для побудови залежності. Для цього наносять $\lg x$ та $\lg y$ і отримані точки апроксимують прямою, проведеною так, щоб мінімізувати розкидання даних. Пряма перетинає вісь ординат у точці, що відповідає $\lg(A)$ тоді як тангенс кута нахилу α визначає показник степеня n у степеневій залежності.

Третя теорема подібності встановлює умови, необхідні та достатні для того, щоб явища вважалися подібними. Вона формулюється обернено щодо першої теореми: явища є подібними тоді й лише тоді, коли їх визначальні критерії мають однакові числові значення.

Слід зазначити, що критеріальні рівняння справедливі лише в межах дотримання подібності, тобто для визначених інтервалів зміни критеріїв, поданих у вигляді рівняння виду (1.14). Поза межами цих інтервалів узагальнення втрачає свою точність. Тому для кожного критеріального рівняння необхідно вказувати допустимі межі зміни критеріїв, у межах яких ним можна користуватися. Саме третя теорема подібності формує основні правила для побудови фізичних та математичних моделей процесів.

Завдяки багаторічним дослідженням і внеску значної кількості науковців проблема подібності фізичних явищ на сучасному етапі є достатньо опрацьованою. У результаті сформовано велику кількість критеріїв, що дають змогу кількісно описувати та оцінювати умови подібності різних процесів. Найбільш уживані критерії гідромеханічної, теплової та дифузійної подібності, які широко застосовуються під час інженерних розрахунків технологічних процесів і апаратів харчових виробництв, систематизовано в

таблиці 2.1. Наведена класифікація критеріїв розроблена професором В. Стабниковим спільно зі співробітниками.

Таблиця 2.1. Основні числа подібності

Назва	Вираз	Позначення	Фізична сутність
1	2	3	4
Гідромеханічна подібність			
Число Ньютона	$Ne = P\tau / mv = Pl / (mv^2)$	P – сила, Н; τ – час, с; m – вага, кг; v – швидкість руху, м/с; l – характерний розмір, м	Враховує сили, які іють та пртидіють
Число Рейнольдса	$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta} = \frac{Pe}{Pr}$	ν – кінематична в'язкість, м ² /с; η – динамічна в'язкість, Па·с; ρ – густина, кг/м ³ ; Pe – число Пекле; Pr – число Прандтля	Описує характер гідродинамічного режиму течії рідини з урахуванням дії сил внутрішнього в'язкого опору в потоці
Число Фруда	$Fr = \frac{v^2}{gl} = Re^2 / Ga$	g – прискорення вільного падіння, м/с ² ;	Характеризує співвідношення сил інерції і тяжіння в потоці
Число Галілея	$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2} = \frac{Re^2}{Fr}$		Відображає відношення між силами інерції та силами тяжіння, що діють у потоці
Число Ейлера	$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}$	Δp – різниця тисків, Па	Характеризує відносний вплив сил тиску та інерції в русі потоку.
Число Архімеда	$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} = Ga \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$	ρ_1, ρ_2 – густина рідини чи газу у двох різних точках потоку, кг/м ³	Відображає взаємодію Архімедової сили та сил в'язкого тертя в середовищі
Число Вебера	$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma}$	σ – коеф. поверхневого натягу, Н/м; v – швидкість руху краплі, м/с	Відображає співвідношення гідродинамічних сил і сил поверхневого натягу

1	2	3	4
Число Струхала	$Sh = \frac{l}{v_0 \tau_0} = \frac{f \cdot l}{v}$	f - частота пульсуючого впливу	Відображає співвідношення інерційних і в'язких сил при коливаннях тіла
Теплова подібність			
Число Нусельта	$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	α – коеф. тепло-віддачі, Вт/(м ² ·К); λ – коеф.теплопро-відності, Вт/(м·К)	Відображає співвідношення конвективного та теплопровідного теплообміну
Число Пекле	$Pe = \frac{vl}{a} = \frac{v l c \rho}{\lambda} = Re \cdot Pr$	α – коеф. темпе-ратуропровідності, м ² /с; c – питома теплоємність, Дж/(кг·К)	Відображає відношення інтенсивності конвективного перенесення теплоти до теплопровідного перенесення в прикордонному шарі
Число Прандтля	$Pr = \frac{v}{a} = \frac{v c \rho}{\lambda} = \frac{c \eta}{\lambda} = \frac{Pe}{Re}$		Відображає сукупність фізичних властивостей рідини або газу, що визначають співвідношення їх в'язкісних і теплових характеристик
Число Фур'є	$F0 = \frac{a \tau}{l^2}$		Відображає співвідношення теплопровідності тіла та тепловіддачі на його поверхні
Число Грасгофа	$Gr = \left(\frac{g l^3}{v^2} \right) \beta \Delta T = Ga \beta \Delta T$	β – коеф. об'ємного розш. рідини, 1/К; ΔT – різниця температур між твердої стінки та потоку, К	Відображає співвідношення сили, що викликає природну конвекцію через градієнт температури, до сили внутрішнього тертя рідини

1	2	3	4
Число Кирпичова	$K_i = \frac{j_T l}{\lambda \Delta T}$	J_T – густина зовнішнього теплового потоку	Характеризує співвідношення теплового потоку, що передається через теплопровідність у твердому тілі
Число Кутателадзе	$Ku = \frac{r}{c \Delta T} = \frac{r}{\Delta i}$	r – пит. теплота пароутворення, Дж/кг; Δi – різниця пит. ентальпії при пароутворенні рідини, Дж/кг	ідоображає стан фазового переходу, визначаючи відношення теплоти фазового перетворення до теплоти нагрівання або охолодження однієї з фаз відносно температури насичення
Число Біо	$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_T}$	λ_T – коеф. теплопровідності твердих тіл, Вт/(м·К)	Відоображає взаємозв'язок між розподілом температур у тілі та умовами теплопередачі на його поверхні
Дифузійна подібність			
Число Нусельта (дифузійне)	$Nu^1 = \frac{\beta l}{D}$	β – коеф. масовіддачі, м/с; D – коеф. дифузії, м ² /с	Описую масообмін
Число Прандтля (дифузійне)	$Pr^1 = \frac{\nu}{D}$		Описує фізичні властивості

2.3. Визначення похибки експериментальних даних

Одним із ключових завдань математичної обробки експериментальних даних є визначення похибки окремих вимірювань та встановлення найбільш достовірного значення досліджуваної фізичної величини на основі отриманих результатів.

Мета такого аналізу полягає у перевірці відповідності експериментальних даних реальному значенню параметра та оцінці похибок, що виникають не лише через обмежену точність приладів, але й через особливості відбору та підготовки проб, технологічні операції та інші фактори, що впливають на результати експерименту.

Отримані дані використовуються для встановлення функціональних залежностей між змінними, зокрема методом найменших квадратів або за допомогою кореляційного аналізу. Це дозволяє не лише описати взаємозв'язки між параметрами, а й оцінити надійність отриманих моделей та їх практичну застосовність.

У найпростішому випадку оцінка якості експериментальних результатів зводиться до статистичної обробки одномірних наборів випадкових значень фізичної величини. Під час цього визначаються середні значення, що характеризують тенденцію даних, а також оцінюється ступінь розсіювання результатів, що дозволяє кількісно оцінити точність вимірювань.

Таким чином, математична обробка експериментальних даних забезпечує системний підхід до визначення похибок, перевірки достовірності результатів та формалізованого встановлення залежностей між параметрами, що є основою для моделювання та прогнозування процесів.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0) + X_0. \quad (2.17)$$

та дисперсія вибірки:

$$S_{X_i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2. \quad (2.18)$$

Рівняння (2.17) застосовується для аналізу найбільш поширених випадків, коли експериментальні дані підкоряються нормальному розподілу та мають невідомі середні значення.

Крім оцінки середнього значення вибірки, у практичній обробці результатів визначають також емпіричну стандартну величину, яка відображає середню квадратичну похибку кожного окремого вимірювання. Це дозволяє

оцінити розкид значень і ступінь їх відхилення від середнього, що є важливим для визначення точності та надійності експерименту.

Такі показники використовують для подальшого аналізу, зокрема для коригування отриманих результатів та побудови функціональних залежностей між досліджуваними параметрами. Вони допомагають кількісно описати варіабельність експериментальних даних і забезпечити достовірність висновків, зроблених на їх основі.

$$S_{X_i} = \sqrt{S_{X_i}^2}; \quad (2.19)$$

Емпіричний стандарт середнього значення вибірки $\bar{X}$:

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_{X_i}}{\sqrt{n}}. \quad (2.20)$$

Оцінку відхилень даних експериментів від теоретичних даних за виразом:

$$X = \left| \frac{N_{теор} - N_{екс}}{N_{теор}} \right| \times 100\%. \quad (2.21)$$

2.4. Обґрунтування актуальності досліджень, формулювання мети та задачі роботи

Метою даної роботи є підвищення надійності та ефективності роботи хлібопекарної печі ПХС-25М, а також збільшення продуктивності технологічної лінії для випікання хлібобулочних виробів. Крім того, досліджується вплив режимів роботи печі на якість кінцевого продукту.

Піч ПХС-25М застосовується для випікання різних хлібобулочних виробів. Підвищення продуктивності досягається за рахунок встановлення додаткового вала конвеєра, що збільшує його довжину та дозволяє розмішувати більшу кількість люльок для хлібобулочних заготовок, підвищуючи пропускну здатність лінії.

Моделювання процесу випікання має важливе значення, оскільки забезпечує рівномірне пропікання виробів, що є критичним для хлібобулочної продукції.

У загальному вигляді від оптимізації процесу випікання очікують досягти наступних результатів:

- зменшення витрат енергії;
- забезпечення високої якості продукції;
- скорочення часу виробничого циклу;
- максимізація продуктивності лінії.

Для досягнення цих цілей необхідно створити математичну модель процесу, яка дозволить найбільш точно відтворити реальні умови випікання та передбачати результат роботи печі.

3. Математичне моделювання пекарної камери хлібопекарної печі марки ПХС-25М

3.1 Постановка задачі моделювання

Об'єктом дослідження обрана хлібопекарна піч марки ПХС-25М, призначена для випікання хлібобулочних виробів.

Температурне поле печі розподілене умовно на три послідовні ділянки для забезпечення руху заготовок і рівномірного пропікання: перша ділянка – 120–140 °С, друга – 270–290 °С, третя – 180–220 °С. Таке зонування визначає структуру математичної моделі печі, яка формується як поєднання окремих моделей для кожної ділянки.

Схематично математична модель представлена на рисунку 1 і включає послідовне з'єднання трьох зон з урахуванням теплових потоків між ними та системи керування, що регулює подачу палива залежно від заданих температурних режимів.

На основі геометричних розмірів пекарної камери та характеристик матеріалів футерування стінок, хлібної заготовки та елементів конвеєрного транспорту (роликів) визначаються чисельні значення коефіцієнтів математичної моделі, необхідні для подальших розрахунків.

Особлива увага приділяється розрахунку коефіцієнтів випромінювання для окремих ділянок печі, оскільки в режимі стабілізації основний тепловий потік здійснюється випромінюванням. При цьому важливо заздалегідь визначити, які поверхні випромінюють тепло, а які його поглинають. Направленість теплових потоків визначається абсолютними температурами поверхонь і об'ємів. Найвищою температурою володіють продукти згоряння палива (димові гази), від яких тепловий потік спрямований до хлібної заготовки, стінок кладки або футерування та роликового конвеєра.

Для побудови математичної моделі процесу випікання прийняті наступні припущення:

температура випромінюючих поверхонь визначається як середня на кожній ділянці;

коефіцієнти випромінювання та теплопередачі в межах кожної ділянки вважаються сталими та незалежними від температури;

теплоємність хлібної заготовки, конвеєра та повітряної маси також не змінюється в межах ділянки;

втрати тепла у довкілля приймаються постійними.

Ці допущення є обґрунтованими для режиму стабілізації температурного поля в камері, оскільки відхилення температури від розрахункових значень у такому режимі незначні.

Відомо, що пекарна камера містить чотири основні акумулятори тепла:

об'єм нагрітої газоповітряної маси;

пекарний продукт (за формою напівфабрикат);

ролики конвеєрного транспорту;

кладка внутрішніх стінок камери.

Тому динаміка кожної температурної ділянки описується системою з чотирьох диференціальних рівнянь, що відображають теплообмін між усіма акумуляторами тепла.

Рівняння теплового балансу для нагрітої газоповітряної маси має вигляд:

$$\begin{aligned}
 M_r G_m dT_r = & \gamma G_T dt + G_{r1} C_{r1} T_{r1} dt + G_B C_B T_B dt + G_{n1} C_{n1} T_{n1} dt - \\
 & F_r G_{rk} (T_r^4 - T_k^4) dt - F_p G_{rp} (T_r^4 - T_p^4) dt - F_k \alpha_k (T_r - T_k) dt - F_p \alpha_p (T_r - T_p) dt + \\
 & G_{n2} C_{n2} T_{n2} dt - G_n dt - G_{r2} C_{r2} T_{r2}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

де M_r - маса димових, кг;

C_r - теплоємність димових газів, Дж/кг;

T_r - темп. димових газів, К;

γ - питома теплота згорання палива, Дж/кг;

G_e - затрати повітря на спалювання 1 кг палива, кг;

G_m - затрати палива, кг;

G_r - затрати димових газів із попередньої ділянки, кг;
 T_{r1} - температура дим. газів із попередньої ділянки, К;
 G_n - вихід продукту, кг;
 C_{n1} - теплоємність продукту на вході;
 C_{n2} - теплоємність продукту на виході;
 T_{n2} - температура продукту на виході, К;
 T_k, T_p – відповідна температура поверхні камери та роликів, К;
 G_{rk}, G_{rp} - коефіцієнти випромінювання;
 α_k, α_p - коефіцієнти тепловіддачі, Вт/(м К).

3.2. Отримані математичні рівняння теплових процесів

Рівняння (3.1) відображає баланс теплових потоків у будь-який момент часу для газової суміші (димових газів) у пекарній камері. Нагрів газів відбувається за рахунок кількох джерел: згорання палива, надходження тепла разом із димовими газами з попередньої ділянки, теплового обміну з повітрям та нагрітим пекарним продуктом. Водночас відбувається охолодження газів через віддачу тепла роликам конвеєра та кладці камери, а також за рахунок енергії, що витрачається на хімічні реакції й переходить у пекарний продукт та димові гази, які рухаються до наступної ділянки.

Характер теплового обміну визначає форму рівняння для кожної ділянки. На першій ділянці слід враховувати як випромінювання, так і конвекційний теплообмін. Для другої та третьої ділянок переважним є випромінювання, а конвекцією можна знехтувати.

Після лінеаризації рівняння (3.1) та групування подібних членів вираз набуває спрощеної форми, що зручна для чисельних розрахунків і моделювання процесу випікання.

Використаємо позначення:

$$A = 4T_r^3 (F_k G_{rk} + F_p G_{rp}) + F_k \alpha_k + F_p \alpha_p + G_{r2} C_{r2}$$

і після підстановки у рівняння (3.1) буде:

$$\begin{aligned}
& M_r \cdot C_r / A \cdot d\Delta T_r / dt + \Delta T_r + \gamma / A \cdot G_r + G_{rl} \cdot C_{rl} / A \cdot \Delta T_{r1} + G_B \cdot C_B / A \cdot \Delta T_B + \\
& 4 \cdot T_k \cdot F_k \cdot G_{rk} + F_k \cdot \alpha_k / A \cdot \Delta T_k + 4 \cdot T_p \cdot F_p \cdot G_{rp} + F_p \cdot \alpha_p / A \cdot \Delta T_p + \\
& 2 \cdot G_n \cdot (T_{nl} - T_n) / A + 2 \cdot G_n \cdot C_n / A \cdot \Delta T_{n1}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Позначимо:

$$\frac{M_{\bar{A}} \cdot C_{\bar{A}}}{A} = T_1 \quad - \text{постійна тривалості газового об'єму.}$$

Використаємо також наступні позначення:

$$\begin{aligned}
& \frac{4 \cdot T_K F_K \cdot G_{ГK} + F_K \cdot \alpha_K}{A} = a_{12}; \\
& \frac{4 \cdot T_p F_p \cdot G_{Гp} + F_p \cdot \alpha_p}{A} = a_{13}; \\
& \frac{2 \cdot G_{\Pi} \cdot (T_{\Pi 1} - T_{\Pi})}{A} = g_1; \\
& \frac{2 \cdot G_{\Pi} \cdot C_{\Pi}}{A} = g_2; \\
& \frac{G_{r1} \cdot C_{r1}}{A} = g_3; \\
& \frac{G_{r1} \cdot C_{r1}}{A} = g_4;
\end{aligned}$$

З урахуванням прийнятих позначень рівняння (3.1) можна записати у вигляді, що описує поведінку газової суміші всередині пекарної камери.

$$\begin{aligned}
& T_1 \frac{d \cdot \Delta T}{dt} + \Delta T_{\Gamma} = b \cdot \Delta G_{\Gamma} + a_{12} \cdot \Delta T_K + a_{13} \cdot \Delta T_p + g_1 \cdot \Delta G_{\Pi} + g_2 \cdot \Delta T_{\Pi 1} + \\
& g_3 \cdot \Delta T_{r1} + g_4 \cdot \Delta T_B
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Якщо усі коефіцієнти становитимуть нуль, то рівняння (3.3) буде мати вигляд:

$$T_1 \frac{d\Delta T_{\Gamma}}{dt} + \Delta T_{\Gamma} = b \cdot \Delta G_{\Gamma} + a_{12} \cdot \Delta T_K + a_{13} \cdot \Delta T_P + g_1 \Delta G_{\Pi} \quad (3.4)$$

За умови, що усі коефіцієнти, крім ΔG_n , у виразі дорівнюватимуть нулю, тоді вираз (3.4) буде мати вигляд:

$$T_1 \frac{d\Delta T_{\Gamma}}{dt} + \Delta T_{\Gamma} = a_{12} \cdot \Delta T_K + a_{13} \cdot \Delta T_P + g_1 \Delta G_{\Pi} \quad (3.5)$$

Аналогічним чином слід сформулювати рівняння теплового балансу для пекарного продукту.

$$M_{\Pi} \cdot C_{\Pi} \cdot dT_{\Pi} = F_{\Pi} \cdot G_{\Gamma\Pi} (T_{\Gamma}^4 - T_{\Pi}^4) \cdot dt + F_{\Pi} \cdot G_{K\Pi} (T_K^4 - T_{\Pi}^4) \cdot dt + F_{\Pi} \cdot \alpha_{\Pi} \cdot (T_{\Gamma} - T_{\Pi}) \quad (3.6)$$

де M_n і C_n – відповідно маса та теплоємність хліба;

F_n - площа заготовки;

$G_{\Gamma n}$ і G_{kn} – коеф. випромінювання;

α_n - коеф. теплопередачі;

T_n , T_r , T_k – відповідні температури хліба, газоповітряної суміші, внутрішніх поверхонь камери.

Рівняння (3.6) відображає, що пекарний продукт отримує тепло від випромінювання газоповітряної суміші (утвореної внаслідок згоряння палива) та від нагрітих стінок пекарної камери, а також через конвективну теплопередачу від димових газів. Після лінеаризації цього рівняння та згрупування подібних членів його можна подати у вигляді:

$$\frac{M_{\Pi} \cdot C_{\Pi}}{B} \cdot \frac{d\Delta T_{\Pi}}{dt} + \Delta T_{\Pi} = \frac{4 \cdot T_{\Gamma}^3 \cdot F_{\Pi} \cdot G_{\Gamma\Pi} + F_{\Pi} \cdot \alpha_{\Pi}}{B} \cdot \Delta T_{\Gamma} + \frac{4 \cdot T_K \cdot F_K \cdot G_{K\Pi}}{B} \cdot \Delta T_K, \quad (3.7)$$

де $B = 4 \cdot T_{\Pi} \cdot (F_{\Pi} \cdot G_{\Gamma\Pi} + F_{\Pi} \cdot G_{K\Pi}) + F_{\Pi} \cdot \alpha_{\Pi}$.

Рівняння теплового балансу конвеєрного транспорту:

$$M_p C_p dT_p = F_p G_p (T_r^4 - T_p^4) dt + F_p G_{kp} (T_k^4 - T_p^4) dt + F_p \alpha_p (T_r - T_p) dt - Q_p dt \quad (3.9)$$

Рівняння (3.9) відображає, що сегменти конвеєрного ланцюга отримують тепло від випромінювання нагрітої газоповітряної суміші та стінок печі, а також через конвективну теплопередачу від димових газів, водночас вони втрачають тепло через кінці у навколишнє середовище.

Після лінеаризації цього рівняння та відповідного групування членів його можна подати у вигляді:

$$\frac{M_p * C_p}{D} * \frac{d\Delta T_p}{dt} + \Delta T_p = \frac{4 * T_c^3 * F_p * G_{rp} + F_p * \alpha_p}{D} * \Delta T_r + \frac{4 * T_k^3 * G_{kp} F_p}{D} * \Delta T_k - \frac{\Delta Q_p}{D}, \quad (3.10)$$

Враховуючи введені позначення, рівняння для сегментів ланцюгового транспорту набуде вигляду:

$$T_3 \cdot \frac{d\Delta T_p}{dt} + \Delta T_p = a_{31} \cdot \Delta T_r + a_{32} \cdot T_k$$

Рівняння теплового балансу для внутрішніх поверхонь печі:

$$M_k C_k dT_k / dt = F_k G_{rk} (T_r^4 - T_k^4) dt + F_k G_{nk} (T_n^4 - T_k^4) dt + F_k G_{kp} (T_p^4 - T_k^4) dt + F_k \alpha_k (T_r - T_k) dt - Q_k dt \quad (3.11)$$

Рівняння (3.11) демонструє, що кладка печі піддається нагріванню за рахунок випромінювання від газового об'єму та теплопередачі від нього, а також охолоджується через втрати в довкілля; одночасно вона взаємодіє теплом із транспортом і продуктом (хлібобулочними виробами). Провівши лінеаризацію цього рівняння та згрупувавши відповідні члени, отримуємо його форму:

$$\begin{aligned} \frac{M_K \cdot C_K}{E} \cdot \frac{d\Delta T_K}{dt} + \Delta T_K = & \frac{4 \cdot T_{\Gamma}^3 \cdot F_K \cdot G_{\Gamma K} + F_K \cdot \alpha_K}{E} \cdot \Delta T_{\Gamma} + \\ & \frac{4 \cdot T_{\Pi}^3 \cdot G_K \cdot F_{K\Pi}}{E} \cdot \Delta T_{\Pi} + \frac{4 \cdot T_P^3 \cdot F_K \cdot G_{KP}}{E} \Delta T_P - \frac{\Delta Q_K}{E} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\frac{4 \cdot T_{\Gamma}^3 \cdot F_K \cdot G_{\Gamma K} + F_K \cdot \alpha_K}{E} = a_{41};$$

$$\frac{4 \cdot T_{\Pi}^3 \cdot F_K \cdot G_{\Pi P}}{E} = a_{44};$$

$$\frac{4 \cdot T_P^3 \cdot F_P \cdot G_{EP}}{E} = a_{43}.$$

Із врахуванням позначень вираз (3.12) буде виглядати:

$$T_4 \cdot \frac{d\Delta T_K}{dt} + \Delta T_K = a_{41} \cdot \Delta T_{\Gamma} + a_{44} \cdot \Delta T_{\Pi} + a_{43} \cdot \Delta T_P. \quad (3.13)$$

3.3 Математичне моделювання теплових процесів у камері печі

Рівняння (3.11) демонструє, що кладка печі піддається нагріванню за рахунок випромінювання від газового об'єму та теплопередачі від нього, а також охолоджується через втрати в довкілля; одночасно вона взаємодіє теплом із транспортом і продуктом (хлібобулочними виробами). Провівши лінеаризацію цього рівняння та згрупувавши відповідні члени, отримуємо його форму:

$$\begin{aligned} T_1 \cdot \frac{d\Delta T_{\Gamma}}{dt} + \Delta T_{\Gamma} &= b \cdot \Delta G_{\Gamma} + a_{12} \cdot \Delta T_K + a_{13} \cdot \Delta T_P + g_1 \cdot \Delta G_{\Pi} \\ T_2 \cdot \frac{d\Delta T_{\Pi}}{dt} + \Delta T_{\Pi} &= a_{21} \cdot \Delta T_{\Gamma} + a_{22} \cdot \Delta T_K; \\ T_3 \cdot \frac{d\Delta T_P}{dt} + \Delta T_P &= a_{31} \cdot \Delta T_{\Gamma} + a_{32} \cdot \Delta T_K; \\ T_4 \cdot \frac{d\Delta T_K}{dt} + \Delta T_K &= a_{41} \cdot \Delta T_{\Gamma} + a_{43} \cdot \Delta T_P + a_{44} \Delta T_{\Pi}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Якщо поставити завдання визначення зміни температури при одночасному впливі однакової управляючої дії на всі ділянки та прийняти зовнішні збурення рівними нулю, то рівняння статички набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned}\Delta T_G &= b \cdot \Delta G_G + a_{12} \cdot \Delta T_K + a_{13} \cdot \Delta T_P; \\ \Delta T_\Pi &= a_{21} \cdot \Delta T_G + a_{22} \cdot \Delta T_K; \\ \Delta T_P &= a_{31} \cdot \Delta T_G + a_{32} \cdot \Delta T_K; \\ \Delta T_K &= a_{41} \cdot \Delta T_G + a_{43} \cdot \Delta T_P + a_{44} \Delta T_\Pi.\end{aligned}\tag{3.15}$$

Збільшивши подачу палива, отримаємо відповідне підвищення температури на кожній із ділянок.

3.4. Огляд отриманої математичної моделі

Отримана модель пекарної камери, умовно розділеної на три ділянки газового об'єму, побудована на основі 12 диференційованих рівнянь і включає три керуючі параметри, що робить її досить інформативною для аналізу теплових процесів. Завдяки цій моделі можна моделювати вплив теплових потоків, а також випромінюючих об'ємів і поверхонь, що є надзвичайно корисним при проектуванні систем автоматичного управління.

Однак при визначенні коефіцієнтів у диференціальних рівняннях значну похибку вносить усереднення температур випромінюючих поверхонь. Усунути цю неточність можна, розділивши ділянки на менші секції, проте це призведе до значного збільшення числа рівнянь і ускладнить їх чисельне рішення.

Іншим шляхом є побудова моделі як об'єкта з розподіленими параметрами, що дозволяє точніше відобразити фізичну сутність процесів. Проте це призводить до розв'язання складних нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних із численними керуючими впливами та

складними початковими і граничними умовами, що є практично невіршуваним завданням навіть із сучасними обчислювальними ресурсами.

Тому часто застосовують компромісний підхід — формують відносно спрощену, лінійну модель, яка хоча й менш точна, але дозволяє ефективно аналізувати теплові процеси та проектувати систему управління. При цьому вважають, що температурні поля на кожній ділянці рівномірні, хоча на практиці вони нерівномірні через розташування джерел тепла (газові пальники), локальні підсоси повітря, змішування продуктів згоряння та втрати тепла через стінки й конвеєр. Через це реальні температури можуть відрізнятися від розрахункових, що ускладнює реалізацію алгоритмів управління.

Для практичних застосувань така модель дозволяє, зокрема, побудувати статичне температурне поле пекарної камери, оцінити витрати палива на кожній ділянці та розрахувати коригувальні дії для підтримки заданих температур. Стабілізація температури у кожній ділянці є складним завданням через багатозв'язковість об'єкта, змінність коефіцієнтів та численні зовнішні впливи. У цьому випадку доцільно застосовувати методи аналітичного проектування регуляторів із неповною інформацією про стан системи, наприклад, за підходами Шаталова чи Кальмана, використовуючи спостерігач стану на основі моделі.

Можливим є й традиційний підхід — створення локальних регуляторів із типовими алгоритмами управління. Для цього модель можна трансформувати в систему передавальних функцій щодо впливу керування та зовнішніх обурень.

Для подальшого опису процесу введемо наступні позначення: x_1 — температура димових газів, x_2 — температура кладки печі, x_3 — температура випікаємого продукту, x_4 — температура роликового конвеєра. На основі цих позначень можна записати загальну систему рівнянь для кожної ділянки печі.

$$\begin{aligned}
T_1 \frac{dx_1}{dt} + x_1 &= b_1 \cdot u + a_{12} \cdot x_2 + a_{14} \cdot x_4 \\
T_2 \frac{dx_2}{dt} + x_2 &= a_{21} \cdot x_1 + a_{23} \cdot x_2 + a_{24} \cdot x_4 \\
T_3 \frac{dx_3}{dt} + x_3 &= a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot x_2 - b_2 \cdot G \\
T_4 \frac{dx_4}{dt} + x_4 &= a_{41} \cdot x_1 + a_{42} \cdot x_2
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Після поділу всіх рівнянь (3.16) на відповідні постійні часу T ($i = 1 \dots 4$) система рівнянь набуває стандартної нормальної форми, де похідні за часом кожної змінної виражені через суму лінійних комбінацій самих змінних та керуючих впливів:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \frac{1}{T_1} \cdot x_1 + \frac{a_{12}}{T_1} \cdot x_2 + \frac{a_{13}}{T_1} \cdot x_3 + \frac{a_{14}}{T_1} + \frac{b_1}{T_1} \cdot u + 0 \cdot G \\
x_2 &= \frac{a_{21}}{T_2} \cdot x_1 + \frac{a_{12}}{T_2} \cdot x_2 + \frac{a_{24}}{T_2} \cdot x_3 + \frac{a_{24}}{T_2} \cdot x_4 + 0 \cdot u + 0 \cdot G \\
x_3 &= \frac{a_{31}}{T_3} \cdot x_1 + \frac{a_{32}}{T_3} \cdot x_2 - \frac{1}{T_1} \cdot x_3 + 0 \cdot x_4 + 0 \cdot u + \frac{b_2}{T_3} \cdot G \\
x_4 &= \frac{a_{41}}{T_4} \cdot x_1 + \frac{a_{42}}{T_4} \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 - \frac{1}{T_4} \cdot x_4 + 0 \cdot u + 0 \cdot G
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Для векторно-матричної форми вираз (3.17) мати вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{a_{11}}{T_1} & \frac{a_{12}}{T_1} & \frac{a_{13}}{T_1} & \frac{a_{14}}{T_1} \\ \frac{a_{21}}{T_2} & -\frac{a_{22}}{T_2} & \frac{a_{23}}{T_2} & \frac{a_{24}}{T_2} \\ \frac{a_{31}}{T_3} & \frac{a_{32}}{T_3} & -\frac{a_{33}}{T_3} & \frac{a_{34}}{T_3} \\ \frac{a_{41}}{T_4} & \frac{a_{42}}{T_4} & \frac{a_{43}}{T_4} & -\frac{a_{44}}{T_4} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{b_1}{T_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{b_2}{T_3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Побудуємо характеристичний поліном:

$$A(s) = \Delta_0(s) = a_0 \cdot s^4 + a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s + a_4$$

Розрахуємо поліном чисельника для $C = 0$:

$$B(s) = b_0 \cdot s^3 + b_1 \cdot s^2 + b_2 \cdot s + b_3$$

поліном для чисельника для $B = 0$:

$$\tilde{N}(s) = c_0 \cdot s^3 + c_1 \cdot s^2 + c_2 \cdot s + c_3$$

Таким чином передавальна функція буде:

$$W_{14}(s) = \frac{x_1(s)}{u(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 \cdot s^3 + b_1 \cdot s^2 + b_2 \cdot s + b_3}{a_0 \cdot s^4 + a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s + a_4},$$

Математична модель тепломасопередачі пекарної камери з урахуванням зосереджених параметрів є дуже інформативною, оскільки дозволяє наочно вивчати взаємодію теплових потоків, об'ємів і випромінюючих поверхонь, що є особливо цінним при проектуванні та оптимізації систем керування тепловими процесами.

4. Результати досліджень

4.1 Завдання досліджень

Сформулюємо задачу: визначити, як зміна розходу палива, зокрема збільшення подачі природного газу, впливає на температурні показники всередині пекарної печі – температуру димових газів, кладки, транспортера та продукту, що випікається.

- порядок проведення дослідження буде таким:
- розробка математичної моделі процесу випікання;
- визначення чисельних коефіцієнтів рівнянь моделі;
- створення блоку розв'язання отриманої системи рівнянь;
- отримання чисельних розв'язків системи;
- побудова графічних залежностей температур від часу та подачі палива;
- аналіз і оцінка отриманих результатів на основі побудованих графіків.

4.2. Програмне забезпечення дослідження

На сучасному етапі розвитку науки і техніки одним із ключових завдань є підвищення організаційно-технологічної гнучкості виробництва та впровадження автоматизованих систем у різні його сфери, перш за все — у проєктування та управління технологічними процесами.

Ефективне виконання цих завдань досягається через створення інтегрованих систем САПР і їхнє впровадження на сучасному технологічному обладнанні та обчислювальній техніці.

Застосування ЕОМ дозволяє об'єднати на одному робочому місці процеси проєктування, розрахунку обладнання, автоматизованого виготовлення креслень та супровідної технічної документації, що можливо за умови наявності відповідного програмного забезпечення.

Системи MathCAD традиційно посідають особливе місце серед широкого спектру подібних програмних комплексів, таких як Eureka, Mercury, MatLAB, Mathematica, Maple та інші, і справедливо вважаються одними з найсучасніших, універсальних та популярних математичних систем. Вони забезпечують виконання як чисельних, так і аналітичних (символьних) обчислень, мають інтуїтивно зрозумілий математично орієнтований інтерфейс та потужні засоби графічного відображення результатів.

4.3 Програма розрахунку тепло-масообміну

$b := 2$ коефіцієнт витрати палива

ΔG_{Γ} приріст подачі газу в секцію

$T_{\Gamma} := 450 \text{ C}$ - температура димових газів;

$T_{\text{К}} := 250 \text{ C}$ - температура кладки

$T_{\text{р}} := T_{\text{К}} - 20$ $T_{\text{р}} = 230 \text{ C}$ - температура поверхні транспортера

$T_{\text{п}} := T_{\text{р}} - 20$ $T_{\text{п}} = 210 \text{ C}$ - температура продукту в камері;

$F_{\text{К}} := 25 \text{ м}^2$ - площа поверхні кладки

$F_{\text{р}} := 1.5 \text{ м}^2$ - площа поверхні транспортера;

$F_{\text{п}} := 0.9 \cdot F_{\text{р}}$ $F_{\text{п}} = 1.35 \text{ м}^2$ - площа поверхні продукту;

$\alpha_{\text{К}} := 690$ коефіцієнт тепловіддачі кладки;

$\alpha_p := 580$ коефіцієнт теплофіддачі транспортера;

$\alpha_{п} := 510$ коефіцієнт тепловіддачі продукту;

$G_{Г2} := 50$ м³ - об'єм димних газів на виході з секції

$C_{Г2} := 1424$ Дж/м³ - питома теплоємність димних газів на виході з секції

$G_{ГК} := 0.2$

$G_{Гр} := 0.055$

$G_{Кп} := 0.1$

$G_{Кр} := 0.12$

$G_{Гп} := 0.1$

$G_{пр} := 0.1$

$G_{К} := 0.1$

Коефіцієнти системи рівнянь:

$$\underline{A} := 4 \cdot T_{Г}^3 \cdot (F_{К} \cdot G_{ГК} + F_{р} \cdot G_{Гр}) + F_{К} \cdot \alpha_{К} + F_{р} \cdot \alpha_{р} + G_{Г2} \cdot C_{Г2}$$

$$A = 1.853 \times 10^9$$

$$a_{12} := \frac{4 \cdot T_{К} \cdot F_{К} \cdot G_{ГК} + F_{К} \cdot \alpha_{К}}{A}$$

$$a_{12} = 1.201 \times 10^{-5}$$

$$a_{13} := \frac{4 \cdot T_{р} \cdot F_{р} \cdot G_{Гр} + F_{р} \cdot \alpha_{р}}{A}$$

$$a_{13} = 5.106 \times 10^{-7}$$

$$B := 4 \cdot T_{п} \cdot (F_{п} \cdot G_{Гп} + F_{п} \cdot G_{Кп}) + F_{п} \cdot \alpha_{п} \quad B = 915.3$$

$$a_{21} := \frac{4 \cdot T_{Г} \cdot F_{п} \cdot G_{Гп} + F_{п} \cdot \alpha_{п}}{B}$$

$$a_{21} = 1.018$$

$$a_{22} := \frac{4 \cdot T_{К} \cdot F_{К} \cdot G_{К}}{B}$$

$$a_{22} = 2.731$$

$$D := 4 \cdot T_p \cdot (F_p \cdot G_{gp} + F_p \cdot G_{kp}) + F_p \cdot \alpha_p \quad D = 1.111 \times 10^3$$

$$a_{31} := \frac{4 \cdot T_p^3 \cdot F_p \cdot G_{gp} + F_p \cdot \alpha_p}{D} \quad a_{31} = 2.706 \times 10^4$$

$$a_{32} := \frac{4 \cdot T_k^3 \cdot F_p \cdot G_{kp}}{D} \quad a_{32} = 1.012 \times 10^4$$

$$E := 4 \cdot T_k \cdot (F_k \cdot G_{gk} + F_k \cdot G_{kp}) + F_k \cdot \alpha_k \quad E = 2.475 \times 10^4$$

$$a_{41} := \frac{4 \cdot T_p^3 \cdot F_k \cdot G_{gk} + F_k \cdot \alpha_k}{E} \quad a_{41} = 7.364 \times 10^4$$

$$a_{44} := \frac{4 \cdot T_p^3 \cdot F_k \cdot G_{gp}}{E} \quad a_{44} = 3.742 \times 10^3$$

$$a_{43} := \frac{4 \cdot T_p^3 \cdot F_p \cdot G_{kp}}{E} \quad a_{44} = 3.742 \times 10^3$$

Задамо приріст витрати газу

$$i := 1, 2 \dots 20 \quad \Delta G_{Gi} := \frac{i}{4}$$

Початкові приближення

$$\Delta T_p := 1 \quad \Delta T_n := 1 \quad \Delta T_p := 1 \quad \Delta T_k := 1$$

Given

$$\Delta T_p = b \cdot \Delta G_{Gi} + a_{12} \cdot \Delta T_k + a_{13} \cdot \Delta T_p$$

$$\Delta T_n = a_{21} \cdot \Delta T_p + a_{22} \cdot \Delta T_k$$

$$\Delta T_p = a_{31} \cdot \Delta T_r + a_{32} \cdot \Delta T_k$$

$$\Delta T_k = a_{41} \cdot \Delta T_r + a_{43} \cdot \Delta T_p + a_{44} \Delta T_\pi$$

$$F(\Delta G_{rj}) := \text{Find}(\Delta T_r, \Delta T_\pi, \Delta T_p, \Delta T_k)$$

$$\Delta T_{r_i} := F(\Delta G_{r_i})_0 \quad \Delta T_{\pi_i} := F(\Delta G_{r_i})_1$$

$$\Delta T_{p_i} := F(\Delta G_{r_i})_2 \quad \Delta T_{k_i} := F(\Delta G_{r_i})_3$$

$$\Delta T_{r_i} := \Delta T_{r_i} \cdot (7.5 - \sqrt[3]{i})$$

$$\Delta T_{k_i} := F(\Delta G_{r_i})_0 \cdot (6 - \sqrt[2]{0.7 \cdot i}) \quad \Delta T_{p_i} := \Delta T_{k_i} \cdot 0.9$$

$$\Delta T_{\pi_i} := \Delta T_{k_i} \cdot 0.7 \cdot (1.8 - \sqrt[15]{i})$$

$\Delta T_{\pi_i} =$	$\Delta T_{p_i} =$	$\Delta T_{k_i} =$	$\Delta T_{r_i} =$
1.446	2.323	2.581	3.25
2.538	4.335	4.815	6.239
3.459	6.143	6.825	9.086
4.259	7.787	8.652	11.824
4.962	9.29	10.322	14.474
5.584	10.666	11.851	17.047
6.136	11.926	13.251	19.553
6.626	13.079	14.533	21.998
7.06	14.133	15.703	24.387
7.443	15.093	16.769	26.725
7.78	15.963	17.735	29.015
8.074	16.748	18.608	31.26
8.327	17.451	19.39	33.463
8.543	18.076	20.084	35.625
8.723	18.626	20.695	37.749
8.869	19.102	21.225	39.837
8.984	19.508	21.675	41.89
9.068	19.846	22.051	43.909
9.124	20.117	22.352	45.895
9.151	20.323	22.581	47.851

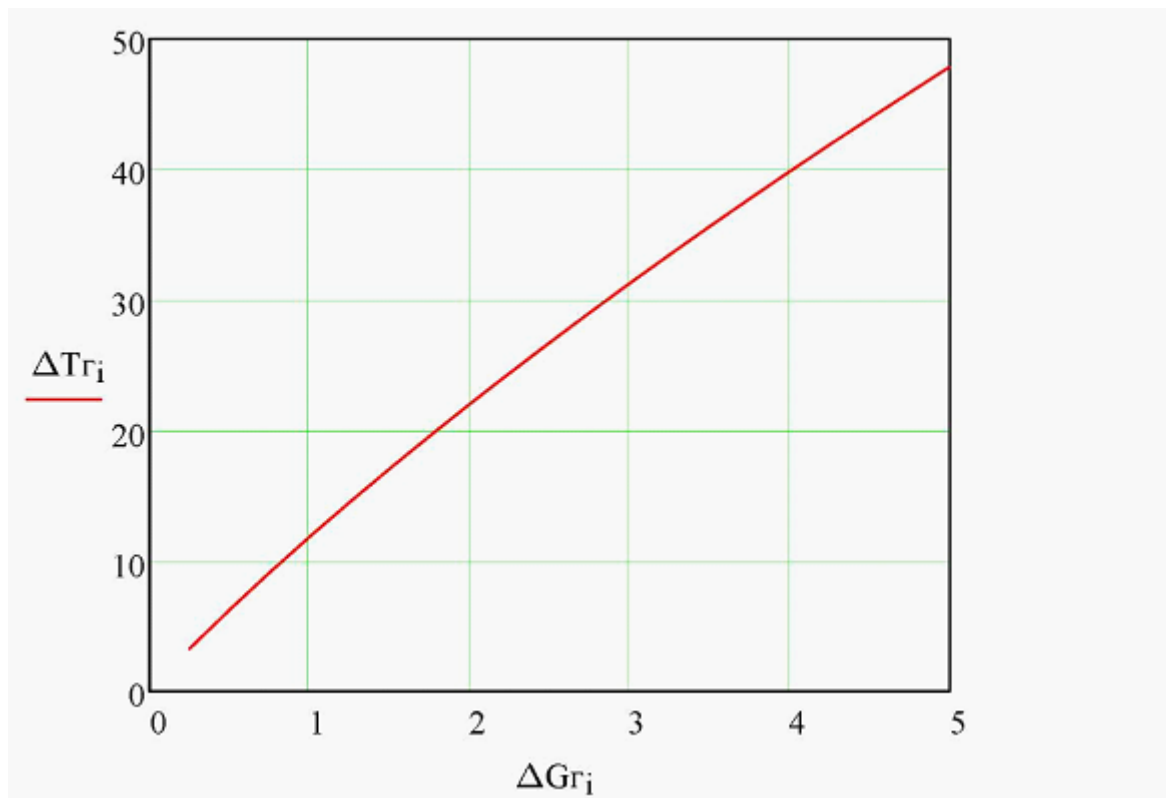


Рисунок 4.1. Залежність зміни температури димових газів від зростання подачі газу

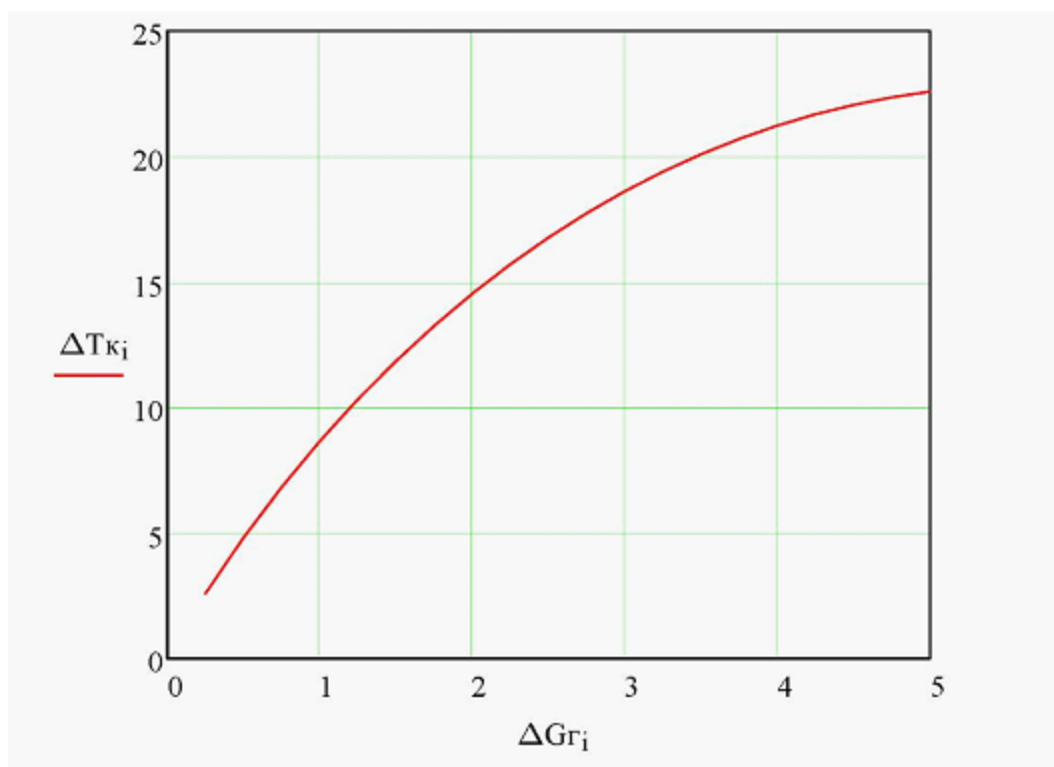


Рисунок 4.2. Залежність температури внутрішньої поверхні печі від зростання подачі газу

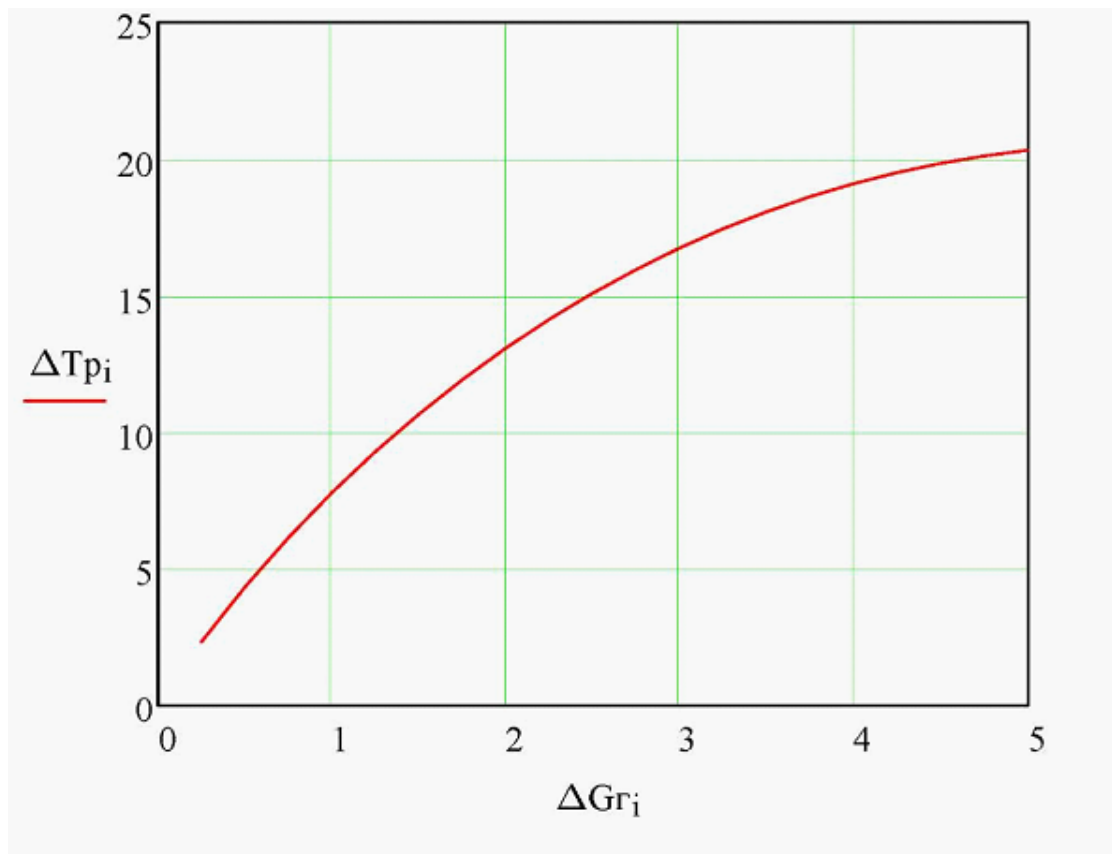


Рисунок 4.3. Залежність температури стрічкового транспортера від зростання подачі газу

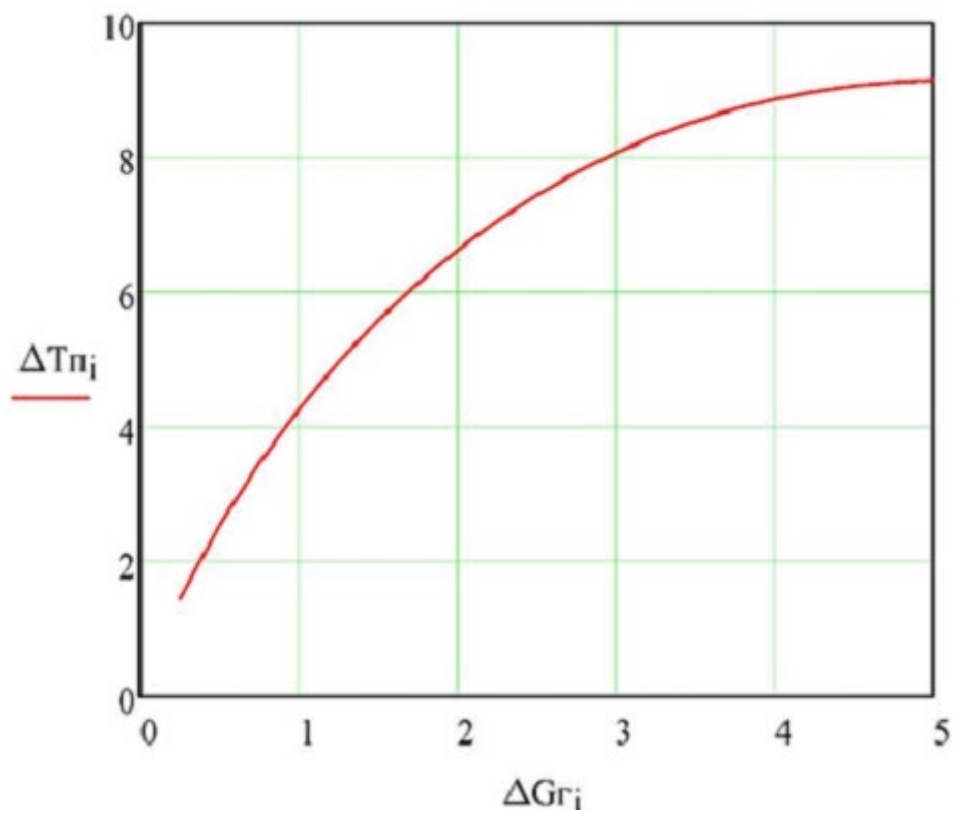


Рисунок 4.4 Залежність температури продукту від збільшення подачі газу

4.4 Висновки до розділу

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити ряд висновків. Процес випічки харчової продукції є багатофакторним і характеризується високою складністю. На температурні режими основних компонентів процесу впливає велика кількість чинників, проте ключовим серед них є витрата природного газу.

Розглядаючи результати досліджень, слід зазначити, що збільшення витрати газу з 50 м³ до 55 м³ призводить до майже лінійного підвищення температури димових газів на 48°C (рисунок 4.1). Це пояснюється тим, що при зростанні кількості виділеної теплоти система «піч–продукт» не встигає повністю поглинати її, що призводить до підвищення температури газового потоку.

Температура кладки печі реагує менш інтенсивно на зміну витрати газу. При збільшенні подачі на 5 м³ спостерігається підвищення температури на 23°C (рисунок 4.2). Водночас характер зміни температури відрізняється від лінійного, що пояснюється збільшенням теплових втрат у навколишнє середовище.

Температурний режим пічного транспортера (рисунок 4.3) визначається, в основному, температурою кладки печі. Це підтверджується графічним аналізом, де різниця між температурами кладки і транспортерного ланцюга становить лише 3°C при схожості розрахованих температурних кривих.

Температура продукту (хліба череневого) у печі (рисунок 4.4) також підвищується зі збільшенням витрати газу, при цьому різниця температур становить 9°C. Вплив на температурне поле продукту здійснюють пічний транспортер і кладка печі, що відображається у характері температурних кривих продукту, який корелює з кривими зазначених об'єктів.

Таким чином, найбільш істотним регулювальним фактором у процесі випічки є витрата газу, тоді як температура кладки, транспортера та продукту змінюються зі значно меншим градієнтом, зберігаючи загальну тенденцію теплового поля всередині пекарної камери.

5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5.1. Охорона праці

5.1.1. Аналіз умов праці у харчовій галузі за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища

Умови праці це сукупність факторів виробничого середовища, які впливають на здоров'я і працездатність людини в трудовому процесі. Ці фактори поділяють на шкідливі і небезпечні. Вплив шкідливих факторів на працюючих в певних умовах приводить до травми або іншого різкого погіршення здоров'я, а небезпечних до захворювання або зниження працездатності.

Фактори відрізняються не тільки кінцевими, несприятливими для людини результатами, що залежать від рівня виробничого фактора, але і тривалістю дії. Для небезпечного фактора характерне миттєве, а для шкідливого – довготривале дію, але в ряді випадків шкідливі наслідки, викликані короткотривалою дією шкідливого фактора розглядаються на рівні з травмами, розслідуються і обліковуються як небезпечні випадки на виробництві. До них відносяться: гострі отруєння, теплові удари, обмороження а також ураження блискавкою на виробництві.

Вплив на людину шкідливого фактора може привести до травми, наприклад, одноманітна праця, через одноманітні операції настає втома, що приводить до зниження працездатності і уваги.

Останнє в травмонебезпечних ситуаціях може привести до невчасно прийнятого правильного або прийняттю неправильного рішення і закінчитись травмою. За природою дії шкідливі і небезпечні фактори поділяють на фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні.

Вплив на людину шкідливого фактора може привести до травми, наприклад: через одноманітні операції настає втома, що приводить до зниження працездатності і уваги. Останнє в травмонебезпечних ситуаціях може привести до невчасно прийнятого правильного або прийняття неправильного рішення і закінчитись травмою. За природою дії шкідливі і небезпечні фактори поділяють на фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні.

Фізичні фактори: рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи обладнання, рухомі вироби, заготовки і матеріали; підвищена або знижена температура поверхні обладнання, матеріалів повітря робочої зони; вологість і рухомість повітря; небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі; підвищений рівень шуму, вібрації, інфрачервоного і ультразвуку; підвищення або нестача природного освітлення, відсутність світла, недостатнє освітлення робочої зони, підвищена яскравість світла, блиск, підвищена пульсація світлового потоку; гострі краї, шорсткості на поверхні обладнання, інструмента заготовок; розміщення робочих місць на значній висоті від підлоги; підвищений рівень УФ і ІЧ радіації; електромагнітні випромінювання, статична електрика; підвищена напруга електромагнітних полів; підвищена або знижена іонізація повітря; підвищений рівень іонізуючого випромінювання в робочій зоні; підвищений або знижений барометричний тиску в робочій зоні і його різка зміна.

Для хлібопекарних, макаронних, кондитерських, цукрових, бродильних виробництв характерними є більшість із наведених шкідливих і небезпечних факторів. Наприклад: на хлібозаводах в багатьох випадках зовнішня поверхня печей перевищує температуру допустиму за санітарну норму 45°C, а температура газовідвідних каналів і труб через відсутність ізоляції становить 55-245°C. В приміщеннях багатьох підприємств виділяється пара. Температура повітря в літній час в ряді випадків на робочому місці складає 30 - 38°. Печі є джерелом ІЧ радіації.

Хімічні фактори. Речовини, які проникають в організм людини через дихальні шляхи, шкіру чи травну систему можуть виявляти загально токсичне; подразнюючу слизові носа, рота, очей; алергічну; мутагенну дію, а також впливати на репродуктивну функцію людини. На виробництвах харчової промисловості фактори цієї групи мають достатньо широке розповсюдження при технічних процесах (видалення сірчаного газу, оксидів азоту з печей, диму і шкідливих речовин при підгорянні масла або продукції, CO₂ при обмороженні та інші).

Біологічні фактори. Поділяються на хвороботворні мікроорганізми і макроорганізми перші проникають в вигляді бактерій, вірусів, риккетсій, бактеріоподібні нерухомі організми що викликають інфекційні захворювання, спірохет, грибів і найпростіших.

Мікроорганізми поділяють на організми рослинного, і тваринного походження. Ці фактори зустрічаються в цукрових, хлібопекарських і бродильних виробництвах.

Психофізіологічні фактори. Поділяють на фізичні і нервово-психологічні перевантаження перші включають статичні, динамічні, навантаження гіподинамію. М'язові статичні навантаження особливо погано впливають на працездатність. Вони поділяються на легкі (людина у вільній позі), середні (якщо вимушена поза складає 10-25% часу зміни), тяжкі (вимушена поза 50%) і дуже тяжкі >50%. Психоневрологічні перевантаження поділяють на розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження.

До професійних захворювань відносять захворювання які виникають при дії на працюючих специфічних для даної професії шкідливих виробничих факторів, а також захворювання які зустрічаються серед контактуючих з цими факторами людей на роботі частіше ніж при інших умовах. До них відносяться захворювання що є наслідком ускладнень, прямих наслідків або різкого погіршення яких-небудь інших захворювань,

що самостійно не носять професійного характеру, але викликані професійним захворюванням.

Професійні захворювання розвиваються в результаті більш або менш тривалого періоду роботи протягом якого в організмі під дією шкідливих факторів нагромаджується критична маса токсичної чи шкідливої речовини (газу, пари, пилу) а також якщо в ньому проходять поступові зміни фізіологічних функцій окремих органів системи (шум, вібрація, мікроорганізми, фізичні чи емоційні перевантаження).

Період нагромадження цих змін до моменту прояву називають періодом прихованого розвитку професійного захворювання. Він може складати 1-2 або навіть 20-30 років. При використанні на виробництві професійних заходів. Професійні захворювання можуть не проявитися протягом усього стажу роботи.

У випадку встановлення у працівника професійного захворювання йому можуть назначити допомогу по тимчасовій непрацездатності, пенсію по інвалідності, а також може розглядатися питання про компенсацію підприємством збитків здоров'ю.

5.1.2. Основні причини травматизму в харчовій галузі. Динаміка травматизму

Харчова промисловість України характеризується широкою різноманітністю умов виробництва і праці у зв'язку з чим характер травм і професійних захворювань на різних підприємствах неоднаковий. За період з 2005 по 2015 травми отримали понад 10 тис. працівників галузі, з яких близько 600 – із летальними наслідками.

До найбільш травмонебезпечних виробництв харчової галузі відносяться хлібопекарські та цукрові заводи, на яких стається більше 50% травм із смертельними наслідками. За даними Державного комітету статистики на підприємствах харчової промисловості біля 14% нещасних випадків

обумовлено технічними причинами, до 35% організаційно-технічними і більше 50% – організаційними.

В свою чергу до основних організаційних причин нещасних випадків відносяться: незадовільна організація, відсутність нагляду за проведенням робіт, незадовільне утримання і недоліки в організації робочих місць, допуск до роботи ненавчених або не проінструктованих працівників, невикористання засобів індивідуального захисту у зв'язку з їх відсутності або невідповідності умов праці, порушення трудової та виробничої дисципліни, експлуатація несправного технологічного обладнання, порушення правил руху внутрішньо цехового або внутрішньо заводського транспорту, недостатня оперативність надходження даних, відсутність комплексної системи обліку, аналізу та прогнозування випадків травматизму.

Наведені дані свідчать, що значна частина нещасних випадків є наслідком недбалого ставлення до вимог охорони праці як самих працівників, так і керівників різних рівнів.

В цьому контексті представляють інтерес дані українських дослідників, відповідно до яких, серед осіб які допустили порушення законодавства про охорону праці на підприємствах харчової галузі, що привело до нещасного випадку, 52% складають керівники.

За таких обставин досягти належного рівня безпеки праці можливо лише при умові, що кожен учасник трудового процесу усвідомить важливість виконання вимог охорони праці.

В продовж останніх десятиліть спостерігається поступове зниження кількості нещасних випадків як в промисловості України загалом так і в харчовій галузі зокрема.

Проте одночасно із даним зниженням кількості нещасних випадків спостерігається поступове зростання тяжкості травматизму збільшується кількість людино-днів непрацездатності з розрахунку на 1000 працівників.

Також прослідковується тенденція щорічного збільшення кількості летальних нещасних випадків: відносний коефіцієнт смертності $K_{вс}$ в

харчовій промисловості за останнє десятиріччя зріс майже вдвічі – від 1,6 у 2004р. до 3,0 у 2013р. Тобто нещасні випадки стають все більш небезпечними.

За даними Державного комітету статистики харчова галузь продовжує входити в п'ятірку найбільш травмонебезпечних галузей України.

Одним із основних напрямків покращення стану охорони праці є заміна застарілого обладнання, застосування сучасних та безпечних для працівників технологічних процесів.

5.1.3. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів підприємств харчової промисловості

Вплив шкідливих факторів на працюючих в певних умовах приводить до травми або іншого різкого погіршення здоров'я, а небезпечних до захворювання або зниження працездатності.

Фактори відрізняються не тільки кінцевими, несприятливими для людини результатами, що залежать від рівня виробничого фактора, але і тривалістю дії. Для небезпечного фактора характерна миттєва, а для шкідливого – довготривала дія, але в ряді випадків шкідливі наслідки, викликані короткотривалою дією шкідливого фактора розглядаються на рівні з травмами, розслідуються і обліковуються як небезпечні випадки на виробництві. До них відносяться: гострі отруєння, теплові удари, обмороження а також ураження блискавкою на виробництві.

Вплив на людину шкідливого фактора може привести до травми, наприклад: одноманітна праця, через одноманітні операції настає втома, що приводить до зниження працездатності і уваги. Останнє в травмонебезпечних ситуаціях може привести до невчасно прийнятого правильного або прийняття неправильного рішення і закінчитись травмою.

За природою дії шкідливі і небезпечні фактори поділяють на фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні.

Фізичні фактори:

- 1) рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи обладнання, рухомі вироби, заготовки і матеріали;
- 2) підвищена або знижена температура поверхні обладнання, матеріалів повітря робочої зони;
- 3) вологість і рухомість повітря;
- 4) небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі;
- 5) підвищений рівень шуму, вібрації, інфрачервоного і ультразвуку;
- 6) підвищення або нестача природного освітлення, відсутність світла, недостатнє освітлення робочої зони, підвищена яскравість світла, блиск, підвищена пульсація світлового потоку;
- 7) гострі краї, шорсткості на поверхні обладнання, інструмента заготовок;
- 8) розміщення робочих місць на значній висоті від підлоги;
- 9) підвищений рівень УФ і ІЧ радіації;
- 10) електромагнітні випромінювання, статична електрика;
- 11) підвищена напруга електромагнітних полів;
- 12) підвищена або знижена іонізація повітря;
- 13) підвищений рівень іонізуючого випромінювання в робочій зоні;
- 14) підвищений або знижений барометричний тиску в робочій зоні і його різка зміна.

Для хлібопекарних, макаронних, кондитерських, цукрових, бродильних виробництв найбільш характерні шкідливі і небезпечні фактори 1-12. Наприклад: на хлібо заводах в багатьох випадках зовнішня поверхня печей перевищує температуру допустиму за санітарну норму 45°C, а температура газовідвідних каналів і труб через відсутність ізоляції становить 55-245 °. В приміщеннях багатьох підприємств виділяється пара. Температура повітря в літній час в ряді випадків на робочому місці складає 30 - 38°. Печі є джерелом ІЧ радіації.

Хімічні фактори. Речовини, які проникають в організм людини через дихальні шляхи, шкіру чи травну систему можуть виявляти: загально

токсичну; подразнюючу слизові носа, рота, очей; алергічну; мутагенну дію; впливати на репродуктивну функцію людини.

На виробництвах харчової промисловості фактори цієї групи мають достатньо широке розповсюдження при технічних процесах: видалення сірчаного газу, оксидів азоту з печей, диму і шкідливих речовин при підгорянні масла або продукції, CO₂ при обмороженні та інші.

Біологічні фактори. Поділяються на хвороботворні мікроорганізми і макроорганізми перші проникають в вигляді бактерій, вірусів, риккетсій, бактеріоподібні нерухомі організми що викликають інфекційні захворювання, спірохет, грибів і найпростіших.

Мікроорганізми поділяють на організми рослинного, і тваринного походження. Ці фактори зустрічаються в цукрових, хлібопекарських і бродильних виробництвах.

Психофізіологічні фактори. Поділяють на фізичні і нервово-психологічні перевантаження; перші включають статичні, динамічні, навантаження гіподинамію. М'язові статичні навантаження особливо погано впливають на працездатність. Вони поділяються на легкі (людина у вільній позі), середні (якщо вимушена поза складає 10-25% часу зміни), тяжкі (вимушена поза 50%) і дуже тяжкі > 50%. Психоневрологічні перевантаження поділяють на розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження.

5.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

5.2.1. Планування заходів з питань цивільного захисту на підприємствах харчової та переробної промисловості

Планування заходів захисту об'єкта – це розроблення сукупності документів, у яких визначені сили і засоби, порядок і послідовність дій з метою забезпечення захисту населення, виробництва, а також виконання

завдань вищих органів, пов'язаних із поданням допомоги населенню інших об'єктів і міст.

Планування заходів з питань цивільного захисту на підприємствах харчової та переробної промисловості проводиться у тій же послідовності, що й на будь яких інших об'єктах народного господарства.

На підприємства мають бути розроблені два плани: на воєнний та мирний час.

План цивільного захисту на воєнний час – це документи, які визначають організацію і порядок переведення об'єкта з мирного на воєнний час і ведення цивільного захисту в початковий період війни.

План цивільного захисту на мирний час – це документи, які визначають організацію і порядок виконання заходів цивільного захисту з метою запобігання або зменшення можливих втрат від важких виробничих аварій, катастроф, і стихійних лих, а також ведення рятувальних та інших невідкладних робіт при їх виникненні.

Методика розроблення планів.

Необхідно зібрати вихідні документи, що будуть використані при розробці документів плану цивільного захисту об'єкта: директивні документи Президента; Верховної Ради; Уряду України; витяг із рішення керівника цивільного захисту району про організацію і ведення цивільного захисту на території району; дані про кількість формувань, їх особовий склад, які потрібно створити на даному об'єкті; витяг із плану прийому і розміщення евакуйованого населення; витяг із наряду райвійськкомату на постачання техніки у збройні сили у зв'язку з мобілізацією; окремі розпорядження керівника цивільного захисту району; документи, які характеризують господарство і населений пункт.

Розробка плану відбувається у три етапи в певній послідовності.

Перший етап – підготовчий, протягом якого визначається склад виконавців і затвердження їх, підготовка виконавців до роботи, доведення до них директив, рекомендацій та інших документів, узагальнення й аналіз

вихідних даних, необхідних для розробки плану ЦЗ, визначення обсягу робіт і розподіл обов'язків між виконавцями та закріплення відповідальних за розділами плану.

Для планування, підготовки і проведення заходів евакуації має бути інформація, щоб забезпечити відповіді на такі запитання: чисельність працюючих відвідувачів, обслуговуючого персоналу на даному об'єкті, всього населення у населеному пункті; час доби, коли буває найбільше скупчення людей у приміщеннях; розміщення людей у приміщеннях; стан входів, аварійних виходів; наявність і стан входів для пожежників, міліції, поліції, внесення технічних засобів; труднощі, які треба враховувати під час евакуації людей (вузькі проходи, сходи, непрацюючі ліфти та ін.); Планування евакуації має передбачати виникнення найбільш несприятливих ситуацій під час підготовки і проведення евакуації: відсутність відповідних керівників, транспорту, електрозабезпечення, погані погодні умови, аварія на дорозі, паніка серед людей та ін.

Другий етап – практична розробка, оформлення документів. Заходи, які плануються в документах плану, мають бути спрямовані на виконання завдань ЦЗ в надзвичайних ситуаціях.

У документах плану визначають заходи, які потрібно виконати в мирний час, при загрозі виникнення надзвичайних ситуацій, несподіваному нападі противника, стихійних лихах, виробничих аваріях, катастрофах і при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, проведенні рятувальних та інших невідкладних робіт, а також характер і порядок дій формувань, зміст і обсяг робіт, строки виконання заходів з урахуванням конкретних умов і можливостей даного об'єкта.

Заходи, які потребують капітальних затрат і матеріально-технічних засобів, також мають бути висвітлені в цих планах.

До них належать: будівництво протирадіаційних укриттів, пункту управління, забійних площадок і пунктів, площадок ветеринарної обробки сільськогосподарських тварин; придбання засобів для герметизації

тваринницьких ферм, складських приміщень і колодязів; систем зв'язку і оповіщення; придбання майна для формувань, спеціальної техніки, необхідної формуванням для проведення рятувальних та інших невідкладних робіт, автономних джерел електроенергії.

Оскільки заходи потребують матеріальних затрат, вони повинні здійснюватися у комплексі з іншими економічними заходами, через що їх необхідно включити в поточний і перспективний план об'єкта, де вони будуть забезпечені коштами.

За даними оцінки можливої обстановки, що може скластися на об'єкті, керівники об'єкта планують заходи підвищення стійкості роботи об'єкта. Всі пропозиції, пов'язані із затратами, необхідно документально обґрунтувати з поданням відповідних заявок із кошторисами в місцеві, районні, обласні органи управління ЦЗ, а якщо необхідно то у відповідні міністерства, відомства.

Планування таких заходів, як підготовка і забезпечення майном формувань, навчання керівного особового складу формувань, працюючих, організація зв'язку і оповіщення, створення навчально-матеріальної бази та ін., проводиться за рахунок коштів об'єкта.

Третій етап – узгодження розроблених планів із відділом ЦЗ району, з районним агропромисловим управлінням, адміністрацією населеного пункту, службами ЦЗ району, після цього затвердження документів плану ЦЗ. Зміст плану цивільного захисту об'єкту узгоджується з вимогами плану ЦЗ району, що підтверджує начальник відділу з питань цивільного захисту населення району, після чого план затверджує керівник ЦЗ об'єкта.

5.2.2. Зони ураження під час техногенних вибухів. Методи розрахунку характеристик зон ураження

До вибухонебезпечних об'єктів відносять виробництва вибухових речовин (ВР), нафтопереробні підприємства, млинарські комбінати та

елеватори, деревообробні та інші підприємства, що використовують або виробляють горючі речовини та матеріали.

Аварії на таких об'єктах, як правило, супроводжуються вибухами. Під вибухом розуміється процес звільнення великої кількості енергії за короткий проміжок часу. В результаті вибуху речовина перетворюється в сильно нагрітий газ з дуже високим тиском, що впливає на навколишнє середовище, повітря, викликаючи його рух, і утворення чинників, що уражають. Тому вони називаються уражаючими факторами.

Основний уражаючий фактор вибуху – це повітряна ударна хвиля (УХ). Ударна хвиля – це зона сильно стислого повітря, називається фронт ударної хвилі, що розповсюджується в усі боки від центру вибуху з надзвуковою швидкістю (більше 330м/с).

Основним параметром УХ, що визначає її руйнівну дію, є надмірний тиск у фронті УХ. Надмірний тиск ΔP_{ϕ} – це різниця між максимальним тиском у фронті хвилі (P_{ϕ}) і атмосферним тиском перед фронтом (P_0):

$$\Delta P_{\phi} = P_{\phi} - P_0, \text{кПа.}$$

Одиниці виміру ΔP_{ϕ} в системі СІ – паскаль (Па).

На рисунку 5.1. показано характер зміни тиску повітря в часі при проходженні ударної хвилі.

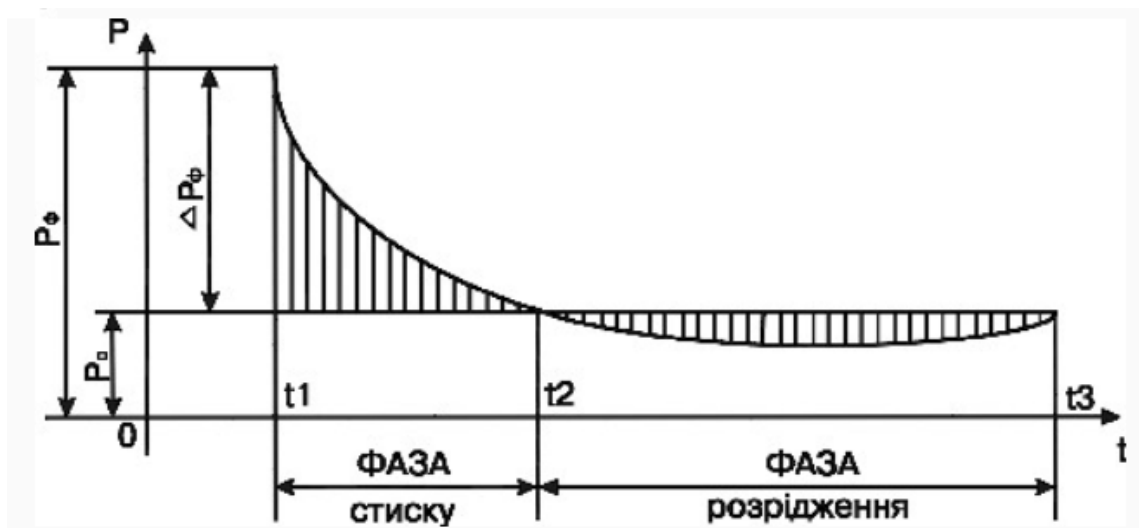


Рисунок 5.1. Зміни тиску повітря при проходженні ударної хвилі

Надмірний тиск у даній точці залежить від відстані до місця (центру) вибуху, маси продукту вибуху (потужності вибуху) та інших чинників.

Повітряна ударна хвиля уражає людей, руйнує або пошкоджує будинки і споруди, обладнання і техніку. У незахищених людей в залежності від величини надмірного тиску можливі травми різного ступеню, характеристики яких наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Характеристика травм незахищених людей в залежності від надмірного тиску ударної хвилі

ΔP_{ϕ} , кПа	Ступені травм	Характер ураження
20-40	Легкі	Легка загальна контузія організму, тимчасова втрата слуху, забиті місця
40-60	Середні	Серйозні контузії, пошкодження органів слуху, кровотеча з носа і вух, сильно забиті місця
60-100	Важкі	Сильна контузія всього організму, пошкодження внутрішніх органів і мозку, важкі переломи кінцівок
>100	Вкрай важкі	Від отриманих травм більшість людей гине

Будинки, споруди, обладнання внаслідок дії УХ можуть бути пошкоджені або зруйновані. В залежності від надмірного тиску ΔP_{ϕ} , типу, розмірів та інших чинників можуть отримати слабе, середнє, сильне або повне руйнування.

Внаслідок вибуху під впливом уражаючих факторів на місцевості утворюється осередок ураження. Межа осередку ураження пролягає через точки на місцевості, де надмірний тиск УХ становить 10 кПа. Форма осередку на рівнинній місцевості – коло (рис. 5.2.).

Радіуси осередку ураження і зон руйнувань залежать від потужності вибуху (маси продуктів вибуху Q).

В залежності від ступеня руйнування виробничих будинків і обсягу необхідних рятувальних і аварійно-відновлюваних робіт осередок ураження ділиться на IV зони: повних, сильних, середніх та слабких руйнувань.

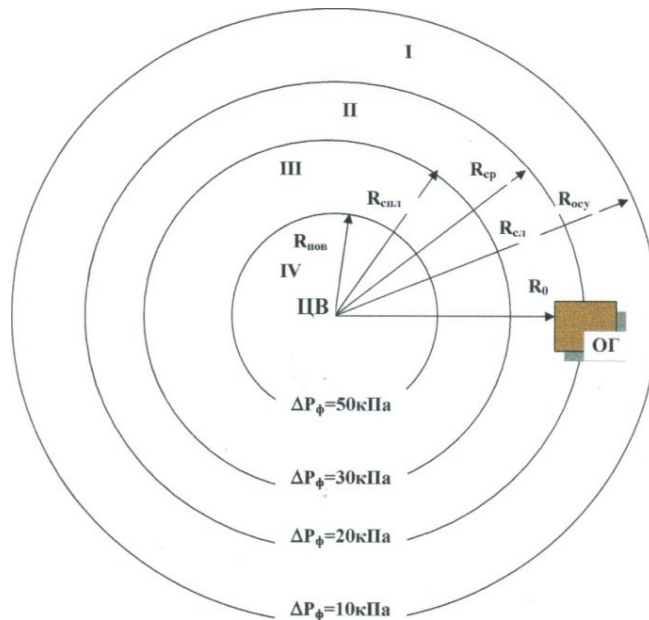


Рисунок 5.2. Форма осередку ураження при вибуху

ОГ – об'єкт господарювання; ЦВ – центр вибуху.

I Зона слабких руйнувань – від 10 до 20кПа. Слабкі руйнування будівель. II Зона середніх руйнувань утворюється там, де надмірний тиск від 20 до 30кПа, будівлі і споруди мають середній ступінь руйнувань.

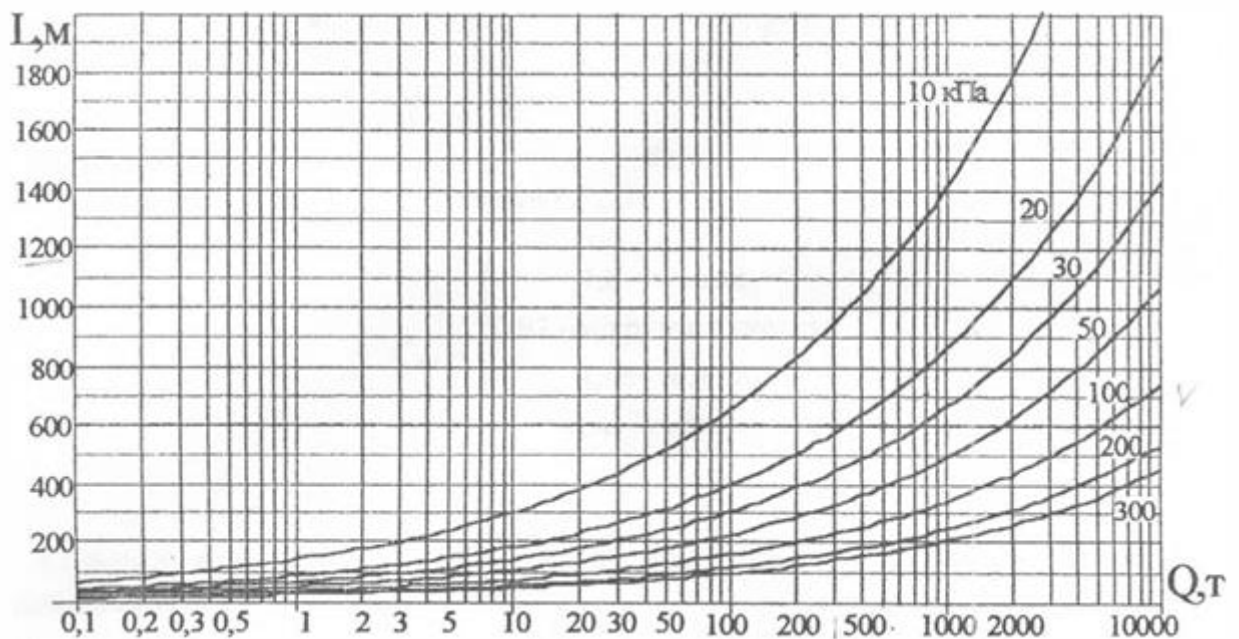


Рисунок 5.3. Графік залежності надмірного тиску від кількості тротилу і відстані до центру вибуху.

Дерев'яні споруди повністю руйнуються. III Зона сильних руйнувань характеризується сильними руйнуваннями будинків і споруд, утворенням місцевих завалів і розповсюджується на територію, де надмірний тиск від 30 до 50кПа. IV Зона повних руйнувань характеризується надмірним тиском у фронті УХ 50кПа і більше. Будинки, споруди, обладнання в зоні повністю руйнуються, утворюю суцільні завали.

Визначення параметрів осередку ураження (радіусів зон руйнувань) здійснюється за допомогою Графіка залежності надмірного тиску від кількості тротилу і відстані до центру вибуху (рис. 5.3.).

Висновки

На основі проведеного аналізу експлуатаційних характеристик хлібопекарної печі ПХС-25М та обробки вихідних технічних даних запропоновано заходи з модернізації даного обладнання, спрямовані на підвищення техніко-економічних показників продуктивності підприємства.

Проведені розрахунки підтвердили доцільність зміни конструкції вузла приводу конвеєра печі ПХС-25М. Запропонована модернізація передбачає встановлення додаткового вала конвеєра та збільшення довжини ланцюгового конвеєра з люльками, що забезпечує більшу пропускну здатність та покращує технологічний процес подачі заготовок у пекарну камеру.

Встановлено, що проведені конструктивні зміни сприяють не лише підвищенню ефективності роботи печі, але й збільшують її надійність, що дозволяє зменшити час простоїв обладнання під час ремонтних робіт.

Отримано результати розробки проектно-технічних і технічних рішень модернізації печі ПХС-25М.

Отримано математичну модель процесу тепло- і масопередачі у пекарній камері печі ПХС-25М, проведено її розрахунок та виконано аналіз отриманих результатів, що дозволяє оцінити ефективність запропонованих конструктивних змін та визначити оптимальні режими роботи печі.

Перелік посилань

1. Карпюк Т. Напрямки вдосконалення обладнання харчової промисловості // Матеріали VIII Міжнародної студентської конференції „Природничі та гуманітарні науки“, Тернопіль, 24-25 квітня 2025 року. 2025. С. 359.
2. Черненко Н., Десик М., Теличкун В. Аналіз ефективності використання теплової енергії в хлібопекарських печах : матеріали конференції «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», 10–11 квітня 2014 р. – К., НУХТ, 2014. – С. 43–45. eNUFTIR
3. Ковальов О. В., Беседа С. Д. Обґрунтування раціональних режимів роботи хлібопекарських печей : матеріали конференції..., 2012. – 167 с. eNUFTIR
4. I. Stadnyk, V. Piddubnyi, O. Kolomiets, A. Chahaida, O. Kravets et. al. (2025). Determining the influence of drum mixer parameters on the change in dough components concentration at the initial mixing stage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2 No. 11(134), 6–15.
5. Баб'як В., Кравець О. Моделювання руху зерна пшениці у процесі очищення в барабані трієра марки БТХМ-2. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті : матеріали 91-ї Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів (Київ, 7–11 квітня 2025 р.). Київ : НУХТ, 2025. Ч. 2. С. 19.
6. Shynkaryk, M., Kravets, O., & Venhrynovych, S. (2021). Features of pressing the juice from viburnum berries. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 101(1), 94-101.
7. Piddubnyi, V., Stadnyk, I., Kravets, O., Chahaida, A., Hushtan, T., Kahanets-Havrylko, L., ... & Rozbytska, T. (2023). Characteristics of mucous-forming polysaccharides extracted from flax seeds. *Slovak Journal of Food Sciences/Potravinarstvo*, 17(1).

8. Kravets, O., Shynkaryk, M., & Kravets, V. (2024). Improvement of environmental sustainability of milk processing enterprises. Вісник Тернопільського національного технічного університету, 114(2), 111-118.

9. Лобур Д.Ю. Шляхи зниження енергоємності процесів сушіння дисперсних матеріалів / Д.Ю. Лобур, О.І. Кравець // зб. тез доп. XIII Міжн. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2024 р. Тернопіль : ТНТУ, 2024. С. 335-336.

10. Крупа В.В. Кваліфікаційна робота магістра: структура, вимоги до виконання та захист: Методичні рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування галузі знань 13 Механічна інженерія для здобувачів всіх форм здобуття освіти. Крупа В.В. та ін. Тернопіль, ТНТУ, 2023р. 66с

11. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

12. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В.Я. Ворощук, Т.М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.

Додатки

Специфікації