

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет) \_\_\_\_\_ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ технологічного обладнання та комп'ютерних технологій  
проектування \_\_\_\_\_

«До захисту в ЕК»  
Директор інституту(декан факультету)  
\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Микола ЯКИМЧУК \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 133 «Галузеве машинобудування» \_\_\_\_\_  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми \_\_\_\_\_ Інжиніринг харчових виробництв \_\_\_\_\_  
на тему: Удосконалення конструкції печі підлогового типу для випікання хліба на  
крафтовому виробництві Common kitchen з покращенням якості продукції

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ОХ-2-2М

\_\_\_\_\_ Карпенко Ігор Русланович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Люлька Дмитро Миколайович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ - 2025 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.Гулого  
Кафедра Технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування  
Освітній ступінь магістр  
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»  
(шифр і назва)  
Освітня програма «Інжиніринг харчових виробництв»  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТОКТП  
проф. Микола ЯКИМЧУК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ року

## **ЗАВДАННЯ** НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Карпенка Ігора Руслановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Удосконалення конструкції печі підлогового типу для випікання хліба на крафтовому виробництві Common kitchen з покращенням якості продукції

керівник проекту (роботи) Люлька Дмитро Миколайович, доц., кандидат тех. наук  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» вересня 2025 р. № 712-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 01.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Технічний паспорт обладнання.

2. Альбом галузевого обладнання. 3. Навчальна та спеціальна література

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат; Зміст; Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів (за необхідністю); Вступ; Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування основного напрямку дослідження; Розробка нового технічного рішення об'єкта дослідження; Дослідна частина та узагальнення результатів; Розрахункова частина; Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування; Заходи з охорони праці та охорони довкілля; Маркетингове обґрунтування проекту; Висновки; Список використаних джерел; Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
Загальний вигляд обладнання – 2 аркуші; Деталі та вузли обладнання – 2 аркуші;  
Технологічна карта збирання вузла – 1 аркуш, Наукова частина – 5 аркушів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 18.09.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	06.10.2025 р.	
2	<i>Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування основного напрямку дослідження</i>	06.10.2025 р.	
3	<i>Розробка нового технічного рішення об'єкту дослідження</i>	07.10.2025 р.	
4	<i>Дослідна частина та узагальнення результатів</i>	13.10.2025 р.	
5	<i>Розрахункова частина</i>	20.10.2025 р.	
6	<i>Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування</i>	27.10.2025 р.	
7	<i>Заходи з охорони праці та охорони довкілля</i>	03.11.2025 р.	
8	<i>Маркетингове обґрунтування проекту</i>	10.11.2025 р.	
9	<i>Висновки</i>	17.11.2025 р.	
10	<i>Список використаних джерел</i>	17.11.2025 р.	
11	<i>Додатки</i>	17.11.2025 р.	
12	<i>Графічна частина формату А1 – 10 шт.</i>	24.11.2025 р.	
13	<i>Подача кваліфікаційної роботи на кафедрі</i>	01.12.2025 р.	

Здобувач

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Карпенко І. Р.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Люлька Д. М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Удосконалення конструкції печі підлогового типу для випікання хліба на крафтовому виробництві Common kitchen з покращенням якості продукції» присвячена вирішенню актуального завдання.

Об'єктом модернізації обрано піч підлогового типу для випікання хліба в умовах крафтового виробництва.

В основу модернізації покладено інженерне рішення щодо удосконалення механізму обертання візка печі, а також зміни теплового і паровологосного режиму випічки, внаслідок чого поліпшується якість виробів і підвищується продуктивність печі.

Крім цього, запропоновано розділити процес випічки хліба на етапи з використанням проміжного вакуумно-випарного охолодження, збільшенням або зменшенням тривалості проміжних процесів, що дозволяло б робити технологію гнучкішою, і в той же час не знижувало б якість випеченого хліба.

Пояснювальна записка структурована згідно з вимогами та містить маркетингове обґрунтування проекту, аналітичний огляд сучасного об'єкта дослідження, методику проведення досліджень та узагальнення їх результатів. Детально описано будову та принцип дії модернізованої печі, розроблено схему складання вузла, а також обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів.

Окремі розділи роботи присвячені питанням монтажу та технічного сервісу обладнання, автоматизації технологічного процесу, а також заходам з охорони праці та охорони довкілля. Проведено необхідні інженерні розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції.

<i>Відповідальна організація</i> <b>МОНУ</b>	<i>Технічне узгодження</i> <b>Люлька Д.М.</b>	<i>Вид документа</i> <b>Пояснювальна записка</b>		<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> <b>НУХТ</b>	<i>Розробник документа</i> <b>Карпенко І.Р.</b>	<i>Удосконалення конструкції печі підлогового типу для випікання хліба на крафтовому виробництві Common kitchen з покращенням якості продукції</i>		<b>24.024.8.КР.15.000.ПЗ</b>			
<b>ОХ-2-2М</b>	<i>Документ затверджено</i> <b>Якимчук М.В.</b>			<i>Інд.</i>	<i>Дата видання</i> <b>30.11.25</b>	<i>Мова</i> <b>UA</b>	<i>Аркуш</i> <b>1/125</b>

Загальний обсяг пояснювальної записки становить 127 сторінок друкованого тексту формату А4.

Графічна частина проєкту представлена на 10 аркушах формату А1, виконаних у системі автоматизованого проєктування.

Вона включає кресленики загального вигляду хлібопекарної печі, модернізованих вузлів, технологію машинобудування, а також графічну інтерпретацію результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу випікання хліба шляхом конструктивного удосконалення обладнання.

Об'єктом дослідження є процес випікання хліба у печах підлогового типу для випікання хліба періодичної дії.

Предметом дослідження є конструктивне удосконалення обладнання з обґрунтуванням доцільності його використання на підприємствах хлібопекарної промисловості.

*Ключові слова:* хлібопекарна піч, хліб, випікання, охолодження, крафтове виробництво.

## *ABSTRACT*

The Master's qualification thesis on the topic «Improvement of the Design of a Deck-Type Oven for Baking Bread in a Craft Production Environment (Common Kitchen) with Improved Product Quality» is dedicated to solving a relevant task.

The object chosen for modernization is a deck-type oven for baking bread in the conditions of craft production.

The modernization is based on an engineering solution to improve the mechanism for rotating the oven's trolley, as well as changing the thermal and steam-humidity baking regime, as a result of which the quality of the products is improved and the oven's productivity is increased.

In addition, it is proposed to divide the bread baking process into stages using intermediate vacuum-evaporative cooling, increasing or decreasing the duration of intermediate processes, which would allow the technology to be more flexible, while not reducing the quality of the baked bread.

The explanatory note is structured according to the requirements and contains the marketing justification of the project, an analytical review of the current object of study, the methodology for conducting research, and a generalization of their results. The design and principle of operation of the modernized oven are described in detail, an assembly diagram of the unit is developed, and the choice of structural materials is justified.

Separate sections of the work are devoted to the issues of installation and technical service of the equipment, automation of the technological process, as well as measures for labor protection and environmental protection. The necessary engineering calculations confirming the operability of the structure have been carried out.

The total volume of the explanatory note is 127 pages of printed text in A4 format.

The graphic part of the project is presented on 10 sheets of A1 format, executed in an automated design system. It includes drawings of the general view of the bakery oven, modernized units, mechanical engineering technology, as well as a graphic interpretation of the results of theoretical and experimental research.

The purpose of the study is to increase the efficiency of the bread baking process through the constructive improvement of the equipment.

The object of the study is the process of baking bread in periodic-action deck-type ovens for baking bread.

The subject of the study is the constructive improvement of the equipment with justification of the feasibility of its use at bakery industry enterprises.

Keywords: bakery oven, bread, baking, cooling, craft production.

## ***ЗМІСТ***

	стор.
Вступ	6
1. Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження	7
2. Розробка нового технічного рішення об'єкту дослідження	35
3. Методика проведення досліджень	41
4. Дослідна частина та узагальнення результатів	60
5. Обґрунтування модернізації. Будова та принцип роботи модернізованого об'єкту проектування	68
6. Розрахункова частина	72
7. Підбір конструкційних матеріалів	93
8. Технологія машинобудування	96
9. Правила монтажу та технічного сервісу модернізованого обладнання	100
10. Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування	103
11. Заходи з охорони праці	107
12. Охорона довкілля	111
13. Маркетингове обґрунтування проекту	115
Висновки	120
Список використаних джерел	121
Додатки	126

## *ВСТУП*

Хлібопекарська промисловість належить до соціально значущих галузей народного господарства України, оскільки забезпечує населення країни основним харчовим продуктом.

Хлібопекарські печі є головним обладнанням кожного хлібозаводу, власне робота печей визначає не тільки асортимент та якість продукції, але й значною мірою впливає на економічні показники підприємства. В тепловому балансі хлібозаводу від 40 до 50% палива витрачається на хлібопекарські печі та 20...30% — на зволоження середовища пекарської камери, тому витрати палива на хлібозаводі значною мірою залежать від роботи хлібопекарських печей.

Нині через значне падіння обсягів виробництва хліба та хлібобулочних виробів в країні, порівняно з 90-ми роками, більшість хлібопекарських печей вимушено експлуатуються в одно- або двозмінному режимі, через що середній коефіцієнт їх використання в промисловості знизився до 0,2...0,5. Суттєве скорочення активного часу роботи печей призводить до значних витрат тепла на підтримання їх в «гарячому» режимі під час простою, особливо це стосується печей з цегляною обмурівкою. За статистичними даними, на харчових підприємствах країни на так звані «перехідні» режими щорічно витрачається в промисловості близько 45% палива від загальних витрат його на випікання хліба та хлібобулочних виробів.

Нині наявний парк хлібопекарських печей в країні становить понад 2000 промислових печей різних типів, марок і модифікацій, з них близько 400 одиниць — це печі з тунельною пекарською камерою в каркасному виконанні, решта — переважно з тупиковою пекарською камерою в цегляній обмурівці (близько 80%), а також ярусні, ротаційні та інші.

## **1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ**

**Огляд літературних джерел, аналіз прогресивних технологічних і конструктивних рішень.** Випікання є особливим процесом прогрівання вологого колоїдного капілярно-пористого матеріалу — тіста. Головним фізичним фактором процесу, що відбувається при випіканні, є перенесення теплоти і вологи в тісті-хлібі. Перенесення теплоти у вологих матеріалах нерозривно пов'язане з перенесенням вологи в них, а перенесення вологи в цих матеріалах пов'язане з перенесенням тепла. Ці два процеси тепломасообміну, що відбуваються одночасно, впливають один на одного і відношення їх визначає хід технологічного процесу. Режим випікання визначається механічним переміщенням тепла і вологи всередині тіста-хліба, що випікається. Теорія перенесення тепла і вологи в процесі випікання дає можливість обґрунтувати оптимальні режими випікання і є основною при вдосконаленні і створенні нових конструкцій печей.

Основи теплофізичної теорії процесу випікання розроблені А.С. Гінзбургом і базуються на сучасному вченні тепломасообміну, що створене академіком А.В. Ликовим і його школою. Перші роботи по вивченню теплофізичних процесів при випіканні хліба проведені Н.І. Краснопевцевим, Л.Я. Ауерманом, Ф.Г. Шумаєвим і І.І. Маклюковим, А.С. Гінзбургом, А.А. Міхелевим, А.В. Володарським. Випікання є заключним етапом технологічного процесу виробництва хліба; на його протікання суттєвий вплив здійснюють попередні стадії процесу, що залежать від властивостей шматків тіста, що підлягають випіканню. В процесі випікання значну роль відіграє термовологопровідність, що зумовлена порівняно великою величиною теплового напруження поверхні хліба; тому в ньому створюється значний температурний градієнт. Саме це явище визначає специфічний характер тепломасообміну при випіканні, що являє собою особливий варіант прогрівання вологого матеріалу (тіста).

Основний закон перенесення речовини запишеться так:

$$j = x \cdot grad\Theta, \quad (1.1)$$

де  $j$  - густина потоку речовини, тобто маса речовини  $M$ , що переноситься через одиницю ізопотенціальної поверхні  $\Delta S$ :

$$j = \frac{dM}{d\tau \cdot \Delta S}, \quad (1.2)$$

$grad\Theta$  - градієнт потенціалу речовини, в одиницях потенціалу/М;

$x$  - коефіцієнт пропорційності, названий А.В. Ликовим коефіцієнтом масопровідності в кг/М.с. од. потенціалу.

Коефіцієнт  $x$  аналогічний коефіцієнту теплопровідності у відомому законі Фур'є:

$$q = -\lambda \cdot gradt \quad (1.3)$$

Градієнт речовини  $grad\Theta$  аналогічний градієнту температури  $gradt$  і пропорційний градієнту тиску пари (при дифузійному перенесенні пари), або градієнту капілярного потенціалу (при молярному переміщенні капілярної вологи), або градієнту осмотичного тиску (при дифузійному перенесенні осмотично поглинутої вологи). При теплообміні, що ускладнюється масообміном, закон теплопровідності записується так:

$$q = -\lambda \cdot gradt + Jj, \quad (1.4)$$

де  $q$  - густина сумарного потоку теплоти, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності вологого матеріалу, Вт/М·К;

$gradt$  - градієнт температури, К/м;

$j$  - густина сумарного потоку вологи, що переміщується всередині тіла, кг/м<sup>2</sup>·С;

$J$  - приведена ентальпія вологи, що переміщується всередині тіла, кДж/кг.

Рух вологи може відбуватися у вигляді молекулярного перенесення пари ( $j_n$ ) і у вигляді перенесення рідини ( $j_p$ ), що обумовлене перепадом

потенціалу вологи, який виникає за рахунок створення в матеріалі градієнта температури:

$$j = j_n + j_p = -a \cdot \rho_0 \cdot \text{grad}U - a \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot \text{grad}t \quad (1.5)$$

тоді:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t - J_n \cdot a \cdot \rho_0 \cdot \text{grad}U - J_p \cdot a \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot \text{grad}t, \quad (1.6)$$

де  $J_n$  - ентальпія вологи, що переміщується всередині тіла у вигляді пари, кДж/кг;

$J_p$  - ентальпія рідини, кДж/кг;

$a$  - коефіцієнт температуропровідності (потенціалопровідність) матеріалу, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_0$  - вага абсолютно сухого матеріалу в одиниці об'єму вологого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  - коефіцієнт термовологопровідності, %/град.

або:

$$q = -(\lambda + a \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot J_p) \cdot \text{grad}t - a \cdot \rho_0 \cdot J_n \cdot \text{grad}U, \quad (1.7)$$

А.С. Гінзбургом отримано диференціальне рівняння внутрішнього теплообміну у вологому матеріалі при перенесенні вологи у вигляді рідини в постійних термовологокоефіцієнтах в процесі випікання:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{\Delta J}{C_{np}} \frac{dU}{d\tau} \quad (1.8)$$

де  $\Delta J$  - різниця ентальпій, величина якої визначає ефект внутрішнього теплообміну, обумовленого перенесенням вологи у вигляді рідини в кДж/кг;

$C_{np}$  - приведена теплоємність матеріалу, кДж/кг;

$$C_{np} = C_{c.p.} + C_p U = C_{c.p.} + C_p \frac{W^c}{100} \quad (1.9)$$

де  $C_{c.p.}$  - теплоємність сухої речовини матеріалу, кДж/кг;

$C_p$  - теплоємність рідини, кДж/кг;

$$U = \frac{W^c}{100} - \text{вологовміст матеріалу, кг/кг.}$$

При теплообміні, що ускладнений масообміном за рахунок часткового або повного перенесення вологи у вигляді пари, А.В. Ликов вводить в диференціальне рівняння критерій фазового перетворення  $\varepsilon$ . Цей критерій характеризує відносну зміну потоку речовини (вологи) шляхом фазового перетворення (внутрішнє пароутворення або конденсація):

$$\frac{dt}{d\tau} = a\nabla^2 t + \varepsilon \frac{r}{C_{np}} \frac{dU}{d\tau} \quad (1.10)$$

де  $r$  - прихована теплота пароутворення, кДж/кг.

$$\varepsilon = \frac{j_n}{j} \quad (1.11)$$

де  $j_n$  - густина потоку пари, кг/м<sup>2</sup>с.

$j_p$  - густина сумарного потоку вологи, кг/м<sup>2</sup>с.

Диференціальні рівняння (1.8) та (1.10) є частковим випадком загального рівняння перенесення теплоти у вологому матеріалі, що враховує всі можливі види перенесення теплоти.

Вологий матеріал являє собою пористе тіло, що складається із твердого скелету, вологи та повітря. Внутрішній теплообмін (перенесення теплоти) в такому тілі може здійснюватися теплопровідністю через твердий скелет тіла і повітря, що знаходиться в порах, конвекцією і випромінюванням між стінками пор, а також за рахунок внутрішнього масообміну (перенесення вологи у вигляді рідини та пари) при наявності джерел і стоків теплоти (внутрішня конденсація пари і випаровування рідини).

Перенесення теплоти в тісті-хлібі в перший період в основному обумовлюється теплопровідністю твердого скелету зразка і у певній мірі переміщенням вологи із поверхневих шарів всередину хліба.

При випіканні хліба в перший період процесу волога переміщується в певній мірі від поверхні всередину, а у другому періоді поле вологості

м'якуша близьке до стаціонарного і волога видаляється виключно із шарів скоринки, що утворюється. В перший період волога переміщується в основному у вигляді рідини, а під час другого періоду, пар, що утворюється в зоні випаровування, виходить переважно через скоринку назовні, що обумовлює втрати від упікання.

Густина потоку теплоти для першого періоду процесу випікання, рівняння (1.4) можна написати в загальному вигляді:

$$q = -(\lambda + J \cdot a \cdot \rho_0 \cdot \delta) \cdot \text{grad}t = -\lambda_{\text{екв}} \cdot \text{grad}t, \quad (1.12)$$

де  $\lambda_{\text{екв}}$  - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності тіста-м'якуша, що враховує вплив масообміну на теплообмін, Вт/м·К;

$$\lambda_{\text{екв}} = \lambda + J \cdot a \cdot \rho_0 \cdot \delta. \quad (1.13)$$

Аналогічно поняттю еквівалентного коефіцієнта теплопровідності тіста-хліба вводиться поняття еквівалентного коефіцієнта температуропровідності. Тоді диференціальне рівняння тепломасообміну буде мати вигляд:

$$\frac{dt}{d\tau} = a_{\text{екв}} \nabla^2 t \quad (1.14)$$

Рівняння (1.14) отримано із основного рівняння тепло- та масообміну (1.8) для процесу випікання.

При переміщенні вологи за рахунок температурного градієнта для першого періоду:

$$\frac{dU}{d\tau} = a \cdot \delta \cdot \nabla^2 t \quad (1.15)$$

тоді:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{\Delta J}{C_{np}} \cdot a \cdot \delta \cdot \nabla^2 t = \left( a + \frac{\Delta J}{C_{np}} \cdot a \cdot \delta \right) \nabla^2 t = a_{\text{екв}} \nabla^2 t$$

Таким чином:

$$a_{\text{екв}} = a + \frac{\Delta J}{C_{np}} \cdot a \cdot \delta. \quad (1.16)$$

Вплив масообміну на термічні коефіцієнти можна охарактеризувати відповідними критеріями, запровадженими О.В. Ликовим [24].

Критерій теплопровідності:

$$K_{\lambda} = \frac{\lambda_{екв} - \lambda}{\lambda}. \quad (1.17)$$

Критерій температуропровідності:

$$K_a = \frac{a_{екв} - a}{a}. \quad (1.18)$$

На даний момент розроблені універсальні методи визначення коефіцієнта перенесення теплоти і маси (речовини).

На прогрівання тіста-хліба в процесі його випікання можуть впливати теплофізичні параметри пекарної камери (температура та відносна вологість пароповітряної суміші), а також ряд моментів, пов'язаних з особливостями виробів, що випікаються (їх вага, форма, вологість, пористість та інше).

Вплив температури пекарної камери на прогрівання тіста-хліба, що випікається було встановлено і відображено в ряді праць. Як і очікували, чим вища температура випікання, тим швидше відбувається прогрівання хліба, що випікається. Але у виробничих умовах температура пекарної камери не буває постійною. Випікання хліба, як правило, ведеться в умовах коли температура пекарної камери постійно знижується.

Н.В. Беліков вивчав температурне поле тіста-хліба в процесі випікання при температурі пекарної камери, що знижується. Він показав, що найбільш різко реагують на зниження температури пекарної камери поверхневі шари скоринки і мало реагує м'якуш, особливо його центральні шари.

Вплив відносної вологості пароповітряної суміші пекарної камери на прогрівання тіста-хліба в процесі випікання вивчалось А.С. Гінзбургом, Ф.Г. Шумаєвим, І.І. Маклюковим, А.А. Міхелєвим, О.В. Володарським, О.Т. Лісовенком, Л.Я. Ауерманом, В.І. Теличкуном, О.А. Руденко-Грицюком, Л.С. Лазаренком та іншими. Зволоження атмосфери пекарної

камери значною мірою зумовлює упікання, приріст об'єму хліба в печі, характер поверхні скоринки та навіть його форму.

Через пористу структуру тіста конденсація відбувається не лише на поверхні шматка тіста, але, як показали праці А.А. Міхелева та інших, в шарах тіста, на деякій глибині від поверхні шматка. Процес конденсації пари води на поверхні шматка тіста і в шарах, що прилягають до його поверхні, буде тим інтенсивнішим і тривалішим, чим більше насичення газового середовища пекарної камери парами води, чим нижча температура пекарної камери та чим нижча температура тіста. Конденсація вологи буде відбуватися до тих пір, доки температура поверхні тіста не перевищить температуру точки роси при параметрах пароповітряного середовища, що заповнює камеру.

Крім того, що конденсація пари на поверхні тіста впливає на якість хліба, його об'єм, форму, характер поверхні скоринки, дуже суттєвим є вплив цього процесу на прогрівання тістової заготовки, що випікається. Це зумовлене тим, що при конденсації пари виділяється прихована теплота конденсації. Зволоження пекарної камери різко прискорює прогрівання поверхневих шарів при конденсації пари на поверхні хліба. При цьому різко прискорюється прогрівання не лише шару м'якуша, що прилягає до скоринки, але і відбувається зміна характеру температури центральної частини м'якуша.

В результаті прогрівання тіста при випіканні хліба відбувається теплове розширення газів, що знаходяться в порах, а також випаровування легкокиплячих компонентів та вологи. Це призводить до збільшення початкового об'єму і пористості м'якуша, закріплення його структури в напрямку від поверхні до центру та зміни щільності окремих шарів тіста-хліба. Значний вплив на цей процес здійснює тепловий режим, що особливо помітно при випіканні подових сортів хліба. Зміна зовнішньої форми і висоти виробів пов'язана із зміною щільності по висоті, що є наслідком двох

причин: зміни пористості і вологості окремих шарів тіста-хліба під дією термовологопровідності і переміщення випареної вологи.

Дослідженню зміни вологості м'якуша хліба під дією термовологопровідності присвячено декілька робіт А.С. Гінзбурга. Було відмічено збільшення вологості м'якуша на кінець випікання на 2,0...3,0% в порівнянні з вологістю тіста. Криві зміни вологості по висоті хліба приведені в працях Л.Я. Ауермана, О.Т. Лісовенка та інших. Н.В. Беліков вивчав поле вологості м'якуша житнього формового хліба масою 2,0 кг. Він також спостерігав рух вологості м'якуша на кінець випікання на 2...2,5%.

Суттєва зміна щільності різних шарів м'якуша відбувається в першому періоді випікання під час росту тістової заготовки. Але і в другому періоді випікання може відбуватися ущільнення окремих шарів під дією надлишкового тиску в центральних шарах, що виникає в момент досягнення ними температури кипіння. Для визначення щільності м'якуша у виробі, що випікається О.Т. Лісовенком запропоновані в дослідях наступні два способи: рентгенографія поперечного зрізу з наступним визначенням щільності рентгенограми на спеціальному фотометричному пристрої; пошарове визначення щільності і вологості зрізів по висоті хліба.

При рентгенографічному визначенні щільності м'якуша зразок хліба, що охолонув розрізають на дві частини, в центрі по висоті вирізають шар товщиною 2 см і проводять його рентгенограму, на якій щільність тону окремих ділянок зворотно пропорційна щільності зрізу. Для визначення щільності окремих ділянок рентгенограм розроблено спеціальний фотометричний пристрій з виведенням на потенціометр. Ним встановлено, що коливання щільності м'якуша по висоті для окремих шарів складає 30%. Це суттєво впливає на якість хліба і на теплообмін при випіканні.

Велика кількість методів і приладів для визначення теплових процесів проведені вітчизняними і закордонними теплофізиками. Розроблені методи і прилади дозволяють досліджувати тепломасообмінні процеси, знання яких

необхідні для автоматизації технологічних процесів, так як найбільш раціональним методом є регулювання по параметрам самого матеріалу, що обробляється.

### **Теплофізичні характеристики тіста-хліба і матеріалів поду.**

Раціональне використання досягнень науки на практиці потребує знання властивостей різноманітних матеріалів і продуктів, що піддаються зберіганню, технологічній обробці. Серед цих властивостей важливе місце займають теплофізичні характеристики і їх кількісні величини так як теплова обробка широко використовується в народному господарстві, зокрема, в харчовій промисловості.

Розвиток, удосконалення і інтенсифікація процесів теплової обробки базується на основних принципах сучасної технології: від знання і аналізу теплофізичних властивостей матеріалів (продуктів) як об'єктів обробки — до вибору методів і оптимальних режимів процесу на цій основі — до створення раціональних конструкцій апаратів.

Для характеристики теплових властивостей харчових матеріалів використовують загальні закони теплопровідності. Лінійна залежність між тепловим потоком і температурним градієнтом вважається законом теплопровідності Фур'є. Складова теплового потоку в напрямку  $x - q_x$  дорівнює:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.19)$$

В математичному формулюванні закону Фур'є мінус означає, що в напрямку потоку теплоти температура зменшується. Закон Фур'є справедливий лише для стаціонарного температурного поля при умові, що:

$$T = f(x, y, z), \text{ а } \frac{dT}{d\tau} = 0, \quad (1.20)$$

де  $\frac{dT}{d\tau}$  - швидкість зміни температури, К/с.

Якщо температура  $T$  харчового матеріалу є функцією координат і часу – температурне поле нестационарне:

$$T = f[x, y, z, \tau], \quad (1.21)$$

то для визначення температурного поля в будь-яким момент часу в будь-якій точці треба вирішити диференціальне рівняння теплопровідності для певних граничних умов.

Диференціальне рівняння теплопровідності в трьохвимірній системі координат має вигляд:

$$\frac{dT}{d\tau} = a \left( \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (1.22)$$

де  $\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$  - другий диференціальний оператор Лапласа;

$a$  - коефіцієнт температуропровідності (в  $\text{м}^2/\text{с}$ ); характеризує теплоінерційні властивості харчових матеріалів і визначається за формулою:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1.23)$$

де  $c$  - питома теплоємність матеріалу, Дж/кг·К;

$\rho$  - густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Величину  $c \cdot \rho$  прийнято називати теплоємністю матеріалу і вимірюють в Дж/м<sup>3</sup>·К.

Коефіцієнт температуропровідності характеризує швидкість вирівнювання температури в різних точках температурного поля. Під теплоємністю тіла розуміють кількість теплоти, що необхідна для нагрівання одного кілограму речовини на 1°C. Всі три коефіцієнти:  $\lambda$ ,  $c$ ,  $a$  - називаються теплофізичними характеристиками матеріалу (ТФХ).

Для глибокого вивчення тепломасообміну, що відбувається при випіканні, і уточнення розрахунку печей необхідно знати характер зміни теплофізичних характеристик.

Перші праці по визначенню ТФХ тіста і хліба були виконані в 1934-1935 р.р. В.В. Нащокіним. А.С. Гінзбург в 1940 р. проводив визначення коефіцієнта температуропровідності пшеничного тіста-хліба в кулеподібній металевій колбі, яку нагрівали з постійною швидкістю. Регулярний режим наставав через 85...90 хвилин. Аналогічно визначали температуропровідність скоринки, яку попередньо подрібнювали. При нагріванні тіста в замкненій колбі створюється підвищений тиск, що порушує внутрішній тепломасообмін.

В.О. Фогаль проводив експерименти із житнім та пшеничним тістом. Під час досліду зразок розміщували між стінками двох коаксіальних циліндрів. Збільшення об'єму тіста при вистоюванні, як і при випіканні, могло відбуватися лише за рахунок переміщення його вздовж осі циліндра, що, звичайно, викликало незвичайне розподілення пористості в зразку. Останнє суттєво впливало на ТФХ тіста-хліба. Значення ТФХ були визначені для різних шарів і при різних теплових навантаженнях, що досягали 1740 Вт/м<sup>2</sup>. Недоліком способу було те, що тісто знаходилось в замкнутому об'ємі і масообмін із середовищем був порушений. Основна перевага цієї роботи полягала в тому, що в ній вперше було помічено залежність ТФХ тіста-хліба від теплових навантажень, вказано вид залежності та дані конкретні значення.

Майже всі існуючі в техніці методи визначення ТФХ пов'язані з прогріванням тіл, що досліджуються. У більшості харчових продуктів під дією теплоти відбуваються незворотні процеси, що змінюють їх структуру і властивості. Тому для визначення ТФХ харчових продуктів більш придатними необхідно визнати методи, при яких необхідне короткочасне прогрівання, що супроводжується незначним підвищенням температури (3...15°C).

Велика робота по вивченню ТФХ проведена О.Т. Лісовенком. Він використав автоматичний пристрій із голковим датчиком для визначення

ТФХ тіста-хліба та інших матеріалів, подібних по фізичним властивостям. Теоретичною основою пристрою є імпульсний метод, що заснований на вирішенні задач нестационарного температурного поля. Тривалість теплового імпульсу  $\tau_0 = 10 + 11$  с. За цей час до датчика підводиться енергія 720 Дж/м. Зміна температури на поверхні датчика фіксувалася потенціометром, а ТФХ визначалися за формулами:

$$\lambda = 0,643q_0 / \Delta t \quad (1.24)$$

$$c = \frac{q_0 \cdot \tau_0 \cdot f_{cv}}{\pi(z_d + z_T)^2 \cdot \rho \cdot \psi \cdot k \cdot \Delta t} \quad (1.25)$$

де  $f_{cv} = \varphi(\mu, k)$  - визначається по номограмі

$$\psi \cdot k \cdot \Delta t_1 = 1,02\Delta t_1.$$

Із зростанням температури коефіцієнт теплопровідності тіста-хліба збільшувався, в інтервалі  $T = 293 + 353$  К його можна визначити за формулою для тіста-хліба ( $W = 16 + 60\%$ ) із пшеничного борошна I сорту.

$$\lambda = \lambda_{293} + 0,00025(T - 293) \quad (1.26)$$

для тіста-хліба ( $W = 16 + 80\%$ ) із житнього борошна

$$\lambda = \lambda_{293} + 0,00030(T - 293) \quad (1.27)$$

Коефіцієнт теплопровідності визначається видом тіста-хліба, причому при зниженні сортності борошна коефіцієнт збільшується. Це викликано інтенсифікацією масообміну, що викликається випаровуванням етилового спирту та інших продуктів, які утворюються при бродінні тіста.

А.С. Гінзбург звернув увагу на те, що коефіцієнти  $\lambda$  та  $a$  тіста-хліба залежать від щільності теплового потоку на поверхні зразка  $q$ . Для пшеничного борошна при нагріванні без зовнішнього масообміну і тепловому потоці на поверхні 580...1744 Вт/м<sup>2</sup> при  $W = 44,8...45,3\%$ :

$$\lambda = 0,30 + 0,00034q_i \quad (1.28)$$

$$a = (19,2 + 0,0019q_i) \cdot 10^{-8} \quad (1.29)$$

Для житнього борошна при  $W = 52...54\%$ :

$$\lambda = 0,41 + 0,00029q_i \quad (1.30)$$

$$a = (18,8 + 0,0028q_i) \cdot 10^{-8} \quad (1.31)$$

Коефіцієнт температуропровідності тіста-хліба із підвищенням вологості  $W=25...30\%$  збільшується, а при подальшому зволоженні — зменшується. Залежність коефіцієнт температуропровідності ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) тіста-хліба (із житнього і пшеничного борошна I сорту) від температури можна представити рівнянням:

$$a = (a_{293} + 0,27(T - 293)) \cdot 10^{-8}. \quad (1.32)$$

Залежність питомої теплоємності в  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$  для тіста-хліба (без врахування витрати теплоти на випаровування) від температури при  $t=30...70^\circ\text{C}$  виражається формулою:

$$c = c_{303} + 17(T - 303) \quad (1.33)$$

О.Т. Лісовенко та С.І. Сидоренко визначили ТФХ тіста-хліба при тепловій обробці. Для тіста-хліба із пшеничного борошна I сорту від  $t=30^\circ\text{C}$  до  $t=80^\circ\text{C}$ :

$$\lambda = 0,375 \div 0,535 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}) \quad (1.34)$$

$$a \cdot 10^6 = 2,24 \div 2,32 \text{ м}^2/\text{с} \quad (1.35)$$

$$c = 2,51 \cdot 10^3 \div 5,65 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К} \quad (1.36)$$

Коефіцієнти теплопровідності змінюються по лінійному закону, а після  $70...80^\circ\text{C}$  різко зростають.

На ділянці  $20...70^\circ\text{C}$  для коефіцієнта теплопровідності справедливим є наступне рівняння:

$$\lambda = \lambda_{20} + 0,0061\Delta t \quad (1.37)$$

де  $\lambda_{20}$  - коефіцієнт теплопровідності при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{В}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;

$\Delta t$  - різниця температур,  $^\circ\text{C}$ .

Зміна теплоємності тіста-хліба при випіканні носить більш складний характер. Тут, крім масообміну, здійснює вплив і теплоспоживання на фазові перетворення. Теплоємність різних сортів хліба розрізняється

незначно і має однаковий характер зміни при нагріванні. Для тіста-хліба із пшеничного борошна I та II сорту, і суміші житньо-пшеничного тіста (60% борошна пшеничного II сорту і 40% житнього обдирного) значення теплоємності при відомій температурі можна описати одним рівнянням:

$$c_i = c_{30} + 0,017\Delta t_i \quad (1.38)$$

де  $c_{30}$  - теплоємність при  $t=30^\circ\text{C}$ , кДж/кг·К;

$\Delta t_i$  - приріст температури,  $\Delta t_i = t_i - 30^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнт температуропровідності характеризує теплоінерційні властивості матеріалів і в процесі випікання змінюється незначно. Для пшеничного борошна I сорту  $a$  змінюється від  $1,97 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с до  $2,08 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Температуропровідність тіста-хліба в процесі випікання можна вважати постійною.

Дослідження ТФХ м'якуша хліба від температури і вологості проведені Мазуром П.Я. Із зростанням температури теплопровідність і температуропровідність м'якуша хліба із пшеничного борошна I сорту і житнього борошна лінійно зростає і описується рівнянням:

$$\lambda_{t_i}^{ни.м.лс.} = \lambda_{20} + 0,00025t_i \quad (1.39)$$

$$\lambda_{t_i}^{ж.м.} = \lambda_{20} + 0,0003t_i \quad (1.40)$$

$$a_{t_{ii}}^{ни.м.лс.і.ж} = a_{20} + 0,027t_i \quad (1.41)$$

Теплоємність для м'якуша хліба із пшеничного борошна I сорту і житнього борошна дещо знижується із підвищенням температури. На залежність ТФХ від температури початкова вологість хліба і сорт борошна, із якого він приготовлений, здійснює незначний вплив.

Дослідження ТФХ тіста-хліба при випіканні в інфрачервоному полі і електромагнітному полі НВЧ-діапазону проведені Незнановою О.Я., Пучковою Л.І., Залевською Н.А., Сверчак В.Д., Паніним А.С., Ільєсовим С.Г. та іншими. Теоретичною основою методу є рішення граничної задачі охолодження (нагрівання) сферичного твердого тіла, виготовленого із

ідеального провідника, що розміщується в досліджуване необмежене (відносно тіла) середовище. ТФХ вимірювали в шарах, що розміщені під верхньою і над нижньою скоринкою (на відстані 1 см) і в центрі м'якуша. Вимірювання проводили експрес-методом, який заснований на залежності інерційних властивостей термопари, що розміщують в досліджуваній продукт, і матеріалу. Коефіцієнт теплопровідності різних шарів тіста-хліба при випіканні змінюється неоднаково. В шарах, які прилягають до нижньої скоринки, він змінюється незначно, а в центральному шарі і в шарах, які розміщені під верхньою скоринкою, на початку випікання зменшується, а починаючи з 3...6 хвилини (в залежності від способу) різко збільшується.

В печі з інфрачервоним випромінюванням  $\lambda$  зменшується від 0,5...0,05 Вт/мК, збільшується від 0,05 до 0,55 Вт/мК. В печі з радіаційно-конвективним теплопроводом  $\lambda$  зменшується від 0,6 до 0,35 Вт/мК, а збільшується від 0,35 до 0,6 Вт/мК. При прогріванні тістової заготовки в печі коефіцієнт  $\lambda$  зменшується. Найбільш різке зниження його спостерігалось в перші хвилини випікання. В печі з інфрачервоним випромінювачем  $c\rho$  змінювалося від  $1,6 \cdot 10^3$  до  $1,0 \cdot 10^3$  кДж/м<sup>3</sup>К. В печі з РК-теплоідведенням -  $c\rho = 1,6 \cdot 10^3$  до  $0,6 \cdot 10^3$  кДж/м<sup>3</sup>К.

Отримані в дослідженнях значення ТФХ тіста-хліба необхідно використовувати при визначенні коефіцієнту теплової активності двох тіл, що дотикаються (тіста-хліба і поду печі) при розрахунку нових конструкцій хлібопекарських печей і розробці раціональних режимів випікання. Коефіцієнт теплової активності  $b$  виведений при вирішенні задач теплопровідності для характеристики відносної температури двох тіл, що дотикаються.

Інтенсивність перенесення теплової енергії до тіста від поду визначається, головним чином, відношенням коефіцієнтів теплової активності матеріалу поду і тіста. Чим менший час випікання виробу, тим більшої інтенсивності теплові потоки повинні бути забезпечені на початку

випікання, тим необхіднішим є використання теплоакumuлюючого поду. Для отримання високоякісних подових хлібобулочних виробів важливе значення має правильний вибір матеріалів поду з необхідними ТФХ і розмірами. Зростання об'єму тістової заготовки, пористості м'якуша, визначається, в основному, режимом підведення теплоти в початковій стадії прогрівання тіста, який в значній мірі залежить від властивостей матеріалів поду.

Важливим фактором вибору матеріалу поду є теплоакumuлююча здатність, так як від цього залежить рівномірність та інтенсивність тепловіддачі нижньої поверхні. Це зумовлює використання масивних керамічних подів, крім цього такі поди, завдяки високій пористості, допускають фільтрацію (дифузію) пари, яка виділяється на нижній поверхні виробу, що є важливим для утворення якісної нижньої поверхні виробу. Але проведені дослідження А.Ф. Зубковим показали, що матеріал поду не впливає на якісні показники тіста-хліба при дотримання аналогічного характеру підведення теплоти знизу. Дослідження, які виконувалися в фізико-технічній лабораторії ВНДІХП, показали переваги керамічної плитки із магнезійного цементу. Вироби, що випікалися на таких подах, були кращої якості, ніж ті, що випікалися на звичайних металевих подах. Огляд плиток показав, що по проходженню деякого часу верхня поверхня була порушена (місцеві раковини, зломи передніх кутів), а нижня поверхня залишилася без змін. Порушення верхньої поверхні, скоріш за все, було викликане проникненням води в пори поверхні шару плиток.

Характерною особливістю масивних неметалевих подів, що використовуються, є набагато менший коефіцієнт температуропровідності, ніж у металевих. Вони повільніше нагріваються, але також і повільніше охолоджуються, віддаючи теплоту виробу протягом довшого часу.

В працях Н.В. Белікова, І.М. Лагузіної, В.О. Фотеля, А.В. Хлопкіної представлені результати дослідження подів із вуглецевої сталі,

карельського талькохлорида, світлого кам'яного лиття, бетону, шамоту, ацеїду. Рекомендовано проводити випікання на подах із світлого кам'яного лиття товщиною 15...20 мм.

Значний інтерес представляє собою спосіб приготування керамічних подів для хлібопекарських печей на магнезійному цементі. Г.І. Аронтріхером була виготовлена дослідна плитка (розміром 150x150x15мм) із каустичного магнезиту, зароблена розчином хлористого магнею щільністю 30...32<sup>0</sup> Боме. Результати дослідного випікання трьох булочок масою по 100 г на металевій пластині, на керамічному поду лабораторної електропечі і на магнезитовій плитці показали суттєву перевагу останньої.

У відповідності з позитивними результатами дослідного випікання в механічній лабораторії ВНДІХП була проведена робота по виготовленню подикових плит (розміри 340x160x12 мм) із магнезійного цементу з 50% наповнювачем у вигляді гравію (фракція 3...4 і 1...2 мм), армованих 5 прутками із проволочи діаметром 0,7 мм. Плити були установлені на печі ФТЛ-2 дослідного хлібозаводу ВНДІХП, на якому пропрацювали 2,5 місяця. Батони, що випікалися на керамічних плитках, мали вищу якість, ніж ті батони, що випікалися на звичайних металевих подах.

Дослідженню теплофізичних характеристик вологих капілярпористих присвячено ряд закордонних праць. Викладене вище засвідчує про доцільність продовження робіт по створенню спеціальних масивних теплоакumuляційних подів, що мають необхідний ТФХ, термостійкість, міцність, вологостійкість.

### **Особливості випікання хліба і підведення тепла в хлібопекарну піч.**

Сучасна хлібопекарна піч — це складний агрегат, робота якого являє собою різноманітний комплекс енергетичного, гідроаеродинамічного, механічного, тепломасообмінного та технологічного процесів.

Наука про печі базується на дослідженнях багатьох вчених, що працюють у різних галузях народного господарства. У створенні нових

пічних агрегатів, удосконалюванні хлібопекарських і кондитерських печей, обґрунтуванні оптимальних режимів випічки великий внесок внесли роботи Г.П. Марсакова, Н.В. Молодих, Н.И. Краснопевцева, В.Н. Лаврова, Н.В. Белікова, Г.Е. Нудельмана, А.С. Гінзбурга, А.А. Міхелева, В.В. Нащокіна, И.Г. Ліфенцева, А.Т. Лісовенко, А.В. Володарського, В.І. Теличкуна і ін. Форма виробів, що піддаються випічці, відрізняється від правильних геометричних форм (циліндр, плоскі поверхні, куля і), процес випічки і швидкість його протікання залежить від того, як відбувається передача теплоти від гріючої поверхні до зони випаровування і до центральних шарів виробу.

Теплообмін є складним процесом і здійснюється шляхом теплопровідності (кондукції), конвекції та випромінюванні (радіації). На практиці рідко має місце лише який-небудь один зі способів теплообміну в чистому виді. У печах хлібопекарського та кондитерського виробництв зазвичай зустрічаються всі три види теплообміну, іноді, в досить складних комбінаціях.

Теплова робота печі — це сукупність теплових процесів, що забезпечують вирішення поставленої технологічної задачі. Технологічний процес роботи печі зводиться до визначення теплового впливу на оброблюваний продукт. Тепловий вплив виражається в зміні температури тіста-хліба і, відповідно, у зміні його ентальпії.

Фундаментом феноменологічної теорії теплопровідності були роботи Ж. Фур'є, виконані ним на початку ХІХ століття. Відповідно до теорії Фур'є температурне поле тіла визначається характером його теплообміну з навколишнім середовищем. Безпосередня передача теплоти від нагрітого тіла до холоднішого відбувається за законом (1.3). Щоб з'ясувати фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності, напишемо основне співвідношення (1.6) для стаціонарного одномірного температурного поля. У цьому випадку

температура залежить тільки від однієї координати-нормалі до ізотермічних поверхонь; скалярна величина вектора теплового потоку буде становити:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \right). \quad (1.42)$$

Якщо градієнт температури буде величиною постійною ( $\frac{dT}{dx} = 0$ ), що означає зміну температури зі збільшенням  $x$  по лінійному закону, то можна написати:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1} = \text{CONST}. \quad (1.43)$$

Звідси випливає, що швидкість зміни теплового потоку  $\frac{dQ}{d\tau}$  буде величиною постійною:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \text{CONST}. \quad (1.44)$$

де:  $Q$  - кількість теплоти, що протікає за час  $\tau$ .

Отже, на підставі (1.6) - (1.22) - (1.24) можна написати:

$$\frac{Q}{S\tau} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{X_2 - X_1}; \quad (1.45)$$

так як  $T_1 > T_2$ , а  $X_2 > X_1$ . Таким чином, коефіцієнт теплопровідності дорівнює кількості теплоти, що протікає в одиницю часу через одиницю поверхні, при перепаді температури на одиницю довжини нормалі, рівній одному градусу. Звідси випливає, що коефіцієнт теплопровідності вимірюється у Вт/м×К. Відношення  $\frac{\lambda}{X_2 - X_1} = \frac{\lambda}{\Delta X}$  - називається тепловою провідністю даної ділянки тіла, а обернена величина  $\frac{\Delta X}{\lambda}$  - тепловим або термічним опором ділянки тіла.

У твердих речовинах перенос теплоти теплопровідністю значною мірою визначається переносом енергії вільними електронами. Розбіжність в коефіцієнті теплопровідності різноманітних неоднорідних матеріалів

пояснюється ефектом пористості. Коефіцієнт теплопровідності залежить від температури.

Закон теплопровідності Фур'є можна написати в іншому виді. Позначимо об'ємну концентрацію внутрішньої енергії тіла через скалярну величину градієнта температури, тоді закон Фур'є можна написати так:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \left( \frac{\partial T}{\partial U_V} \right)_V \frac{\partial U_V}{\partial n} = \frac{1}{C_V} \frac{\partial U_V}{\partial n}; \quad (1.46)$$

де:  $C_V = \left( \frac{\partial U_V}{\partial T} \right)_V = C_V \rho$ ,

$C_V \rho$  - ізохорна об'ємна теплоємність тіла (Дж/м<sup>3</sup>×К);

$C_V$  - питома ізохорна теплоємність (Дж/кг×К).

Отже, рівняння теплопровідності буде мати вигляд:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_V \text{grad} U_V. \quad (1.47)$$

де:  $a_V$  - коефіцієнт температуропроводності при постійному об'ємі тіла ( $V = \text{CONST}$ ), рівний:

$$a_V = \frac{\lambda}{C_V \rho}. \quad (1.48)$$

Таким чином, щільність потоку теплоти прямо пропорційна градієнтові об'ємної концентрації внутрішньої енергії тіла. Коефіцієнт пропорційності дорівнює коефіцієнтові температуропроводності при постійному об'ємі тіла. При стаціонарному одномірному потоці теплоти ( $q = \text{CONST} = \frac{\partial U_V}{\partial n} = \text{CONST}$ ) рівняння (1.47) можна написати так:

$$\frac{Q}{S\tau} = a_V \frac{U_{V_1} - U_{V_2}}{X_2 - X_1}. \quad (1.49)$$

Таким чином, коефіцієнт  $a_V$  дорівнює кількості теплоти, що протікає в одиницю часу через одиницю поверхні, при перепаді об'ємної концентрації внутрішньої енергії в 1 Дж/м<sup>3</sup> на одиницю довжини нормалі. Отже,

коефіцієнт температуропроводності має розмірність  $[a_v] = \frac{\text{Дж} \times \text{м}^4}{\text{м}^2 \times \text{с} \times \text{Дж}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$  і

по своїй фізичній суті характеризує молекулярний перенос внутрішньої енергії тіла. При постійному тиску ( $P = \text{CONST}$ ) коефіцієнт температуропроводності  $a_p$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) визначається співвідношенням:

$$a_p = \frac{\lambda}{C_p \rho} = \frac{\lambda}{C_p'} \quad (1.50)$$

де:  $C_p$  - питома ізобарна теплоємність тіла;

$C_p'$  - об'ємна ізобарна теплоємність тіла.

$$C_p' = C_p \rho = \left( \frac{\partial H_V}{\partial T} \right)_P; \quad (1.51)$$

$H_V$  - об'ємна концентрація ентальпії ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ ).

За своїм фізичним змістом коефіцієнт температуропроводності  $a_p$  характеризує перенос ентальпії тіла шляхом молекулярного руху. Закон теплопровідності тепер можна написати так:

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial H_V} \right)_P \frac{\partial H_V}{\partial n} = -a \text{grad} H_V. \quad (1.52)$$

Таким чином, коефіцієнт температуропроводності є коефіцієнтом дифузії внутрішньої енергії  $a_v$  або ентальпії  $a_p$  в залежності від умов сполучення тіла з навколишнім середовищем ( $V = \text{CONST}$  або  $P = \text{CONST}$ ).

Для твердих тіл питома ізохорна теплоємність  $C_v$  мало відрізняється від питомої ізобарної теплоємності  $C_p$ , тому можна вважати  $C_v = C_p = C$ . В аналітичній теорії теплопровідності твердих тіл коефіцієнт температуропроводності вважають однаковими і незалежними від умов сполучення тіла з навколишнім середовищем, тобто  $a = a_p = a_v = \frac{\lambda}{c\rho}$ .

Скалярна величина вектора теплового потоку складає:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.53)$$

Складові вектора  $q$  по осях координат  $x, y, z$  позначимо через  $q_x, q_y, q_z$  скалярні величини яких відповідно становлять:

$$q_x = q \cos(n, x) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \cos(n, x) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (1.54)$$

$$q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad (1.55)$$

$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (1.36)$$

Визначимо кількість теплоти, що проходить через елементарну ділянку  $dS_l$  розташовану під кутом  $\psi$  до ізотермічної поверхні (точніше, до площини, дотичної до ізотермічної поверхні):

$$q_l = q \cos \psi = \frac{dQ}{d\tau} \frac{1}{dS_n} \cos \psi = \frac{dQ}{d\tau} \frac{1}{dS_l}; \quad (1.57)$$

так, як (рис. 1.1)  $dS_n = dS_l \cos \psi$  є проекцією площадки  $dS_l$  на ізотермічну поверхню.

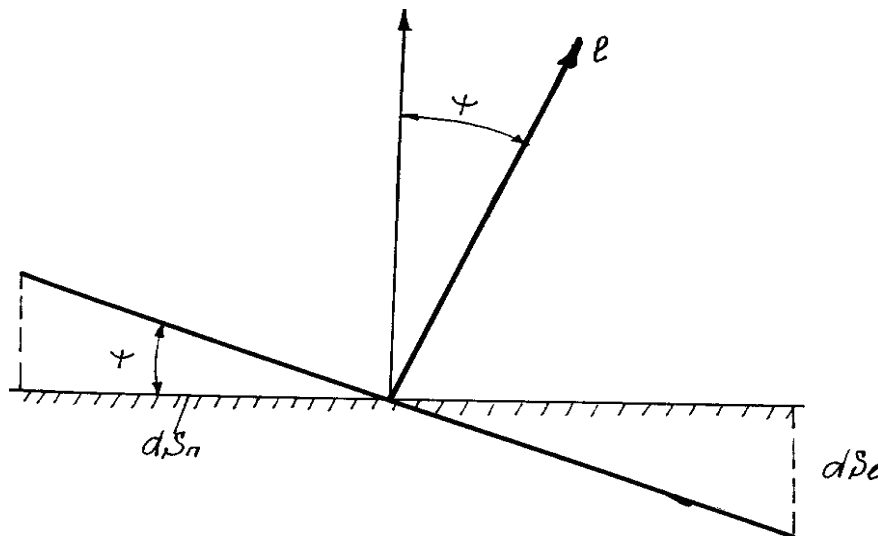


Рис. 1.1. Потік теплоти через елементарну поверхню

З рівності (1.54) одержуємо:

$$dQ = q_l dS_l d\tau = q(dS_l \cos \psi) d\tau = q dS_n d\tau. \quad (1.58)$$

Рівність (1.55) допускає двояке розуміння переносу теплоти  $dQ$ : потік теплоти через площадку  $dS_l$  в напрямку нормалі  $l$  до неї; потік теплоти через

проекцію ділянки  $dS_l$  на ізотермічну поверхню в напрямку нормалі  $n$  до останньої. Кількість теплоти  $Q$  яка протікає за час  $\tau$  через поверхню  $S$  кінцевих розмірів, становить:

$$Q = -\lambda \int_0^{\tau} \int_{(S)} \frac{\partial T}{\partial l} dS_l d\tau. \quad (1.59)$$

Отже, для визначення кількості теплоти, що протікає через будь-яку поверхню твердого тіла, необхідно знати температурне поле всередині тіла. Знаходження температурного поля і складає головну задачу аналітичної теорії теплопровідності. Сумарне теплопоглинання нижньої скоринки хліба за час може бути визначене за формулою:

$$Q = \int_0^{\tau} q d\tau \quad (1.60)$$

Дослідження щільності теплового потоку, що передається кондукцією до тістової заготовки спрямоване на вибір раціональних режимів та встановлення зв'язку між основними параметрами процесу. Питання знаходження теплових потоків у печах хлібопекарської і кондитерської промисловості є актуальними з точки зору економії енергії, поліпшення якості виробів, автоматизації процесів. Розробка малогабаритних малоінерційних датчиків теплового потоку і особливо кульоподібних датчиків властивості яких (тепло- і температуропровідність, ступінь чорноти поверхні) при збереженні високої чутливості можна наблизити до властивостей хлібобулочних виробів, дала поштовх до розвитку теплометричних досліджень у хлібопекарській промисловості.

Кінетику теплопідводу, до виробів було досліджено так. Шаруватий датчик теплового потоку закріплювали на нижній та верхній поверхні тістової заготовки, і він проходив з нею весь шлях робочої камери печі, а гнучкі струмоз'ємні проводи поступово подавалися по конвеєру слідом за датчиком. Сигнал датчика реєструвався потенціометром. Середня щільність теплопритоків до нижньої поверхні тістової заготовки за увесь час випічки

виходить вище, ніж до верхньої. На рис. 1.2 представлено щільності теплових потоків, що сприймаються верхньою і нижньою поверхнями тіста-хліба з пшеничного борошна II сорту при раціональному режимі.

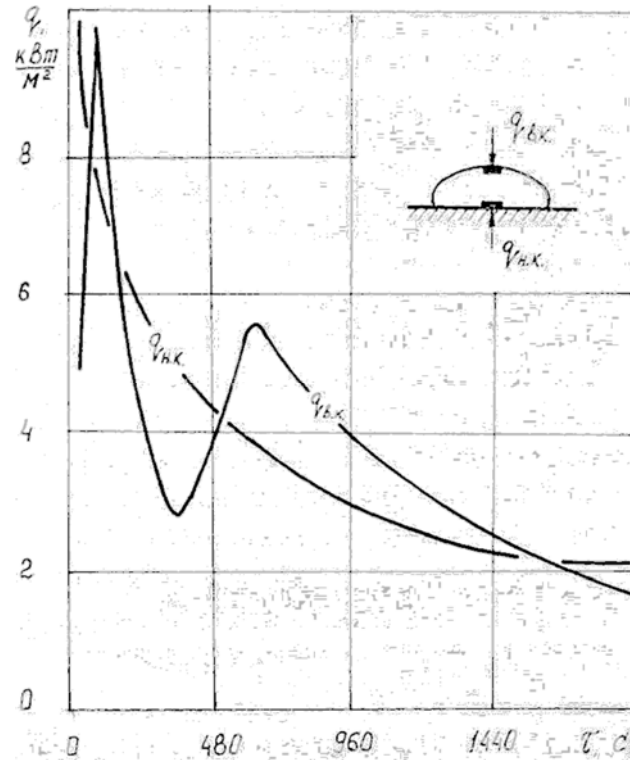


Рис. 1.2. Характерні криві щільності теплових потоків, які сприймає верхня і нижня поверхня тіста-хліба подового хліба з пшеничного борошна II сорту при раціональному режимі випічки

Інтенсивність переносу теплової енергії до тіста визначається головним чином співвідношенням коефіцієнтів теплової активності поду і тіста. Теплова активність тіла характеризує відносну температуру  $\Theta$  двох дотичних тіл:

$$b = \sqrt{\lambda c \rho} \left[ \frac{Bm \times c^{\frac{1}{2}}}{m^2 \times K} \right]. \quad (1.61)$$

При вирішенні задач тепломасообміну між двома поверхнями необхідно знаходити теплову активність тіл. Теплові активності можна

розрахувати, знаючи теплопровідність, щільність і теплоємність тіла, тому в даний час  $b$  відносять до числа величин, що характеризують теплофізичні властивості тіл. Теплову активність розглядають у сукупності двох тіл:

$$K = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}} = \frac{b_1}{b_2}. \quad (1.62)$$

На границі контакту тіл температура  $\Theta(0, \tau)$  змінюється від нуля (мінімальна теплова активність) до одиниці (максимальна теплова активність). Таким чином, величина  $\Theta(0, \tau)$  характеризує зниження відносної температури тіла при його контакті з іншим тілом:

$$\Theta_1 = \frac{T_1(x, \tau)}{T_0}; \quad \Theta_2 = \frac{T_2(x, \tau)}{T_0} \quad (1.63)$$

де:  $T_0$  – температура тіла при  $\tau = 0$ .

У вітчизняній літературі величину  $b$  (або  $\xi$ ) прийнято називати коефіцієнтом теплової активності або теплосприйняттям у закордонній вона називається коефіцієнтом тотожності. Вирішальне значення на ріст виробу має нижній теплопідвод. При забезпеченні вільного збільшення об'єму приріст висоти, зумовлений нижнім теплопідводом, складає близько 80% загального збільшення висоти.

Таким чином, тепловіддача від поду печі до тістової заготовки повинна бути досить інтенсивною на початку випічки, щоб уникнути розпливання виробу і одержання хліба більшого об'єму і визначеної форми. Однак інтенсивність тепловіддачі до хліба повинна бути пов'язана з умовами теплообміну в пекарній камері конкретної конструкції печі.

**Основні поняття про вакуум-випарне охолодження і порівняння з методом шокової заморозки.** Іноді традиційні методи виробництва змінюються на більш ефективні і більш гігієнічні технології, через які, проте, продукти можуть втрачати частину своїх корисних властивостей. Проте існують приклади того, як сучасні технології покращують продукти, як у випадку з застосуванням вакууму для охолодження хліба.

Існує два способи — шокова заморозка (або шокування) та вакуумна система охолодження (вакуумування). Раніше з цим начебто було все ясно: виготовлялась недопечена продукція, яка піддавалася шоківій заморозці і доставлялася в місця масового продажу, де відбувалося розморожування та допикання продукту. Але на останнім часом було анонсовано новинку — вакуумну систему охолодження хліба. Відомо, що деякі ідеї по вакуумному охолодженню хлібобулочних виробів з'явилися мало не на початку минулого століття, в 20...30-х роках. Технологія вакуумного охолодження хліба існує давно, але тільки зараз вона досягла такого рівня, що отримує широке визнання.

Вакуумне охолодження представляє собою надшвидку технологію охолодження недопечених або напівспечених напівфабрикатів, забезпечує додаткову стабілізацію випічки та ефективну логістику всього виробничого процесу. Ще одна перевага — низькі енерговитрати. У порівнянні з традиційними холодильними системами — від попереднього випікання, охолодження, транспортування до зберігання і кінцевого випікання вдається заощадити до 60% енергії. Традиційні холодильні технології та технології вакуумного охолодження побудовано на зовсім різних принципах. Щоб визначити відмінності, наведемо короткий огляд традиційного процесу виробництва недопечених продуктів. Після первинного випікання вироби спочатку охолоджуються до кімнатної температури, потім заморожуються в системах шокової заморозки. Спочатку охолоджується скоринка. При заморожуванні всередині випічки зменшується тиск газів, що може спричинити утворення складок на її поверхні. Оскільки охолодження йде зовні всередину, вільна вода переміщується з м'якуша до холоднішої скоринки (рис. 1.3-1.4), там збирається і замерзає. Після зберігання при  $-18^{\circ}\text{C}$  проводиться кінцеве випікання продукту. Щоб температура в скоринці могла піднятися до  $140^{\circ}\text{C}$

і відбулося потемніння (реакція Майяра), спочатку повинна випаруватися накопичена в скоринці вода.

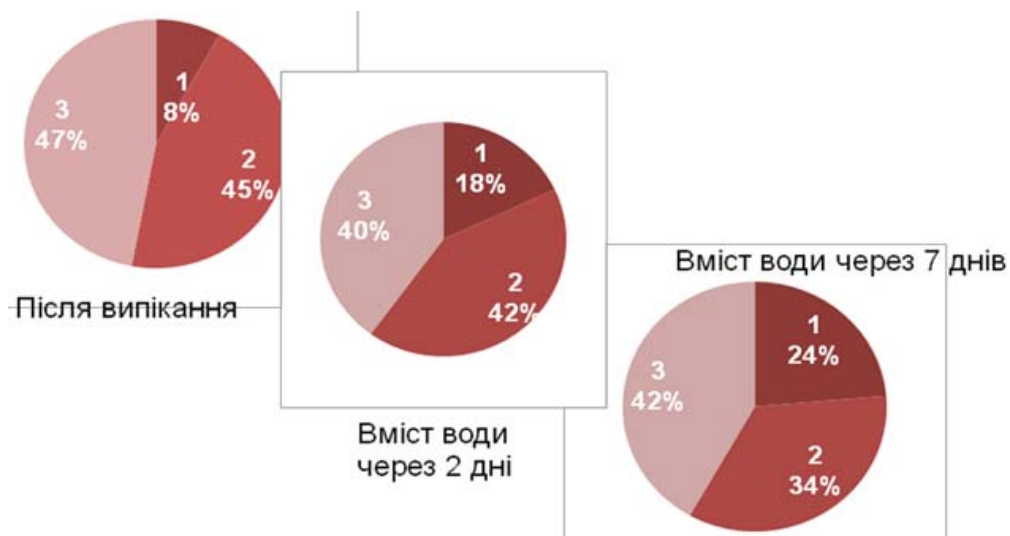


Рис. 1.3. Вміст води в хлібі після випікання в залежності від терміну зберігання: 1 – скоринка; 2 – під скоринкою; 3 – всередині хлібини

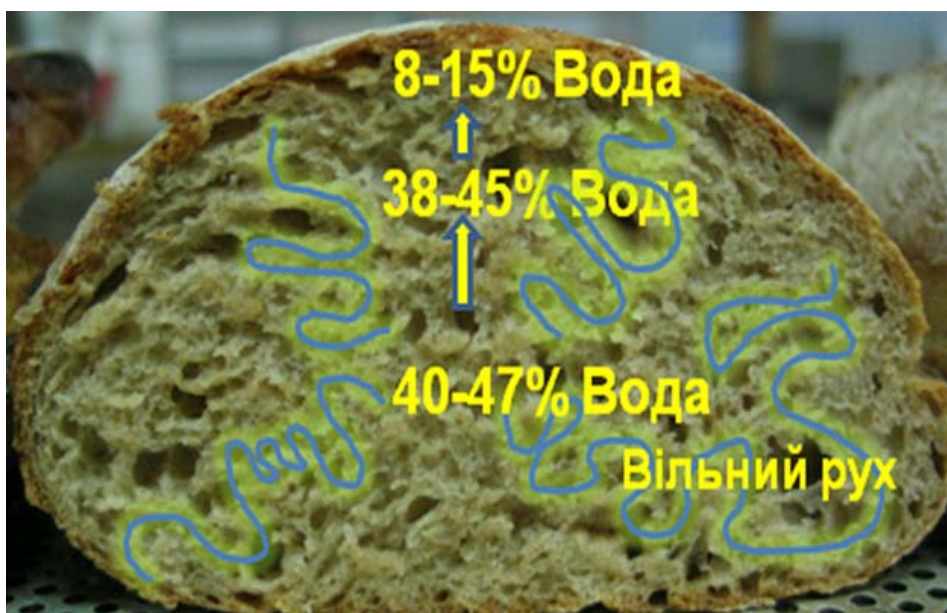


Рис. 1.4. Схема руху води в хлібині при охолодженні

При вакуумному охолодженні недопечені вироби направляються у вакуумну камеру в гарячому стані. Менш ніж за три хвилини тиск знижується до необхідної позначки і внутрішня частина випічки

охолоджується, наприклад, до 15...20°C. Стабілізувавшись в процесі охолодження структура скоринки залишається в колишньому вигляді і після вирівнювання тиску, гарантуючи довге збереження хрусткості та стабільність при тривалому зберіганні. Стабілізація скоринки підвищує стійкість чутливих продуктів до механічних навантажень, що значно спрощує поводження з ними. Об'єм напівфабрикату приблизно відповідає обсягу готової випічки. Для деяких типів випічки можна навіть отримати надбавку в об'ємі до 20 відсотків. Збільшення об'єму продукту залежить від його властивостей та рецептури. Ще один феномен: водомісткі начинки (наприклад, фруктові або сирні), починаючи кипіти, не осідають, а розподіляються в наявному просторі закритої тістової заготовки.

Додатковий аспект — швидке проходження критичних в мікробіологічному плані температур від 60 до 30°C. Після охолодження відбувається вирівнювання тиску в камері за допомогою стерильного, відфільтрованого повітря, яке також проникає в випічку. Все це значно знижує мікробіологічне навантаження. У порівнянні з класичним ланцюжком глибокого охолодження — від шокової заморозки з низькотемпературним складом до низькотемпературного транспортування і низькотемпературного зберігання в магазині — тут ми маємо більш просту логістику, оскільки для доставки не потрібні низькотемпературні рефрижератори. Охолоджена за допомогою вакууму і заварена в пакети випічка може до 10 днів зберігатися при плюсових температурах, що дозволяє значно знизити потреба в холодильних площах.

## **2. РОЗРОБКА НОВОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Технологія виробництва хліба є трудомістким і достатньо тривалим процесом. У зв'язку з тим, що цей процес включає багато технологічних операцій, зміна тривалості яких приводить до погіршення якості продукту, традиційна технологія залишалася довгий час незмінною. Це привело до обмеження асортименту хлібобулочних виробів; відсутності свіжого і гарячого хліба в ранній час; створенню нічних змін і збільшенню навантаження на пекарів, що працюють в нічну зміну; а також відсутності свіжого хліба на віддалених пунктах харчування і торгівлі. Ці проблеми, викликані безперервністю і довготривалістю процесу виробництва хлібобулочних виробів, необхідно було вирішити розділенням процесу випічки хліба на етапи, збільшенням або зменшенням тривалості проміжних процесів, що дозволяло б робити технологію гнучкішою, і в той же час не знижувало б якість випеченого хліба.

«Двохетапна» випічка з використанням проміжного вакуумно-випарного охолодження є технічним рішенням даних проблем. Вона включає операції: приготування тіста; формування; вистійки; попередньої випічки; швидкого охолодження напівфабрикату виробу у вакуумній камері; подальшого його зберігання в холодильній камері; допікання частково випеченого і охолодженого хліба. Технічна реалізація нової технології на хлібозаводах пов'язана з необхідністю використання вже існуючого устаткування з додаванням механізованого комплексу для вакуумно-випарного охолодження.

«Двохетапна» технологія випічки хліба включає: попередню випічку, яка складає 80% від загального часу випічки виробу за традиційною технологією, стандартний температурний режим залишається незмінним для кожного конкретного хлібобулочного виробу; вакуумно-випарне

охолодження до температури  $t = 0...+2^{\circ}\text{C}$ ; упаковку і зберігання частково випеченого і охолодженого хліба при температурі  $t = 0...+2^{\circ}\text{C}$ , кінцеву випічку виробу при температурі  $t = 180...210^{\circ}\text{C}$ .

Альтернативою традиційним способам охолодження є вакуумно-випарне. У цьому процесі вільна і розділена в об'ємі продукту волога, випаровуючись, відбирає теплоту. Процес релаксації між змінами тиску насиченої пари і температури рідини протікає швидко. На основі систематизації відомостей про фізичні процеси, що протікають при вакуумно-випарному охолодженні тіл, фізична модель будувалася на наступних уявленнях і допущеннях: тіло має пористість 70...80% і високу паропроникність; в процесі вакуумно-випарного охолодження може відбутися перерозподіл маси вологи за об'ємом заготовки, при цьому вологість охолоджуваного тіла достатня для його вакуумно-випарного охолодження без утворення сухих зон і суцільних меж фазових переходів; фазові переходи «рідина пара» відбуваються у всьому об'ємі тіла одночасно відповідно до локальних значень температури і тиску в кожній точці охолоджуваного вибору; фазовий перехід відбувається за відсутності підведення тепла ззовні за рахунок зменшення внутрішньої енергії вибору і, як наслідок, супроводжується зменшенням температури вибору.

Відповідно до розробленої фізичної моделі процесу було побудовано математичну, така, що дозволила розглянути різні аспекти процесу. Найбільший інтерес представляє розподіл температур по товщині вибору при вакуумно-випарному і конвективному охолодженнях. Встановлено, що тіло з однаковою масою і формою охолодження в 100 разів швидше вакуумно-випарним охолодженням, ніж конвективним. Все відбувається через те, що при такому способі охолодження швидкість процесу не обмежується повільнішим процесом теплопровідності, як конвективному способі. Велике значення має і вологість охолодження продукту.

Процеси охолодження і нагрівання вивчаються давно та несправедливо вважати, що вони вивчені досконало і повно. Джерела теплоти і способи його підведення багатообразні і за часом протікання процесу деколи просто незрівняні, як конвективний поверхневий спосіб нагріву і нагрів струмами високої частоти і мікрохвилями. А для відведення теплоти (охолодження) дотепер досконально розглядали тільки поверхневий спосіб. Об'ємний спосіб охолодження швидкий, в декілька десятків або сотень разів, вважався утопією. Останнім часом з'явилися спроби використовувати для об'ємного охолодження вакуумно-випарне охолодження, яке позитивно зарекомендувало себе при охолодженні овочів і фруктів, хоча в їх випадку воно використовувалося як швидший поверхневий спосіб охолодження. Цей спосіб охолодження вимагає розміщення виробів у вакуумній камері із залишковим тиском, відповідним температурі насиченої пари води, близької  $+2^{\circ}\text{C}$ . При цьому волога виробу інтенсивно випаровується і тим охолоджує його. Швидкість випаровування вологи і відповідна їй швидкість охолодження визначаються продуктивністю системи вакуумування.

Традиційні способи охолодження харчових продуктів конвективним потоком холодного повітря не завжди можуть бути використані для проміжного охолодження харчових продуктів. Це пов'язано з обмеженнями по температурі охолоджуючого середовища, яке, будучи достатньо низькою, повинне залишатися позитивним і не допускати заморожування продукту. Через малих перепадів температур ( $T_{\text{прод}} - T_{\text{камери}}$ ) тривалість процесу росте, (особливо на його останній стадії) стають істотними усихання і нерівномірність розподілу вологи за об'ємом охолоджуваного об'єкту. Все це призводить до погіршення умов подальшого зберігання і відхилення від стандартів якості продукту на вигляд, кислотності, мікрофлорі і т.п.

Альтернативою цим способам є вакуумно-випарне охолодження, в якому вологий охолоджуваний продукт сам по собі служить регульованим по температурі холодоагенту. Основна вимога до належного охолодження продукту вакуумно-випарним способом — це достатньо велика пористість, що дозволяє парам, що утворюються всередині капілярно-пористого тіла, вільно покидати його і віддалятися разом з відкачуваним повітрям.

Вакуумно-випарне охолодження здійснюється в результаті відбору теплоти від продукту при випаровуванні вологи з нього. Випаровування вологи викликається пониженням тиску (створенням вакууму). У зв'язку з достатньо рівномірним розподілом вільної вологи у виробках охолодження так само йде у всьому об'ємі охолоджуваного виробу. Позитивною властивістю вакуумно-випарного охолодження є простота регулювання швидкості процесу. При вакуумно-випарному охолодженні пошкодження кристалами льоду структури пористих виробів неможливі із-за позитивних температур на весь період охолодження. Ці якості вакуумно-випарного охолодження харчових продуктів використовуються для охолодження вологих рослинних продуктів: грибів, салату, зеленних культур і ін. У всіх випадках наголошувалася висока швидкість охолодження, а обезводнення продукту відповідало кількості випарованої води і ступеня його охолодження.

Для повного вивчення процесу вакуумно-випарного охолодження необхідно було підібрати харчовий продукт ідеальним капілярно-пористим тілом, що є. Було розглянуто публікації про вакуумно-випарне охолодження різних харчових продуктів, зокрема напівфабрикатів і готових хлібобулочних виробів. У них наголошувалося, що охолодження під вакуумом може прискорити охолодження хлібобулочних виробів. Наприклад, тонкі вироби типу panettoni (італійський пиріг) можуть бути охолоджені за 4 хв. під вакуумом в порівнянні з двадцяти чотирьох годинним конвективним охолодженням. Це привело до того, що багато

італійських виробників даного виробу перейшли на нову технологію охолодження. Проте із-за структурних змін, викликаних надмірним перепадом тиску пари у області низької газопроникності (хлібної скориночки), необхідна спеціалізована програма досягнення вакууму. Використання модульованого вакуумного холодильника (MVC) дозволяє одержати швидке охолодження хлібобулочних виробів без несприятливої зміни їх об'єму і структури. Замість того, щоб застосовувати вакуумування з постійною швидкістю відкачування, тиск в герметичній камері змінюється по заданому закону протягом всього часу охолодження. Вакуумно-випарне охолодження хлібобулочних виробів здійснюється в температурному діапазоні 98...30°C, який супроводжується втратою маси виробу приблизно на 1 % при зниженні його температури на кожні 10°C, або на 6,8% при зниженні температури від 98°C до 30°C. В той же час, звичайне конвективне охолодження приводить до втрати маси на 3...5 % в залежності від швидкості охолоджуючого повітря [1, 3]. Різниця між втратами маси незначна. Пшеничний хліб, французькі батони, пироги з м'ясом, печиво і пироги, що охолоджуються традиційно за 1±3 години, можуть бути охолоджені за час від 30 секунд до 5 хвилин у вакуумно-випарній установці.

Процес вакуумно-випарного охолодження має переваги як за якістю і за зовнішнім виглядом виробу, так і за рахунок скорочення часу охолодження, коли зменшується кількість споживаної енергії. Крім того, продукція може довгий час зберігатися при плюсових температурах. Збільшений термін придатності виробів через відсутність зараження мікробами протягом охолодження поза сумнівом є великою перевагою вакуумно-випарного способу охолодження.

Дослідження направлені на виявлення кінетичних закономірностей і розробку фізичної моделі тепло- і масообміну у взаємозв'язаних процесах

зневоднення, охолодження, перенесення вологи при вакуумно-випарному охолодженні.

Спосіб вакуумно-випарного охолодження ґрунтується на процесі в якому вільна і розподілена в об'ємі продукту волога, випаровуючись, відбирає теплоту. Процес релаксації між змінами тиску насиченої пари і температури рідини протікає швидко. На основі систематизації відомостей про фізичні процеси, що протікають при вакуумно-випарному охолодженні харчових продуктів, фізична модель будувалася на наступних уявленнях і допущеннях: хлібобулочний виріб після першого етапу випічки розглядається як капілярно-пористе тіло з пористістю 70...80% і високої паропроникності; в процесі вакуумно-випарного охолодження може відбуватися перерозподіл маси вологи за об'ємом заготовки, при цьому вологість охолоджуваного напівфабрикату достатня для його вакуумно-випарного охолодження без утворення сухих зон і суцільних меж фазових переходів; фазові переходи «рідина-пара» відбуваються у всьому об'ємі напівфабрикату одночасно відповідно до локальних значень температури і тиску в кожній точці охолоджуваного виробу; фазовий перехід відбувається за відсутності підведення тепла ззовні за рахунок зменшення внутрішньої енергії виробу і, як наслідок, супроводжується зменшенням температури виробу.

В результаті проведених досліджень встановлено, що вакуумно-випарне охолодження набагато інтенсивніше за конвективне. Воно забезпечує охолодження продукту від 80°C до 0...2°C за 3...6 хв.

При цьому на відміну від конвективного при вакуумно-випарному охолодженні температури на поверхні і в глибині тіста-хліба однакові по всьому об'єму виробу. При збільшенні швидкості вакуумування тривалість охолодження різко зменшується. Збільшення маси охолоджуваних виробів навпаки пропорційно збільшує час охолодження.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вивчення ТФХ тіста-хліба в процесі теплової обробки проводились на установках, що розроблені в Національному університеті харчових технологій. ТФХ тіста-хліба визначались методом регулярного режиму II-роду методом плоского імпульсного джерела теплоти. Вивчення ТФХ матеріалів, що використовуються в конструкціях подів проводилися методом регулярного режиму II-роду, при розрізненні експерименту в часі.

Для методу регулярного режиму II-роду готувався зразок тіста-хліба діаметром  $d = 140$  мм, товщиною  $\delta = 9...14$  мм. Маса і вологість зразка визначалися стандартними методами після чого зразок поміщали у вимірювальний пристрій (рис. 3.1). При проведенні експерименту через певний інтервал часу ( $\tau_0 = 5+10$  хв.) знімали показники теплових потоків і температур з верхньої і нижньої поверхні зразка.

Для вивчення теплопровідності тіста в процесі бродіння експеримент повторювали. Тісто готувалося безопарним способом із пшеничного борошна I сорту по відповідній рецептурі. Бродіння тіста відбувалося у вимірювальному пристрої при постійній температурі  $t = 32^\circ\text{C}$ . Результати експериментів оброблювалися за відомими методиками.

При дослідженні методом плоского імпульсного джерела теплоти готувалися дві пластини тіста-хліба діаметром  $d = 136$  мм, товщиною  $\delta = 15...20$  мм. Маса та вологість визначалися на початку і в кінці експерименту. Двохскладовий зразок помістили у вимірювальний пристрій (рис. 3.2). Після імпульсу теплоти внутрішнім джерелом визначалася швидкість поширення максимуму температури.

Для дослідження ТФХ матеріалів, що використовуються в конструкції подів, розроблений спосіб здійснювався за два прийоми (тимчасове розрізнення експерименту) при двох різних теплових режимах, підведенням різної електричної сталої потужності до плоского електронагрівача. Зразок

готувався із двох плоскопаралельних пластин, з однаковими ТФХ, між якими поміщували плоский центральний і охоронний електронагрівач. Двоскладовий зразок вертикально поміщали в теплоізолюючу камеру з регульованою температурою повітряного середовища.

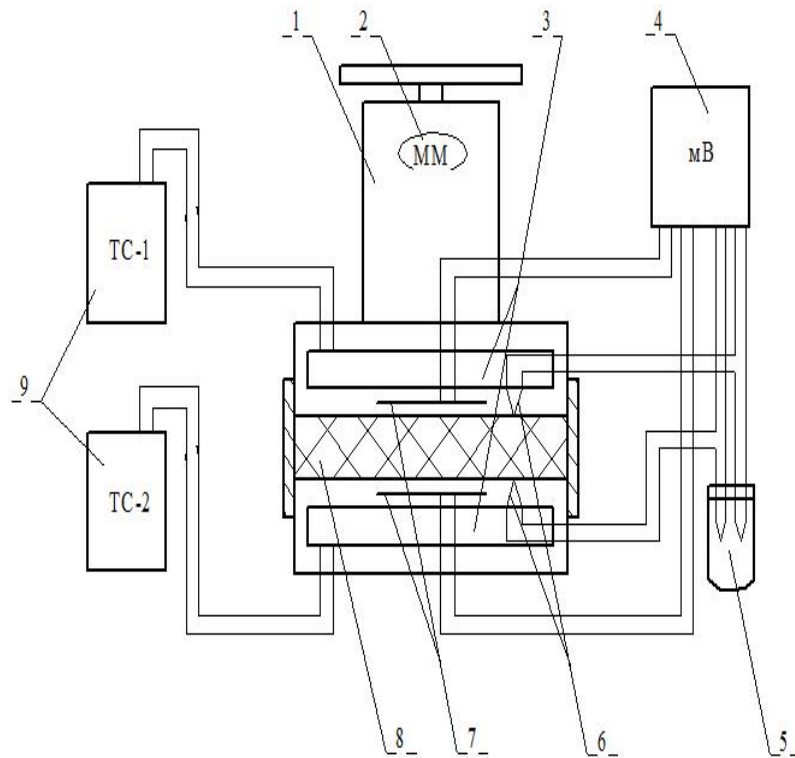


Рис. 3.1. Установка для комплексного визначення ТФХ тіста-хліба:  
 1 – вимірювальний пристрій, 2 – мікрометр, 3 – теплообмінні камери,  
 4 – потенціометр, 5 – посудина Дьюара, 6 – термопари, 7 – тепломіри,  
 8 – зразок, 9 – ультратермостат

Через визначений інтервал часу ( $\tau = 5 \dots 10$  хв.) знімали покази температур поверхні пластин та електричної потужності нагрівача.

Для дослідження теплового стану подів проведений аналіз вибраних матеріалів, що використовуються в їх конструкції. Розроблена математична модель хлібопекарської печі для проведення обчислювального експерименту, що дозволило, проводячи обчислювальний експеримент, встановити вплив ТФХ матеріалу поду на зміну його теплового стану.

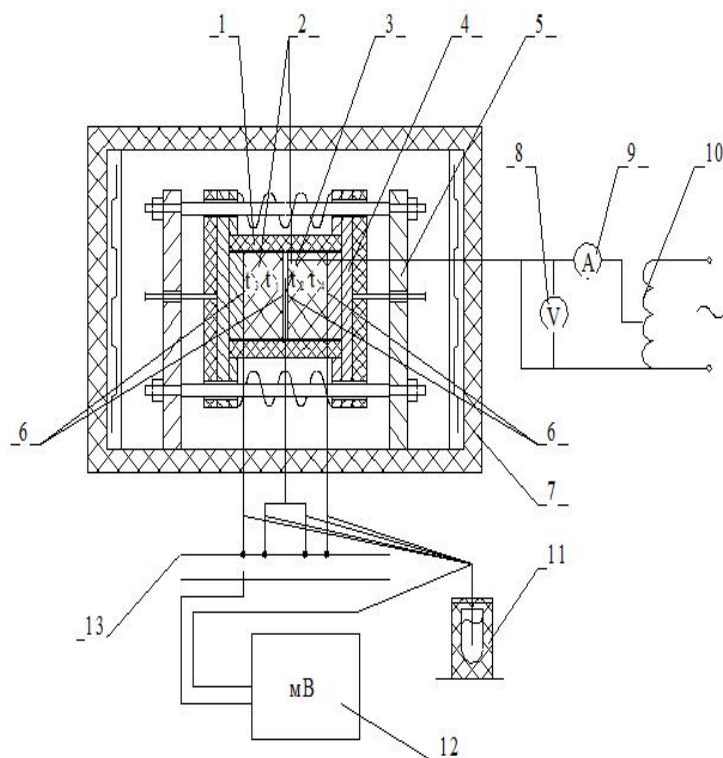


Рис. 3.2. Установка для комплексного вимірювання ТФХ тіста-хліба:

1 - вимірювальний пристрій, 2 - двохскладовий зразок, 3 - плоский електронагрівач, 4 - притискна кришка, 5 - станина, 6 - термопари, 7 - теплоізолююча камера, 8 - вольтметр, 9 - амперметр, 10 - ЛАТР, 11 - посудина Дьюара, 12 - мілівольтметр, 13 - галетний перемикач

Теплоспоживання тістової заготовки при різних температурах середовища та гріючих поверхнях в робочій камері печі визначені у виробничих та лабораторних умовах.

**Установка для визначення ТФХ (м'якуша і тіста) методом регулярного режиму II-го роду.** Установка для визначення ТФХ, яка змонтована в НУХТ, складається із вимірювального пристрою 1, двох ультратермостатів 9 та самописного потенціометру 4 (рис. 3.1). Вимірювальний пристрій складається із двох теплообмінних камер 3, між якими поміщують зразок 8. Через камери із термостатів прокачують воду. Швидкість зміни температури води однаково постійна. Нижня камера, що має меншу температуру, установлена на станині пристрою 1, верхня камера,

що має більшу температуру, переміщується за допомогою гвинта вздовж вертикальної осі. Відстань між камерами, тобто товщина зразка, вимірюється мікрометром 2.

В днищах камер, з боку зразка, установлені датчик температури – гарячий спай мідь – константової термопарі 6 і датчик густини теплового потоку – термоелектричний тепломір 7. Холодні спаї термопар знаходяться в посудині Дьюара 5 із льодом, що тане.

Тепломір являє собою тонкий пластмасовий диск діаметром 60 мм і товщиною 1,5 мм, в якому вкладена плоска спіраль із 3000 послідовно включених диференційних термопар. При появі на диску перепаду температур виробляється термоЕРС, що пропорційна густині теплового потоку, який проходить крізь неї.

Ультратермостати 9 – ємності з водою, оснащені системою нагрівання і автоматичного регулювання температури води, а також зануреним центробіжним насосом для подачі цієї води в теплообмінні камери вимірювального пристрою.

Масу зразка вимірювали на лабораторних вагах до і після досліду, вологість – приладом ВНІХП-В4 (конструкції Чижової).

**Установка для вимірювання ТФХ тіста-хліба методом плоского імпульсного джерела теплоти.** Установка, що змонтована на кафедрі МАХФВ НУХТ (рис. 3.2.) складається із вимірювального пристрою 1, станини 5, мілівольтметра 12, вольтметра 8, амперметра 9, ЛАТРа 10, теплоізолюючої камери 7.

Вимірювальний пристрій складається із циліндричної камери, в яку з двох сторін поміщують зразок 2. Між пластинами зразка встановлений плоский електронагрівач 3. Із торців циліндрична камера із зразком закривається притискними кришками 4. На поверхні плоского електронагрівача і притискних кришках установлені датчики температури – гарячий спай мідь-константових термопар. Холодний спай термопар

знаходиться в посудині Дьюара 11 із льодом, що тане. Сигнал із датчиків температури надходить через галетний перемикач 13 на мілівольтметр 12.

**Установка для вимірювання теплових потоків на поверхні і всередині тістової заготовки.** Для забезпечення раціонального теплового режиму в робочій камері хлібопекарської печі необхідна інформація про всі її параметри і їх зміну в часі. Дуже важливо знати необхідну кількість теплової енергії, що затрачається на утворення скоринки і прогрівання тістової заготовки.

Досліди проводили на експериментальній установці, що складається із електропечі із регульованою температурою середовища пекарної камери, датчиків температури (мідь-константових термопар), датчиків теплового потоку (системи послідовно з'єднаних мідно-константових термоелектродів), самописного потенціометра, посудини Дьюара з льодом, що тане. Датчик теплових потоків являє собою пластину товщиною 1...1,5 мм, в яку укладено плоску спіраль із послідовно включених диференційних термопар. При появі на пластині перепаду температур виробляється термоЕРС, що пропорційна густині теплового потоку, що проходить через неї. Тепломіри виготовлені щілинні і перфоровані в напрямку потоку вологи і потоку маси речовини. Тістова заготовка формувалася із плоских паралельних пластин, між якими розміщували теплоелектричний тепломір із приєднаною до нього диференційною термопарою. Шари термопари рознесені на відому величину в досліджуваному матеріалі. Глибину закладання тепломірів визначали на початку і в кінці досліду.

**Установка для вимірювання ТФХ матеріалів, що використовуються в конструкціях поду.** Установка (рис. 3.3.) складається із двох плоскопаралельних пластин 1, 2 рівної товщини з однаковими ТФХ, між якими розміщується плоский електронагрівач, що складається із центрального 3 і охоронного 4, вертикально розміщених в тепло ізолюючу камеру 5 з регульованим тепловим станом середовища.

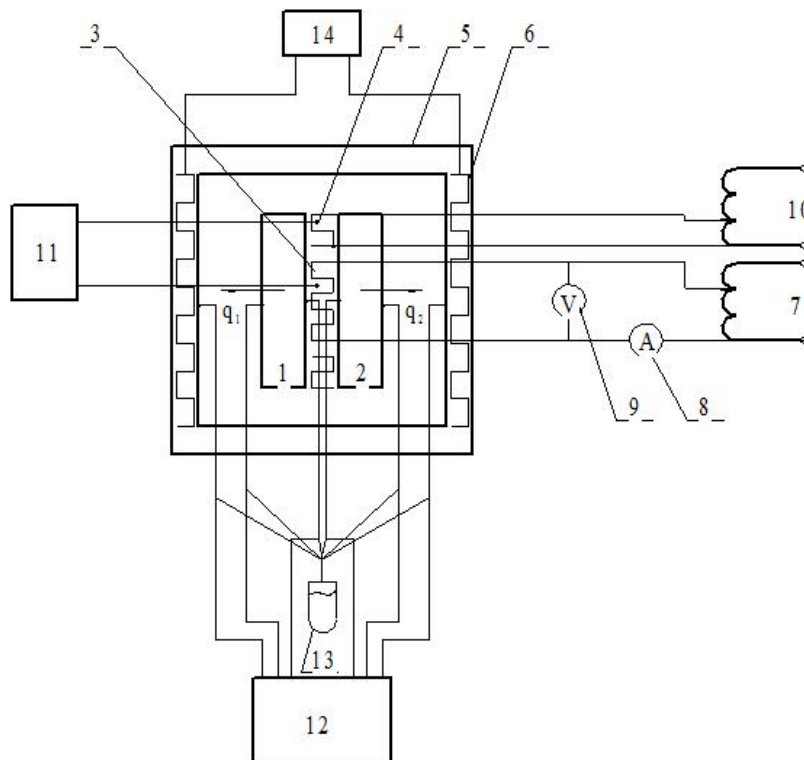


Рис. 3.3. Установа для вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів: 1, 2 - плоскопаралельні пластини, що досліджуються, 3 - центральний, 4 - охоронний плоскі електронагрівачі, 5 - теплоізолююча камера, 6 - коловий електронагрівач, 7, 10 - ЛАТР, 8 - амперметр, 9 - вольтметр, 11 - гальванометр, 12 - потенціометр, 13 - посудина Дьюара, 14 - автоматичний програмний задаючий пристрій

Нагрівання зразка здійснюється підведенням до плоского електронагрівача електричної потужності через ЛАТР 7. Підведена потужність вимірюється амперметром 8 і вольтметром 9. Нульова різниця температур між центральним і охоронним плоским електронагрівачем підтримується регулюванням ЛАТРОм 10, а відхилення фіксується гальванометром 11. Підтримання нульової різниці температур між досліджуваним зразком і внутрішньою поверхнею теплоізолюючої камери досягається за рахунок регулювання потужності нагрівача теплоізолюючої камери, що відбувається по закону:

$$\frac{W}{F_p} = a \ln^3 \tau + b \ln \tau + c, \quad (3.1)$$

де  $W$  - потужність нагрівача, Вт;

$F_p$  - робоча площа, м<sup>2</sup>;

$\tau$  - поточний час;

$a, b, c$  - сталі коефіцієнти, що залежать від ТФХ досліджуваного зразка і конструкції теплоізолюючої камери, що визначалися з досліду.

Температури поверхні пластин, внутрішні поверхні теплоізолюючої камери вимірюються термопарами, що з'єднані з потенціометром 12. Холодний спай термопар поміщений в посудину Дьюара 13.

### **Визначення ТФХ тіста-хліба методом регулярного режиму II-го роду.**

Для визначення ТФХ тіста-хліба готується зразок діаметром 140 мм, товщиною  $\delta = 9 \dots 14$  мм, який зважується і встановлюється у вимірювальній пристрій. Починаючи з деякого часу  $\tau_1$  процес теплопровідності перестає залежати від початкового розподілення температур, і настає стадія регулярного режиму II-го роду, тобто в пластині встановлюється лінійне розподілення щільності теплового потоку і параболічний розподіл температури, при якому швидкість зміни температури  $\frac{dt}{d\tau} = U$  і у всіх точках однакова (рис. 3.4.).

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_n}{\lambda} \left( \frac{a \cdot \tau}{\delta} - \frac{\delta^2 - 3x^2}{6\delta} \right) \quad (3.2)$$

$$q(x, \tau) = q_n \frac{x}{\delta} \quad (3.3)$$

Рівняння (3.2) і (3.3) справедливі в стадії регулярного режиму II-роду не тільки для всієї пластини товщиною  $\delta$ , але і для будь-якого її шару товщиною  $x_1 - x_2 = h$  якщо густина теплового потоку на його поверхні  $q_1$  і  $q_2$  незмінні в часі.

Вимірявши в будь-який момент стадії регулярного режиму нагрівання плоского зразка його товщину  $h$ , густину теплового потоку  $q_1$  і  $q_2$  температури  $t_1$ ,  $t_2$ , швидкість зміни температури однієї із його поверхонь, визначимо ТФХ зразка за формулами, що отримано із рівнянь (3.2) і (3.3):

$$\lambda = h \left( \frac{2\Delta t}{q_1 + q_2} - R_0 \right)^{-1} \quad (3.4)$$

$$c\rho = \frac{1}{h} \left( \frac{q_1 - q_2}{U} - P_0 \right) \quad (3.5)$$

$$a = \frac{h^2 \Delta t (q_1 + q_2)}{[(q_1 - q_2)\Delta \tau - P_0 \Delta t] \cdot [2\Delta t - R_0 (q_1 + q_2)]} \quad (3.6)$$

де  $R_0$  - баластний термічний опір;

$P_0$  - баластна теплоємність.

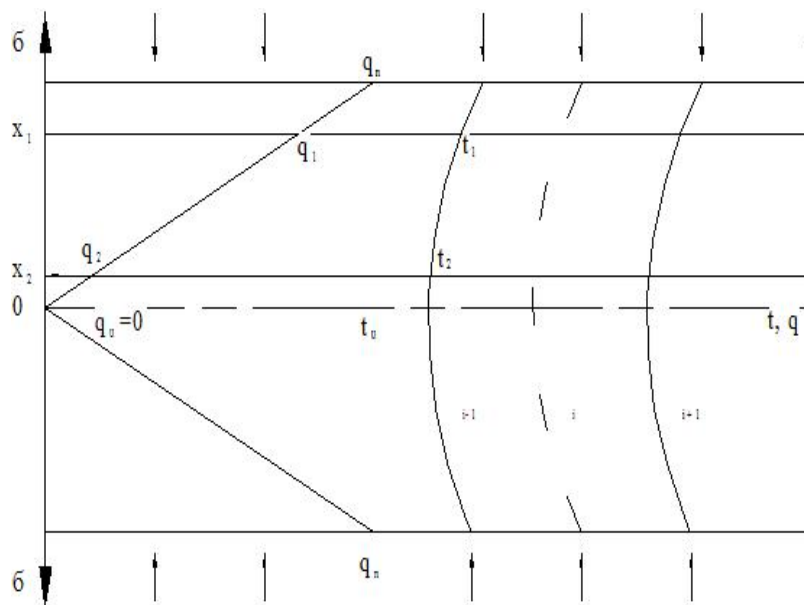


Рис. 3.4. Поля температур і теплових потоків по висоті зразка при регулярному режимі II-го роду

Баластні характеристики визначаються в градуйованих дослідах з еталонними матеріалами. Тут виключено похибки від зміни нестационарних теплових потоків, так як досліди проводяться в квазістационарному режимі,

не впливає зусилля притискування зразка (при гарному контакті зразка з тепломіром), враховані також похибки: неоднорідність температурного поля в зразках, вплив раціонального і конвективного теплопереносу, вплив баластних характеристик приладу. Випадкові похибки оцінюються статично. Відносна середньоквадратична похибка складає 3...5%.

Метод регулярного режиму II-го роду, що реалізується на теплометричних ТФХ приладах, дозволяє при дослідженні ТФХ підвищити точність вимірювання і суттєво розширити можливість програмування дослідів з метою наближення останніх до реальних виробничих умов.

**Імпульсний метод миттєвого плоского джерела теплоти.** Метод засновано на вирішенні одномірного рівняння теплопровідності для необмеженого тіла у випадку дії в ньому протягом часу  $\tau_0$  короткочасного джерела теплоти. Розглянемо зразок з початковою температурою  $t(x,0) = T$ ,  $T = const$  всередині якого в площині  $P(0,y,z)$  діє протягом часу  $\tau_0$  тепловий імпульс заданої величини поверхневої енергетичної густини  $q_n$  (Дж/м<sup>2</sup>). Особливості «розсмоктування» імпульсу всередині середовища представлено на рис. 3.5. При однорідному середовищі досліджуваного зразка задача має аналітичне вирішення:

$$t(x, \tau) = [q_n / (2\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \tau})] \exp[-x^2 / (4a \cdot \tau)], \quad (3.7)$$

де  $\sqrt{\lambda c \rho} = b_a$  - теплова активність тіла.

Із функції (3.7) випливає, що для визначення ТФХ достатньо виміряти температуру в будь-якому одному ізотермічному перерізі  $x_0$  тіла:

$$t(x_0, \tau) = [q_n / (2\sqrt{\pi \lambda c \rho \tau})] \exp[-x_0^2 / (4a \tau)]. \quad (3.8)$$

Найхарактернішою точкою на кривій  $t(x_0, \tau_m)$  є точка максимуму  $t_m = t(x_0, \tau_m)$ . Використовуючи її значення, визначаємо теплоємність:

$$c = q_n / (\sqrt{2\pi d} \cdot \rho \cdot x_0 \cdot t_m) = 0,241 q_n / \rho \cdot x_0 \cdot t_m. \quad (3.9)$$

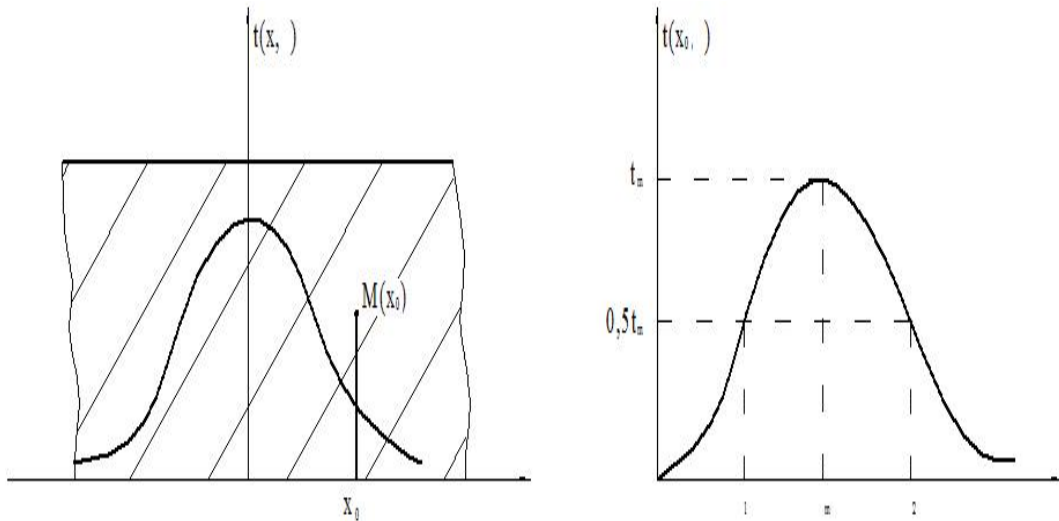


Рис. 3.5. Особливості поширення імпульсу теплоти всередині зразка

Другу ТФХ можна обчислити, використовуючи будь-яку точку кривої  $t(x_0, \tau)$ . Частково, для  $t_m = t(x_0, \tau_m)$  маємо:

$$a = x_0^2 / (2\tau_m). \quad (3.10)$$

На жаль, реєстрація  $\tau_m$  відзначається низькою точністю, в зв'язку з цим доцільно використовувати ділянки кривої  $t(x_0, \tau)$ , що мають найбільшу крутизну, наприклад точки  $t(x_0, \tau_1) = t(x_0, \tau_2) = 0,5t_m$  для яких:

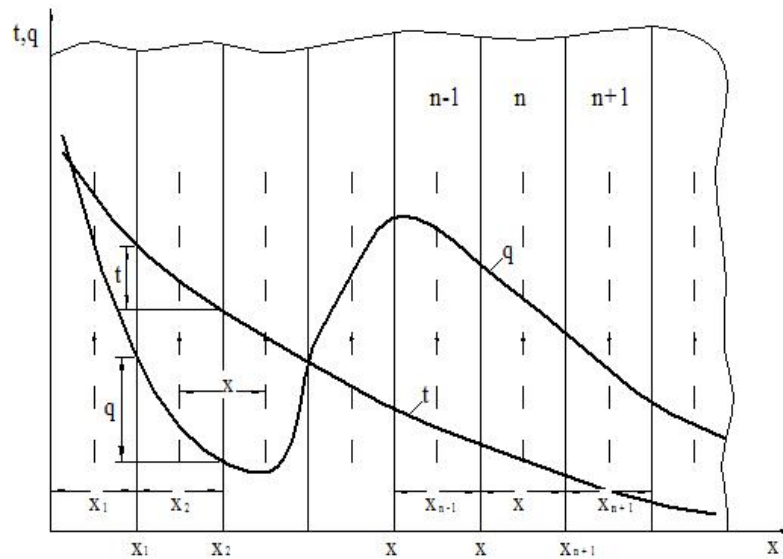
$$\left. \begin{aligned} a &= x_0^2 / (7,40 \cdot \tau_1) \\ a &= x_0^2 / (0,202 \cdot \tau_2) \end{aligned} \right\}. \quad (3.11)$$

Так як:  $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$

$$\lambda = \frac{0,241 q_n \rho}{\rho x_0 t_m} \cdot \frac{x_0^2}{2\tau_m} = 0,1205 q_n x_0 / t_m \tau_m. \quad (3.12)$$

**Методика розрахунку потоку теплоти в плоскій поверхні.** Тістова заготовка розбивається на елементарні шари, паралельні поверхні, кінцевого розміру  $\Delta x$  (рис. 3.6а). Приймається, що властивості матеріалу кожного шару зосереджені в ньому. Таким чином переходять від поля матеріалу конструкції з неперервно розподіленими ТФХ до ланцюга провідних елементів (рис. 3.6б) із зосередженими ТФХ. Прийнято вважати,

що теплова ємність кожного елемента (елементарного шару) зосереджена в центрі, а провідність теплоти матеріалом між шарами.



a)



б)

Рис. 3.7. Методика розрахунку потоку теплоти в плоскій поверхні

Процес нестационарного перенесення теплоти характеризується двома складовими: провідністю і акумуляцією. Рівняння в одновимірній постановці може бути виражене наступними диференціальними рівняннями, кожне з яких може бути використане тільки до елементарного шару:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{d^2t}{dx^2} \quad (3.13)$$

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}; \quad (3.14)$$

$$\frac{dq}{dx} = -\lambda \frac{d^2t}{dx^2}; \quad (3.15)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{c\rho} \cdot \frac{dq}{dx}. \quad (3.16)$$

Густина теплового потоку через поверхні  $n$ -го шару на координатах ( $x_n$  і  $x_{n+1}$ ) визначається за формулою (3.14), в якій частинна похідна замінена кінцевими різницями:

$$q_n = \frac{\lambda}{\Delta x}(t'_{n-1} - t_n); \quad (3.17)$$

$$q_{n+1} = \frac{\lambda_{n+1}}{\Delta x}(t'_n - t_{n+1}). \quad (3.18)$$

Різниця теплових потоків іде на акумуляцію теплоти шаром. При цьому зміна температури  $\delta t = t'_n - t$  елементарного шару за час  $\Delta \tau = \tau' - \tau$  відбувається за рахунок накопичення теплоти:

$$Q = (q_n - q_{n+1})F \cdot \Delta \tau = c\rho_n \cdot \Delta x(t'_n - t_n)F. \quad (3.19)$$

Підставляємо (3.17) і (3.18) в це рівняння, замінюючи  $\lambda_n$  і  $\lambda_{n+1}$  на  $\bar{\lambda}_n \approx \lambda_n$ :

$$c\rho_n \frac{\Delta x}{\Delta \tau}(t'_n - t_n) = \frac{\lambda_n}{\Delta x}(t'_{n-1} - t_n - t_n - t_{n+1}); \quad (3.20)$$

і вирішуємо відносно  $t'_n$ :

$$t'_n - t_n = \frac{\lambda_n}{c\rho} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}(t'_{n-1} + t_{n+1} - 2t_n). \quad (3.21)$$

Частина виразу являє собою число Фур'є  $F_{0q}$  підставляючи символ якого в кінцеву формулу отримаємо:

$$t'_n = F_{0q} \left( t'_{n-1} + t_{n+1} + t_n \left( \frac{1}{F_{0q}} - 2 \right) \right). \quad (3.22)$$

Ця формула дозволяє послідовно, від першого до останнього шару – і від першого до останнього моменту часу процесу, розраховувати температури на межах елементарних шарів, тобто отримувати температури пластини в часі в будь-якому нестационарному процесі. Користуючись рівняннями (3.14) і (3.16) отримаємо формули для розрахунку густини теплового потоку на поверхнях елементарних шарів:

$$q = \frac{\lambda_n}{\Delta x}(t'_{n-1} - t_n); \quad (3.23)$$

$$q_{n+1} = q - c\rho_n \Delta x \frac{t'_n - t_n}{\Delta \tau}. \quad (3.24)$$

Із рівняння (3.22) випливає, що значення розрахункових температур залежить від числа  $F_{0q}$ , тобто від способу розбиття просторово-часової області. Вибираючи інтервали розбиття  $\Delta x$  і  $\Delta \tau$  можна отримати при даних ТФХ будь-яке значення  $F_{0q} = \frac{\lambda_n \Delta \tau}{c\rho_n \Delta x^2}$ . Але, як показує аналіз, рішення стійке не при будь-якому  $F_{0q}$ , і відповідно вибір  $\Delta x$  і  $\Delta \tau$  не довільний. Аналіз відхилення числового розрахунку від точного рішення показує, що стійкість розрахунку забезпечується при  $(2F_{0q-1}) \leq 0$ , тобто  $F_{0q} \leq \frac{1}{2}$ . Розрахункові формули (3.22), (3.23), (3.24) дозволяють розраховувати температурне поле і теплові потоки в процесах із змінними ТФХ, а також розраховувати дійсні локальні ТФХ по даним підшарових теплотричних вимірювань.

**Метод визначення ТФХ матеріалів, що використовуються в конструкції поду хлібопекарських печей.** Для обґрунтування методу і виведення розрахункових формул комплексного визначення ТФХ матеріалів використана постановка до вирішення задачі теплопровідності при граничних умовах II-роду. Тут коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  при відомому тепловому потоці на обох поверхнях плоскопаралельної пластини, визначається із формули:

$$\lambda = \frac{(q_A + q_B)h}{2\Delta t}, \quad (3.25)$$

де  $q_A$ ,  $q_B$  - відповідно густина теплового потоку на протилежних поверхнях пластини, Вт/м<sup>2</sup>;

$h$  - товщина пластини, м;

$\Delta t$  - різниця температур на товщині  $h$ , К.

Для того, щоб не виконувати вимірювання теплового потоку на протилежній поверхні  $q_B$  (при відомому тепловому потоці на одній поверхні  $q_A$ ) виконаємо вирішення рівняння (3.25) таким чином, щоб позбутися  $q_B$

$$q_B = q_A - \Delta q. \quad (3.26)$$

Тоді:

$$\lambda = \frac{(2q_A - \Delta q)h}{2\Delta t}. \quad (3.27)$$

В подальшому  $\Delta q$  виразимо через питому теплоємність:

$$c\rho = \frac{\Delta q}{h \cdot U} \rightarrow \Delta q = c\rho hU, \quad (3.28)$$

де  $U$  - швидкість нагрівання зразка, К/с.

Тоді:

$$\lambda = \frac{(2q - c\rho hU)h}{2\Delta t}. \quad (3.29)$$

Складемо систему рівнянь для двох дослідів при різних теплових режимах:

$$\begin{cases} 2\lambda\Delta t' = (2q' - c\rho hU')h \\ 2\lambda\Delta t'' = (2q'' - c\rho hU'')h \end{cases} \quad \text{- для I-го та II-го теплового режиму} \quad (3.30)$$

В цій системі дві невідомі  $\lambda$  і  $c\rho$ . Вирішення її відносно цих двох коефіцієнтів дасть наступні розрахункові формули визначення ТФХ для однієї плоскопаралельної пластини:

$$\text{- коефіцієнт теплопровідності } \lambda = \frac{h(q'U'' - q''U')}{\Delta t''U' - \Delta t'U''}; \quad (3.31)$$

$$\text{- коефіцієнт питомої теплоємності } c\rho = \frac{2(q'_1\Delta t'' - \Delta t'q''_1)}{h(U'\Delta t'' - U''\Delta t')}; \quad (3.32)$$

$$\text{- коефіцієнт температуропровідності дорівнює } a = \frac{h^2(q''U' - q'U'')}{2(q'_1\Delta t'' - q''_1\Delta t')}. \quad (3.33)$$

Формули (3.31), (3.32), (3.33) справедливі для визначення ТФХ плоскої плоскопаралельної пластини із відомим тепловим потоком на одній поверхні. Розглянемо двохскладовий зразок із відомим тепловим потоком, що створюється внутрішнім джерелом теплоти, на одній поверхні плоскопаралельної пластини. Потужність внутрішнього джерела теплоти (плоского електронагрівача) визначається як сума теплових потоків на внутрішній поверхні пластини:

$$W = Q_1 + Q_2 = (q_1 + q_2)F ; \quad (3.34)$$

$$Q = q \cdot F . \quad (3.35)$$

де  $q_1, q_2$  - відповідно густина теплового потоку на внутрішній поверхні однієї і другої пластини двохскладового зразка.

Для визначення коефіцієнта теплопровідності складемо систему рівнянь для 2-х пластин при двох швидкостях нагрівання зразка, використовуючи рівняння (3.35):

$$\begin{cases} \lambda(\Delta t_1'' \cdot U_1' - \Delta t_1' \cdot U_1'') = h(q_1'' \cdot U_1' - q_1' U_1'') \\ \lambda(\Delta t_2'' \cdot U_2' - \Delta t_2' \cdot U_2'') = h(q_2'' \cdot U_2' - q_2' \cdot U_2'') \end{cases} \quad (3.36)$$

Вирішимо систему рівнянь відносно коефіцієнта теплопровідності:

$$\lambda = \frac{h(\bar{U}'(q_1'' + q_2'') - \bar{U}''(q_1' + q_2'))}{\bar{U}'(\Delta t_1'' + \Delta t_2'') - \bar{U}''(\Delta t_1' + \Delta t_2')} \quad (3.37)$$

Для визначення питомої теплоємності складемо систему, використовуючи рівняння (3.19):

$$\begin{cases} c\rho h(U_1'\Delta t_1'' - U_1''\Delta t_1') = 2(q_1'\Delta t_1'' - \Delta t_1'q_1'') \\ c\rho h(U_2'\Delta t_2'' - U_2''\Delta t_2') = 2(q_2'\Delta t_2'' - \Delta t_2'q_2'') \end{cases} \quad (3.38)$$

звідки:

$$c\rho = \frac{2[(q_1'\Delta t_1'' + q_2'\Delta t_2'') - (q_1''\Delta t_1' + q_2''\Delta t_2')]}{h[\bar{U}'(\Delta t_1'' + \Delta t_2'') - \bar{U}''(\Delta t_1' + \Delta t_2')]} \quad (3.39)$$

Коефіцієнт температуропровідності визначимо як:

$$a = \frac{h^2[\bar{U}'(q_1'' + q_2'') - \bar{U}''(q_1' + q_2')]}{2[(q_1'\Delta t_1'' + q_2'\Delta t_2'') - (q_1''\Delta t_1' + q_2''\Delta t_2')]} \quad (3.40)$$

При аналізі точності визначення ТФХ проведена оптимізація параметрів і характеристик досліду, яка приводить до зниження похибки. Границі оптимальної області вимірювань при нагріванні зразка отримані експериментально  $1,8 < \frac{U'}{U''} < 5$ . Коефіцієнт теплопровідності, отриманий при стаціонарному тепловому режимі, має розходження від отриманого при квазістаціонарному режимі до 1%. Таким чином, метод регулярного режиму

II-го роду, реалізуємий для дослідження ТФХ матеріалів, дозволяє підвищити точність вимірювань і спростити методику проведення.

**Метрологічний аналіз вимірювальних засобів.** Однією з головних умов експерименту є відновлення дослідів. Ця умова пред'являється також при плануванні експерименту. Щоб пересвідчитися у відновлюваності результатів вимірювань, проводять декілька серій паралельних дослідів.

У використаній нами експериментальній установці визначення ТФХ тіста-хліба в регулярному режимі II-роду для визначення відновлюваності дослідів проводили 4 серії ( $N = 4$ ) по 3 досліди ( $K = 3$ ) в кожному. В якості параметрів, що вимірювалися приймали тепловий потік  $q_n, q_v$ , температуру  $t_n, t_v$  нижньої і верхньої поверхні зразка ( $Y_I, Y_{II}, Y_{III}, Y_{IV}$ ), швидкість нагрівання  $U(Y_V)$ . Визначали ТФХ м'якуша подового хліба із пшеничного борошна Іс. Оцінку дисперсії для кожної серії дослідів проводили за формулою:

$$S_i^2 = \frac{1}{K-1} \sum_j^k (Y_j - \bar{Y}_j)^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=3}^3 (Y_j - \bar{Y}_j)^2 \quad (3.41)$$

Відновлюваність дослідів оцінюється по критерію Кохрена, який визначається як відношення найбільшої із оцінок дисперсій до суми всіх оцінок дисперсій:

- для теплового потоку на нижній поверхні  $|Y_I| \quad G_p = \frac{18,75}{42,95} = 0,436;$
- для теплового потоку на верхній поверхні  $|Y_{II}| \quad G_p = \frac{29,18}{42,09} = 0,694;$
- для температури на нижній поверхні  $|Y_{III}| \quad G_p = \frac{0,67}{1,27} = 0,527;$
- для температури на верхній поверхні  $|Y_{IV}| \quad G_p = \frac{1,59}{3,75} = 0,423;$
- для швидкості нагрівання  $|Y_V| \quad G_p = \frac{1,3 \cdot 10^{-7}}{1,86 \cdot 10^{-6}} = 0,068.$

Отримані розрахункові значення критерію Кохрена порівнюють з табличним значення при  $N$  і  $f = K - 1$ . При  $G_p \leq G$  досліди вважають відновлюваними. Значення табличного  $G$  при  $N = 4$  і  $f = 2$ ,  $G = 0,745$ .

Як бачимо, отримані розрахункові значення критерію Кохрена при визначенні відновлюваності для вимірювання параметрів теплового потоку, температур, швидкості нагрівання надто менші табличних. Умова  $G_p < G$  витримана, досліди відновлювані. Аналогічно проводили дослідження для інших вимірюваних в процесі дослідження параметрів. У всіх випадках отримана добра відновлюваність результатів вимірювань.

**Визначення порогу чутливості вимірювальних приладів.** Однією із важливих характеристик вимірювальних приладів є поріг чутливості (реагування). Під ним розуміють зміну вимірюваної величини, що викликає найменшу зміну показників вимірювального приладу, яке ще може бути знайдене при нормальному для даного приладу способі відліку показників. Допустиме значення порогу чутливості задають в долях основної похибки (10...50%) або в ціні поділки шкали. Значення порогу чутливості приладів, що були нами використані в промислових дослідженнях, при визначенні зміни вимірювань не перевищували 50% їх основної похибки. Спираючись на правило трьох сигм, визначаємо метрологічний показник для використаних нами вимірювальних засобів:

$$A = \frac{3G}{\bar{Y}_i}, \quad (3.42)$$

де  $G$  - середньоквадратичне відхилення при повторенні вимірювань;

$\bar{Y}_i$  - середнє значення виміряного параметра;

$$G = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{n-1}} \quad (3.43)$$

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}, \quad (3.44)$$

де  $n$  - кількість повторів вимірювань.

Нами при оцінці точності вимірювань досліджуваних параметрів приводилось 5 серій по три досліди в кожній серії – всього 15 дослідів.

Для досліджуваних параметрів  $q_n|Y_I|$ ,  $q_e|Y_{II}|$ ,  $t_n|Y_{III}|$ ,  $t_e|Y_{IV}|$ ,  $U|Y_V|$  розраховані значення  $A_I$ ,  $A_{II}$ ,  $A_{III}$ ,  $A_{IV}$ ,  $A_V$ .

$$A_I = \frac{3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{II} - \bar{Y}_I)^2}{n-1}}}{\sum_{i=1}^n (Y_{II} / n)} = \frac{3\sqrt{\frac{85,92}{12}}}{155,8} = 0,047,$$

$$A_{II} = \frac{3 \cdot 2,36}{171,8} = 0,041,$$

$$A_{III} = \frac{3 \cdot 0,425}{36,57} = 0,035,$$

$$A_{IV} = \frac{3 \cdot 0,538}{38,43} = 0,042,$$

$$A_V = \frac{3 \cdot 5,19 \cdot 10^{-5}}{3,675 \cdot 10^{-3}} = 0,042.$$

Умовою достатньої точності вимірювальних засобів для експериментальних досліджень приймається  $A \leq 0,1$ . Як видно, для всіх вимірювальних величин значення показника  $A$  не перевищує 0,1, що свідчить про достатню точність вимірювальних засобів. Обробку результатів проводили методом математичної статистики, визначаючи достовірність кількісних різниць результатів дослідження. Характер зв'язку між окремими параметрами і кількісний вираз в цьому зв'язку знаходили кореляційну залежність.

Отже, встановлено, що інтенсивність прогрівання тіста-хліба в процесі випікання, а також якісні показники готової продукції залежать від матеріалу і товщини поду. При раціональній організації теплопідведення в пекарній камері, вибираючи оптимальну товщину поду можна забезпечити випікання якісних національних виробів на подах із різних матеріалів.

Методом безпосередніх замірів теплових потоків і температур на поверхні і у внутрішніх шарах тіста-хліба побудовані поля розподілення потоків і температур в процесі випікання. Аналіз полів теплового потоку і температур дозволяє дати кількісну і якісну оцінку зовнішнього і внутрішнього теплообміну, що відбувається при випіканні тіста-хліба. Було показано, що інтенсивність теплового потоку до тіста-хліба від поду визначається коефіцієнтом теплової активності матеріалу поду. Коефіцієнт теплової активності матеріалу є однією із важливих теплових характеристик, по якій визначають оптимальну товщину поду, що використовується.

#### **4. ДОСЛІДНА ЧАСТИНА ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Вакуумне ентальпійне охолодження було відкрито ще в XVIII ст. шотландським професором медицини Вільямом Калленом, який помітив, як ефір кипить у вакуумі, приводячи до охолодження рідини. Вакуумне охолодження, яке стали застосовувати в виробництві недопечених напівфабрикатів, базується на холоді, що виникає в результаті випаровування води. При нормальному атмосферному тиску вода кипить при 100°C. При цій температурі досягається поріг переходу з рідкого агрегатного стану в газоподібний. Пара забирає у води, яка залишилась стільки тепла, що температура киплячої води ніколи не перевищує 100°C. При зниженні тиску вода починає кипіти значно при нижчій температурі. Закипання води призводить до охолодження завантаженої в камеру випічки. Після випаровування води суха порівняно з м'якушем скоринка буде мати ще більшу температуру, ніж у м'якуша. Ефект охолодження відбувається зсередини назовні, тобто, в порівнянні з традиційним способом охолодження, в зворотному напрямку і, що дуже важливо, надзвичайно швидко. Швидкість охолодження у вакуумній камері залежить від того, наскільки швидко знижується тиск. Тиск і температура кипіння знаходяться в прямій залежності.

##### **Методи використання вакуумного способу на виробництві.**

Пропонуються два варіанти: 1-й - для ротаційної печі, 2-ий - для тунельної печі. Для першого варіанту використовуються вакуумна камера і насос. Така мінімальна установка може абсолютно спокійно забезпечувати 3...4 печі. Візок закотили в камеру відразу після випічки, 3...4 хвилини - і вже температура виробу дорівнює 12...17°C.

Для тунельної печі - трохи складніше. Це ціла система вакуумних установок, конвеєр, кілька насосів, щоб забезпечити безперервне охолодження.

**Аналіз результатів експериментальних досліджень.** Проведені дослідження процесу вакуумно-випарного охолодження з метою вдосконалення на цій основі дискретного процесу виробництва хлібобулочних виробів. Уся множина факторів тих, що визначають процес вакуумно-випарного охолодження хлібобулочних виробів розділено нами на три групи: контрольовані керовані змінні  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , які змінюються в процесі експерименту відповідно до прийнятого плану. До них відносяться швидкість вакуумування камери, маса і форма охолоджуваних виробів, об'єм камери охолодження, температура стінок камери; контрольовані некеровані змінні  $z_1, z_2, \dots, z_n$  - температура шкірки і м'якуша виробу, їх вологість; неконтрольовані збурення  $k_1, k_2, \dots, k_n$  - міра герметичності системи, вібрації установки, випромінювальна здатність стінок камери.

В якості вихідної вихідних величин розглядалися зміни тиску в камері охолодження, температур шкірки і м'якуша охолоджуваного виробу, і його маси. Як узагальнювальна цільова функція  $Y$  прийнятий темп охолодження хлібобулочного виробу до заданої температури. На рис. 4.1 дані початкова і перетворена схеми об'єкту дослідження з цільовою функцією  $Y$ , що дорівнює:

$$Y = y_i + \varepsilon_i$$

де  $y_i$  - істинне значення вихідної функції в цьому експерименті;

$\varepsilon_i$  - аддитивна перешкода, відповідна  $i$ -му експерименту утворена за рахунок сумарної дії некерованих змінних.

Передбачається, що залежність  $y_i = f(x_1, x_2)$  диференційована і може бути представлена розкладанням в ряд Тейлора, а незалежні випадкові числа підкоряються нормальному розподілу з параметрами  $M(\varepsilon) = 0$  і  $\sigma\varepsilon^2 = \text{const}$ . Демонстрація можливостей вакуумно-випарного охолодження може бути здійснена тільки прямим його відтворенням на промисловому або експериментальному устаткуванні. Тому експериментальне устаткування включало лабораторну хлібопекарську піч з регульованою температурою

середовища для попередньої і остаточної випічки хліба; лабораторну вистійну камеру; камеру вакуумно-випарного охолодження, розміщену в холодильнику; систему вакуумування камери з вакуумним насосом, масляним фільтром, фільтром-осушувачем, ресивером, сполучними магістралями та запірними кранами.

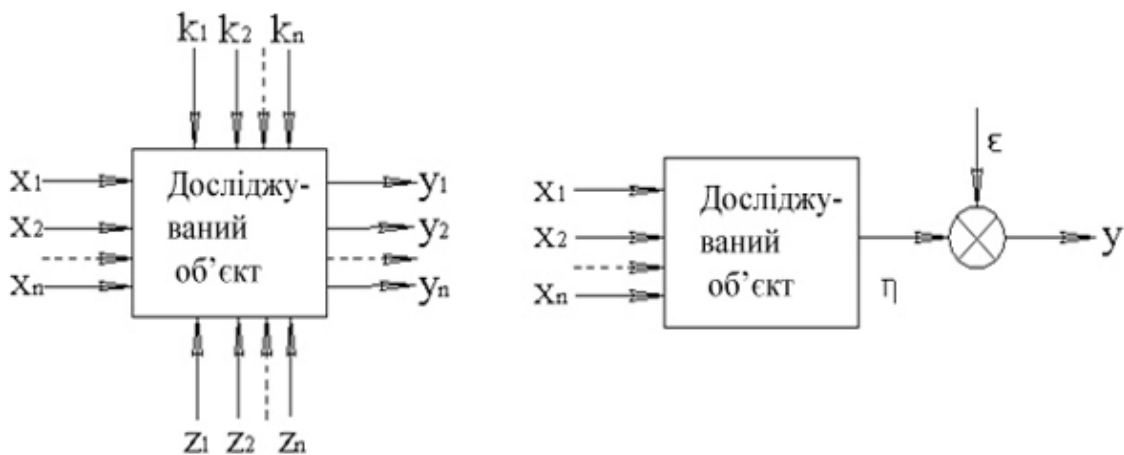


Рис. 4.1. Структурне представлення об'єкту дослідження

У експериментах повинні змінюватися і контролюватися швидкість вакуумування камери, об'єм камери охолодження та температура її стінок; температура шкірки і м'якуша виробу, їх вологість. Необхідно було також понизити до мінімуму вплив на результати випробувань неконтрольованих збурень, таких як герметичність системи вакуумування, рівень вібрації установки, передачу тепла від стінок камери.

Такого роду експерименти вимагають одночасного вимірювання різних за своєю природою параметрів. Ускладнення завдання експериментального дослідження призводить до необхідності застосування досить складних комп'ютерних систем збору і представлення цих, спеціальних алгоритмів їх оброблення, і при здійсненні її в реальному режимі часі - до підвищених вимог до інерційності датчиків і швидкості вимірів, близько декілька сотень вимірів на хвилину. Аналоговий сигнал з первинних перетворювачів подається на багатоканальний аналого-цифровий перетворювач, де

перетворюється в цифровий код, фільтрується від випадкових перешкод і по заданому алгоритму перетворюється в цифровий сигнал, що відповідає вимірюваній величині у вибраній системі одиниць. Перевагою розробленої системи виміру є можливість обробки інформації в режимі реального часу, проведення перетворень і нормування величин, а також використання різних способів представлення та реєстрації даних. Фактичні значення граничного мінімального тиску вакуумного насоса і продуктивності системи вакуумування у складі створеної установки визначалися в ході попередніх випробувань з незавантаженою камерою. Відомо, що тривалість вакуумування герметичних місткостей при постійній швидкості відкачування прямо пропорційна їх об'єму. У описаних експериментах при одному і тому відношенні початкового тиску до кінцевого тривалість відкачування при збільшенні об'єму камери зростає майже в 4 рази.

Використання розробленої системи збору, обробки і представлення даних дозволило автоматизувати експериментальні дослідження вакуумно-випарного охолодження хлібобулочних виробів, отримати необхідні дані для уточнення фізичної моделі явища, вибрати оптимальні параметри промислового устаткування для реалізації пропонованого методу охолодження.

**Обґрунтування отриманих основних наукових, практичних та соціальних результатів досліджень.** На рис. 4.2...4.5 наведено результати досліджень при випіканні виробу високої ступені готовності «Хліба французького бездріжджового» з різним часом попередньої випічки.

Проаналізувавши ці графіки можна створити такі висновки: спосіб двоетапного випікання хліба і булочних виробів шляхом попередньої випічки, швидкого охолодження напівфабрикату у вакуумно-випарній камері відрізняється тим, що попередня випічка повинна дорівнювати 80% від загального часу випікання хліба і булочних виробів; спосіб відрізняється

тим, що кінцеву випічку хліба і булочних виробів (допікання) треба здійснювати при постійній температурі 190...210°C.

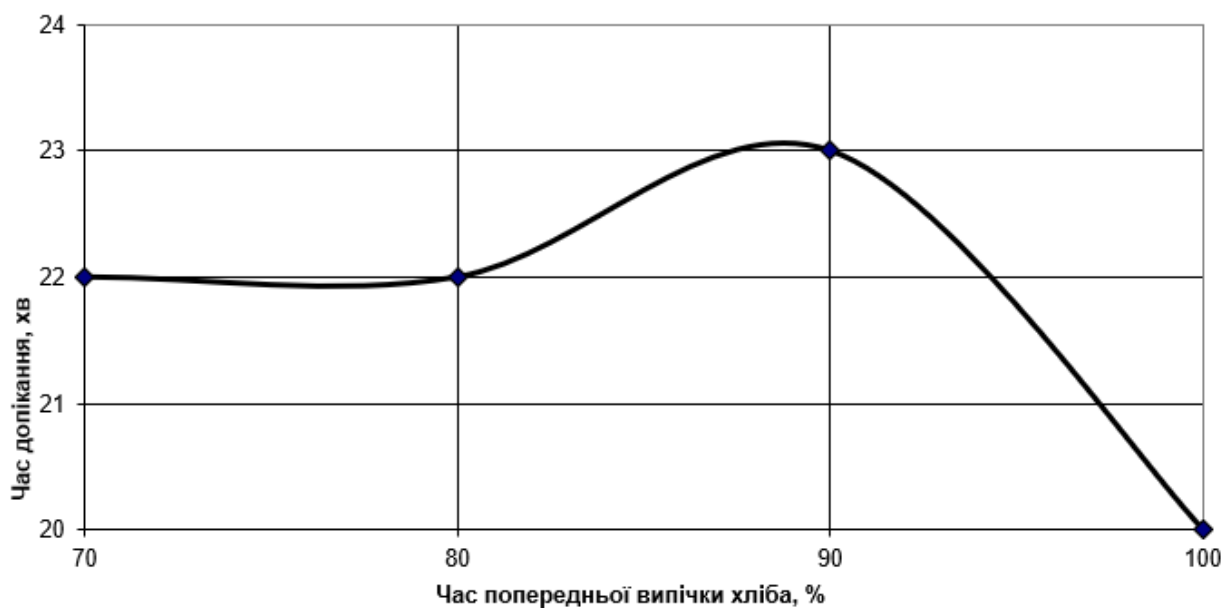


Рис. 4.2. Час допікання виробу високого ступеня готовності «Хліба французького бездріжджового» від часу попередньої випічки

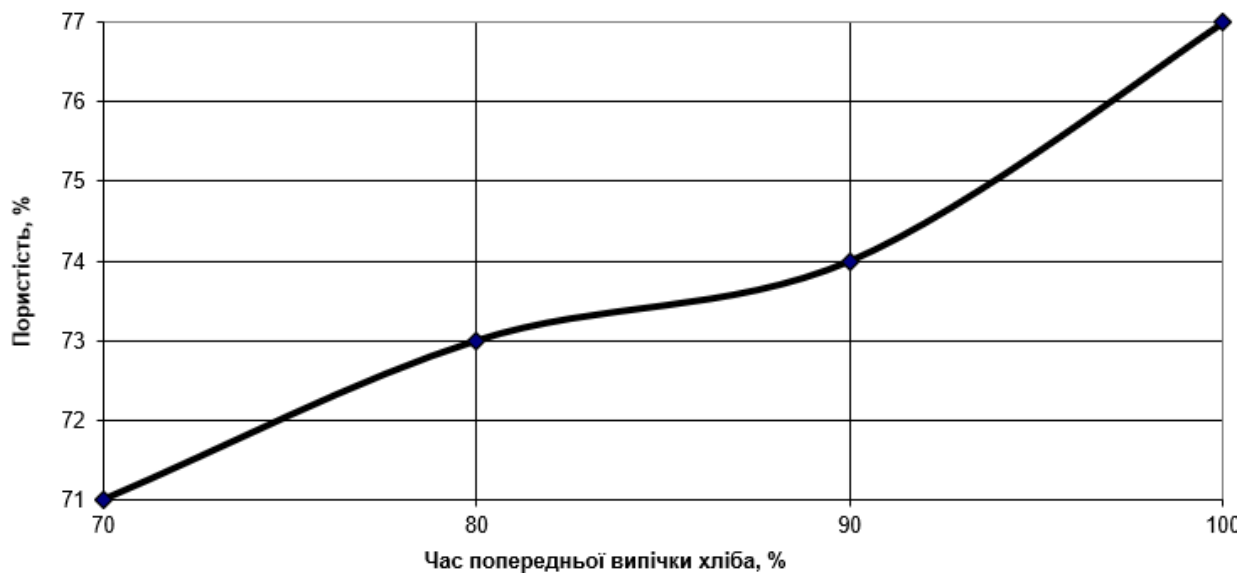


Рис. 4.3. Пористість виробу високого ступеня готовності «Хліба французького бездріжджового» від часу попередньої випічки

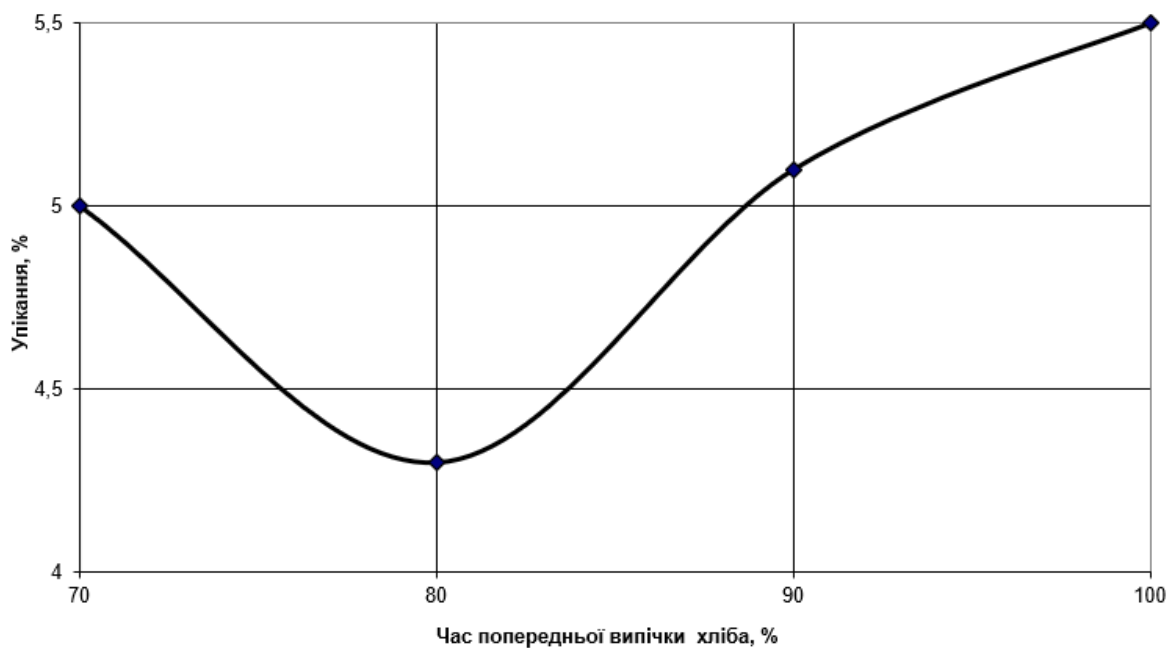


Рис. 4.4. Величина упікання виробу високого ступеня готовності «Хліба французького бездріжджового» від часу попередньої випічки

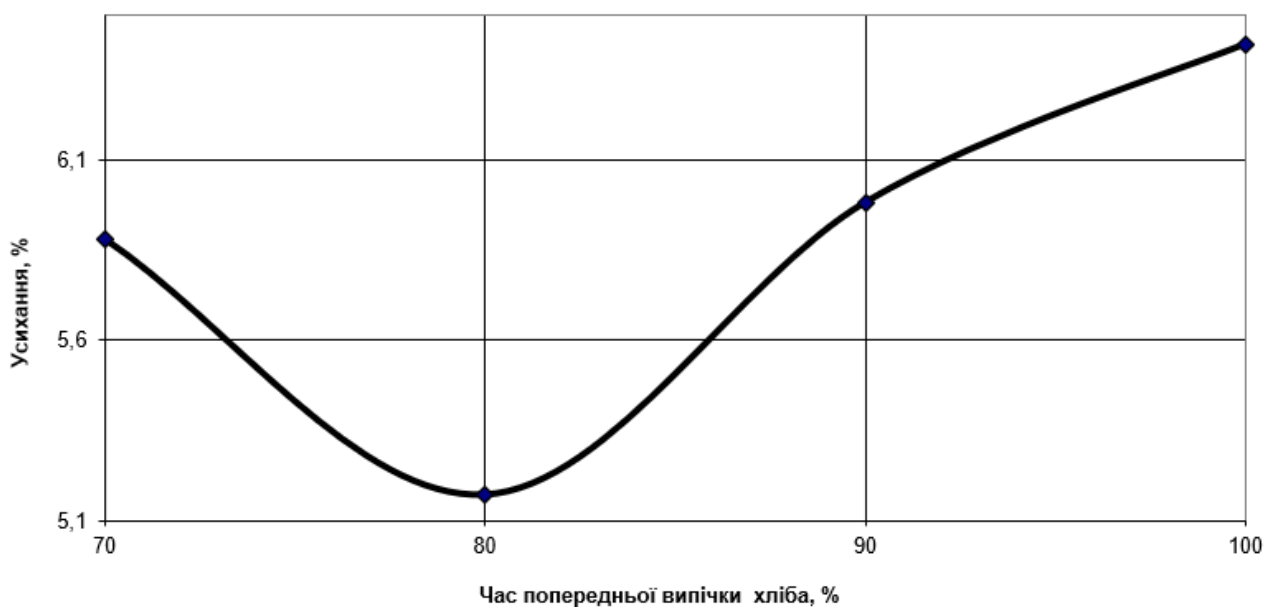


Рис. 4.5. Усихання виробу високого ступеня готовності «Хліба французького бездріжджового» від часу попередньої випічки

З дослідів видно, що попередня випічка повинна бути в межах 80% від загальної випічки. При попередній випічці, в межах 80%, упікання становить 4,25%, усихання – 5,17%, пористість – 72%, час допікання – 22

хвилини. Допечені вироби мають рівномірну пористість та найкращі органолептичні показники.

Таблиця 4.1

Хліб «Французький бездріжджовий»								
Номер заготовки	Ступень попередньої випічки, %	Маса недопеченого хліба М н.х. гр	Маса хліба Мх, гр	Упікання		Час допікання, хв.	Усихання, %	Пористість, %
				г, гр	г, %			
1	100	545	515	30	5,5	20	6,42	77
2	80	580	555	25	4,3	22	5,17	73
3	80	585	555	30	5,1	23	5,98	74
4	70	595	565	30	5,0	22	5,88	71

**Основні переваги вакуум-випарного методу охолодження.** При лабораторних і наступних експлуатаційних випробуваннях були виявлені і доведені наступні переваги вакуумного охолодження:

1. Скорочення часу охолодження - до 95%, в залежності від маси випеченого виробу.

2. Скорочення часу випічки. Наприклад, стандартний батон випікається 25 хв. Виявляється, перед вакуумним охолодженням його досить випікати 20 хв. Через 20 хв. хліб практично готовий, а протягом 5 хв. відбувається випаровування зайвої вологи. Були проведені дослідження в одній з швейцарських лабораторій і в Берлінському технологічному університеті, які показали, що при використанні вакуумного охолодження час випічки скорочується на 10...30%. По суті справи, це збільшення потужності (продуктивності) печі.

3. Покращення об'єму та структури м'якушки. Вакуумне охолодження приводить до збільшення об'єму і до поліпшення загальної структури продукту (рівномірна пористість тощо). Короткий термін охолодження практично виключає можливість утворення тріщин на скоринці хліба.

4. Збільшення природного терміну зберігання. Охолоджений продукт можна відразу пакувати, і не обов'язково за допомогою вакуумної

упаковки. Цей хліб можна зберігати до місяця при температурі +5°C в звичайному холодильнику. Природний термін зберігання як мінімум в 2 рази більше, ніж при звичайному охолодженні. А якщо хліб помістити у вакуумну упаковку з упорскуванням туди нейтрального газу, то термін зберігання можна продовжити до 3 місяців.

5. Інші переваги - істотне зниження витрат на різні поліпшувачі, на логістику всередині пекарні, економія площі всередині пекарні.

Але найголовніше — економічна вигода. При рівних інвестиційних вкладеннях вакуумне охолодження однозначно краще, ніж шокова заморозка. У першу чергу, значно скорочуються експлуатаційні витрати і поліпшується якість хлібобулочних виробів. При вакуумному охолодженні немає необхідності в інших додаткових витратах, які супроводжують процес шокової заморозки: морозильники з температурою -18°C, транспортування в морозильних камерах, зберігання у морозильних камерах і печі для допікання продукції. А це знову додаткова економія на упаковці, складуванні та логістиці. Плюс до цього виключаються в продукті бактерії, цвіль і т.д., чого дуже складно домогтися при заморожуванні, оскільки в цьому випадку більшою мірою присутній так званий «людський фактор».

У результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що вакуум-випарне охолодження має значну перевагу над конвективним і заморозкою в морозильній камері. Таким чином даний метод охолодження є найбільш економічним і швидким, що відповідає задачам, які поставлені перед харчовим виробництвом.

## **5. ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ. БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДЕРНІЗОВАНОГО ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ**

Піч підлогового типу призначена для випічки борошняних кондитерських і булочних виробів. Піч працює в комплекті з розстійною шафою, стелажними візками і подіками. Цей комплект забезпечує розстойку і випічку виробів. Міжопераційне переміщення, розстійка і випічка виробів проводиться на стелажному візку.

При модернізації поліпшуються тепловий і паровологосний режими випічки, внаслідок чого поліпшується якість виробів і підвищується продуктивність печі.

Застосований новий механізм обертання візка, що виключає ручну працю по установці візка на кульову опору.

Піч хлібопекарська конвективна (рис. 5.1) складається із пекарної камери 6, повітряних коробів 5 та 7, нагнітаючого 4 та відводного 8 повітряходів, вентилятора 2 та нагрівальних батарей 3. Зовнішні, гріючі частини печі теплоізолювані від зовнішньої оболонки мінеральною ватою 14.

Основною частиною печі є пекарна камера (рис. 5.2) на підлозі якої встановлена опора 2, а у верхній частині розташовано захват 9, приводу 3 стелажного візка 4. По бокам пекарної камери розташовані повітряні коробки 5 і 7. Переріз повітряних щілин в стінках пекарної камери регулюють за допомогою планок. Відводний повітропровід 8 з'єднує короб з всмоктувальним патрубком вентилятора.

Вихідний отвір з'єднаний з входом повітря нагрівальної батареї 3. До вихідного вікна нагрівної батареї приєднано нагнітальний повітропровід 4. Вихідний отвір нагрівного повітропроводу приєднано з впускним коробом повітря.

В нагрівальній батареї розташовані тенти 16. Форсунка 10 впуску води та плити 11 теплоаккумулятора розташовані у нагрівальному повітряпроводі. Вентилятор має трубу прямого вихлопу, яка закривається шибером 15. Стрілкою 17 показано напрям обертання вентилятора.

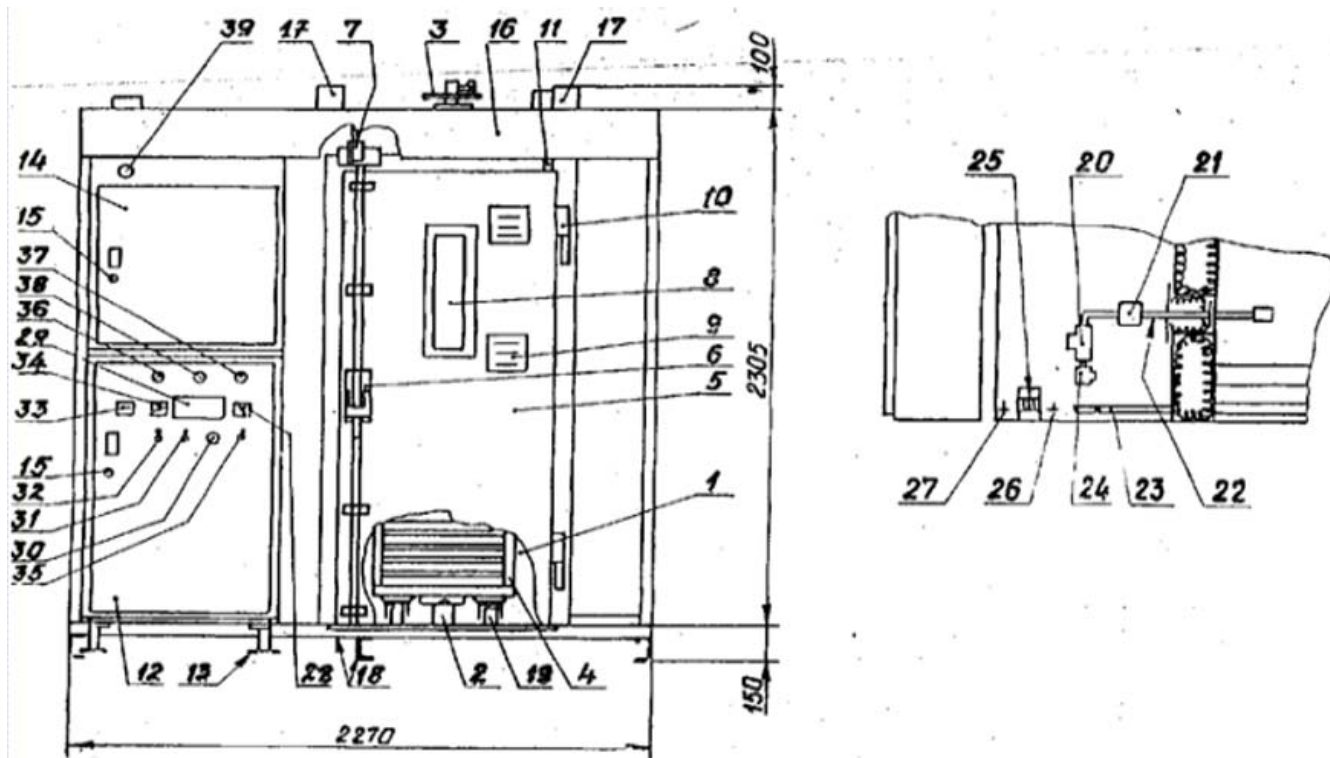


Рис. 5.1. Загальний вигляд печі

Пекарна камера закривається дверцями 5, фіксація яких здійснюється за допомоги рукоятки 6. Над дверцями встановлено кінцевий вимикач 7. У дверцях вбудовано зорове вікно 8 та два освітлювача 9. Дверцята кріпляться до каркасу шарнірними петлями 10. Електроживлення (12 В) до освітлювачів підводиться через штуцер 11.

На горі пекарній камери розташовано привід 3 візка. Перед піччю встановлено щит керування 12. Під час транспортування піч знаходиться на транспортній рамі 18.

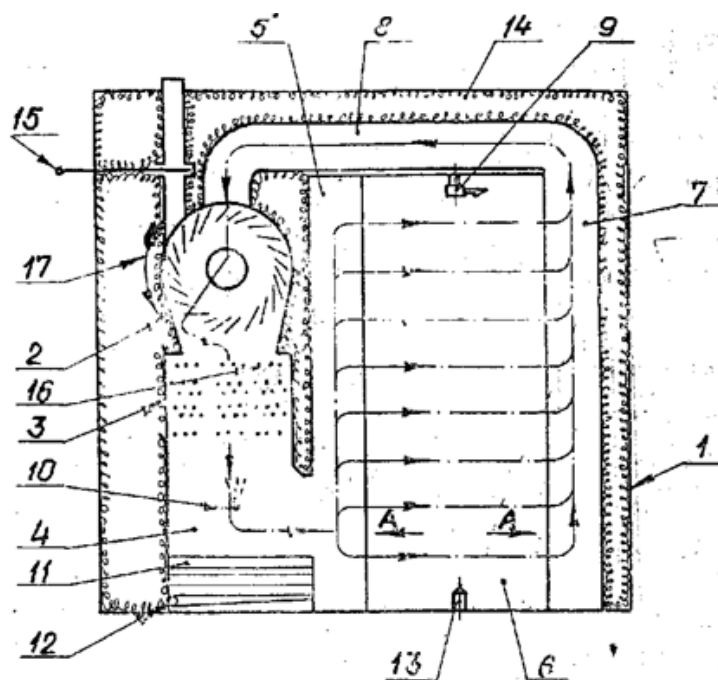


Рис. 5.2. Пекарна камера печі

Привід візка складається з двигуна, клинопасової передачі, черв'ячного редуктора, ланцюгової передачі, запобіжного пристрою, вертикального вала муфти та захвату візка.

Вентилятор рис. 5.3 складається з корпусу 1, робочого колеса 2, двигуна 3, кришки 4, муфти 5. На муфті знаходиться крильчатка 6 для охолодження двигуна.

Система парозволоження складається із фільтра 20, магнітного клапана 21, трубопровода 22, плит теплоаккумулятора 11, форсунки 10 та дренажної труби 23. Фільтр 12 має кран 24 для впуску відстою.

Пекарна камера печі обігривається повітрям, яке циркулює по замкнутому контуру.

Вентилятором 2 повітря продувається через тенти. Для забезпечення більш плавного регулювання теплового режиму тенти згруповані на три групи. Нагріте повітря направляється через нагнітаючий повітропровід 4 у впускний короб 5. Повітря, яке пройшло пекарню камеру 6 поступає у впускний короб 7 із якого через відводний повітропровід направляється

зворотно до вентилятора. Для отримання рівномірного випікання візок обертається.

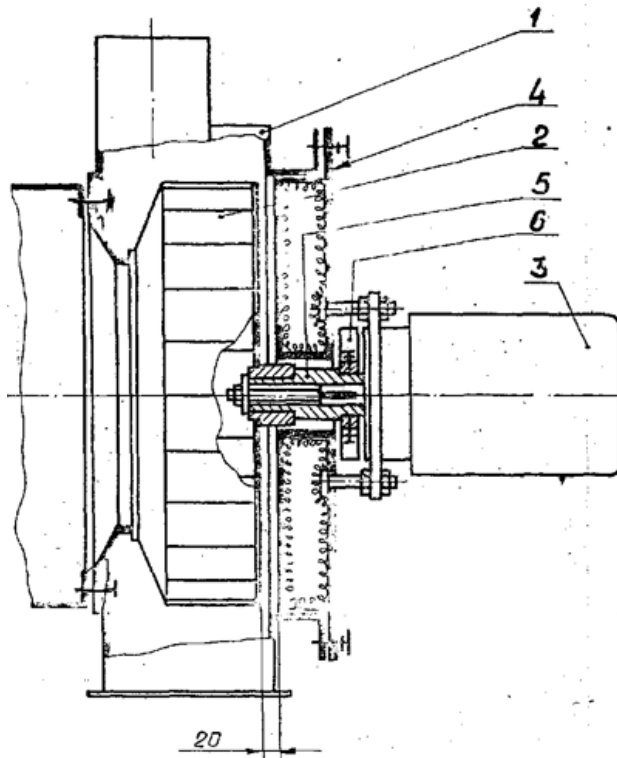


Рис. 5.3. Вентилятор хлібопекарської печі

Пара для зволоження середовища пекарної камери отримується системою парозволоження. Через форсунку 10 вприскується вода у нагнітаючий повітропровід, де вона випаровується за рахунок теплоти теплоаккумулятора та гарячого повітря. Вода, яка не випаровувалась через дренажну трубу 12. Кількість пара регулюється часом подачі води.

## 6. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### Розрахунок продуктивності печі.

Розрахунок продуктивності печі визначається по виробництву батона нарізного з пшеничного борошна першого гатунку, маса батону 0,4 кг:

$$G = \frac{m \cdot n}{\tau_{\text{вип}} + \tau_{\text{доп}}}; \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

де  $m$  - маса одного виробу, кг;

$n$  - кількість виробів, які одночасно завантажуються в піч;

$\tau_{\text{вип}}$  - час випікання,  $\tau_{\text{вип}} = 40$  хв.;

$\tau_{\text{доп}}$  - допоміжний час, який витрачається на вивантаження і завантаження печі,  $\tau_{\text{доп}} = 3$  хв.;

$$G = \frac{0,4 \cdot 104}{1680 + 300} = 2,1 \cdot 10^{-2}; \frac{\text{кг}}{\text{с}}; G = 75,6 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Добова продуктивність печі:

$$G_{\text{доб}} = p \cdot z \cdot G; \frac{\text{кг}}{\text{добу}},$$

де  $p$  - кількість робочих змін;

$z$  - кількість робочих годин на зміну

$$G_{\text{доб}} = 2 \cdot 7,4 \cdot 75,6 = 1118,9 \frac{\text{кг}}{\text{добу}}$$

### Тепловий розрахунок печі.

Витрати теплоти на випікання (тепловий баланс пекарної камери) складаємо на 1 кг продукції на виході з печі. Витрати теплоти на випікання визначаються за формулою:

$$q_1 = W_{\text{вип}}(i_{\text{м}} - i_{\text{в}}) + q_{\text{к}}c_{\text{к}}(t_{\text{к}} - t_{\text{м}}) + (q_{\text{м}}c_{\text{м}} + W_{\text{м}}c_{\text{м}})(t_{\text{м}} - t_{\text{м}}); \text{Дж/кг},$$

де  $W_{\text{вип}}$  - кількість випаровуваної вологи з тістової заготовки під час випічки – упікання, %;

$i_{nn}$  - ентальпія перегрітої пари, яка визначається при атмосферному тиску і температурі в пекарній камері, кДж/кг;

$t_{нк} = 250$  °С – температура в пекарній камері, за таблицями перегрітої пари  $i_{nn} = 2970$  кДж/кг;

$i_g$  - ентальпія води при температурі тіста в момент посадки його в пекарну камеру, кДж/кг,

$$i_g = t_m \cdot c_g; \text{ кДж/кг,}$$

де  $t_m = 37$  °С - температура тіста;

$c_g$  - теплоємність води, кДж/(кг °С)

$$i_g = 37 \cdot 4,187 = 155 \text{ кДж/кг,}$$

$q_k$  - масова частина скоринки в хлібі, %;

$c_m = c_k$  - теплоємність сухої речовини відповідно скоринки і хліба, кДж/(кг °С);

$$q_m = W_m = \frac{1 - 0,12}{2} = 0,44 \text{ - вміст сухої речовини в м'якиші}$$

приблизно дорівнює вмісту води в м'якиші;

$t_k$  - температура скоринки, °С;

$t_m$  - температура м'якиша, °С

$$q_1 = 0,07(2970 - 155) + 0,12 \cdot 1,68(160 - 37) + (0,44 \cdot 1,68 + 0,44 \cdot 4,187)(98 - 37) = 435,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Витрати теплоти на утворення пари в пекарній камері:

$$q_2 = D_n (i_{nn} - i'_g); \text{ кДж/(кг г.хл.),}$$

де  $D_n$  - витрати пари на зволоження середовища пекарної камери, кг/кг;

$i'_g$  - ентальпія води, яка подається для утворення пари, кДж/кг;

$i_{nn}$  - ентальпія перегрітої пари, яка визначається при атмосферному тиску і температурі в пекарній камері, кДж/кг;

$$q_2 = 0,05(2970 - 126) = 142 \text{ кДж/кг.}$$

Витрати теплоти вентиляційним повітрям розраховуються виходячи з того, що в період завантаження печі проходить повний обмін повітря в пекарній камері, тобто об'єм викиду повітря на одну посадку викидів:

$$V_{\text{вук}} = a \cdot b \cdot h; \text{ м}^3,$$

де  $a$  - довжина пекарної камери, м;

$b$  - ширина пекарної камери, м;

$h$  - висота пекарної камери, м

$$V_{\text{вук}} = 0,85 \cdot 0,85 \cdot 1,9 = 1,37 \text{ м}^3.$$

Теплові витрати з виходом повітря на одну посадку становитимуть:

$$q_3'' = c_p \cdot V_{\text{вук}} (t_{\text{нк}} - t_e); \text{ кДж/(кг гар. хліба)},$$

де  $c_p$  - ізобарна теплоємність 1 м<sup>3</sup> повітря, кДж/(м<sup>3</sup>К);

$V_{\text{вук}}$  - об'єм викиду повітря, м<sup>3</sup>;

$t_{\text{нк}}$  - температура пекарної камери, °С;

$t_e$  - температура води, °С

$$q_3'' = 1,3 \cdot 1,37(250 - 30) = 391,9 \text{ кДж/(кг гар. хліба)}.$$

При тривалості випікання 40 хв, за годину виконується дві посадки ( $n = 2$ ). Тоді за одиницю часу (1 год) втрати теплоти з вентиляційним повітрям становитимуть:

$$q_3' = n \cdot q_3'' \frac{1}{3600}; \text{ кВт},$$

де  $n$  - кількість посадок виробів;

$q_3''$  - теплові втрати з виходом повітря на одну посадку, кДж;

$$q_3 = 2 \cdot 391,8 \cdot \frac{1}{3600} = 0,22 \text{ кВт}.$$

Втрата теплоти на нагрів транспортних засобів – стелажний візок з формами:

$$q_4 = \frac{1}{3600} n \cdot q_k \cdot c_k \cdot (t_k'' - t_k'); \text{ кВт},$$

де  $n$  - кількість стелажних візків у печі;

$q_k$  - маса стелажного візка, кг;

$c_k$  - теплоємність заліза, кДж/(кг К);

$t_k''$  - температура середовища пекарної камери в кінці процесу випікання;  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_k'$  - температура стелажного візка на початку випікання,  $^{\circ}\text{C}$

$$q_4 = \frac{1}{3600} \cdot 1 \cdot 62 \cdot 0,46 \cdot (180 - 30) = 1,19 \text{ кВт}.$$

Втрати теплоти огороженням пекарної камери в навколишнє середовище:

$$q_5' = f_n \cdot a_{np} \cdot c_0 \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{nos}}{100} \right)^4 \right] + \alpha (t_n - t_{nos}); \text{ кВт},$$

де  $f_n$  - площа поверхонь огороження печі,  $\text{м}^2$ ;

$a_{np}$  - приведена ступінь чорноти поверхні огороження печі та навколишнього середовища;

$c_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від вертикальних стін:

$$\alpha^{vert} = Nu \frac{\lambda}{l}; \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}),$$

де  $Nu = c(Gr \cdot Pr)^n$  - критерій Нусельта.

Визначальна температура:

$$t_m = (t_n + t_{nos});$$

де  $t_n$  – середня температура поверхні печі;  $t_n = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{nos}$  – температура повітря,  $t_{nos} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$$t_m = (t_n + t_{nos}) / 2 = (45 + 30) / 2 = 37,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

При визначенні  $t_m$  для повітря:

$\lambda = 0,0269$  Вт/м·К – коефіцієнт теплопровідності;

$\nu = 16,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – кінематична в'язкість;

$P_r = 0,72$  – значення критерію Прандля.

Критерій Грасгофа:

$$G_r = (\beta \cdot l^3 \cdot q \cdot \Delta t) / \nu^2$$

де  $l$  – висота печі,  $l = 3,39$  м;

$q$  – механічна стала,  $q = 9,81$  кгм/с<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – різниця температур  $t_n$  і  $t_{нов}$ , °С;

$\nu$  – кінематична в'язкість, м<sup>3</sup>/с.

$$G_r = (2,39^2 \cdot 9,81(45 - 30)) / ((273 + 37,5)(16,3 - 10^{-6})^2) = 2,4 \cdot 10^{10},$$

$$G_r \cdot P_r = 2,4 \cdot 10^{10} \cdot 0,72 = 1,75 \cdot 10^{10}.$$

При такій величині добутку критеріїв емпіричні коефіцієнти матимуть значення:  $c = 0,135$ ;  $n = 0,33$ .

$$Nu = c(C_r P_r)^n = 0,135(1,75 \cdot 10^{10})^{0,33} = 324$$

$$\alpha_{верт} = Nu \cdot \frac{\lambda}{l} = 324 \cdot \frac{0,0269}{2,39} = 3,65 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від горизонтальних стін:

$$\alpha_{гор} = 1,3 Nu (\lambda / e)$$

Критерій Грасгофа:

$$G_r = (\beta \cdot l^3 \cdot q \cdot \Delta t) / \nu^2,$$

де  $l$  – визначаючий розмір, м;

$q$  – механічна стала, кг м/с<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – різниця температур  $t_n$  і  $t_{нов}$ , °С;

$\nu$  – кінематична в'язкість, м<sup>3</sup>/с

$$G_r = (1,6^3 \cdot 9,81(45 - 30)) / ((273 + 37,5)(16,3 \cdot 10^{-6})^2) = 7,3 \cdot 10^9,$$

$$G_r P_r = 7,3 \cdot 10^9 \cdot 0,72 = 5,26 \cdot 10^9$$

При такій величині добутку критеріїв емпіричні коефіцієнти матимуть значення:  $c = 0,135$ ;  $n = 0,33$ .

Критерій Нусельта:

$$Nu = c(C_r P_r)^n = 0,135(5,26 \cdot 10^9)^{0,33} = 218.$$

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі:

$$\alpha_{гор} = 1,3Nu(\lambda / e),$$

де  $Nu$  – критерій Нуссельта;

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

$l$  – визначаючий розмір, м;

$$\alpha_{гор} = 1,3 \cdot 218(0,0269 / 1,6) = 4,76 \text{ (Вт/м·К)}.$$

Площа вертикальних поверхонь печі визначається з герметичних розмірів:

$$f_{верт} = 2(a' + b')h',$$

де  $a'$  – довжина печі;

$b'$  – ширина печі;

$h'$  – висота печі.

$$f_{верт} = 2(155 + 1,6)2,39 = 15,06 \text{ м}^2.$$

Площа горизонтальних поверхонь печі:

$$f_{гор} = a' \cdot b',$$

де  $a'$  – довжина печі;

$b'$  – ширина печі.

$$f_{гор} = 1,55 \cdot 1,6 = 2,48 \text{ м}^2.$$

Тепловіддача вертикальними поверхнями:

$$Q_{верт} = f_{верт} \{ a_{пр} C_0 [(T_n / 100)^4 - (T_{нов} / 100)^4] + \alpha_{верт} (t_n - t_{нов}) \},$$

де  $a_{пр}$  – приведена ступінь чорноти поверхні огорожень печі та навколишнього середовища;

$C_0$  – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>);

$\alpha_{верт}$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від вертикальних стін, Вт/(м<sup>2</sup> К);

$t_n$  – середня температура поверхні печі,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{нов}$  – температура повітря,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{верт} = 15,06\{0,82 \cdot 5,7[(273 + 45)/100]^4 - ((273 + 30/100^4)] + 3,65(45 - 30)\} = 2,09 \text{ кВт.}$$

Тепловіддача горизонтальними поверхнями:

$$Q_{гор} = f_{гор} \{a_{пр} C_0 [(T_n / 100)^4 - (T_{нов} / 100)] + \alpha_{гор} (t_n - t_{нов} = 0,385)\},$$

де  $a_{пр}$  – приведена ступінь чорноти поверхні огорожень печі та навколишнього середовища;

$C_0$  – стала Стефана – Больцмана,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ ;

$\alpha_{гор}$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від горизонтальних стін,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ;

$t_n$  – середня температура поверхні печі,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{нов}$  – температура повітря,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{гор} = 2,48\{0,82 \cdot 5,7[(273 + 45)/100]^4 - ((273 + 30/100^4)] + 4,76(45 - 30)\} = 0,385 \text{ кВт.}$$

Загальна тепловіддача стінами:

$$q'_5 = Q_{гор} + Q_{верт} = 0,385 + 2,09 = 2,475 \text{ кВт,}$$

де  $Q_{гор}$  – тепловіддача горизонтальними поверхнями, кВт;

$Q_{верт}$  – тепловіддача вертикальними поверхнями, кВт;

Тепловіддача на одиницю продукції:

$$q_5 = q'_5 / G,$$

де  $q'_5$  – загальна тепловіддача стінами, кВт;

$G$  – продуктивність печі за 1 с;

$$q_5 = \frac{2,475}{2,2 \cdot 10^{-2}} = 112,5 \text{ кДж/кг.}$$

Тепловіддача на одиницю продукції:

$$q_3 = q'_3 / G,$$

де  $q'_3$  – теплові витрати з вентиляційним повітрям, кВт;

$G$  – продуктивність печі за 1 с;

$$q_3 = \frac{0,22}{2,2 \cdot 10^{-2}} = 10 \text{ кДж/кг},$$

$$q_4 = q'_4 / G,$$

де  $q'_4$  – втрати теплоти на нагрів транспортних засобів, кВт;

$$q_4 = \frac{1,19}{2,2 \cdot 10^{-2}} = 54 \text{ кДж/кг}.$$

Приймаємо інші витрати:

$q_6$  – втрати теплоти через посадочні і розвантажувальні вікна пекарної камери, кДж/кг;

$q_7$  – інші втрати теплоти, кДж/кг;

$$q_6 + q_7 = 40 \text{ кДж/кг}.$$

Сумарна теплопередача в пекарну камеру на одиницю продукції:

$$q_{нк} = \sum_{i=1}^7 q_i = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7,$$

де  $q_1$  – втрати теплоти на випікання;

$q_2$  – втрати теплоти на утворення пари в пекарній камері;

$q_3$  – втрати теплоти з вентиляційним повітрям;

$q_4$  – втрати теплоти на нагрів транспортних засобів;

$q_5$  – втрати теплоти огороженням пекарної камери в навколишнє середовище;

$q_6$  та  $q_7$  – інші втрати теплоти.

$$q_{нк} = 435,6 + 142 + 10 + 54 + 112,4 + 40 = 794 \text{ кДж/кг},$$

або за одиницю часу:

$$Q_{заг} = Q_i = G \cdot q_i = 2,2 \cdot 10^{-2} \cdot 794 = 17,5 \text{ кВт}.$$

Визначення необхідної кількості електронагрівачів:

$$n = Q'_{заг} / N_m,$$

де  $Q'_{заг}$  – сумарна теплопередача в пекарну камеру за одиницю часу, кВт;

$$Q'_{заг} = Q_{заг} \cdot k,$$

де  $k = 1,2$  – коефіцієнт збільшення потужності.

$$Q'_{заг} = 17,5 \cdot 1,2 = 21 \text{ кВт.}$$

$N_m = 2$  кВт – потужність одного ТЕНа, кВт;

$$n = 21/2 = 10,5$$

Приймаємо для встановлення в печі необхідну кількість  $n = 11$  шт.

**Визначення розрахункової потужності на обертання вагонетки в печі.** Необхідна потужність двигуна:

$$N_1 = (QV)/1000\eta,$$

де  $Q = 1200$  Н – сила, що діє на диск привода візка;

$V = (Z_3 n_3 t)/(60/1000)$  - швидкість обертання диска;

$Z_3 = 120$  – кількість зубів зірочки;

$n_3 = 11,4$  об/хв. – частота обертання диска;

$t = 12,7$  мм – крок ланцюга;

$\eta$  - ККД привода.

Величинами  $Z_3$ ,  $\eta$  та  $t$  задаємося для проектного розрахунку, згідно рекомендацій [6].

$$V = (120 \cdot 11,4 \cdot 12,7)/(60 \cdot 100) = 0,29 \text{ м/с,}$$

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,96 \cdot 0,8 \cdot 0,99 = 0,76,$$

де  $\eta_1 = 0,96$  - ККД ланцюгової передачі;

$\eta_2 = 0,8$  - черв'ячного редуктора;

$\eta_3 = 0,99$  - ККД муфти.

$$N_1 = (1200 \cdot 0,29)/(1000 \cdot 0,76) = 0,46 \text{ кВт.}$$

Вибираємо електродвигун 4А71АЧУЗ потужністю  $N = 0,55$  кВт, частотою обертання ротора  $n = 1370$  об/хв.

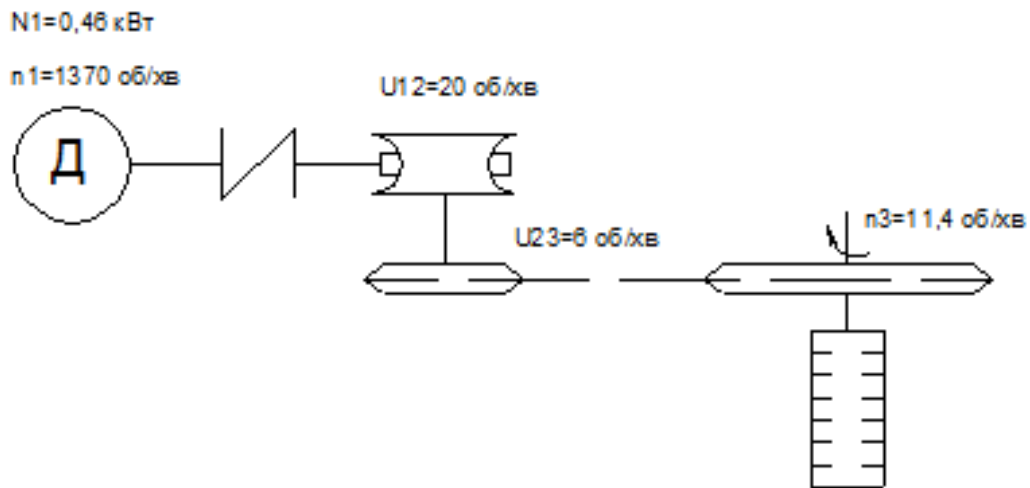


Рис. 6.1. Кінематична схема приводу

Загальне передаточне відношення приводу:

$$U_{13} = n / n_3,$$

де  $n$  – частота обертання ротора, об/хв.;

$n_3$  – частота обертання диска, об/хв.;

$$U_{13} = 1370 / 11,4 = 120;$$

приймаємо передаточне число ланцюгової передачі  $U_{23} = 6$ , тоді передаточне число редуктора:

$$U_{12} = U_{13} / U_{23},$$

де  $U_{13}$  – загальне передаточне відношення приводу

$U_{23}$  – передаточне число ланцюгової передачі

$$U_{12} = 120 / 6 = 20.$$

За визначеним передаточним числом підбираємо редуктор РЧУ-50-20-2-3-1 [2].

Крутний момент, що створюється редуктором:

$$T_1 = 9550 N_1 / n_1 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де  $N_1$  – потужність двигуна, кВт;

$n_1$  – частота обертання ротора, об/хв.

$$T_1 = 9550 \cdot 0,46 / 1370 = 3,2 \text{ Нм};$$

Крутний момент, що створюється редуктором:

$$T_2 = 9550N_2 / n_2 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$N_2 = N_1\eta_2\eta_3,$$

де  $N_1$  - потужність двигуна, кВт;

$\eta_2$  - ККД червячного редуктора;

$\eta_3$  - КККД муфти.

$$N_2 = 0,46 \cdot 0,99 \cdot 0,8 = 0,36 \text{ кВт},$$

$$n_2 = n_1 / U_{12},$$

де  $n_1$  - частота обертання ротора, об/хв.;

$U_{12}$  - передаточне число редуктора;

$$n_2 = 1370 / 20 = 68,5 \text{ об/хв.};$$

$$T_2 = 9550 \cdot 0,36 / 68,5 = 50,2 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Крутний момент диска:

$$T_3 = 9550N_3 / n_3, \text{ об/хв}$$

$$N_3 = N_2\eta_1, \text{ кВт},$$

де  $\eta_1$  - коефіцієнт корисної дії ланцюгової передачі;

$$N_3 = 0,36 \cdot 0,96 = 0,345 \text{ кВт},$$

$$n_3 = n_2 / U_{23}, \text{ об/хв.},$$

де  $U_{23}$  - передаточне число ланцюгової передачі;

$$n_3 = 68,5 / 6 = 11,4 \text{ об/хв. } T_3 = 9550 \cdot 0,345 / 11,4 = 288,5 \text{ Н м}$$

Кінематичні характеристики зводимо до табл. 6.1.

Таблиця 6.1

### Кінематичні характеристики приводу

№ вала	Потужність N, кВт	Крутний момент T, Н м	Частота обертання n, кВт	Передаточне відношення U
1	0,46	3,2	1370	20
2	0,36	50,2	68,5	6
3	0,345	288,5	11,4	6

## Розрахунки на міцність

**Розрахунок вала.** Вихідні дані для розрахунку:

Крутний момент  $T_2 = 700$  Нм;

Кутова швидкість  $\omega_2 = 55$  рад/с;

Ділильний діаметр зубчастого колеса  $d_2 = 320$  мм;

Ділильний діаметр конічного колеса  $d_\omega = 95$  мм;

Передаточне число конічної передачі  $U_{\text{кон}} = 3$ ;

матеріал - Сталь 40Х.

Попередньо визначаємо сили, що діють у зачепленні зубчатих коліс і які передаються на вал.

Колова сила:

$$F_{t2} = \frac{2T}{d_2};$$

$$F_{t2} = \frac{2 \cdot 700 \cdot 10^3}{320} = 4375 \text{ Н.}$$

Радіальна сила:

$$F_{r2} = F_{t2} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 4375 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 1592,4 \text{ Н.}$$

Сили у зачепленні конічної шестерні.

Колова сила:

$$F_t = \frac{2T}{d_\omega} = \frac{2 \cdot 700 \cdot 10^3}{95} = 14737 \text{ Н.}$$

Радіальна сила:

$$F_{r1} = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \delta_1,$$

$$\text{де } \delta_1 = \operatorname{arctg} \frac{d\omega_1}{d\omega_2} = \operatorname{arctg} \frac{95}{285} = 18,435^\circ.$$

Кут при вершині ділильного конуса шестерні:

$$F_{r1} = 14737 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ \cdot \cos 18,435^\circ$$

Зображуємо розрахункову схему вала на рис. 6.2., де вказані напрямки сил, що діють на вал.

Визначимо відстані між опорами та посадочними місцями валів:

$$a = b = 0,4 \cdot d_2 = 0,4 \cdot 320 = 128 \text{ мм},$$

$$c = 2 \cdot d_{o1} = 95 \cdot 2 = 190 \text{ мм}.$$

Реакція опор у вертикальній площині:

$$\Sigma M_a = 0 \quad R_{bx}(a+b) - F_{t2}b - F_{t1}c = 0,$$

$$R_{bx} = \frac{F_{t2}b + F_{t1}c}{a+b} = \frac{4375 \cdot 128 + 14737 \cdot 190}{128 + 128} = 131125,1 \text{ Н},$$

$$\Sigma M_b = 0 \quad R_{ax}(a+b) - F_{t2}a - F_{t1}(a+b+c) = 0,$$

$$R_{ax} = \frac{-F_{t2}a + F_{t1}(a+b+c)}{a+b} = \frac{4375 \cdot 128 + 14737 \cdot 446}{128 + 128} = 23487,1,$$

$$\Sigma X = 0 \quad -R_{bx} + F_{t2} + R_{ax} - F_{t1} = 0,$$

$$-131125,1 + 4375 + 23487,1 - 14737 = 0.$$

Згинальні моменти у вертикальній площині:

$$\Sigma M_b = 0 \quad M_{cx} = R_{bx} \cdot a = 131125,1 \cdot 0,128 = 1680 \text{ Нм},$$

$$M_{ax} = R_{bx}(a+b) - F_{t2} \cdot b = 131125,1 \cdot 0,256 - 4375 \cdot 0,128 = 2800 \text{ Нм},$$

$$M_{dx} = R_{bx}(a+b+c) - F_{t2}(b+c) - R_{ax} \cdot c = 131125,1 \cdot 0,446 - 4375 \cdot 0,318 - 23487,1 \cdot 0,19 = 0$$

Будуємо епюру згинальних моментів у вертикальній площині. Реакції опор в горизонтальній площині.

$$\Sigma M_a = 0 \quad -R_{by}(a+b) - F_{r2}b + F_{r1}c + M = 0,$$

$$R_{by} = \frac{-F_{r2}b + F_{r1}c + M}{a+b} = \frac{-1592,4 \cdot 128 + 5088,6 \cdot 190 + 1696,2 \cdot 47,5}{128 + 128} = 3295,2 \text{ Н};$$

$$\Sigma M_b = 0 \quad R_{r2} \cdot a - R_{ay}(a+b) + F_{r1}(a+b+c) + M = 0,$$

$$R_{ay} = \frac{F_{r2}a + F_{r1}(a+b+c) + F_a \cdot r}{a+b} = \frac{1592,4 \cdot 128 + 5088,6 \cdot 446 + 1696,2 \cdot 47,5}{128 + 128} = 9976,2.$$

$$\Sigma Y = 0 \quad -R_{bx} + F_{r2} - R_{ay} - F_{r1} = 0,$$

$$3295,2 + 1592,4 - 9976,2 + 5088,6 = 0.$$

Згинальні моменти у горизонтальній площині:

$$\Sigma M_{by} = 0 \quad M_{cy} = -R_{by} \cdot a = -3295,2 \cdot 0,128 = -421,8 \text{ Нм},$$

$$M_{ay} = -R_{by}(a+b) - F_{r2} \cdot b = -3295,21 \cdot 0,256 - 1592,4 \cdot 0,128 = 1047,4 \text{ Нм},$$

$$M_{dx} = -R_{by}(a+b+c) - F_{r2}(b+c) + R_{ay} \cdot c = -3295,2 \cdot 0,446 - 1592,4 \cdot 0,318 + 9976,2 \cdot 0,19 = -80,56,$$

$$M_{dx} = -80,56 \text{ Нм}.$$

Будуємо епюру згинальних моментів у горизонтальній площині.

Сумарні згинальні моменти

$$M_{Cb} = 0 \quad M_{Cc} = \sqrt{M_{cx}^2 + M_{cy}^2} = \sqrt{1680^2 + 421,8^2} = 1732,1 \text{ Нм},$$

$$M_{Ac} = \sqrt{M_{ax}^2 + M_{ay}^2} = \sqrt{2800^2 + 1047,4^2} = 2989,5 \text{ Нм},$$

$$M_{Dc} = \sqrt{M_{dx}^2 + M_{dy}^2} = \sqrt{0^2 + 80,56^2} = 80,56.$$

Будуємо епюру сумарних згинальних моментів. Будуємо епюру крутного моменту. Зведені моменти знаходимо по формулі:

$$M_{\sigma} = \sqrt{M_C^2 + (\alpha T)^2},$$

$$\text{де } \alpha = \frac{[\sigma_{-1}]}{[\sigma_c]}.$$

За таблицями:  $[\sigma_{-1}] = 90$  МПа – допустиме знакозмінне напруження для вала;  $[\sigma_c] = 150$  - допустиме пульсуюче напруження для вала.

$$\alpha = \frac{90}{150} = 0,6.$$

Тоді:

$$M_{\sigma B} = 0,$$

$$M_{\sigma C} = \sqrt{1732,1^2 + (0,6 \cdot 700)^2} = 1782,3 \text{ Н},$$

$$M_{\sigma A} = \sqrt{2989,5^2 + (0,6 \cdot 700)^2} = 3018,9 \text{ Н},$$

$$M_{\sigma D} = \sqrt{80,56^2 + (0,6 \cdot 700)^2} = 427,7.$$

Розраховуємо діаметр вала в небезпечному (найбільш навантаженому) перерізі:

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{np}}{0,1 \cdot [\sigma_{-1}]}} = \sqrt[3]{\frac{3018,9 \cdot 10^2}{0,1 \cdot 90}} = 69,5 \text{ мм}.$$

Діаметр вала під підшипники  $d_n = 70$  мм.

**Розрахунок та підбір підшипників.** Так як конічна шестерня повинна бути точно і жорстко зафіксована в осьовому напрямку, приймаємо конічні роликові підшипники легкої серії: для I опори 7214; для II опори 7212. Радіальне навантаження на підшипник I  $F_{r1} = R_{ay} = 9976,2$  Н. Радіальне навантаження на підшипник II  $F_{r2} = R_{by} = 3295,2$  Н. Осьове навантаження, що сприймає підшипник I  $F_a = F_{ai} = 1696,2$  Н. Коефіцієнт обертання внутрішнього кільця беремо  $V = 1$ . Коефіцієнт безпеки при легких поштовхах беремо  $K_\sigma = 1,2$ . Температурний коефіцієнт при робочій температурі менше  $100^\circ\text{C}$  беремо  $K_T = 1$ . Стандарти запроваджують довговічність підшипників для зубчастих редукторів  $L_h = 20000$  год (при 90% надійності). У підшипника 7214 динамічна вантажність  $C = 95900$  Н; кут контакту  $\alpha = 14^\circ$ ; коефіцієнт  $e = 0,37$ . У підшипника 7212 динамічна навантаження  $c = 72200$ , кут нахилу  $\alpha = 13^\circ$ , коефіцієнт  $e = 0,35$ .

Для підшипника I:

Осьові складові радіального навантаження:

$$F_{sl} = 0,83 \cdot e \cdot F_r = 0,83 \cdot 0,37 \cdot 9976,2 = 3063,7 \text{ Н.}$$

Для підшипника II:

$$F_{sII} = 0,83 \cdot e \cdot F_r = 0,83 \cdot 0,35 \cdot 3295,2 = 957,3 \text{ Н.}$$

Розрахункове осьове навантаження при  $F_{sl} > F_{sII}$  і  $F_a > 0$ .

Для підшипника I:

$$F_{al} = F_{sl} = 3063,7 \text{ Н.}$$

Для підшипника II

$$F_{aII} = F_{sl} + F_a = 3063,7 + 1696,2 = 4759,9 \text{ Н.}$$

Знаходимо відношення  $\frac{F_a}{F_r}$  для підшипника II:

$$\frac{F_{aII}}{F_{rII}} = \frac{3063,7}{1,0 \cdot 9976,2} = 0,3 (e = 0,37).$$

Приймаємо коефіцієнт радіального та осевого навантаження  $X=1$ ;  $Y=0$ . Приймаємо коефіцієнт радіального та осевого навантаження  $X=0,4$ ;  $Y=1,46$ , так як для підшипника II відношення:

$$\frac{F_{all}}{F_{rII}} = \frac{4759,9}{1,0 \cdot 3295,2} = 1,44 > 0 = 0,35.$$

Еквівалентне розрахункове навантаження для підшипника I:

$$P_1 = V \cdot F_{rI} \cdot K_\sigma \cdot K_T = 1 \cdot 9976,2 \cdot 1,2 \cdot 1 = 11971,4 \text{ Н.}$$

Еквівалентне розрахункове навантаження для підшипника II:

$$P_2 = (0,4V \cdot F_{rII} + YF_{all}) K_\sigma K_T = (0,4 \cdot 1 \cdot 3295,2 + 1,46 \cdot 4263,1) \cdot 1,2 \cdot 1 = 9050,6 \text{ Н}$$

Відношення  $c/p=7,3$ , звідки для підшипника III опори:

$$c = 7,3p = 7,3 \cdot 11971,4 = 87391,2 \text{ Н,}$$

яке дещо менше динамічного навантаження з таблиць ( $c = 95900 \text{ Н}$ ).

При цьому безвідмовність роботи підшипника буде вище 90%.

Для підшипника II опори  $p = 9050,6$ :

$$c = 7,3p = 7,3 \cdot 9050,6 = 66069,4 \text{ Н,}$$

яке дещо менше динамічного навантаження з таблиць ( $c = 72200 \text{ Н}$ ).

При цьому безвідмовність роботи підшипника буде трохи вище 90%.

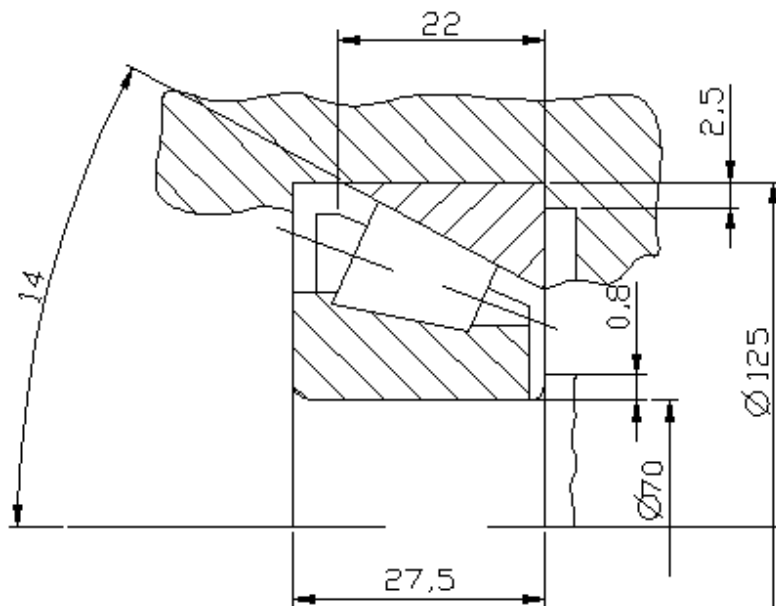


Рис. 6.2. Розріз підшипника

**Розрахунок ланцюгової передачі приводу.** Потужність на вихідному валу редуктора  $N_2 = 0,36$  кВт, частота обертання  $n_2 = 68,5$  об/хв, передаточне число  $U_{23} = 6$ .

Коефіцієнт експлуатації передачі:

$$K_e = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6,$$

де  $K_1 = 1,3$  - навантаження з незначним поштовхом;

$K_2 = 1,1$  - регулювання натягу ланцюга за допомогою нажимного ролика;

$K_3 = 0,9$  - міжосьова відстань знаходиться в проміжку (60...80)t;

$K_4 = 1$  - нахил лінії центрів зірочок  $0^0$ ;

$K_5 = 0,8$  - змащення у ванні;

$K_6 = 1,5$  - робота у дві зміни.

$$K_e = 1,3 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1,5 = 1,54.$$

Кількість зубів ведучої зірочки приймаємо  $z_2 = 20$ . Допустимий питомий тиск в шарнірах приймаємо  $[p] = 35$  МПа. Розрахунковий крок ланцюга:

$$t = 183 \sqrt[3]{\frac{N_2 \cdot K_e \cdot 10}{S_t \cdot [p] \cdot z_2 \cdot n_2 \cdot K_m}},$$

де  $N_2$  - потужність на вихідному валу редуктора, кВт;

$K_e$  - коефіцієнт експлуатації передачі;

$[p]$  - допустимий питомий тиск в шарнірах, МПа;

$z_2$  - число зубів ведучої зірочки;

$n_2$  - частота обертання, об/хв.;

$$t = 183 \sqrt[3]{\frac{0,36 \cdot 1,54 \cdot 10}{0,28 \cdot 35 \cdot 20 \cdot 68,5 \cdot 1}}.$$

Приймаємо ланцюг ПР-12,7-1820-1 [6], у якого  $t = 12,7$  мм,  $Q_{розр} = 18200$  Н,  $S_{он} = 39,6$  мм<sup>2</sup>, маса 1 погонного метра ланцюга  $q = 0,65$  кг.

Колова швидкість ланцюга:

$$v = \frac{z_2 \cdot n_2 \cdot t}{60 \cdot 1000},$$

де  $z_2$  - число зубів ведучої зірочки;

$n_2$  - частота обертання, об/хв.;

$t$  - розрахунковий крок ланцюга, мм,

$$v = \frac{20 \cdot 68,5 \cdot 12,7}{60 \cdot 1000} = 0,29 \text{ м/с.}$$

Колове зусилля:

$$F_t = \frac{1000 \cdot N_2}{v},$$

де  $N_2$  - потужність на вихідному валу редуктора, кВт;

$v$  - колова швидкість ланцюга, м/с;

$$F_t = \frac{1000 \cdot 0,36}{0,29} = 1240 \text{ Н.}$$

Середній питомий тиск в шарнірах ланцюга:

$$p = \frac{F_t}{S_{on}},$$

де  $F_t$  - колове зусилля, Н.

$$p = \frac{1240 F_t}{39,6} = 31,3 \text{ МПа,}$$

що менше допустимого питомого тиску  $[p] = 35 \text{ МПа}$ .

Термін служби ланцюга:

$$T = 5200 \frac{\Delta t \cdot K_c \cdot \sqrt{z_2} \sqrt[3]{a_t \cdot u}}{p^3 \sqrt[3]{v} K_e},$$

де  $\Delta t \leq 3\%$  - допустиме збільшення кроку ланцюга;

$K_c$  - коефіцієнт змащення;

$z_2$  - число зубів ведучої зірочки;

$a_t$  - міжосьова відстань;

$U$  - передаточне число;

$p$  - середній питомий тиск у шарнірах ланцюга;

$$a_t = \frac{a}{t}; \quad a_t = \frac{995}{12,7} = 778.$$

Коефіцієнт змащення:

$$K_c = \frac{K_{cn}}{\sqrt{v}},$$

де  $K_{cn}$  - коефіцієнт, що враховує спосіб змащення

$$K_c = \frac{2,5}{\sqrt{0,29}} = 4,64.$$

$$T = 5200 \frac{3 \cdot 4,64 \cdot \sqrt{20} \cdot \sqrt[3]{78 \cdot 6}}{31,3 \sqrt{0,29} \cdot 1,54} = 78772 \text{ год},$$

що більше очікуваного строку служби.

$$T_{oc} = 4000 \cdot K_{cn},$$

де  $K_{cn}$  - коефіцієнт, що враховує спосіб змащення.

$$T_{oc} = 4000 \cdot 2,5 = 10000 \text{ год}.$$

**Розрахунок навантажень ланцюгової передачі.** Натяг від провисання веденої вітки від власної ваги:

$$F_f = K_f \cdot q \cdot g \cdot a,$$

де  $K_f$  - коефіцієнт провисання;

$g$  - маса 1 погонного метра ланцюга, кг;

$a$  - величина міжосьової відстані, м

$$a = (60 \dots 80)t = (60 \dots 80)12,7 = 995 \text{ мм},$$

$$F_f = 6 \cdot 0,65 \cdot 9,81 \cdot 0,995 = 38 \text{ Н}.$$

Сумарний натяг ведучої та веденої віток буде:

$$F_{\Sigma b} = F_f + F_t K_1,$$

де  $F_f$  - коефіцієнт провисання;

$F_t$  - колове зусилля, Н;

$K_1$  - коефіцієнт, що враховує характер, переданого навантаження;

$$F_{\Sigma b} = 38 + 1240 \cdot 1,3 = 1650 \text{ Н.}$$

Навантаження, що діє на вали:

$$R = (1,15 \dots 1,2) F_t,$$

де  $F_t$  - колове зусилля, Н;

$$R = 1,2 \cdot 1650 = 1980 \text{ Н.}$$

Перевірка ланцюга по запасу міцності

$$n = \frac{Q_{розр}}{F_{\Sigma b}},$$

де  $F_{\Sigma b}$  - сумарний натяг;

$$n = \frac{18200}{1650} = 11,$$

що більше допустимого  $[n]=10,2$ .

**Геометричний розрахунок передачі.** Міжосьова відстань  $a=995$ .

Кількість зубців веденої зірочки:

$$z_3 = z_2 \cdot U_{23},$$

де  $z_2$  - кількість зубів ведучої зірочки;

$U_{23}$  - передаточне число

$$z_3 = 20 \cdot 6 = 120.$$

Довжина ланцюга в кроках:

$$L_t = \frac{2a}{t} + \frac{z_2 + z_3}{2} + \left( \frac{z_3 - z_2}{2\pi} \right)^2 \frac{t}{a},$$

$$L_t = \frac{2 \cdot 995}{12,7} + \frac{20 + 120}{2} + \left( \frac{120 - 20}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{12,7}{995} = 230.$$

Дійсна міжосьова відстань становить  $a = 995$  мм, так як значення  $L_t$  виявилось цілим і парним числом в результаті прямого розрахунку.  
Діаметри ділильних кіл зірочок:

$$d_{o2} = \frac{t}{\sin \frac{180}{z_2}}; \quad d_{o3} = \frac{t}{\sin \frac{180}{z_3}},$$

де  $t$  - крок ланцюга;

$z_2$  - число зубів ведучої зірочки;

$z_3$  - число зубів веденої зірочки.

$$d_{o2} = \frac{12,7}{\sin \frac{180}{20}} = 81,18 \text{ мм}; \quad d_{o3} = \frac{12,7t}{\sin \frac{180}{120}} = 485,16 \text{ мм}.$$

Монтажна міжосьова відстань:

$$a_m = 0,996 \cdot a$$

$$a_m = 0,996 \cdot 995 = 991 \text{ мм}.$$

## **7. ПІДБІР КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

При виборі конструкційних матеріалів враховували якість, небезпечність різних матеріалів при взаємодії їх з харчовою продукцією, враховуючи правила безпеки при обслуговуванні печей робочим персоналом. Обшивка тунельних печей виконується з металевих листів товщиною 2...4 мм з каркасом із профільного металу (швелери, двотаври). В якості теплоізоляційного матеріалу використовується шлаковата або мінераловатні плити на синтетичному матеріалі, що укладають між грюючими поверхнями і обшивкою. При необхідності забезпечення кращої теплоізоляції застосовують базальтову вату або базальтове волокно, коефіцієнт теплопровідності яких нижче, ніж у шлако- або скловати. Крім того, умови роботи з базальтовою ватою значно кращі і не вимагають спецодяг і респіратори. В якості матеріалу для прокладок застосовується азбестовий і базальтовий картон. Цегельна кладка печей дуже часто сполучається з металевими деталями: із чавунними або сталевими трубами, листами. Для використання матеріалів в пічному агрегаті пред'являють ряд вимог: вогнетривкість, герметичність, теплоізолююча властивість, механічна міцність. Відповідно до правил безпеки температура поверхні повинна бути не більш 318 К. Гжельська глина використовується для кладки стін топки і каналів, виконаних із гжельської або вогнетривкої цегли, а вогнетривка - для кладки вогнетривкої шамотної цегли. Пісок, застосований у розчинах для кладки печей, повинен бути чистим, без домішок. Пісок добавляють тільки до звичайної і тугоплавкої глини. До вогнетривкої глини замість піску добавляють шамот. Річковий пісок менше придатний для кладки печей, чим гірський пісок, що має кутасті частки. Пісок має бути дрібнозернистим. Футеровка топкового циліндра і фронт, виробляється спеціальними вогнетривкими деталями (фігурними блоками) або вогнетривкою цеглою марки ША або ШБ I і II (до 50 шт.) і вогнетривкою

масою, яка складається із шамотного порошку класу А (63%), латненської глини (36%) і рідкого скла (1%). При кладці фундаментів під печі і труби, при викладенні оголовок труб, розташованих вище даху, а також для труб висотою більше одного поверху в якості в'язких матеріалів використовується цемент і вапно. Основу печей доцільно виконувати з бутового каменю, а фундаменти під печі – із постелистого каменю і бутової плити. Вода, яка використовується для готування розчинів, гасіння вапна, поливки цегли і бутового каменю, повинна бути чистою, без домішок. Конвеєрна сітка складається із окремих спіралей, які з'єднані шомполами. Спіралі виконані із проволочи діаметром 1мм або із профільованого заліза перерізом 2x1 мм і довжиною, яка дорівнює ширині сітки. Печі з ізоляційним шаром із мінеральної вати мають малу теплову ізоляцію, тобто вони порівняно легко розігріваються і швидко виходять на необхідний тепловий режим. Виходячи з цього немає необхідності довго, більше 2...3 год, підтримувати такі печі в робочому стані при включеному пальнику. Що стосується печей із цегельним обмуруванням робочої камери, то вони значно більш теплоінерційні, ніж печі з ізоляцією із мінеральної вати, тобто вони порівняно повільно розігріваються і виходять на необхідний тепловий режим. Виходячи з викладеного, складається характер економної експлуатації печі. У зв'язку з великою тепловою інерцією перехідні процеси (розігрів і охолодження) сповільнюються. Тому для питання про відключення пальника в таких печах момент перерви у завантаженні варто відноситися обережно, перед посадкою тістових заготовок на под печі, знову включити пальник. У протилежному випадку температура в робочій камері печі не досягне нормальних значень у момент посадки в піч заготовок. Найбільш розповсюдженими видами матеріалів для печей є чорні матеріали, які являють собою сплав заліза і вуглецю та з добавками ін. Найбільш розповсюджені сталі марок: Ст3, Ст5, Ст35 і Ст45; леговані конструкційні сталі марок 20Х. Також використовуються корозійностійкі і

жаростійкі сталі марки: 0X17T; X18H9T; 0X13; 2X13; 4X13; X28 (наприклад под печі, топка, камера змішування та ін.).

Стальні заготовки надходять на хлібзавод у вигляді прокату і лиття. Прокат такого сортаменту: сталь кругла і квадратна; сталь шестикутна; сталь полосова; сталь кутова, швелерна, двотаврова; сталь тонколистова і товстолиста; сталевий провілок. Використовуються кольорові матеріали (латунь).

## 8. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

### Розроблення послідовності складання модернізованого вузла печі.

Для розроблення схеми складання та технологічного маршруту я обрав привод печі (рис. 8.1), який використовується для приведення в рух приводного барабана за допомогою ланцюгової передачі.

Привод складається з редуктора, електродвигуна, муфти (рис. 8.2) та ланцюгової передачі. Закріплюється болтами на рамі. Подетальний складу приводу печі подано у табл. 8.1.

Таблиця 8.1.

### Подетальний склад приводу печі

<i>Номер позиції деталі</i>	<i>Назва деталі</i>	<i>Кількість деталей</i>	<i>Номер позиції деталі</i>	<i>Назва деталі</i>	<i>Кількість деталей</i>
1	Редуктор	1	9	Металева втулка	1
2	Муфта	1	10	Болт	6
3	Двигун	1	11	Гровер	6
4	Зірочка	1	12	Гайка	10
5	Гайка	6	13	Шплінт, болт	10
6	Шайба	1	14	Болт	6
7	Болт	4	15	Гайка	6
8	Гумова втулка	1	16	Шайба	1

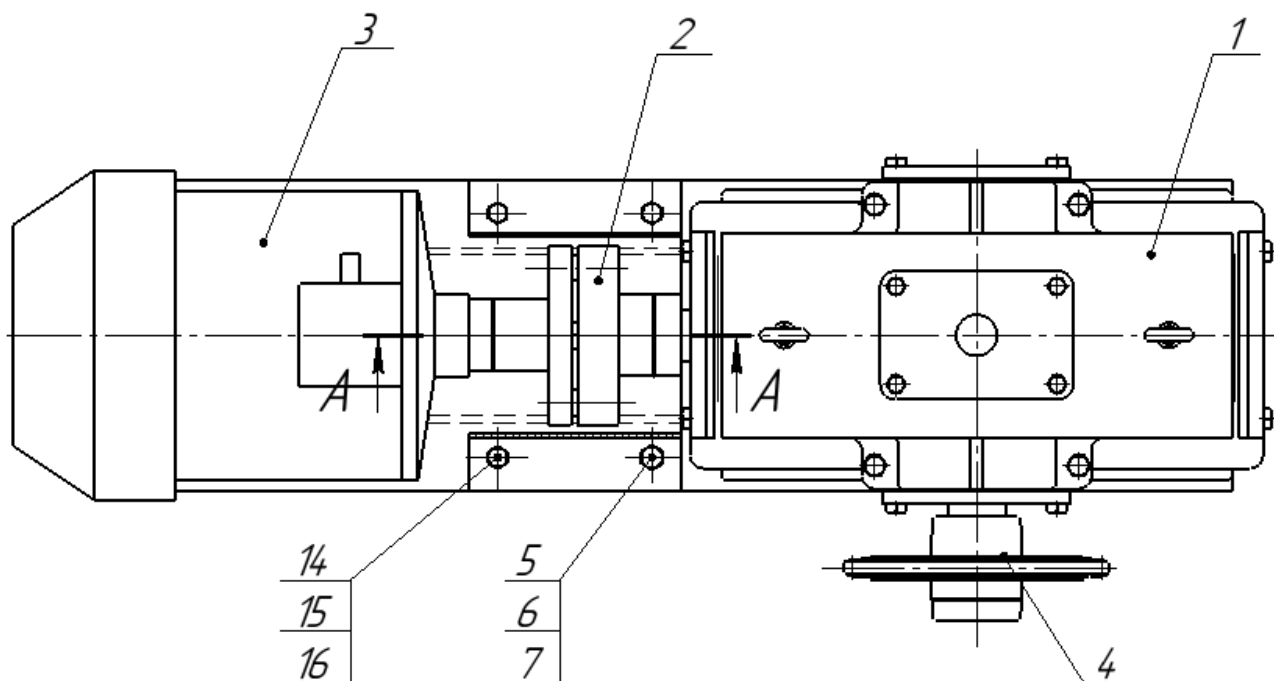


Рис. 8.1. Привод печі

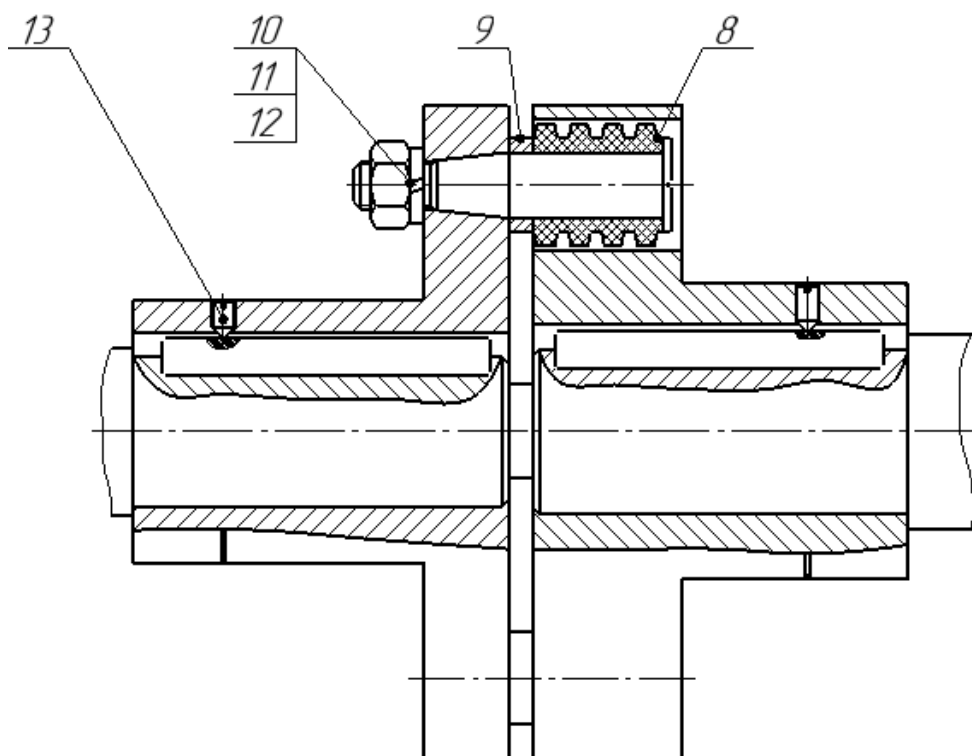


Рис. 8.2. Муфта

З аналізу конструкції приводу печі (рис. 8.1) необхідно виділити складальні одиниці 1-го порядку, а саме: Ск.1 – редуктор, Ск.2 – муфта, Ск.3

– двигун, окремих деталей – зірочка 4, металічна втулка 9, а також окремі стандартні деталі болти 7, шайби 6 і гайки 15.

Схему складання приводу печі представлено діаграмою на рис. 8.3.

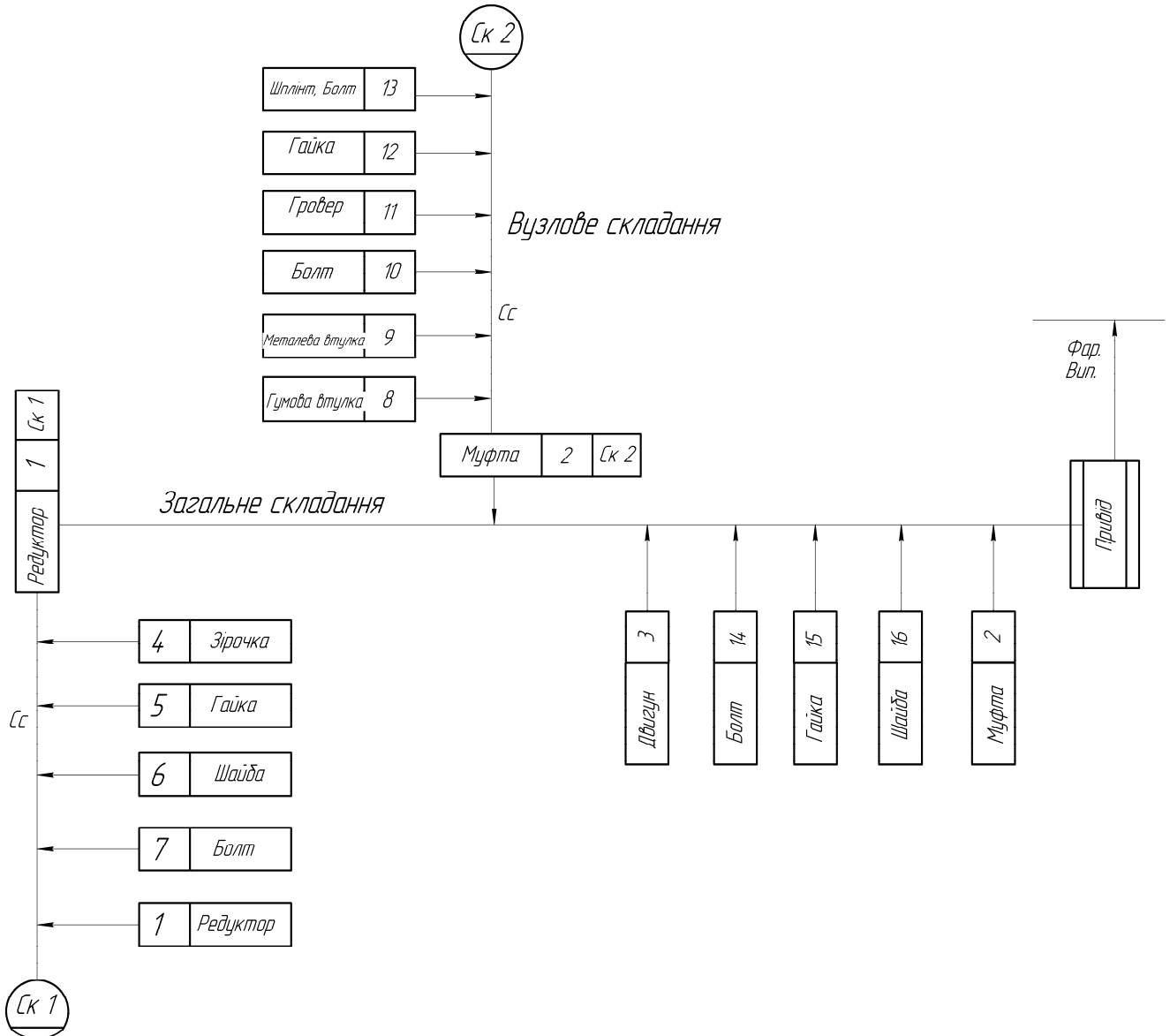


Рис. 8.3. Технологічна схема складання приводу печі

Вертикальні лінії зі стрілками показують послідовність складання окремих складальних одиниць, а горизонтальна лінія в центрі схеми – послідовність з’єднання складальних одиниць 1-го порядку за допомогою стандартних виробів.

У прямокутниках розміщені найменування деталей і номери їхніх позицій на кресленику, а в прямокутниках з двома потовщеними лініями подано найменування складальних одиниць 1-го порядку. Застосовані також умовні позначення, що містять технологічні вказівки: **Сс** – складання на столі; **З** – зварювання; **Вив.** – вивірка; **Конт.** – контроль; **Вип.** – випробування; **Фар.** – фарбування.

Технологічний маршрут складання приводу полягає у описанні короткого змісту операцій з переходами (табл. 8.2).

Таблиця 8.2

<i>№ операції</i>	<i>№ переходу, зміст переходу</i>
10. Збирання редуктора (Ск. 1)	10.1. Установити редуктор на раму 10.2. Очистити отвори від стружки 10.3. Вставити болти в отвір 10.4. Запресувати ведучу зірочку на вихідний вал 10.5. Встановити напівмуфту на вхідний вал 10.6. Встановити напівмуфту на вал двигуна 10.7. Встановити двигун на раму 10.8. Скрутити болтами дві напівмуфти 10.9. Прикріпити двигун до рами болтами
20. Збирання муфти (Ск. 2)	20.1. Встановити на болт гумову втулку 20.2. Встановити металеву втулку 20.3. Встановити болт в напівмуфту 20.4. Встановити гровер 20.5. Закрутити гайку 20.6. Вкрутити циліндричний гвинт в напівмуфту
30. Контрольна	30.1. Проконтролювати роботу приводу
40. Фарбування	40.1. Пофарбувати виріб
50. Консервація	50.1. Нанести захисне покриття

## **9. ПРАВИЛА МОНТАЖУ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ МОДЕРНІЗОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Вибране місце встановлення печі повинно забезпечувати зручне користування нею та враховувати технологічну послідовність виготовлення продукції. Крім того, необхідно враховувати вимоги протипожежної безпеки та безпеку технологічного обслуговування.

Конструкція підлоги приміщення повинна витримувати навантаження від комплекту печі. Поверхня підлоги повинна бути рівною, без стиків.

Піч і вистійна шафа повинні встановлюватися на горизонтальній поверхні без додаткового кріплення, яка перевірена по рівню.

Живлення електрокабеля печі повинен бути підключений до розподільного щита через вимикач.

При виборі місця встановлення печі потрібно керуватися розмірами, які наведено в технічній документації, де вказано встановлюючі розміри, а також зона підводу комунікацій (електроживлення, водогін, каналізація, розташування вентиляційних патрубків, розташування анкерів щита керування).

Після підготовки місця встановлення печі роботи потрібно вести у такій послідовності: від'єднати монтажну раму, встановити піч, забетонувати анкери кріплення щита керування в підлогу, вивести кінець труби дренажу в каналізацію, під'єднати до фільтру водопровід, зробити розконсервацію, очищення печі та ревізію, під'єднати заземлюючий зажим печі до контуру заземлення, під'єднати кінці живлячого кабеля до живильної колодки, зробити контрольне електровимірювання згідно вимогам електробезпеки, зробити мащення печі, згідно карти мащення.

Для мащення редуктора приводу візка використовують масло трансмісійне ЛТУ 38-101529-75 (Нігрол). Необхідна кількість при заміні мастила 1,2 літра. Періодичність заміни один раз на рік при двохзмінній

роботі. Мастило заливається через отвір, де знаходиться вказівник рівня масла. Періодичність перевірки рівня масла один раз у місяць.

Для мащення ланцюгової передачі використовують суміш мастила ЦИАТИМ-221 з графітом у співвідношенні 1:10. Мащення робити один раз у місяць. Для мащення підшипників вертикального валу використовують мастило ЦИАТИМ-221. Періодичність – один раз у місяць.

Технічне обслуговування електроапаратури повинен робити електрик відповідної кваліфікації. Перед роботою відключити живлення.

В об'єм технічного обслуговування входить: періодично 2 рази у рік перевіряти затяжку клемних з'єднань та стан контактів живильників, періодично 1 раз у місяць очищати щит управління від пилу, перед заміною запасних ТЕНів потрібно їх просушити протягом 24 години при температурі 60...80°C, після просушки перевірити електричну міцність ізоляції, підлогу пекарної камери і вистійної шафи очищати один раз на добу, санітарне оброблення печі робити після її охолодження.

Перед пуском обладнання обслуговуючий персонал повинен добре вивчити конструкцію печі, принцип роботи її контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації, правила пуску і зупинки приводу.

Перед початком роботи обслуговуючий персонал повинен перевірити: справність всіх контрольно-вимірювальних приладів; роботу вентиляційних пристроїв; наявність огорожень на приводах конвейера печі і вентиляційних пристроїв; справність основного обладнання і механізмів по посадці, надрізці і наколці тістових заготовок і вивантаженню готових виробів; справність спорядження (форм, листів).

Обслуговуючому персоналу заборонено: працювати на несправному обладнанні і при знятих огороженнях; залишати робоче місце без нагляду; заставляти проходи і підлогу на робочому місці формами, листами та іншими предметами; працювати без санодрягу або в несправному санодрязі;

чистити і змащувати обладнання і поправляти секції з формами на люльках конвейера на ходу.

Обслуговуючий персонал печей відповідає за пошкодження і аварії, які трапились під час роботи від недотримання встановлених інструкцією правил експлуатації і заходів з безпеки.

Обслуговування печей з електрообігрівом повинно відповідати інструкціям по експлуатації печей з електрообігрівом машинобудівного заводу, що виготовляє піч.

Нагрівання печі з холодного стану до потрібної температури повинен проходити поступово. При дистанційному (ручному) вмиканні струм подається тільки одній групі електронагрівачів. При досягненні температури в пекарній камері 100...120°C вмикається друга і інші групи електронагрівачів.

Тривалість розігріву печі з холодного стану повинна бути не менше 2,5 год, так як при недотриманні цієї умови можуть виникнути порушення щільності з'єднань секцій і вузлів печі і недопустима деформація деталей механізмів. Після розігріву печі систему управління переводять з ручного режиму на автоматичний.

## **10. ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ ПРОЕКТУВАННЯ**

Автоматизація виробництва завжди була одною з основних складових прискорення науково-технічного прогресу у всіх галузях народного господарства. Головним напрямком автоматизації є створення комп'ютерно-інтегрованих виробництв. Основною системою автоматизації нині стали функціональні можливості мікропроцесорних систем управління при створенні яких вирішальну роль відіграють такі фактори, як використання систем інтеграції розподіленого управління програмних комплексів. При автоматизації виробництва, об'єктом автоматизації є не окремий технологічний процес, чи агрегат, а технологічний комплекс (ТК) із складними взаємозв'язками між його підсистемами.

При автоматизації дається можливість централізації, контролю і управління машинами, агрегатами, а в деяких випадках всіх заводів, що значно полегшує ведення технологічного процесу. Автоматизація також сприяє зниженню аварійності і як наслідок, покращенню роботи обладнання.

Випічка є важливим етапом технологічного процесу виробництва хліба і одним з основних факторів, що визначають якість хлібобулочних виробів. Характер випічки і якість продукту в значній мірі залежить від тривалості випікання і пароутворення середовища пекарної камери до яких відносяться вологість середовища і температура в основних зонах пекарної камери.

Для різних сортів хлібобулочних виробів потрібна різна тривалість випікання і відповідний температурний і паровий режим в пекарній камері. Тому для строгого нагляду і дотримання режиму випічки необхідно мати можливість регулювати вказані параметри у визначених межах. Це досягається шляхом автоматизації виробничого процесу.

Сучасні печі хлібопекарського виробництва являють собою агрегати, що складаються з ряду теплових пристроїв. В механізованому виробництві пічний агрегат є основною ланкою потокової лінії, в лінії відбувається безперервна гідротермічна обробка тіста. Під час обробки в тісті відбувається складний комплекс змін і воно перетворюється в готовий виріб. В пекарні камері розрізняють такі зони: зволоження першого періоду випікання, другого періоду випікання. В кожній з цих зон виробам потрібно передавати різну кількість теплоти.

Так як хлібопекарна піч являє собою об'єкт з рівнорозподіленими параметрами, то оптимізація теплового та вологого режиму пекарної камери може бути досягнута засобами автоматичного вимірювання і регулювання температури і відносної вологості середовища пекарної камери в найбільш характерних точках окремих зон.

#### Аналіз виробничої ділянки, як об'єкта автоматизації

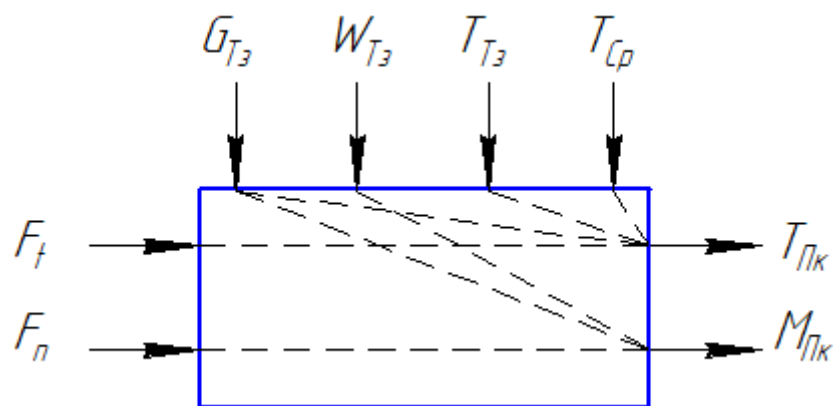


Рис. 10.1. Параметрична схема пекарної камери хлібопекарської печі

Величина  $F_t$ ,  $F_n$ ,  $G_{T3}$ ,  $W_{T3}$ ,  $T_{T3}$ ,  $T_{CP}$  – вхідні параметри, а величини  $T_{Пк}$ ,  $M_{Пк}$  – вихідні параметри (контролюємі і регулюємі) камери регулювання:

$F_t$  – регулююча дія – витрата тепла;

$T_{Пк}$  – регулюємія параметр – температура в пекарній камері;

$F_n$  – регулююча дія – витрата пари;

$M_{ПК}$  – регулюючий параметр – вологість в пекарній камері;

Збурюючими діями будуть такі параметри:

$G_{Тз}$  – кількість тістових заготовок;

$W_{Тз}$  – маса тістових заготовок;

$T_{Тз}$  – температура тістових заготовок;

$T_{Ср}$  – температура навколишнього середовища.

**Вибір технічних засобів вимірювання і автоматичного регулювання.** При виборі приладів важливе значення має його оформлення, наявність вимірювальної (показуючої чи реєструючої) частини сигнального пристрою, можливість переходу з автоматичного на ручне дистанційне регулювання.

Суттєве значення при виборі регуляторів, як і при виборі контрольно-вимірювальних приладів, має вибір діапазону шкали приладу. Цей діапазон повинен охоплювати всі можливі відхилення величини регулюємого параметру при будь яких збуреннях притаманних даному об'єкту. Але значно розширювати шкали не варто, так як при цьому збільшується абсолютна похибка вимірювання параметру. Вибір чутливих елементів чи датчиків зводиться до підвищення чутливості датчика, зменшення його інерційності, відносно більшої розвиваємої потужності для зменшення зони нечутливості. Тип виконавчого механізму і регулюючого органу обирається, виходячи з конкретних умов, конструктивних і монтажних особливостей систем розмірів об'єктів і комунікацій величини затрат регулюючих об'єктів, необхідних характеристик виконавчого механізму і регулюючого органу. Вибір роду допоміжної енергії (пневматичної чи гідравлічної) здійснюють в залежності від конкретних умов роботи приладів у виробництві.

Характер випічки та якість продукції залежать в основному від параметрів середовища пекарної камери, до яких відноситься вологість і температура, а також від тривалості випікання. При автоматизації процесу

випікання повинні передбачатись електроприводами і вентилятора печі, запальні пристрої для розпалювання печі з комплексом автоматичних захистів, автоматичного регулювання температури і вологості в пекарній камері і розрідження в топці печі, автоматичне вимірювання і запис витрат пари, що надходить в пекарну камеру для зволоження середовища і температура середовища пекарної камери, безперервний облік витрат газу і контроль тиску в трубопроводах печі.

Для автоматичного управління тепловими режимами пекарної камери в теперішній час широко використовується система управління подачі палива до пальників в залежності від температури середовища пекарної камери з порцією по температурі гріючих газів на виходів з топчного пристрою.

Втілення автоматики у виробництво сприяє безаварійній роботі обладнання, виключає випадки травматизму, попереджує забруднення атмосферного повітря і водойм промисловими відходами.

Комплексна автоматизація процесів передбачає не тільки автоматичне забезпечення нормального перебігу цих процесів у використанні різних автоматичних пристроїв але й автоматичне управління пуском і зупинкою апаратів, для ремонтних робіт, критичних ситуацій.

## **11. ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ**

Фундаментом правової бази, що регулює безпеку виробничих процесів, виступає Закон України «Про охорону праці». Його положення деталізуються через розгалужену систему нормативно-правових актів: національних стандартів, галузевих норм, статутів підприємств, інструкцій та положень.

Гарантія безпечних умов діяльності є невід'ємним конституційним правом кожного громадянина. Відповідно до чинного законодавства, охорона праці трактується як комплексний механізм, що об'єднує правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи, метою яких є збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі трудової діяльності [15].

Матеріальне забезпечення заходів з охорони праці здійснюється за рахунок спеціалізованих фондів. Кошти цих фондів мають цільове призначення і витрачаються виключно на реалізацію затверджених кошторисів для покращення умов праці та підвищення рівня безпеки. Контроль за використанням фінансів покладається на роботодавців, а також на органи державного нагляду (Держпраці). Важливою особливістю є те, що невикористані залишки коштів фонду наприкінці звітного року не підлягають вилученню чи списанню, а акумулюються та переносяться на наступний календарний період для подальшого інвестування в безпеку [15].

Кожен працівник, незалежно від стажу та посади, при прийнятті на роботу та в процесі трудової діяльності проходить обов'язкове навчання та інструктажі з питань охорони праці. Програма включає засвоєння методів надання домедичної допомоги постраждалим, а також алгоритмів дій у разі виникнення аварійних ситуацій [1].

Персонал, задіяний в обслуговуванні обладнання підвищеної небезпеки, підлягає спеціальному навчанню з подальшою атестацією

(іспитом). Відповідальність за організацію освітнього процесу несе керівник підприємства, а в окремих підрозділах — їх безпосередні начальники. Загальний контроль здійснює служба охорони праці. Варто зазначити, що посадові особи також зобов'язані проходити регулярну перевірку знань [1].

Класифікація інструктажів включає п'ять типів: вступний, первинний (на робочому місці), повторний (періодичний), позаплановий, цільовий.

Головна мета цих заходів — сформувати у персоналу стійкі навички безпечного виконання посадових обов'язків.

При експлуатації промислових печей хлібопекарного і кондитерського виробництв потрібно дотримуватись ряду правил, зв'язаних з безпечною експлуатацією. Обслуговуючий персонал повинен бути ознайомлений з будовою печі, навчений роботі на ній та проінструктований по правилам техніки безпеки роботи на печі.

Забороняється працювати на незаземленій печі. Забороняється залишати підключену піч без догляду. При завантаженні і вивантаженні печі необхідно використовувати рукавиці з теплоізоляцією. Перед чищенням печі, зупинкою на ремонт електроживлення повинно бути відключено. Перше увімкнення печі повинно бути після ретельного перевірення усіх електричних з'єднань.

При експлуатації печей з електрообігрівом необхідно дотримуватись правил з безпечної експлуатації електрообладнання: електронагрівачі повинні працювати тільки у тому середовищі, для якого вони призначені; кількість електронагрівачів, встановлених на одну піч, визначається за результатами розрахунків; електронагрівачі не повинні торкатись один одного; вихідні кінці електронагрівачів повинні бути захищені від механічних пошкоджень індивідуальними ковпаками або загальним кожухом також повинна бути передбачена теплова ізоляція вивідних кінців нагрівачів.(температура на вивідних кінцях не повинна перевищувати 180...200°C); корпус кожного електронагрівника рекомендується надійно

заземляти; жили проводів і кабелів до нагрівачів потужністю 5 кВт підключаються за допомогою кабельних наконечників; рекомендується підключати нагрівачі до електромережі через індивідуальні плавкі запобіжники, а це дозволить легко визначати вихід з ладу любого нагрівача, який встановлено на печі.

При експлуатації нагрівачів необхідно слідкувати за станом контактів вивідних кінців з електромережею. Потрібно періодично підтягувати контактні гайки, не допускаючи пошкоджень закріплення в корпусі нагрівачів контактних вивідних стержнів (через які подається напруга). Не допускати кріплення нагрівачів за вивідні стержні. Необхідно періодично проводити очистку оболонок (хімічним і механічним шляхом) нагрівачів від можливих забруднень і осадження на них. З метою продовження терміну служби нагрівачів перед монтажем бути здійснені захисні покриття.

У випадку виникнення на печі пожежі, необхідно одразу ж, не чекаючи прибуття пожежної команди, приступити до його погашення. При цьому слід користуватись парою, а не водою, так як потрапляння води на розжарені металеві поверхні печі може призвести до їх короблення.

Рівень звуку від працюючої печі не повинен перевищувати 85 дБ, що не перевищує допустимої величини, передбаченої «Гігієнічними нормами допустимих рівнів звукового тиску і рівнів звуку на робочих місцях».

Вібрація на робочому місці і вібрація печі з боку посадки не повинні бути вище по рівню віброшвидкості 92 дБ при активній смузі з середньо геометричною частотою 16 Гц, що не перевищують допустимої величини, передбаченої санітарними нормами проектування промислових підприємств.

Електробезпеці при роботі на печі забезпечується конструкцією виробу, що передбачає прокладку електропроводів по корпусу в металевих трубах і спеціальних каналах, що захищають дроти від пошкодження, установкою пускової апаратури, що відповідає умовам експлуатації, а також

пристрій захисного заземлення від болтів з шайбою, з вказівкою знаку «Земля».

Щит печі має запобіжні пристрої, що відключають піч від мережі, у разі замикання однієї з фаз на корпус печі. Двері електрощита закриваються ключем за допомогою внутрішніх (вбудованих) замків. На внутрішній стінці дверець електрощита є електричні схеми.

Безпека при обслуговуванні печі по тепловиділеннях (термозахист) забезпечується конструкцією печі, що передбачає укладання теплоізоляції між вузлами системи обігріву.

## 12. ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

В останні роки в усьому світі велика увага приділяється розробці і впровадженню заходів по охороні навколишнього середовища, втому числі по зниженню викидів в атмосферу. В зв'язку з цим всі промислові підприємства України повинні, в першу чергу, проводити інвентаризацію джерел викидів забруднюючих речовин. Виробництво хліба не відноситься до тих галузей харчової промисловості, які дуже забруднюють навколишнє середовище (чого не скажеш про цукрову, спиртову, м'ясну та деякі інші галузі).

Викиди хлібопекарських підприємств в атмосферу включають: речовини органічного походження (окис етилового спирту, оцтова кислота, оцтовий альдегід), що виділяються основним виробництвом, тобто при технологічному процесі; речовини неорганічного походження (окис азоту, вуглецю), що виділяються основним виробництвом при згоранні природного газу, рідкого і твердого палива в хлібопекарських печах і парових котлах.

Нижче дано характер викидів по стадіях технологічного процесу виробництва хліба із пшеничного і житнього борошна з наступним балансом викидів в твердій, рідкій і газоподібній фазі.

Процес виробництва хлібобулочних виробів включає наступні етапи: приймання, зберігання і підготовка сировини до виробництва; заміс, бродіння, розстійка тістових заготовок; випікання хліба; зберігання готової продукції і відправка в торговельну мережу.

Оскільки основною сировиною для випікання хліба є борошно, то основним забрудненням повітря на складі, а в деяких місцях виробництва є борошняний пил.

Гранично допустима концентрація борошняного пилу сягає 0,06 мг/м<sup>3</sup>, в той час, як на хлібокомбінаті потужність викидів складає 0,05 т/рік. Для

очищення повітря від пилу використовуються циклони, або рукавні фільтри (сухі пиловловлювачі). Після використання циклонів вловлений пил може бути повторно відправлений на виробництво, а після використання рукавних фільтрів пил на виробництво не допускається, використовується лише на корм.

Джерелом утворення органічних сполук є цукор (в основному глюкоза), який зброджується в результаті життєдіяльності дріжджових клітин, що присутні в тісті. В процесі випікання хліба відбувається найбільший викид легких сполук які через пекарну камеру потрапляють в атмосферу, а деяка кількість видаляється з конденсатом в стічні води.

Таким чином, як правило, на цій стадії виробництва хліба основними забруднювачами навколишнього середовища є оксид вуглецю, етиловий спирт та шум (вентилятори, струшуючі рукавні фільтри, тістомісильні та завалочні машини). Безумовно тут також використовується вентиляція приміщень та вологе прибирання, а знищення шуму здійснюється приглушувачами, які встановлені в каналах, трубопроводах. При охолодженні і зберіганні хліба в основному відбувається процес перерозподілу. Кількість летких сполук на цьому етапі незначна.

Кількість основних викидів визначається на всіх стадіях технологічного процесу в тісті, конденсаті і готовому хлібі. В зв'язку з тим найбільша кількість летких сполук утворюється і виділяється при виробництві хліба з пшеничного борошна опарним способом та житнього хліба на заквасках з направленим культивуванням мікроорганізмів. Для визначення летких компонентів аналізується проби твердої фази тістових заготовок в процесі розстійки, перед випіканням, гарячого і охолодженого хліба, конденсату пароповітряного середовища пекарної камери, газового середовища в процесі розстійки і в кінці випікання хліба.

В хлібобулочному і кондитерському цеху існують кімнати стерилізації (автоклав і мийка) у них в повітря виділяється водяні пари та пари хлору,

які потрапляють в атмосферу робочої зони і навколишнє середовище, таким чином при роботі хлібокомбінатів в атмосферу викидаються наступні речовини.

Перелік забруднюючих речовин, які викидаються в атмосферу на хлібозаводі наведено в (табл. 12.1).

*Таблиця 12.1.*

**Перелік забруднюючих речовин**

<i>Назва викидів</i>	<i>ГДК, Мг/м<sup>3</sup></i>	<i>Клас небезпеки</i>	<i>Потужність викидів</i>
Окис заліза	0,4	4	5
Гідроокис натрію	0,01	2	0,0077
NO <sub>2</sub>	0,085	2	4,523
СО	5	4	8,054
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ОН	5	4	0,776
Ацетальдегід	0,01	3	0,038
Ацетон	0,35	4	0,0184
Мурашина кислота	0,2	3	0,518
Оцтова кислота	0,2	3	0,521
Фурфурол	0,05	3	0,359
Пил паперовий	0,1	0	0,01
Пил борошна	0,06	0	0,05
Пил металевий	0,4	0	0,01

Тверді відходи хлібокомбінату розміщуються в спеціально відведеному місці на території заводу і вивозяться на місцеве звалище. Кількість викидів і скидів твердих відходів на підприємстві визначаються спеціалізованою організацією, контролюється виконання державним управлінням екологічної безпеки. Основними відходами виробництва хліба є відходи борошна, тіста, хлібної та сухарної крихти, хлібобулочних

виробів, а також інші відходи тіста та хліба, одержані при виробництві х/б виробів. Відходи хлібопекарного виробництва застосовуються згодовуванням тваринам, птиці, рибі.

Види відходів:

1. Відходи тіста – це шматочки тіста одержані в результаті нещільності, а також під час пуску технологічного обладнання, які за санітарним станом не можуть бути використані для виготовлення х/б та сухарних виробів.

2. Відходи від виробів – шматки підгорілої скоринки у вигляді обрізків та інші. Частина цих відходів 5% після помелу йде на вторинне використання — додається в закваску тіста.

Транспортування відходів здійснюється насипом або в ящиках, який відповідає санітарним вимогам, що пред'являються до засобів перевезення кормів для с/г тварин.

Основні шляхи зменшення забруднення навколишнього середовища на підприємстві це — дотримання роботи печей та котлів суворо по режимним картам, які розроблені спеціалізованою організацією, яка має ліцензію на проведення цих робіт. Кожний рік підприємство вносить плату за користування природними ресурсами.

### 13. *МАРКЕТИНГОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ*

**Загальна характеристика ринку.** В умовах сучасного ринку інженерна досконалість виробу не є єдиною запорукою його комерційного успіху. Критично важливим стає відповідність технічних параметрів реальним потребам користувачів. Об'єктом даної розробки є вдосконалена піч підлогового типу (подава піч), орієнтована на специфічний сегмент ринку — крафтові міні-пекарні.

Концепція «Common Kitchen» передбачає спільне використання обладнання різними орендарями (стартапами, кондитерами, пекарями). Це висуває до обладнання специфічні вимоги: підвищена зносостійкість, універсальність (здатність випікати як хліб, так і кондитерські вироби) та «прощення помилок» персоналу.

Інновація дозволяє отримати кінцевий продукт (хлібобулочні вироби) з покращеними органолептичними властивостями: рівномірною пористістю м'якушки, глянцевою скоринкою без розривів та збільшеним об'ємом виходу. З точки зору класифікації товарів промислового призначення, розробка відноситься до основного технологічного обладнання тривалого користування.

Ринок хлібопекарської продукції України проходить стадію фундаментальної трансформації. Можна виділити такі ключові характеристики:

- *поляризація попиту*: Споживачі розділилися на два табори. Перший — це споживання найдешевшого масового хліба (соціальний сегмент). Другий, на який орієнтований наш проект, — це попит на преміальний, «здоровий» хліб (бездріжджовий, цільнозерновий, на живих заквасках).
- *ренесанс крафту*: Спостерігається зростання кількості локальних пекарень («пекарня біля дому»). Споживач готовий платити на

20...40% більше за свіжий хліб з печі, ніж за запакований заводський продукт.

- *енергетична криза*: Внаслідок нестабільності енергосистеми та зростання тарифів для промисловості, фактор енергоспоживання (кВт·год на 1 кг продукції) став вирішальним при виборі печі. Старе обладнання стає нерентабельним.

Ринок пекарського обладнання в Україні є імпортозалежним.

Структурно його можна представити так:

- *преміум-сегмент (High-End)*: Обладнання виробництва Німеччини (MIWE, Wachtel) та Франції (Bongard). Це «Мерседеси» у світі печей. Вони займають близько 15% ринку, переважно у великих мережах супермаркетів та елітних пекарнях.
- *середній сегмент (Middle)*: Італійські виробники (Unox, Polin, Bassanina). Найпопулярніший сегмент (близько 45% ринку), що пропонує баланс ціни та якості.
- *бюджетний сегмент (Low)*: Турецьке обладнання (Kumkaya) та вживане обладнання з Європи. Займають близько 30% ринку.
- *вітчизняний виробник*: Займає найменшу частку (близько 10%), часто програючи в дизайні та автоматизації, але виграючи в ціні та доступності сервісу.

Проект спрямований на те, щоб запропонувати ринку продукт із технічними характеристиками сегменту Middle, але за ціною, наближеною до Budget.

**Огляд тенденцій розвитку (PEST-аналіз).** Для детального розуміння макросередовища проведемо PEST-аналіз факторів, що впливають на успіх проекту (табл. 13.1).

Таблиця 13.1

Група факторів	Вплив на проект
P (Political) - політичні	Гармонізація українських стандартів з ЄС (НАССР) вимагає використання обладнання, що легко миється та дезінфікується. Державні гранти для малого бізнесу (наприклад, "єРобота") стимулюють відкриття нових пекарень, які потребують обладнання
E (Economic) - економічні	Інфляція та девальвація гривні роблять імпортне обладнання надто дорогим для стартапів. Це відкриває вікно можливостей для вітчизняного аналога. Зростання вартості електроенергії підвищує попит на енергоефективні рішення
S (Social) - соціальні	Тренд на урбанізацію та зміна культури споживання: українці все частіше купують хліб у кав'ярнях, а не в супермаркетах. Зростання популярності формату Common Kitchen як способу зниження витрат на оренду
T (Technological) - технологічні	Доступність сучасних матеріалів (ефективна термоізоляція, точні PID-контролери температури) дозволяє створити конкурентний продукт на базі вітчизняних потужностей

**Аналіз зовнішнього маркетингового середовища.** На ринку присутні прямі аналоги, з якими доведеться конкурувати розроблюваній печі. Проведемо порівняльний аналіз за 5-бальною шкалою (де 5 — найвищий показник) (табл. 13.2).

Головний конкурент — італійське обладнання. Воно виграє в дизайні та електроніці, але програє в ціні та вартості обслуговування. Наша розробка має перевагу в показнику "Ціна/Якість" та доступності запчастин, що критично для малого бізнесу.

Цільову аудиторію проекту можна розділити на три основні сегменти:

*Сегмент А:* Резиденти Common Kitchen.

Молоді підприємці, стартапери, кондитери-аматори, що виходять на профі-рівень. Їм потрібна піч «все-в-одному». Зранку там печуть круасани,

вдень — чабату, ввечері — бісквіти. Максимальна універсальність та простота налаштувань обладнання.

*Сегмент В:* Крафтові пекарні (Artisan Bakery).

Сімейний бізнес, акцент на унікальних рецептурах. Стабільність температури. Їм важливо, щоб «кам'яний під» довго тримав тепло. Якість скоринки (парозволоження).

*Сегмент С:* HoReCa (Ресторани).

Заклади, що хочуть подавати власний хліб як комплімент гостю. Компактність (на кухні ресторану мало місця) та дизайн (якщо піч стоїть у відкритій кухні).

Таблиця 13.2

Критерій	Проектна розробка	Аналог (Італія)	Аналог (Туреччина)	Аналог (Україна, стара модель)
Якість випікання	5	5	4	3
Енергоефективність	5	5	3	2
Цінова доступність	4	2	4	5
Ремонтопридатність	5	3	3	4
Зручність керування	4	5	4	3

Узагальнимо маркетингові перспективи розробки за допомогою SWOT-аналізу:

**Сильні сторони (Strengths):** Покращена якість продукції завдяки модернізації. Нижча собівартість порівняно з імпортними аналогами (відсутність мит, логістики з ЄС). Використання доступних комплектуючих (швидкий ремонт). Адаптація під українські електромережі (захист від перепадів напруги).

**Слабкі сторони (Weaknesses):** Відсутність відомого бренду (низька довіра на старті). Менш привабливий промисловий дизайн порівняно з італійськими топ-брендами. Потреба в налагодженні сервісної мережі.

**Можливості (Opportunities):** Вихід на ринок франшиз пекарень (постачання обладнання «під ключ»). Отримання державних замовлень (їдальні, військові частини). Модернізація існуючого парку старих печей на підприємствах шляхом встановлення розробленого вузла.

**Загрози (Threats):** Демпінг з боку китайських/турецьких виробників. Зміна цін на матеріали (нержавіючу сталь, електроніку). Зниження купівельної спроможності населення (падіння попиту на крафтовий хліб).

Проведений маркетинговий аналіз доводить, що удосконалення конструкції печі підлогового типу є своєчасним та економічно обґрунтованим. Ринок потребує обладнання, яке заповнює нішу між дешевими, але неякісними вітчизняними печами, та дорогими європейськими брендами. Завдяки модернізації піч забезпечує якість випікання рівня Premium за ціною сегменту Middle. Основні ризики лежать у площині впізнаваності бренду, що нівелюється чітким позиціонуванням на B2B клієнтів, які оцінюють насамперед технічні характеристики та окупність, а не бренд. Впровадження даної розробки дозволить підприємству знизити виробничі витрати та підвищити конкурентоспроможність своєї продукції.

## **ВИСНОВКИ**

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності печі підлогового типу для випікання хліба в умовах крафтового виробництва.

Модернізацією передбачалося інженерне рішення щодо удосконалення механізму обертання візка печі, а також змінити тепловий і паровологосний режим випічки, внаслідок чого поліпшиться якість виробів і підвищиться продуктивність печі. Також запропоновано розділити процес випічки хліба на етапи з використанням проміжного вакуумно-випарного охолодження, збільшенням або зменшенням тривалості проміжних процесів, що дозволяло б робити технологію гнучкішою, і в той же час не знижувало б якість випеченого хліба.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, а також інженерних розробок встановлено, що інтенсивність прогрівання тіста-хліба в процесі випікання, а також якісні показники готової продукції залежать від матеріалу і товщини поду. При раціональній організації теплопідведення в пекарній камері, вибираючи оптимальну товщину поду можна забезпечити випікання якісних виробів на подах із різних матеріалів.

Методом безпосередніх замірів теплових потоків і температур на поверхні і у внутрішніх шарах тіста-хліба побудовані поля розподілення потоків і температур в процесі випікання. Аналіз полів теплового потоку і температур дозволяє дати кількісну і якісну оцінку зовнішнього і внутрішнього теплообміну, що відбувається при випіканні тіста-хліба.

Із дослідів видно, що попередня випічка повинна бути в межах 80% від загальної випічки. При попередній випічці, в межах 80%, упікання становить 4,3%, усихання – 5,15%, пористість – 73%, час допікання – 22 хвилини. Допечені вироби мають рівномірну пористість та найкращі органолептичні показники.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості: підруч. для студентів ВНЗ / Мирончук В.Г., Гулий І.С., Пушанко М.М. та ін. Вінниця: Нова книга, 2007. 648с.
2. Методичні рекомендації до виконання випускової кваліфікаційної роботи [Електронний ресурс] [Текст]: на здобуття освіт. ступ. "Магістр" за спец. 133 "Галузеве машинобудування" освіт.-проф. програми "Інжиніринг харчових виробництв" ден. та заоч. форми навч. / уклад.: В.Г. Мирончук, М.В. Якимчук, О.М. Гавва, Д.М. Люлька, О.М. Чепелюк; Нац. ун-т харч. технол. Київ: НУХТ, 2022. 51 с.
3. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: навч. посіб. / Мирончук В.Г., Орлов Л.О., Пушанко М.М. та ін. Вінниця: Нова книга, 2004. 288с.
4. Монтаж і технічний сервіс обладнання: підручник [Текст] [Електронний ресурс] / В.Г. Мирончук, М.В. Якимчук, Д.М. Люлька, С.О. Володін; Нац. ун-т харч. технол. Київ: НУХТ, 2024. 267 с.
5. Монтаж та технічний сервіс обладнання. Практикум: навч. посібник [Текст] [Електронний ресурс] / В.Г. Мирончук, Д.М. Люлька, О.А. Єщенко, О.І. Свідерська; Міністерство освіти і науки України, Національний університет харчових технологій. Київ: НУХТ, 2017. 162 с.
6. Заплетніков, І.М. Експлуатація і обслуговування технологічного обладнання харчових виробництв: навч. посіб. / І.М. Заплетніков, В.Г. Мирончук, В.М. Кудрявцев. К.: «Кафедра», «Центр учбової літератури», 2012. 344 с.
7. О.О. Чепелюк, О.А. Єщенко, Ю.Ю. Доломакін. Гігієнічні вимоги до проектування обладнання харчових виробництв: підруч. К.: НУХТ, 2017. 311 с.

8. Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: підруч. для студентів ВНЗ / К.: НУХТ, 2010. 547 с.
9. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва: навч. посібник / П.С. Берник, З.А. Стоцько, І.П. Паламарчук, В.В. Яськов. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2004. 336 с.
10. Дробот В.І. Технологія хлібопекарського виробництва: підручник / В. І. Дробот. К.: ПрофКнига, 2024. 516 с.
11. Pyler E. J., Gorton L. L. Baking Science & Technology: 3rd ed. Lancaster, PA: Technomic Publishing, 1998. 800 p.
12. Zhou W., Hui Y. H. (eds.) Bakery Products: Science and Technology : 2nd ed. Ames : Wiley-Blackwell, 2013. 528 p.
13. Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer: 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 992 p.
14. Fellows P. Food Processing Technology: Principles and Practice: 4th ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. 840 p.
15. EN 1672-2:2020. Food processing machinery — Basic concepts — Part 2: Hygiene and cleanability requirements. — CEN, 2020.
16. ДСТУ ISO 22000:2019. Системи керування безпечністю харчових продуктів. Вимоги (ISO 22000:2018, IDT). Київ: УкрНДНЦ, 2019.
17. Porlanmaz. Rotary Rack Oven — Technical catalogue (Porlanmaz).
18. IBIS. Rotary Ovens RS Roto Speed — Brochure.
19. Bresso Oven. Advantages of Using Rotary Ovens in Baking — Company article, 2024.
20. Akinwonmi A.S. Design and Fabrication of a Novel Commercial Baking Oven // American Journal of Mechanical and Manufacturing Engineering. 2024. Vol. 8, No.3, P.45-56.

21. Development of a Prototype Inverter Powered Baking Oven — ResearchGate, 2025.
22. Gerke G. Bakery Locks in Product Quality with New SCADA System // Food Engineering, 23 Dec 2024.
23. Razhyvín O. Development of an automated system for controlling the bakery oven // Control and Information Systems for Manufacturing, 2024.
24. Market Report Analytics. Commercial Rotating Rack Oven — Market analysis and trends, 2025.
25. Hygienic design of food processing equipment and maintenance — technical guidance PDF, 2022.
26. Харченко С. М., Олешко Ю. О., Сидоренко С. І., Доломакін Ю. Ю. Модернізація хлібопекарської печі БН-50 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/2ef5a7c0-6cba-4188-8bbb-1fe8ae5aced8/content> (дата звернення: 31.10.2025).
27. Мхоян А.А. Модернізація ротаційної конвективної хлібопекарської печі для мініпекарні продуктивністю 1000 кг/добу хлібобулочних виробів: кваліфікаційна робота бакалавра. – Київ: НУХТ, 2024. 86 с.
28. Sanusi M. S., Sunmonu M. O., Adepoju A. L., Abodunrin T. O., Ajibade H. A. Development and evaluation of the operational parameters of a rotary oven. Nigerian Journal of Technological Development, 2020, 17(4), 1–11.
29. Dawood A., Elhabashy H. Some engineering factors affecting the performance of a small rotary baking oven. Misr Journal of Agricultural Engineering, 2020, 38(1), 27–36.
30. Kosemani B. S., Ilori A. T., Atere A. O. Modification and optimization of a baking oven for small scale bread production. Agricultural Sciences, 2021, 12(6), 630–644.

31. Manhiça F. A. Efficiency of a wood-fired bakery oven – Improvement by theoretical and practical approaches: Doctoral thesis. – Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2014.
32. Masanet E., Therkelsen P., Worrell E. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Baking Industry: An ENERGY STAR® Guide for Plant and Energy Managers. – Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2012. LBNL-6112E.
33. Carbon Trust. Improving the efficiency of bakery ovens: Case study. – London: Carbon Trust, 2016.
34. Mukherjee S., Asthana A., Howarth M., McNeill R., Frisby B. Achieving operational excellence for industrial baking ovens. Energy Procedia, 2019, 161, 395–402.
35. Khatir Z., Paton J., Thompson H., Kapur N., Toropov V. Optimisation of the energy efficiency of bread-baking ovens using a combined experimental and computational approach. Applied Energy, 2013.
36. Boulet M., Marcos B., Dostie M., Moresoli C. CFD modeling of heat transfer and flow field in a bakery pilot oven. Journal of Food Engineering, 2010, 97(3), 393–402.
37. Mosalam H. Digital modeling of heat transfer during the baking process. Modelling and Simulation in Engineering, 2021, Article ID 8957148.
38. Kokolj U., Škerget L., Ravnik J. The validation of numerical methodology for oven design optimization using numerical simulations and baking experiments. Journal of Mechanical Engineering, 2017.
39. Yan Z., Chen M.-H., Chen H., Zhang Y. Optimization of the temperature field inside a forced convection oven. Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2024), Vol. 119, 2024, 390–401.
40. Çukurova University / Research Square. A systematic approach to numerical analysis and validation for industrial oven design and optimization. Preprint, 2023.

41. Okoronkwo E. N., Nnam R. E., Adindu P. U. Design and characterization of a gas-powered baking oven fabricated with local engineering materials. *Advanced Journal of Science, Technology and Engineering*, 2022, 2(1), 63–77.
42. Akinwonmi A. S. Design and fabrication of a novel commercial baking oven. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2024, 8(3), 39–46.
43. MEMAK. Installation and User Manual for Bakery Oven with Rotating Trolley (ROTA Series). – Konya, Turkey: Memak Makina, б/р.
44. IBIS. Rotary Ovens. RS “Roto Speed” Series: Technical Brochure. – Szubin, Poland: IBIS Sp. z o.o., 2024.
45. ATS Machines. Rotary Oven EN 5070–80100: Technical Catalogue. – 2023.
46. KAR Ovens. Rotary Rack Oven: Catalogue. – 2025.
47. WP Bakery Technologies. WP Baking – Ovens Portfolio (brochure). – 2020.
48. Gaware S. L., Mandlik A. S., Vikhe P. S., Kadu C. B. Oven temperature control using PID with smartphone monitoring via Firebase. *IJARIIIE*, 2024.
49. Melesse T.Y., Peer M.S., Ramasamy S., et al. Digital twin for energy-intelligent bakery operations: Concepts and applications. *Energies*, 2025, 18, 3660.
50. Altomare R.E. Heat transfer in bakery ovens. In: *Developments in Food Engineering*. – Springer, 1992. – С. 298–300.
51. Semenova E.I., Semenov A.V. Impact of bakery innovation on business resilience growth. In: *Baking Business Sustainability Through Life Cycle Management*. – Springer, 2023. – С. 241–259.
52. Aziz, Harjuma. Design of baking oven with two sources of heat (electric & gas). *ICONSS 2019 Proceedings*. – Palopo, 2019.