

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 004.89:004.942:681.518:637.4:664.93

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
(назва ННІ)

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

В.о. завідувача кафедри автоматики  
та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ В.В. Каплун  
(підпис) (ПІБ)

\_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**02.06.-КМР.2059"С".2024.11.18.001.ПЗ**

на тему **"ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ  
ЖОВТКІВ ПТАШИНИХ ЯЄЦЬ"**

**Спеціальність:**

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»  
(шифр і назва)

**Освітньо-професійна програма:**

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(назва)

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_  
(підпис)

Т.І. Лендел, к.т.н., доцент  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав \_\_\_\_\_  
(підпис)

С.А. В'ялий  
(П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.М. Ромащук, докт. філос.  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

**КИЇВ-2025**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри  
автоматики та робототехнічних  
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

О.О. Опришко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ  
(бакалаврської, дипломної)

**В'ялому Сергію Анатолійовичу**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

**Спеціальність:** 174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

**Освітньо-професійна програма:** Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема магістерської роботи "**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ЖОВТКІВ ПТАШИНИХ ЯЄЦЬ**",

затверджена наказом ректора НУБіП України від 18.11.2024 року №2059«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.11.2025 року

**Вихідні дані до магістерської роботи:** завдання кафедри на виконання магістерської роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження та аналізу; наукова література з тематики магістерської роботи.

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Загальна характеристика, області використання та перспективи виробництва яєчних продуктів.
2. Дослідження теплофізичних та фізико-хімічних властивостей взаємодії яєчних жовтків із водою.
3. Дослідження механізму внутрішнього тепломасопереносу при зневодненні жовткової суміші методом розпилювання.
4. Розробка раціональних режимів сушіння жовткової суміші курячих яєць.

**Дата видачі завдання** «19» листопада 2024 року

**Керівник магістерської роботи**

\_\_\_\_\_ (Підпис)

Ромашук О.М.

(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_ (Підпис)

В'ялий С.А.

(Прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

Вступ .....	5
РОЗДІЛ 1. Загальна характеристика, області використання та перспективи виробництва яєчних продуктів .....	11
1.1. Технологічна характеристика яєчних продуктів .....	11
1.2. Перспективи виробництва і області використання яєчних продуктів .....	16
1.3. Аналіз сучасних технологій переробки яєчних продуктів .....	18
1.4. Перспективні способи і конструкторські рішення для сушіння яєчних продуктів .....	21
1.5. Функціональна схема автоматизації системи керування установкою для сушіння яєчних продуктів .....	26
РОЗДІЛ 2. Дослідження теплофізичних та фізико-хімічних властивостей взаємодії яєчних жовтків із водою .....	32
2.1. Визначення теплофізичних та структурно-механічних характеристик яєчних жовтків .....	32
2.1.1. Визначення щільності жовтка курячих яєць .....	33
2.1.2. Визначення питомої теплоємності жовткової суміші .....	39
2.1.3. Визначення теплопровідності жовткової суміші .....	40
2.1.4. Визначення температуропровідності жовткової суміші .....	44
2.2. Закономірності взаємодії жовткової суміші з водою .....	46
2.3. Термодинамічний аналіз внутрішнього масо переносу при взаємодії жовткової маси із водою .....	52
РОЗДІЛ 3. Дослідження механізму внутрішнього тепломасопереносу при зневодненні жовткової суміші методом розпилювання .....	56
3.1. Установка для експериментальних досліджень процесу сушіння жовткової суміші методом розпилювання .....	57
3.2. Аналіз результатів експериментальних даних при визначенні кінетики сушіння жовткової суміші курячих яєць .....	61
3.3. Дослідження механізму внутрішнього масопереносу при сушці жовткової суміші методом розпилення .....	67
РОЗДІЛ 4. Розробка раціональних режимів сушіння жовткової суміші курячих яєць .....	69
4.1. Аналіз впливу основних факторів на питому продуктивність при сушінні жовткової суміші методом розпилення .....	69
4.2. Розробка раціональних комбінованих режимів сушіння жовткової суміші курячих яєць .....	74
4.3. Визначення передатної функції сушарки для яєчних продуктів для каналу керування температурою теплоносія .....	79
РОЗДІЛ 5. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань .....	82
5.1. Вибір алгоритму керування .....	82
5.2. Реалізація алгоритму керування .....	84

5.2.1. Вибір промислових пристроїв керування .....	85
5.2.2. Обґрунтування вибору датчика температури .....	87
5.2.3. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму САК температурою теплоносія .....	90
5.2.4. Вибір частотного перетворювача .....	95
РОЗДІЛ 6. Розробка цифрової системи керування .....	99
6.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК .....	99
6.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування	102
РОЗДІЛ 7. Розробка схеми електричної принципової та засобів людино-машинного інтерфейсу візуалізації процесу керування .....	107
7.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування сушаркою для яєчних продуктів .....	107
7.2. Розробка засобів візуалізації процесу керування сушаркою для яєчних продуктів .....	109
Висновки .....	118
Література .....	120
Додатки .....	123

## ВСТУП

*Актуальність теми.* З винаходом технологій переробки яєць в сухі яєчні продукти (ЯП) харчова промисловість отримала можливість заготовляти вміст яєць і зберігати його, використовуючи тоді, коли виникає потреба, а не за фактом наявності або відсутності свіжих яєць.

До сухих яйцепродуктів відносять *білковий яєчний порошок, сухий яєчний жовток, сухий меланж*, а також *сухий омлет* – білки і жовтки в суміші з суцільним або знежиреним молоком. Вони мають цілий ряд переваг в порівнянні з замороженими яйцепродуктами і вже тим більше - свіжими яйцями. Їх можна довго зберігати без холодильників, їх зручно використовувати в кондитерській промисловості, в громадському харчуванні і для інших кулінарних потреб. У сухому яєчному порошку не розвиваються мікроорганізми: вони гинуть під час сушки яєчної маси.

Спростилася структура перевезень. За оцінками міжнародних транспортних агентств, в залежності від країни економія витрат на логістику при використанні громадським харчуванням сухих ЯП замість рідких і заморожених становить 25-35%, а замість сирих яєць - 70-80% [40].

Для отримання яєчного порошку використовують цілі столові яйця, а також яйця з пошкодженою шкаралупою, але без ознак течі, з терміном зберігання не більше доби після знесення, дрібні яйця і морожений меланж після розморожування. Орієнтовна норма виходу яєчного порошку вологістю 17% становить 27,4% використаної яєчної маси. Харчові властивості порошку майже не відрізняються від курячих яєць. Калорійність яєчного порошку становить 542 ккал на 100 г продукту, що еквівалентно 8 великим яйцям [35].

Сухі ЯП діляться на дві підгрупи: для промислового споживача (кондитерська, м'ясна продукція, хлібобулочна, м'ясна і інші галузі) і для домашнього господарства, а також громадського харчування. У харчовій промисловості сухі ЯП затребувані при виробництві хлібобулочних і

кондитерських виробів, майонезів, соусів. До складу майонезів і соусів входить до 8% яєчного порошку або сухого жовтка. Попит на ці продукти постійно збільшується [36].

Також в числі споживачів яєчного порошку і сухого яєчного білка - виробники варених ковбас і сосисок. За даними Міжнародної програми розвитку птахівництва, частка м'ясних продуктів, виготовлених з використанням яєчного білка, збільшується на 2-3% в рік. Крім того, сухі ЯП з білків (альбумін) кондитери застосовують для створення гелів, безе, зефіру і суфле.

Яєчна продукція використовується в індустрії HoReCa (готелі, ресторани, кафе) для приготування сендвічів і салатів. Сухі ЯП затребувані фастфудом і іншими компаніями громадського харчування. Там з яєчного порошку, розчиняючи його в молоці, готують яєчню і омлет. У закладах громадського харчування яєчний порошок може повністю замінити сирі яйця в багатьох рецептах. З порошку готують омлети, підливи, його додають в тісто для млинців і здобної випічки, соуси, кляр для обсмажування риби, м'яса і овочів [18].

У різних регіонах світу до переробки курячих яєць в сухі і рідкі продукти підходять дуже по-різному. Наприклад, за даними FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations - Продовольчої організації ООН), країни ЄС переробляють близько 50% вироблених яєць, США - близько 30-35%, Японія - понад 50%, а країни пострадянського простору - тільки близько 10-12%.

Основна причина застосування технологій глибокої переробки яйця - необхідність згладжування сезонних коливань. Після Великодня, з кінця квітня - початку травня, попит на товарні яйця різко падає. Підприємства, які використовують цю технологію, виробляють з надлишків яйця, наприклад, порошок меланж, займаючи тим самим нові ніші ринку і отримуючи прибуток від продажу продуктів глибокої переробки.

Виробництво яєчних продуктів в світі стабільно зростає. Темпи зростання виробництва сухих ЯП перевищують темпи приросту рідких через зручності використання. У 2009 р. в усьому світі було вироблено 829 тис.т. сухих ЯП, у 2015 р. - 1 млн.т., у 2018 р. - 1,2 млн.т. Прогноз компанії Pro-Consulting на 2024 р. - 1,3млн.т, на 2025 - 1,37млн.т., на 2026 - 1,44млн.т. [40].

В Європі та Америці споживають більше ЯП на душу населення, але країни Азії наздоганяють їх швидкими темпами. На думку експертів, попит на ЯП зростає насамперед за рахунок їх застосування в харчовій промисловості. Тут важливо зручність зберігання: рідкі ЯП зберігаються в холоді 27-36 днів, а сухі можна зберігати до двох років [37].

В ЄС в п'ятірку найбільших імпортерів сухих яєчних продуктів входять Німеччина (23% від загального обсягу імпорту в грошовому еквіваленті), Великобританія (15%), Франція (10%), Нідерланди (8%) і Бельгія (6%). Хоча імпортні поставки йдуть в основному усередині ЄС, в 2018 р спостерігалось зростання поставок сухих ЯП з третіх країн - він склав 9% від загального обсягу імпорту в грошовому вираженні (ще в 2016 р було 7%).

В Україні масштабне промислове виробництво ЯП почалося в 2005 р і за останні 10 років зростає в 3,6 рази. При цьому з самого початку виробництво яєчних продуктів в Україні спиралося на зовнішній попит, оскільки внутрішнього ринку практично не існувало. Більшість підприємств використовували яйця в шкаралупі, і зараз йде поступове освоєння технологій і формування попиту на ЯП на внутрішньому ринку.

З 2009 по 2019 рр. випуск сухих яєчних продуктів в Україні зріс з 4,2 тис. до 11,9 тис. т (прогноз на поточний рік), відзначають в Pro-Consulting. Але це зростання було дуже нерівним: пікові обсяги були зафіксовані в 2013-2014 рр., Потім сировинна база скоротилася через втрату ряду птахофабрик в Криму і на сході України, що призвело до скорочення виробництва ЯП [40].

Традиційно для реалізації процесу сушіння в яйцепереробній промисловості застосовують конвективні розпилювальні сушильні установки або сушарки з киплячим в потоці сушильного агента шаром інертних тіл на

поверхню яких розпорошується продукт. Дані типи сушильного обладнання мають високий технічний рівень, який базується на сформованій потужній машинобудівельній та науково-технічній базі.

При розпилювальній сушці продукт тонко диспергується на частки в потік теплоносія, при цьому істотно збільшується поверхня контакту фаз і, як наслідок, значно підвищується інтенсивність тепломасообмінних процесів. Специфічні особливості сушіння розпиленням обумовлюють ряд характерних гідних цього способу: висока якість висушеного продукту і відсутність його перегріву в результаті інтенсивного випаровування і короткострокового контакту з сушильним агентом; готовий порошок не вимагає подрібнення і має високу розчинність та ін.

Беручи до уваги, що збільшуються обсяги випуску сухих яєчних продуктів, очевидно, що впровадження рекомендацій щодо вдосконалення стадії сушки призведе до відчутних економічних вигод виробників.

Проведення додаткових комплексних досліджень з метою вибору раціональних способу і режимів зневоднення, типу і конструктивних особливостей сушильного апарату, які забезпечують відповідні техніко-економічні показники, актуально і вимагає наукового підходу з урахуванням специфіки технології і властивостей сировини та вимог до кінцевої продукції.

Вдосконаленню процесів сушіння приділяється велика увага, так як саме ця стадія досить енергоємна, а, отже, в значній мірі визначає вартість готового продукту і, крім того, має суттєвий вплив на якісні показники товарної продукції.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вдосконалення процесу сушіння яєчних продуктів шляхом комплексного дослідження процесів тепломасообміну, розробки раціональних режимів зневоднення і конструкції сушильної установки.

Відповідно до поставленої мети вирішуються наступні **завдання**:

1. Визначити перспективні напрями вдосконалення тепломасообміну при сушінні яєчних продуктів на основі аналізу способів сушки і

конструкторських рішень для їх здійснення з урахуванням енергетичних витрат, інтенсивності процесу і вимог до сировини та якості готового продукту.

2. Комплексно дослідити об'єкти сушки, вивчивши експериментально і на основі узагальнення відомих літературних даних їх морфологічні, теплофізичні і гігроскопічні характеристики, а також проаналізувати термодинамічні закономірності статичної взаємодії яєчних продуктів з водою.

3. Виявити особливості механізму внутрішнього тепломасопереносу при сушінні яєчних продуктів на основі дослідження кінетики сушіння.

4. Експериментально обґрунтувати раціональні способи зневоднення яєчних продуктів і виявити вплив основних факторів на процес сушіння, отримати розрахункові залежності кінетики вологовидалення і питомої продуктивності сушарки від факторів, що впливають для їх використання в інженерних розрахунках при проектуванні сушарок.

5. Розробити і чисельно реалізувати математичну модель процесу розпилювального сушіння яєчних продуктів для розрахунку еволюції температурних полів у продуктах при зневодненні.

6. Розробити алгоритм отримання комбінованих раціональних режимів 2-х зонної розпилювальної сушки при активній нестационарної аеродинамічній обстановці взаємодії потоків в сушильній камері.

7. На основі аналізу результатів комплексу проведених експериментально-аналітичних досліджень по інтенсифікації тепломасообміну з урахуванням цільового дослідження даних науково-технічної літератури запропонувати конструкторські рішення для реалізації розроблених режимів сушки.

**Об'єктом дослідження** є процес сушіння яєчних продуктів у сушарках розпилювального типу.

**Предметом дослідження** є взаємозв'язки і закономірності процесів керування енергетичними потоками і режимів сушіння на енергоефективність виробництва сухих яєчних продуктів у розпилювальних сушарках.

**Методи дослідження.** Дослідження виконані методами фізичного, математичного моделювання та теорії подібності, проведення експерименту з статистичною обробкою результатів. Експерименти здійснювались на установках для розпилювального сушіння, обладнаних сучасними методами керування та вимірювання. Для аналітичного дослідження використовувалось програмне забезпечення Matlab, MathCad 15, Excel.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ЯЄЧНИХ ПРОДУКТІВ

#### 1.1. Технологічна характеристика яєчних продуктів

Одним з основних продуктів птахівництва є яйце (рис. 1.1). Велика розмаїтість поживних речовин, що містяться в яйці, робить його цінним поживним продуктом. Воно сприяє підтримці здоров'я дорослої людини, посилює ріст і розвиток дітей, грає важливу роль при лікуванні багатьох розладів харчування, включаючи вітамінну недостатність. Цінність яєць в тому, що в них містяться повноцінні білки і жири, а також біологічно цінні речовини.



Рис. 1.1. Будова яйця птиці

Співвідношення білка, жовтка і шкаралупи залежить від виду, віку, породи та продуктивності, умов утримання і годівлі. У яйцях курей міститься 6 вагових частин білка - 54-60%, 3 жовтки - 28-32% і 1 частина шкаралупи - 11-14% [3,5,23 та ін.]. У яйцях молодих курей міститься менше жовтка і більше білка, а з віком маса жовтка збільшується.

Основну масу їстівної частини яйця становить білок, який складається з чотирьох неоднорідних по щільності шарів: рідкого зовнішнього – 23%, щільного зовнішнього – 57%, рідкого внутрішнього – 17% і щільного внутрішнього – 3%.

Вміст щільного білка прийнято вважати одним з основних показників якості яєць, так як при зберіганні яєць білок поступово розріджується і стає водянистим.

Найбільш важлива частина в харчовому відношенні – жовток. Це густа маса, укладена в тонку прозору кулясту оболонку неправильної форми. Колір жовтка обумовлений вмістом каротиноїдів і може бути від блідо-жовтого до темно-помаранчевого. Жовток складається з розташованих по черзі темножовтих і світло-жовтих шарів, а в центрі жовтка розташовується більш світла частина – латєбра.

Шкаралупа – вапняна оболонка, яка складається з двох шарів: внутрішнього, або сосочкового, що становить одну третину шкаралупи, і зовнішнього, або губчастого. Шкаралупа пронизана численними порами. Шкаралупа охороняє вміст яйця від пошкоджень і служить джерелом мінеральних речовин, які витрачаються на утворення скелета. Колір шкаралупи залежить від виду і породи птиці. Яєчна шкаралупа, внутрішня (яєчна), зовнішня (підшкарлупна) оболонки і кутикула з пористою структурою є переплетеними, скріплені білковим речовиною, волокнами [3].

Після знесення яйця, в ньому на тупому кінці утворюється повітряна камера, розмір якої, як важливий якісний показник, визначається проникністю шкаралупи, тривалістю і умовами зберігання [23].

Хімічний склад є об'єктивним показником якості та поживної цінності яєць. Хімічний склад яєць птиці дещо різниться і узагальнено в таблиці 1.1 [5]. В цілому яйця будь-якого виду сільськогосподарської птиці складаються на 70-75% з води, в якій містяться розчинені мінеральні речовини, вуглеводи, вітаміни, протеїни і жири у вигляді емульсії.

## Хімічний склад яєць птиці

Вид птиці	Суша речовина, всього, %	Вода, %	У тому числі			
			Вуглеводи, %	Протеїн, %	Жири, %	Мінеральні речовини, %
Кури	26,4	73,6	1,0	12,8	11,8	0,8
Індики	26,3	73,7	0,7	13,1	11,7	0,8
Цесарки	27,2	72,8	0,8	13,5	12,0	0,9
Перепілки	25,4	74,6	-	13,1	11,2	1,1
Качки	29,9	70,1	1,4	13,0	14,5	1,0
Гуси	29,6	70,4	1,3	13,9	13,3	1,1

Вміст сухої речовини по відношенню до цілого яйця найбільше в жовтку – 45-48%, потім в шкаралупі з оболонками – 32-35% і в білку – близько 20%. У жовтку знаходиться практично весь жир, жиророзчинні вітаміни. Калорійність 100 грам жовтка становить 370 – 400 ккал, білка – 40-50 ккал.

Жовток є основним джерелом поживних речовин і енергії в яйці, співвідношення між розмірами жовтка і білка є важливим фактором, що визначає його харчову цінність [5].

Яйця вважаються також дуже хорошим натуральним джерелом високоцінних жирів (в тому числі і ненасичених жирних кислот) вітамінів і мінеральних речовин, у значній мірі забезпечують щоденну потребу людини. Вживання одного яйця покриває добову потребу дорослої людини в протеїні на 10%, вітамінах та мікроелементах: рибофлавіні – 15%, В12 – 8%, А – 6%, В6 – 4%, Е – 3%, тіаміні – 2%, цинку і залізі – 4%, селені – 10%. У яйці та яйце продуктах містяться антитіла IgY, бетаїн G2 і G3 глобулінів, зв'язаних лінолевої, олеїнової і фолійової кислот, каротиноїдних пігментів, лізоциму та інших речовин, що дозволяє класифікувати яйцепродукти як компонент здорового харчування.

Дослідження останніх років переконливо свідчать про те, що кількість споживаних яєць не має прямого зв'язку з рівнем холестерину в крові. Навпаки, яйця корисні для підтримки серцевої діяльності завдяки присутності

в них лецитину, який перешкоджає накопиченню холестерину в організмі людини.

Залежно від якісних показників яйця класифікуються наступним чином: *харчові, харчові неповноцінні та технічний брак.*

Харчові – свіжі доброякісні яйця з чистою шкаралупою, без механічних пошкоджень, з висотою повітряної камери не більше 13 мм; з щільним, просвітлюючимся, в'язким білком; з жовтком чистим, в'язким, рівномірно забарвленим в жовтий або помаранчевий колір. Харчові яйця підрозділяють на *дієтичні і столові*. Дієтичними вважаються яйця, які зберігалися не більше 7 діб, не рахуючи дня знесення. Після закінчення цього терміну їх за актом переводять в їдальні.

Основні показники якості яєць: маса; чистота і цілісність шкаралупи; стан і величина повітряної камери; консистенція внутрішніх фракцій яйця; становище і рухливість жовтка. Яйця, які мають різного роду дефекти, підрозділяють на неповноцінні (харчові відходи) і непридатні в їжу (технічний брак). Харчові неповноцінні яйця направляють на промислову переробку.

При зберіганні в яйцях відбуваються незворотні процеси, що знижують їх харчові якості. За рахунок випаровування води збільшується повітряна камера, розріджується білок, спостерігається зміщення жовтка. Під час зберігання яйця можуть набувати неприємний запах цвілі, затхлості. При тривалому зберіганні білок яйця втрачає свої бактерицидні властивості, тому в яйці може відбуватися розмноження мікробів, грибів, накопичення токсичних речовин.

Яєчні продукти виробляють у вигляді рідкого і сухого яєчного меланжу, яєчного жовтка і яєчного білка. Сухі яєчні продукти виготовляють наступних видів: яєчний порошок – зневоднена суміш жовтка і білка яєць в природному співвідношенні; білок яєчний сухий; жовток яєчний сухий. За органолептичними показниками яєчні продукти повинні відповідати вимогам, зазначеним в таблиці (Додаток А1).

За фізико-хімічними показниками яечні продукти повинні відповідати вимогам, зазначеним в таблиці (Додаток А2).

Довідкові відомості про харчову та енергетичну цінність в 100 грамах яечного харчового продукту наведені в таблиці 1.2.

Згідно з вимогами яечні продукти зберігають в сухих, чистих і добре вентиляльованих приміщеннях. Термін придатності та умови зберігання встановлює виробник.

Рекомендовані терміни придатності, починаючи з дати виробництва:

- сухих яечних продуктів: при температурі не вище 20 °С – не більше 6 міс. ; при температурі не вище 4 °С – не більше 24 міс.

- рідких охолоджених яечних продуктів: при температурі не вище 4°С – не більше 24 годин, в тому числі на підприємстві-виробнику, не більше 6 годин з моменту закінчення технологічного процесу.

Таблиця 1.2.

Харчова та енергетична цінність яечних харчових продуктів (на 100 гр.)

Назва продукту	Білок, гр., не менше	Жир, гр., не менше	Енергетична цінність, ккал
Сухі яечні продукти			
Яечний білок	85,0	-	340,0
Яечний жовток	35,0	53,0	617,0
Яечний меланж	45,0	38,0	522,0
Рідкі яечні продукти			
Яечний білок	11,0	-	44,0
Яечний жовток	15,0	26,0	294,0
Яечний меланж	15,0	26,0	294,0

Очевидно, що виробництво сухих яечних продуктів перспективно тому, що дозволяє ліквідувати втрати яєць, пов'язані з боєм, усиханням і псуванням в процесі зберігання, знижує вимоги до упаковки, полегшує транспортування, а також дозволяє значно скоротити потребу в складських приміщеннях і холодильниках.

## **1.2. Перспективи виробництва і області використання яєчних продуктів**

Сучасна яйцепереробна промисловість виробляє і постачає на ринок різноманітні яєчні продукти: сухий жовток, білок та яєчний порошок, у т.ч. із різноманітними функціональними домішками. Яєчні продукти є основним компонентом у кулінарії та харчовій промисловості, враховуючи їх високу поживну цінність, піноутворюючу здатність, і здатність утворювати стійкі емульсії у процесі збивання за рахунок високої в'язкості.

Яєчні продукти важливі також для таких галузей, як медицина і фармацевтика (отримання бактеріальних середовищ, лікарських препаратів), при виготовленні мазей і кремів у косметичній індустрії, у літо- та поліграфії при виробництві барвників та надання чутливості до світла, та ін.

Оскільки яєчні продукти є основою функціонального, лікувально-профілактичного і дитячого харчування, розробка асортименту продуктів із оригінальними властивостями, збагачення їх вітамінами та мінеральними елементами, зменшення вмісту холестерину є актуальними задачами і вимагають розробки оригінальних енергозберігаючих і екологічно безпечних технологій за наступним алгоритмом:

- дослідження характеристик компонентів яйця при їх глибокому розділенні з метою покращення піноутворюючих, емульгуючих і гелеоутворюючих властивостей;

- модифікація яєчних продуктів із використанням специфічних препаратів для покращення або створення нових функціональних особливостей;

- якісний аналіз готових яйцепродуктів і напівфабрикатів на базі визначення зв'язку між їх споживчими властивостями і факторами впливу, такими як доля вільних жирних кислот, рН, розчинність, консистенція, органолептичні показники, режимні параметри процесів технологічного ланцюга виробництва, і т.п.;

- створення нових або оригінальних типів яйцепродуктів [16];

- дослідження комплексу характеристик і властивостей компонентів яєць для реалізації їх у технологіях відомих і нетрадиційних для яєчних продуктів галузях індустрії: харчовій, кормовій олійно-жировій, кондитерській, хлібопекарській та ін. з метою підвищення споживчого попиту.

З огляду перспективності розширення асортименту і розвитку технологій яйцепродуктів у 2001 році вперше у Європі організована міжнародна яєчна Програма COST 923, об'єм фінансування якої склав 20 млн. євро. Сфера її діяльності – дослідження курячого яйця для створення оригінальних способів виробництва продуктів функціонального харчування, а також використання яєчних продуктів в областях промисловості, не пов'язаних із харчовими продуктами. У США під патронажем Об'єднання виробників яєць і Американської ради по яйцю (із 1984 р. у Вашингтоні) функціонує центр дослідження поживності яєць (egg Nutrition Center) [1], що координує свою роботу із урядом і організаціями, які вирішують задачі здорового харчування.

На харчовому ринку популярності набувають яйця Columbus, розроблені у рамках Бельгійської національної програми, із високим вмістом протеїну, вітамінів і мінералів із досконалим жировим балансом і заданими властивостями, які отримують за рахунок специфічного вегетаріанського раціону харчування курей [34].

Британська рада по яєчній промисловості (BtIC) разом із Фондом наукових і просвітницьких досліджень, Європейською асоціацією переробників яєць, Міжнародною комісією по яйцю, Іспанським інститутом дослідження яйця (Instituto de estudios del Huevo), Канадською агенцією по маркетингу яйця, Швейцарським об'єднанням виробників (Gallo Suisse) вирішують ряд задач по забезпеченню яєчного життєвого циклу для реалізації товарного яйця на основі наукового забезпечення виробництва і переробки із урахуванням стандартизації і зберігання [12].

### 1.3. Аналіз сучасних технологій переробки яєчних продуктів

Прогресивними є технології глибокої переробки яєць, які включають в себе виробництво сухих яєчних продуктів, що дозволяє мінімізувати втрати яєць в процесі зберігання. Виробництво сухих яєчних продуктів забезпечує скорочення витрат на транспортування і дозволяє істотно скоротити потребу в складських приміщеннях, а також знизити вимоги до пакування і здійснювати тривале зберігання без створення спеціальних умов і знижених температур.

Технологічний процес виробництва сухих яєчних продуктів складається з наступних основних операцій:

- приймання, сортування і санітарна обробки яєць;
- розбивання і вилучення вмісту яєць;
- поділ на білок і жовток (при виробництві меланжу розділення не відбувається);
- накопичення, фільтрація, перемішування, пастеризація (при необхідності);
- сушка, охолодження порошку;
- фасування, зберігання.

Дотримання спеціальних санітарно-гігієнічних правил уважним чином враховується при організації всіх технологічних операцій: повітря у виробничих цехах перед початком робіт очищають від пилу пульверизацією; технологічне і допоміжне обладнання потрібно промивати і стерилізувати; підлогу і стіни щодня після робіт миють і дезінфікують та ін.

Вміст яйця є живильним середовищем для розмноження різних мікроорганізмів. Отримати продукцію регламентованої і високої якості можна тільки при переробці яєць з чистою шкаралупою. Обробка яєць за технологічною інструкцією не завжди ефективна, так як на практиці можливе проникнення мікроорганізмів з поверхні шкаралупи у вміст яєць ще до санітарно-гігієнічної обробки. Перед приготуванням сухих яєчних продуктів, яйця проходять санітарну обробку (миття, сушіння та дезінфекція).

Дезінфікують яйця переважно озоном, а необхідність миття продиктована наявністю джерел розмноження мікрофлори - частинок підстилки, які пристали, посліду, слизу. Яйця до мийки замочують у воді (30 хв. при температурі води 25-28°C) з додаванням хлорного вапна (вміст активного хлору 0,1 - 0,2%). Далі чисті, після дезінфекції і просушування яйця надходять в технологічний вузол розбивання.

Розбивання яєць та відділення від шкаралупи здійснюється за допомогою спеціального обладнання або вручну. При необхідності відокремлюють білок від жовтка і здійснюють візуальний контроль яєчної маси. При ручному розбитті, вміст яйця виливається в індивідуальну ємність - чашечку і в разі виявлення дефектів в білку, або жовтку оператор зливає яєчну масу, проводить зміну ножа і чашечки. В агрегатах для розбиття яєць також передбачено відділення білка від жовтка. Вміст яйця виливається в чашку, жовток залишається на поверхні, а білок відбирається через дренажні отвори в спеціальну ємність.

Для видалення частинок шкаралупи, градинки і підшкаралупної оболонки, яєчну масу фільтрують і одночасно перемішують.

Для сушки яєчних продуктів застосовують:

- *конвективні розпилювальні сушильні установки;*
- *сушарки з киплячим в потоці сушильного агента шаром інертних тіл, на поверхню яких розпорошується продукт.*

При *сушінні методом розпилення* продукт диспергується в потік теплоносія, при цьому істотно збільшується поверхня контакту фаз і, як наслідок, значно підвищується інтенсивність тепломасообмінних процесів. Переваги розпилювальної сушки: висока якість висушеного продукту і відсутність його перегріву в результаті інтенсивного випаровування і короткострокового контакту з сушильним агентом; готовий продукт не вимагає додаткового подрібнення і має високу розчинність та ін.

З *дискових сушарок* найбільшого поширення набули сушарки з паротурбінним приводом. Основним вузлом сушарки є розпилювальний диск з

соплами. Продукт на сушку надходить через отвір у верхній частині диска і за рахунок дії відцентрової сили відкидається до периферії диска, а далі виходить через канали і сопла в сушильну камеру. Швидкість відриву краплі досягає 160 м/с і зустрічаючи опір сушильного агента з температурою 140–160°C, крапля дробиться на частинки. Приданій організації процесу розпилення поверхню 1 літра продукту становить 120–300м<sup>2</sup>. Завдяки розвиненій поверхні зіткнення частинок продукту з сушильним агентом і значної відмінності температур між ними досягається миттєва сушка продукту. Продуктивність промислових дискових сушарок становить 300–500кг/год. На малотоннажних підприємствах використовують сушарки з акустичними або пневматичними форсунками, продуктивністю 50 – 70кг/год.

Для забезпечення високої якості яєчних продуктів визначальне значення має режим сушіння. Яєчну масу неможна нагрівати в процесі сушіння вище температури, при якій відбувається денатурація білків 52-60°C. Крім того, щоб розчинність порошку була високою, температуру яєчної маси не рекомендується перевищувати 48 - 50°C.

Межа теплової білкової коагуляції білка можна підвищити, додаючи органічні кислот або солі. При розвитку реакції Майяра зменшується харчова білкова цінність, що обумовлює специфічну обробку яйцепродуктів перед зневодненням шляхом ферментування яєчної маси і її обезцукрювання відомими методами [39], з метою збереження промислової цінності яєць і збільшення терміну зберігання яйцепродуктів в сухому вигляді. Для виробництва якісного яєчного порошку застосовують столові свіжі яйця, при терміні зберігання менше 20 днів. Для безпеки яйцепродуктів проводиться термообробка при раціональних режимах [14].

Важливою перевагою сухих яєчних продуктів, у порівнянні з іншими формами кінцевих продуктів яйцепереробки, є те, що при виробництві сухого порошку мікроорганізми гинуть під час сушки яєчної маси, а ті які залишилися не розвиваються під час зберігання готового продукту, що має низьку вологість.

Між технологією переробки, шляхом сушки і якістю яєчного порошку існує взаємозв'язок. Мікробіологічний стан кінцевого продукту безпосередньо залежить від якості вихідної сировини, санітарно-гігієнічних умов виробництва та ін. При застосуванні свіжої яєчної маси, її негайної гомогенізації, фільтрації, пастеризації і сушці до 95% яєчний порошок буде відповідати мікробіологічним вимогам.

При використанні сухого яєчного порошку у виробничій практиці, основною вимогою вважається його розчинність у воді. Регулювання розчинності – складна виробнича задача. Розчинність залежить від температури продукту в процесі пастеризації та сушки, тобто при виробництві конкурують два взаємозалежних параметри: вище розчинність, але вище і забрудненість - підвищуємо температуру переробки, знижується розчинність.

Важливий показник яєчного порошку – кислотність, яка головним чином визначається якістю яєчної маси, яка переробляється.

Таким чином, спосіб, конструкція установки і режими сушіння повинні прийматися на основі аналізу результатів комплексу експериментальноаналітичних досліджень з вивчення фізико-хімічних властивостей об'єктів переробки та раціоналізації сушильного процесу, так як стадія сушіння визначає функціональні властивості яєчних продуктів, які прямо впливають на їх комерційний успіх.

#### **1.4. Перспективні способи і конструкторські рішення для сушіння яєчних продуктів**

Конструктивні особливості і апаратне оформлення установок розпилювальної сушки обумовлено технологічними вимогами, фізикохімічними властивостями, типом розпилювача, продуктивністю за кількістю випареної вологи та ін.

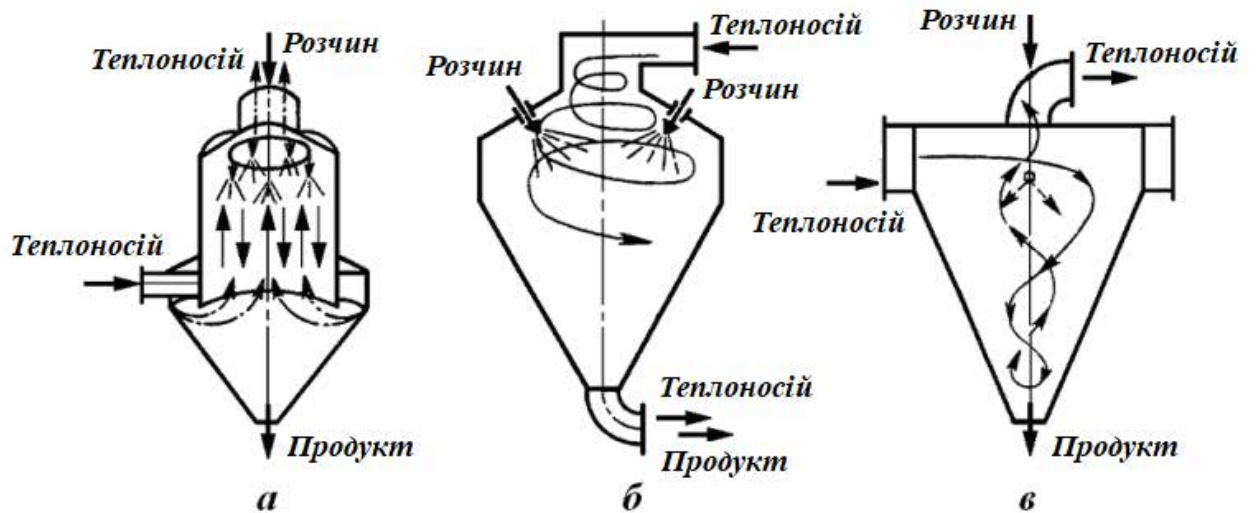


Рис. 1.2. Схеми камер розпилювальних сушарок:

а – з протитечійним рухом потоків і форсунковим розпилом; б – з центральним закрученим підведенням теплоносія (прямоток) і форсунковим розпилом; в – з закрученим тангенціальним підведенням теплоносія

Крім відмінностей, зумовлених методом розпилу рідини, на конструкцію сушарки впливає спосіб підведення теплоносія. На рис. 1.2, 1.3 і 1.4 наведено кілька типових схем розпилювальних сушильних установок, що застосовуються в промисловості.

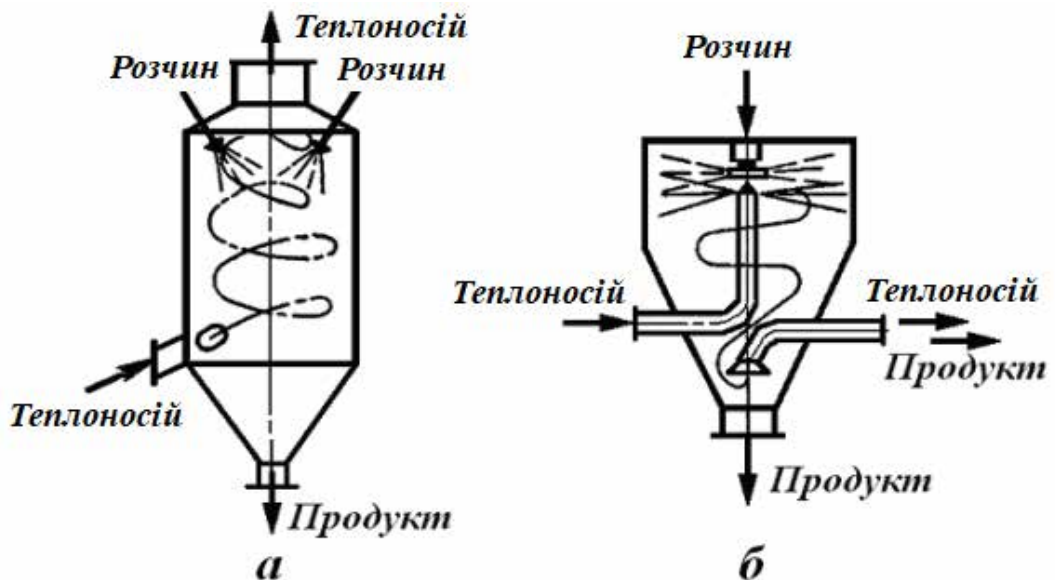


Рис. 1.3. Схеми камер розпилювальних сушарок:

а – з тангенціальним підведенням теплоносія (протитечія) і форсунковим розпиленням; б – з дисковим розпиленням (протитечія)

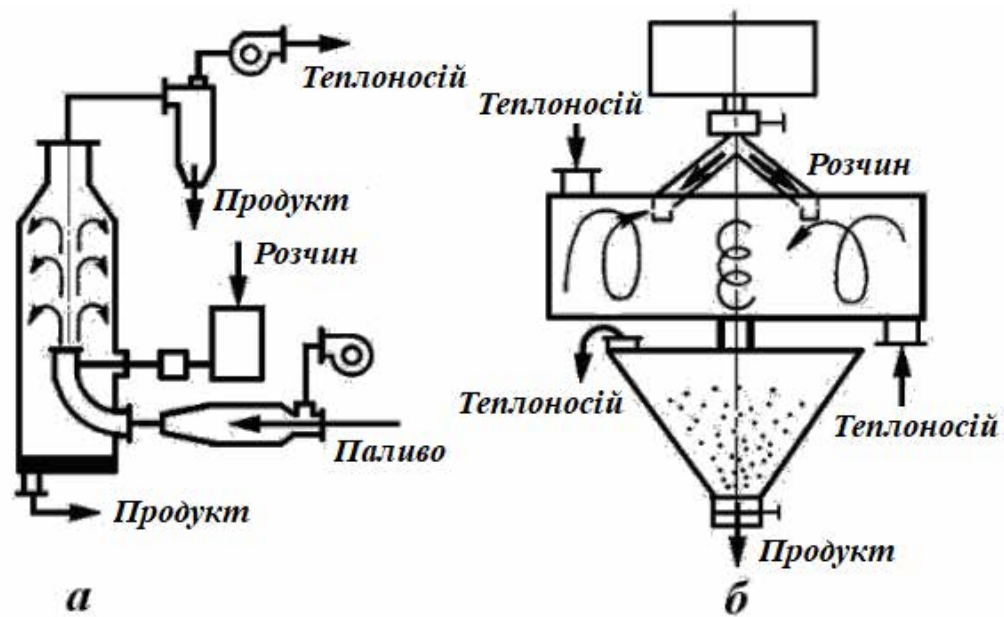


Рис. 1.4. Схеми камер розпилювальних сушарок:

а – з протитечійним сопловим підведенням теплоносія; б – закручені зустрічні потоки, форсунковий розпил, тангенціальний підведення теплоносія

Вибір способу розпилення і конструкції розпилюючого пристрою визначаються властивостями розпилюючої рідини, необхідними характеристиками факела розпилу певної дисперсності, продуктивністю, ступенем складності конструкції економічними міркуваннями та ін.

Способи розпилювання рідин класифікують за способами підведення енергії, що витрачається на розпорощення [12,25,20].

*Гідравлічний спосіб* розпилювання економічний і простий, але при цьому розпил гідравлічної форсунки грубий і неоднорідний, а також важкий у диспергуванні високов'язких рідин.

*Механічний спосіб* дозволяє розпорощувати високов'язкі рідини і контролювати (регулювати) в широкому діапазоні продуктивність без зміни дисперсності. Головним недоліком механічного розпилювання є потреба в значних енерговитратах на привід відцентрового розпилюючого механізму.

В основі *пневматичного способу* розпилення лежить взаємодія потоку рідини з потоком розпилюючого агента. Якість пневматичного розпилення не залежить від витрати рідини, але підвищується витрата електроенергії в

порівнянні з гідравлічним в 15-20 разів і в 3-4 рази в порівнянні з механічним способами.

Перспективним є *пульсаційне розпилювання* при пульсації тиску і варіюванні витрати, яке може комбінуватися з іншими способами і при цьому, збільшення енерговитрат і ускладнення конструкції мінімальні.

При *ультразвуковому розпилюванні*, тонке дроблення досягається або за рахунок подачі струменя продукту на коливний елемент генератора звуку, або шляхом ультразвукових коливань потоку повітря. Для ультразвукового розпилювання необхідно використання складного обладнання.

*Електрогідравлічне розпилювання* дозволяє управляти дисперсними характеристиками факелів розпорошити в широких діапазонах, але цей спосіб не отримав широкого поширення, так як для його реалізації потрібно дороге енергоємне обладнання.

Поєднання способів розпилювання дозволяє отримати такі характеристики факела розпилу, які не можна забезпечити застосуванням способів окремо. Наприклад, поєднання гідравлічного і пневматичного способів дозволяє отримати розпил з дисперсними характеристиками, порівнянними з пневматичним розпилюванням, але при менших витратах енергії.

Механізм дроблення рідини залежить, перш за все, від форми витікання потоку і співвідношення швидкостей навколишнього газу і потоку, які в свою чергу визначаються методом розпилювання і конструкцією розпилювача.

У додатках А3 – А7 наведені приклади різних конструктивних рішень сушарок методом розпилення.

Широке впровадження у виробничу практику сушильної техніки стримується відсутністю режимних карт і коректних, експериментально обґрунтованих програм переналаштування на різні види сировини і адекватних системи автоматичного регулювання. Очевидна необхідність розробки таких режимів, як для конкретних видів продукції, так і їх узагальнення для використання в інженерних розрахунках при проектуванні сушильної техніки.

Розробка і обґрунтування принципово нових інноваційних схем організації процесу і конструкторських рішень необхідні для мінімізації (усунення) недоліків властивих традиційним конструкціям, а також для розширення перспектив використання розпилювальної сушильної техніки в умовах підприємств малої і середньої потужності. Очевидна необхідність врахування при проектуванні сушильної техніки комплексу властивостей об'єктів сушки, в тому числі термодинамічних, структурно-механічних і теплофізичних. Не викликає сумнівів необхідність розробки математичних адекватних моделей, для оперативного управління процесом, і якістю продукції, автоматизації роботи сушарок.

*Аналіз конструкторських рішень в області організації розпилювальної сушки показав, що подальший розвиток отримують:*

*- використання вбудованих поверхонь нагріву, що перемішують і вібраційних пристроїв; використання імпульсного підведення тепла;*

*- створення замкнутих циклів з метою зниження енерговитрат і вирішення екологічних проблем; розробка спеціальної сушильної технології з використанням полів різної фізичної природи і спеціальних добавок;*

*- створення комбінованих сушарок; суміщення процесу сушіння з іншими процесами.*

*Для визначення раціонального режиму сушки, вибору способу і конструкції установки необхідно досліджувати зміни хіміко-технологічних показників з урахуванням реальної динаміки зневоднення.*

### 1.5. Функціональна схема автоматизації системи керування установкою для сушіння яєчних продуктів

У даній кваліфікаційній магістерській роботі розробляється система автоматичного керування установкою для сушіння яєчних продуктів (жовткової суміші, білкової суміші, меланжу), зображена на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Установка для сушіння яєчних продуктів

Функціональна схема автоматизації системи керування установкою для сушіння яєчних продуктів наведена на рис. 1.6.

Технологічний процес роботи установки можна розділити на декілька етапів. Для різних видів сировини (жовткова або білкова суміш, меланж) він є однаковим, і відрізняється лише певними параметрами, що обумовлене різними структурно-механічними та тепло-фізичними властивостями сировини. Зокрема, ці властивості мають вирішальний вплив на розмір форсунок високого тиску, завдяки яким здійснюється розпилення продуктів із різною щільністю, і на температурний режим сушки.



Розділ 2 даного дослідження присвячений визначенню названих властивостей жовткової суміші курячих яєць.

### 1. Підготовка до сушіння яєчних продуктів.

1.1. Підготовка сировини. Залежно від виникнення попиту, а також в результаті роботи підприємства, коли виникає певна кількість битих яєць, здійснюється підготовка робочої суміші для подальшого сушіння. Для цього у **змішувальний бак** подається сировини (гомогенізована жовткова або білкова суміш яєць одного виду птиці, або гомогенізований меланж). Для отримання робочої суміші із необхідними характеристиками до її складу додається певна кількість підготованої води. Заповненість змішувального баку контролюється датчиками верхнього **LE (1-1)** та нижнього **LE (1-2)** рівня. Змішувальний бак оснащений мішалкою для запобігання згущення або утворення щільних комків у робочій суміші (на схемі не показана).

1.2. Підготовка **форсунок високого тиску**. Вид продукту (його щільність) визначає розмір сопел форсунок, завдяки яким здійснюється розпилення продукту. Відповідно, перед запуском процесу, оператор встановлює у камері сушіння форсунки необхідного типорозміру.

### 2. Запуск сушильного обладнання.

2.1. Перевірка працездатності системи подачі природного газу в пальник.

2.2. Перевірка працездатності **компресора високого тиску**: наявності масла і роботи масляного насосу, клапана випуску повітря.

2.3. Запуск теплогенератора. Здійснюється пуск **відцентрового вентилятора** (рис. 1.7) **подачі теплоносія** в сушарку (електродвигун **M1**), відцентрового витяжного **вентилятора відпрацьованого повітря** (подібна конструкція, але інший типорозмір) (електродвигун **M5**). Цей процес контролюється датчиками тиску повітря **PE (1-7)** та **PE (1-8)**.

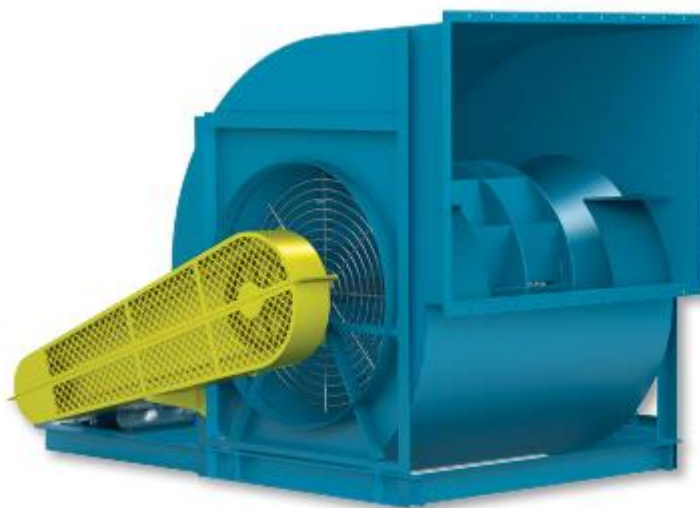


Рис. 1.7. Відцентровий вентилятор TCF 200 BC-SIS W

Після запуску вказаних вентиляторів вмикається **пальник теплогенератора** і повітря (як агент сушіння) прогрівається до початкового значення 130°C (датчик температури **TE (1-3)**). Коли температура повітря на виході камери сушіння досягає значення 80°C (датчик температури **TE (1-9)**), здійснюється запуск **стрічкового транспортера** (електродвигун **M6**), **вивантажувального механізму** (електродвигун **M7**) та **похилого вивантажувального конвеєра** (електродвигун **M8**). При цьому відбувається запуск системи подачі сировини на форсунки високого тиску для сушіння.

Керування температурою теплоносія здійснюється за допомогою регулювального клапану подачі газо-повітряної суміші у пальник теплогенератора (на функціональній схемі контур керування подачею природнього газу та газо-повітряною сумішшю не показаний).

Керування **продуктивністю сушарки по кількості теплоносія та швидкістю руху теплоносія** в сушильній камері здійснюється за допомогою частотного перетворювача SIC (1-13), який змінює частоту обертання валу електродвигуна приводу відцентрового вентилятора подачі теплоносія в установку (рис. 1.7).

### 3. подача сировини на форсунки високого тиску.

3.1. Попередньо для підготовки до роботи форсунок високого тиску на **компресор високого тиску** короткочасно подається підготована вода, запускається **масляний насос** (електродвигун **М4**) та основний електродвигун **М3 компресора високого тиску**.

3.2. Після штатного запуску компресора високого тиску і продувки форсунок високого тиску подача підготованої води припиняється, здійснюється подача робочої суміші і починається процес розпилення її у сушильній камері.

Контроль тиску в системі подачі робочої суміші здійснюється за допомогою датчиків тиску **PE (1-5)** та **PE (1-6)**.

### 4. Отримання яєчного порошку.

Відповідно до встановленого алгоритму сушіння продукту, який задається оператором залежно від типу яєчної суміші, теплоносій досягає необхідної температури (датчик температури **TE (1-3)**) і здійснюється сушіння розпиленої яєчної суміші. Як буде показано далі, в камері встановлені спеціальні **завіхрювачі повітря**, за допомогою яких досягається **ефект двохзонного сушіння**: спочатку сушка відбувається у **прямотоці теплоносія**, а потім у **завіхреному потоці теплоносія**, що істотно підвищує ефективність роботи і покращує якість висушеного продукту.

Після штатного пуску повітряної системи і системи подачі робочої суміші на форсунки високого тиску для розпилення вмикається **повітряно-імпульсний колектор**, який утворює потужні повітряні імпульси високого тиску, збиваючи висушений яєчний порошок на стрічковий транспортер.

### 5. Вивантаження і розфасовка висушеного продукту.

Висушений яєчний порошок через вивантажувальний похилий транспортер подається у спеціальну камеру, де через решето фільтрується яєчний порошок заданої консистенції, після чого розфасовується у тару.

6. Очищення магістральних трубопроводів установки від залишків сировини. Підготовка для наступних циклів роботи. Після здійснення сушки

яєчних продуктів змішувальний бак заповнюється теплою водою, після цього ця вода пропускається насосами через магістральні трубопроводи і форсунки високого тиску при працюючій системі подачі теплоносія. Таким чином очищується також сушильна камера і повітряно-імпульсний колектор. Після очищення запірні арматури системи закривається, і установка із дотриманням гігієнічних вимог готова до подальшої експлуатації.

#### 7. Вимкнення технологічного обладнання.

У таблиці 1.3 вказані основні технічні характеристики електродвигунів системи керування установки для сушіння яєчних продуктів.

Таблиця 1.3.

Основні технічні характеристики електродвигунів  
системи керування (рис. 1.6)

Номер ел. двигуна на схемі	Призначення	Характеристики
М1	Привод відцентрового вентилятора подачі теплоносія	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 18,5$ кВт, $I_{н} = 37А$
М2	Привод насоса подачі робочої суміші	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 0,75$ кВт, $I_{н} = 2,0А$
М3	Основний двигун компресора високого тиску	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 11,25$ кВт, $I_{н} = 21А$
М4	Привод масляного насосу компресора високого тиску	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 0,37$ кВт, $I_{н} = 1,1А$
М5	Привод відцентрового вентилятора видалення відпрацьованого повітря	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 22$ кВт, $I_{н} = 44А$
М6	Привод стрічкового транспортеру жовткового порошку	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 1,1$ кВт, $I_{н} = 2,5А$
М7	Привод вивантажувального механізму	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 1,1$ кВт, $I_{н} = 2,5А$
М8	Привод похилого конвеєра	3-фазний, $U_{ж} = 380В$ , 50Гц, $P_{н} = 1,1$ кВт, $I_{н} = 2,5А$

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЗАЄМОДІЇ ЯЄЧНИХ ЖОВТКІВ ІЗ ВОДОЮ

#### 2.1. Визначення теплофізичних та структурно-механічних характеристик яєчних жовтків

Характер і швидкість протікання тепло- і масообмінних процесів переважно визначаються теплофізичними характеристиками матеріалу, які залежать від його структури та фізико-хімічних властивостей. Теплоінерційні властивості вологої харчової сировини характеризуються коефіцієнтом температуропровідності  $a$ , а теплопровідні характеристики – коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  [39].

Відомо [12], що кількісна зміна вологовмісту харчової сировини призводить до зміни теплофізичних характеристик (ТФХ) та деяких інших фізико-хімічних характеристик.

Результати досліджень характеристик яєчних продуктів з різних джерел [26,32,36 та ін.] часто сильно відрізняються або є суперечливими, отримані для вузьких діапазонів температур і вологостей, що істотно ускладнює застосування визначених ТФХ при побудові математичних моделей процесу сушіння яєчних продуктів та у подальших інженерних розрахунках.

Для потреб харчової промисловості здійснюють сушіння усіх видів яєчних продуктів, тобто жовток, білок і меланж.

Режими сушіння визначають технологічні властивості отриманих сухих яєчних продуктів. З метою виключення процесу денатурації білків при сушінні, температура яєчної маси не повинна перевищувати значення  $55\div 65^{\circ}\text{C}$  [29]. Відповідно, для подальших розрахунків, зокрема для визначення залежності теплофізичних характеристик від температури, верхнє граничне значення температури продукту приймається  $T_{\text{В}} = 333^{\circ}\text{K}$ . Нижнє граничне

значення приймається на основі технологічних вимог до сухих яєчних продуктів [12,13,29], дорівнює  $T_H = 278^\circ\text{K}$  і відповідає температурі зберігання рідких яєчних продуктів. Діапазон зміни вологості повинен відповідати вимогам до фізико-хімічних показників продукту, які регламентовані ДСТУ 8719:2017 «Продукти яєчні. Технічні умови» (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1.

#### Діапазон зміни температури і вологості яєчних продуктів

Назва продукту	Температура $T, ^\circ\text{K}$	Вологовміст $W, \text{кг/кг}$
Жовток	278÷333	0,54÷0,05
Білок	278÷333	0,882÷0,09
Меланж	278÷333	0,75÷0,085

Оскільки магістерська робота присвячена сушінню саме яєчного жовтка, визначення теплофізичних та структурно-механічних властивостей будемо здійснювати саме для нього.

#### 2.1.1. Визначення щільності жовтка курячих яєць

Дані про щільність яєчного жовтка в різних джерелах [26,32,36 та ін.] суттєво відрізняється, що можна пояснити відмінністю в раціонах харчування курей на птахофабриках. Зважаючи на нескладні умови проведення і організації експериментальних досліджень з метою визначення щільності жовтка курячих яєць на конкретній птахофабриці, вони були проведені для встановлених діапазонів температури і вологовмісту (таблиця 2.1). Щільність жовтка курячих яєць визначалася за допомогою пікнометричного методу, сутність якого полягає у вимірюванні маси продукту відомого об'єму. Для отримання експериментальних даних було використане наступне обладнання (рис. 2.1): ваги, що відповідають класу точності 2 за ГОСТ 24104-88 (із допустимою похибкою не більше 0,1%), марки OHAUS AR3130; мірний стакан із допустимою похибкою вимірювання не більше 0,1%; хромель-

копелева термопара ХК(L) ТП-011 (номінальна статична характеристика відповідає ДСТУ EN 62460:2018 «Температура. Таблиці електрорушійної сили (ЕРС) для комбінованих термопар з елементами без домішок (EN 62460:2008, IDT; IEC 62460:2008, IDT)), допустима основна похибка не більше  $0,5^{\circ}\text{K}$ ), яка підключається до мультиметру; міксер для перемішування жовткової суміші до однорідної маси.

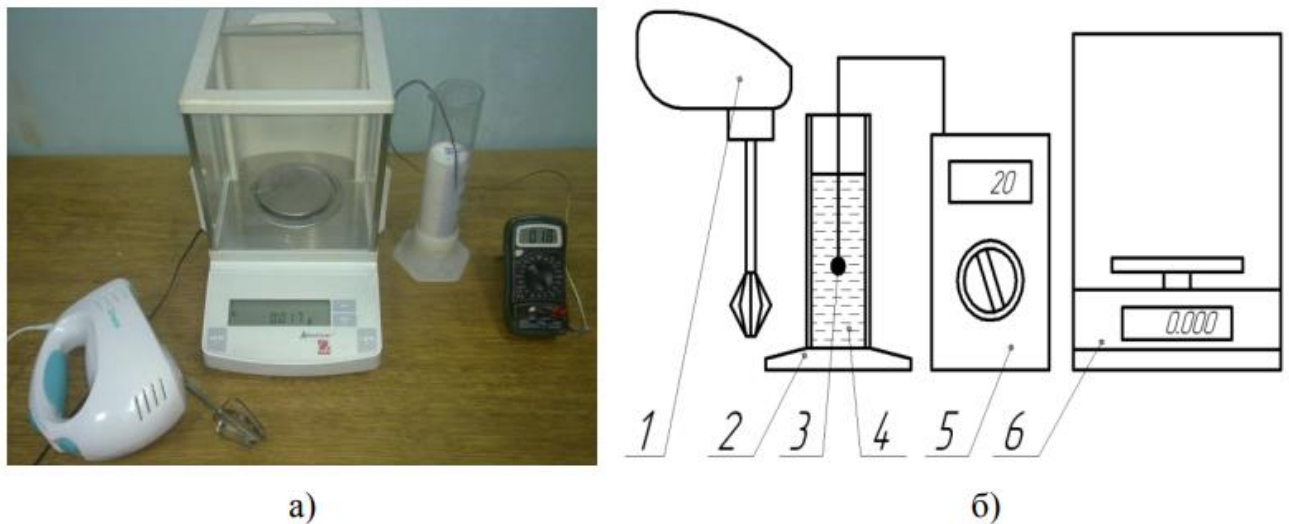


Рис. 2.1. Обладнання (а) та схема проведення експерименту (б) для визначення щільності жовтків курячих яєць:

1 – міксер; 2 – мірний стакан; 3 – термопара; 4 – суміш яєчних жовтків; 5 – мультиметр; 6 – ваги

Об'єм суміші 4 яєчних жовтків ( $V, \text{m}^3$ ) вимірювався мірним стаканом 2, температура суміші ( $T, ^{\circ}\text{K}$ ) – термопарою 3 і реєструвалася мультиметром 5, маса суміші ( $m, \text{kg}$ ) реєструвалася вагами 6.

Щільність суміші яєчних жовтків визначається за співвідношенням

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Результати експериментальних досліджень наведені у таблицях 2.2, 2.3. З метою підвищення точності експерименту вимірювання проводилися тричі у різні дні. Розрахунок похибок при визначенні щільності жовткової суміші курячих яєць виконаний за такою послідовністю [11,22].

1. Складаємо таблицю вимірювань та визначаємо середнє значення вимірюваної щільності суміші з виразом

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n \rho_i \quad (2.2)$$

де  $\rho_i$  – чисельне значення вимірної щільності суміші ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  
 $n = 3$  – кількість вимірювань.

2. Визначаємо одиничні відхилення  $\Delta\rho_i = \rho_i - \bar{\rho}$  та перевіряємо, чи виконується умова  $\sum_1^n \Delta\rho_i = 0$ .

3. Розраховуємо квадрати відхилення  $(\Delta\rho_i)^2$  та середні квадратичні відхилення за виразом

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta\rho_i)^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

4. Виявляємо із подальшим виключенням невлучань із таблиці вимірювань (невлучання вимірювань – коли  $\Delta\rho_i > 2S_n$ ). Визначаємо середні квадратичні відхилення середнього за формулою

$$S_{\bar{\rho}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta\rho_i)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (2.4)$$

5. Визначаємо критерій Стюдента  $t_{an} = 4,3$  та обчислюємо похибку результатів вимірювань за виразом

$$\Delta\rho = \varepsilon_a = t_{an} \cdot S_{\bar{\rho}} \quad (2.5)$$

6. Обчислюємо відносні похибки

$$\varepsilon_{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Експериментальні дані для визначення щільності жовткової суміші курячих яєць та результати статистичної обробки

$W$ , кг/кг	$T$ , °К	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_3$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$S_n$ , кг/м <sup>3</sup>	$S_p$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\varepsilon_\rho$ , %
0,54	278	1020,8	1031,2	1031,5	1027,8	6,093	3,518	15,126	1,472
	313	1015,4	1014,4	1025,4	1018,4	6,083	3,512	15,101	1,483
	333	1012,4	1020,8	1005,4	1012,9	7,711	4,452	19,142	1,890
0,45	278	1145,6	1142,5	1124,1	1037,4	11,622	6,710	28,853	2,781
	313	1023,2	1035,1	1023,7	1027,3	6,731	3,886	16,710	1,627
	333	1034,5	1012,9	1013,4	1020,3	12,329	7,118	30,608	3,000
0,35	278	1051,7	1023,4	1052,9	1042,7	16,696	9,640	41,450	3,975
	313	1040,2	1046,6	1011,6	1032,8	18,637	10,760	46,267	4,480
	333	1021,4	1034,7	1028,4	1028,2	6,653	3,841	16,517	1,606
0,05	278	1036,8	1063,9	1071,4	1057,4	18,202	10,509	45,188	4,273
	313	1050,1	1064,1	1040,4	1051,5	11,915	6,879	29,580	2,813
	333	1041	1052,4	1040,7	1044,7	6,670	3,851	16,559	1,585

Таблиця 2.3.

Зведені результати експериментального визначення щільності жовткової суміші курячих яєць  $\rho_{жс}$ , кг/м<sup>3</sup>

$T$ , °К	$W$ , кг/кг			
	0,54	0,45	0,35	0,05
278	1027,8	1037,4	1042,7	1057,4
313	1018,4	1027,3	1032,8	1051,5
333	1012,9	1020,3	1028,20	1044,7

Відносна похибка при обчисленні щільності жовткової суміші курячих яєць не перевищила  $\varepsilon_\rho = 5\%$  (таблиця 2.2).

Для отримання функціональної залежності  $\rho_{жс} = f(W, T)$  результати експериментальних досліджень були апроксимовані; величина достовірності апроксимації при цьому становила  $R_2 = 0,99$ .

$$\begin{aligned} \rho_{жс} = & \left( -0,03123512 \cdot T^2 + 19,41190244 \cdot T - 3051,25620812 \right) \cdot W^2 + \\ & \left( 0,02337442 \cdot T^2 - 14,58307701 \cdot T + 2229,02805985 \right) \cdot W + \\ & + \left( -0,0041356 \cdot T^2 + 2,31181453 \cdot T + 735,35569345 \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

На рис. 2.2 наведені залежності щільності жовткової суміші курячих яєць від їх вологовмісту для різних температур, які були отримані за

формулами (2.2), (2.4), (2.6). На рис. 2.3 зображене поле значень щільності жовткової суміші для діапазонів фактичної зміни вологовмісту і температури під час сушіння продукту.

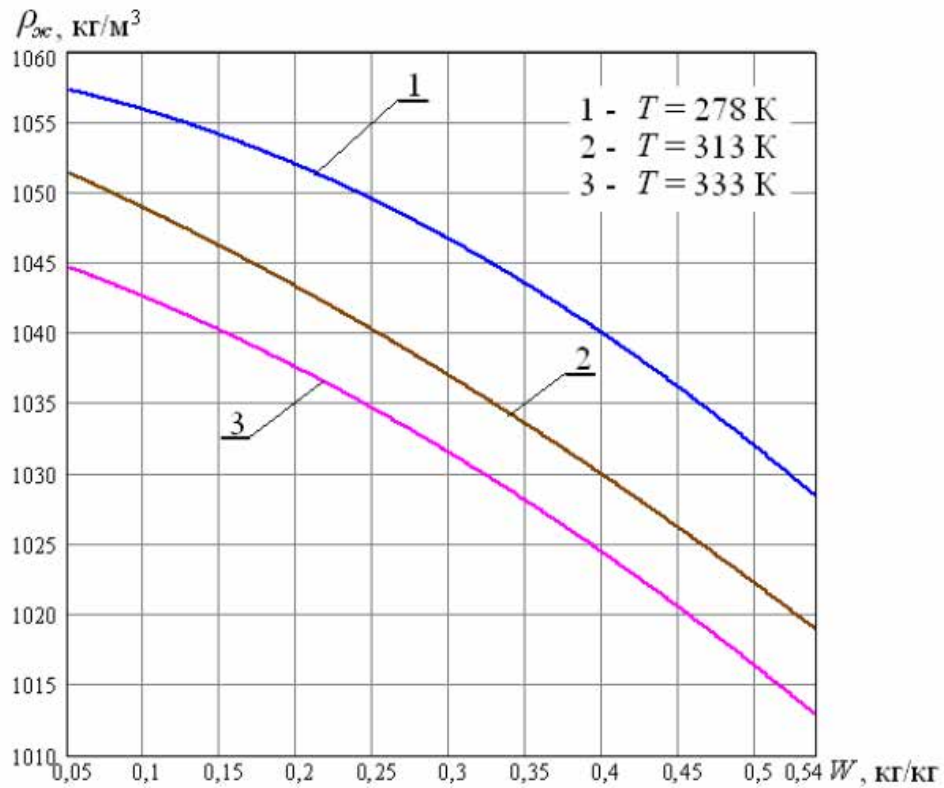


Рис. 2.2. Залежність щільності жовткової суміші курячих яєць від вологовмісту при різних значеннях температури продукту

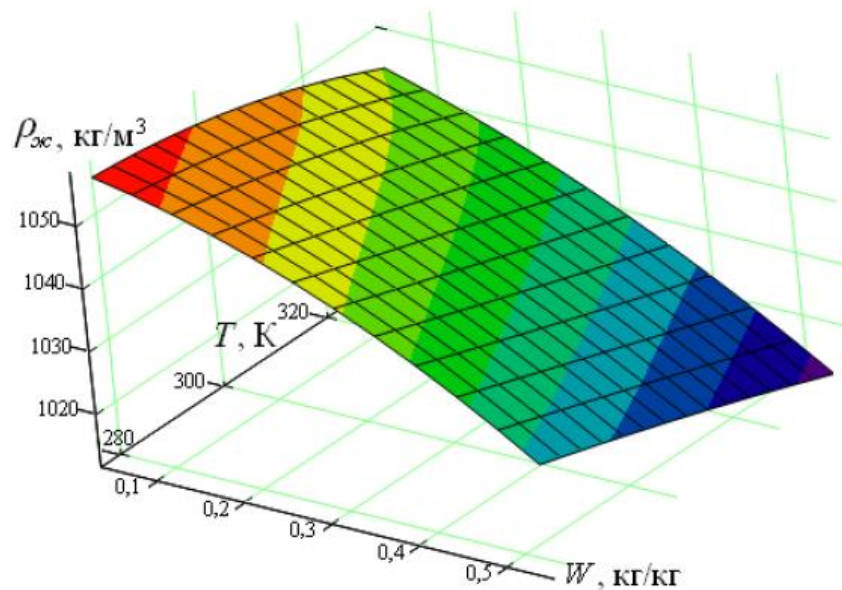


Рис. 2.3. Поле значень щільності жовткової суміші  $\rho_{жс}$  для діапазону  $T = 278 \dots 333$  K та  $W = 0,05 \dots 0,54$  кг/кг

Аналізуючи експериментальні дані та побудовані графічні залежності можна зробити висновок, що зміна вологовмісту жовткової суміші суттєво впливає на її щільність. Загалом, при збільшенні вологовмісту усіх яєчних продуктів зменшується їх щільність (рис. 2.2, 2.3), що пояснюється збільшенням долі води, щільність якої менша за щільність сухих речовин жовтка, білка та меланжу. Вплив температури на щільність яєчних продуктів у встановленому діапазоні (таблиця 2.1) є незначним.

У процесі зневоднення за допомогою функціональної залежності (2.7) можна визначити щільність жовткової суміші у робочих діапазонах зміни вологості та температури продукту із різною точністю.

Виконаний порівняльний аналіз даних по щільності жовткової суміші курячих яєць, отриманих за допомогою експериментальних досліджень (рис. 2.2, 2.3) із даними, що отримані аналітично, показав високий збіг значень щільності жовтка із відносною похибкою, що не перевищує 5%.

Аналіз графіків (рис. 2.2, 2.3), що ілюструють експериментальні дані, показує, що залежність щільності від вологовмісту жовткової суміші має переважно нелінійний характер. Це пояснюється такими чинниками:

- явищем фізико-хімічного зв'язування вологи силами адсорбції в області високої вологості яєчних продуктів;
- зв'язуванням вологи у просторових структурах (капіляри, пори, замкнені комірки) під час формування капілярно-пористого колоїдного тіла, які утворюються за рахунок коагуляції частинок (міцел) при зменшенні вологості продукту.

Отримані дані про функціональну залежність щільності жовткової суміші від вологовмісту та температури продукту будуть використані для аналізу кінетики та динаміки тепломасообмінних процесів, їх моделювання і оптимізації з метою ресурсо- і енергозбереження при сушінні яєчних продуктів.

### 2.1.2. Визначення питомої теплоємності жовткової суміші

Залежність питомої теплоємності жовткової суміші від вологовмісту  $W$  отримана з використанням даних [9] при температурі  $T = 293^\circ\text{K}$  по правилу адитивності.

Залежність питомої теплоємності жовткової суміші  $c_{жс}$ , Дж/(кг·°K), від поточного вологовмісту  $W$  визначається за формулою

$$c_{жс}(W) = \left( \frac{c_{жс}^1 - c_{г} \cdot W_{жс}^1}{1 - W_{жс}^1} \right) \cdot (1 - W) + c_{г} \cdot W \quad (2.8)$$

де  $c_{жс}^1 = 3055$  Дж/(кг·°K) – питома теплоємність жовткової суміші при температурі  $T = 293^\circ\text{K}$  та відомому значенню вологовмісту  $W_{жс}^1 = 0,48$  кг/кг [9].

Із урахуванням вказаних числових значень і після відповідних перетворень у виразі (2.8), отримаємо

$$c_{жс}(W) = 2167,308 \cdot W + 2014,692 \quad (2.9)$$

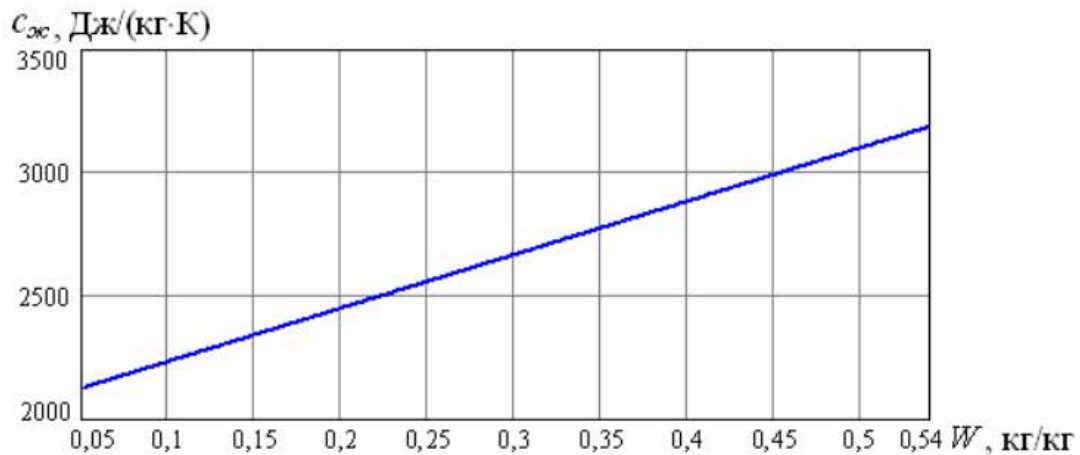


Рис. 2.4. Залежність питомої теплоємності жовткової суміші  $c_{жс}$  для робочого діапазону зміни вологовмісту при зневодненні продукту

За даними досліджень [9] робимо висновок, що зміна температури яєчних продуктів (жовтка, білка, меланжу) у діапазоні  $278 \div 333^\circ\text{K}$  не призводить до істотної зміни їх питомої теплоємності: з підвищенням температури питома теплоємність дещо збільшується. При однакових

температурно-вологісних умовах питома теплоємність білкової суміші менша, ніж жовткової, оскільки у жовтка вміст жиру набагато більший. Збільшення вологовмісту жовткової суміші (рис. 2.4) викликає збільшення її питомої теплоємності із поступовим наближенням значень в області високого вологовмісту до теплоємності води.

Функціональна залежність (2.9) може бути використана у практичних розрахунках при проектуванні та моделюванні технологічних процесів і апаратів у виробництві яєчних продуктів.

### 2.1.3. Визначення теплопровідності жовткової суміші

Експериментальне визначення теплопровідності жовткової суміші курячих яєць проведене за допомогою методу лінійного джерела тепла, який базується на закономірності розвитку теплового процесу у початковій стадії процесу нагрівання або охолодження [19,24]. Метод характеризується тим, що результати експериментів залежать від початкових умов. Як початкова умова повинна бути дотримана рівність і незмінність температур в усіх просторових точках об'єму досліджуваного зразка.

Основою методу є розв'язок диференційного рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (2.10)$$

де  $\tau$  – тривалість процесу, с;  $t$  – температура зонду, °С;  $r$  – радіус зонду, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності досліджуваного зразка, Вт/(м·°С);  $a$  – коефіцієнт температуропровідності досліджуваного зразка, м<sup>2</sup>/с.

Межевими є наступні умови [24]:

$$\begin{array}{lll} \tau = 0 & r \neq 0 & t = 0 \\ \tau > 0 & r = \infty & t = 0 \\ \tau > 0 & r \rightarrow 0 & -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} = q = const \end{array}$$

де  $q$  – потужність, яка виділяється одиницею довжини зонду, Вт/м.

Розв’язок диференційного рівняння теплопровідності має такий вигляд [24]:

$$t = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left( -0,5772 + \ln \frac{4 \cdot a \cdot r}{r^2} + \frac{r^2}{4 \cdot a \cdot \tau \cdot 1 \cdot 1!} - \frac{r^4}{16 \cdot a^2 \cdot \tau^2 \cdot 2 \cdot 2!} + \dots \right) \quad (2.11)$$

де 0,5772 – число Ейлера.

Спростимо формулу (2.11) із урахуванням малих значень радіусу зонду і значень поточного часу процесу, і отримаємо вираз для коефіцієнта теплопровідності [24]:

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot t} \left( -0,5772 + \ln \frac{4 \cdot a \cdot r}{r^2} \right) \quad (2.12)$$

У ситуації, коли значення коефіцієнту теплопровідності дослідного зразку  $\lambda$  невідоме, розраховується середнє значення теплопровідності  $\lambda_{cp}$  при зміні температури зонду від  $t_1$  до  $t_2$ , які відповідають моментам часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$  за виразом [24]:

$$\lambda_{cp} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)} \cdot \ln \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (2.13)$$

Результати експериментального визначення теплопровідності жовткової суміші та їх статистичної обробки наведені у таблицях 2.4, 2.5.

Таблиця 2.4.

Результати експериментального визначення теплопровідності жовткової суміші та їх статистичної обробки

$W$ , кг/кг	$T$ , К	$\lambda_1$ , Вт/(м·К)	$\lambda_2$ , Вт/(м·К)	$\lambda_3$ , Вт/(м·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$S_n$ , Вт/(м·К)	$S_\lambda$ , Вт/(м·К)	$\Delta\lambda$ , Вт/(м·К)	$\varepsilon_\lambda$ , %
0,54	278	0,328	0,321	0,333	0,327	0,006	0,003	0,015	4,576
	313	0,347	0,340	0,353	0,347	0,007	0,004	0,016	4,655
	333	0,367	0,372	0,378	0,372	0,006	0,003	0,014	3,676
0,45	278	0,241	0,239	0,228	0,236	0,007	0,004	0,017	7,364
	313	0,240	0,254	0,261	0,252	0,011	0,006	0,027	10,534
	333	0,261	0,275	0,288	0,275	0,014	0,008	0,034	12,190
0,35	278	0,123	0,135	0,135	0,131	0,007	0,004	0,017	13,130
	313	0,139	0,154	0,151	0,148	0,008	0,005	0,020	13,314
	333	0,166	0,164	0,154	0,161	0,006	0,004	0,016	9,914
0,05	278	0,016	0,017	0,015	0,016	0,001	0,001	0,002	15,516
	313	0,020	0,022	0,022	0,021	0,001	0,001	0,003	13,651
	333	0,028	0,027	0,029	0,028	0,001	0,001	0,002	8,866

Розрахунок похибок при обчисленні теплопровідності здійснено у вказаній вище послідовності (2.2 – 2.6) [11,22]. Відносна похибка при визначенні теплопровідності жовткової суміші курячих яєць не перевищила 16% (таблиця 2.4).

Відмінністю дійсного значення  $\lambda$  від середнього  $\lambda_{cp}$  для жовткової суміші курячих яєць можна знехтувати, оскільки зміна температури зонду не перевищує кількох градусів, а значення температурного коефіцієнта теплопровідності є незначними.

Таблиця 2.5.

Результати експериментального визначення теплопровідності  
жовткової суміші  $\lambda_{жс}$ , Вт/(м·К)

T, К	W, кг/кг			
	0,54	0,45	0,35	0,05
278	0,327	0,236	0,131	0,016
313	0,347	0,252	0,148	0,021
333	0,372	0,275	0,161	0,028

Для отримання функціональної залежності  $\lambda_{жс} = f(W, T)$  (формула 2.14) результати експериментальних досліджень були апроксимовані із використанням методу точного попадання у вузлові точки; величина достовірності апроксимації при цьому становила  $R_2 = 0,99$ .

$$\begin{aligned} \lambda_{жс} = & (0,00008128 \cdot T^2 - 0,04907462 \cdot T + 8,62430954) \cdot W^2 + \\ & (-0,0000269 \cdot T^2 + 0,01733185 \cdot T - 2,84106206) \cdot W + \\ & + (0,00000469 \cdot T^2 - 0,00269459 \cdot T + 0,40404506) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Отримана формула (2.14) дозволяє із будь-якою точністю визначити чисельні значення теплопровідності у робочому діапазоні зміни вологовмісту і температури в процесі сушіння продукту.

На рис. 2.5 наведена графічна інтерпретація функціональної залежності (2.14) теплопровідності жовткової суміші від її вологовмісту для різних температур, а на рис. 2.6 – поля значень теплопровідності продукту.

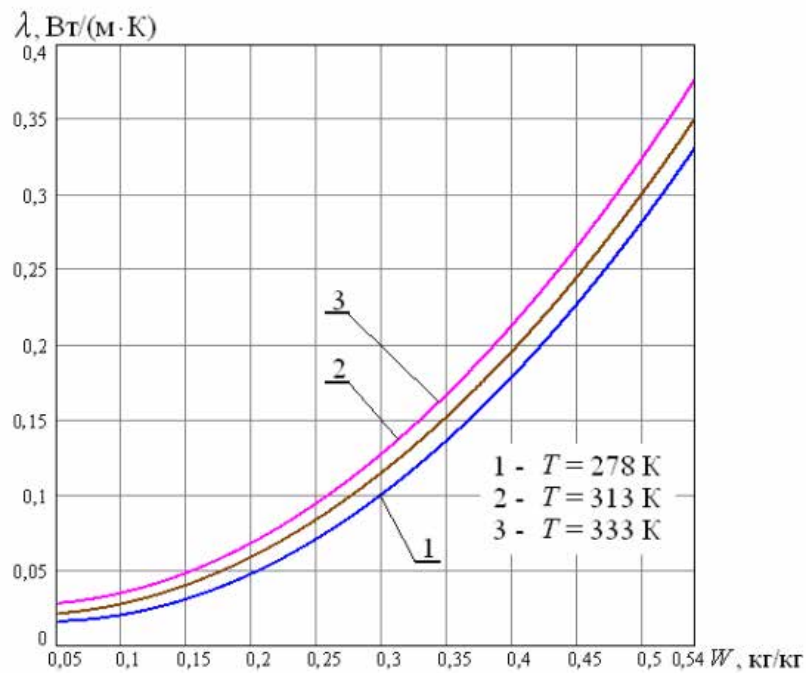


Рис. 2.5. Залежність теплопровідності жовткової суміші курячих яєць для робочого діапазону зміни її вологовмісту під час сушіння

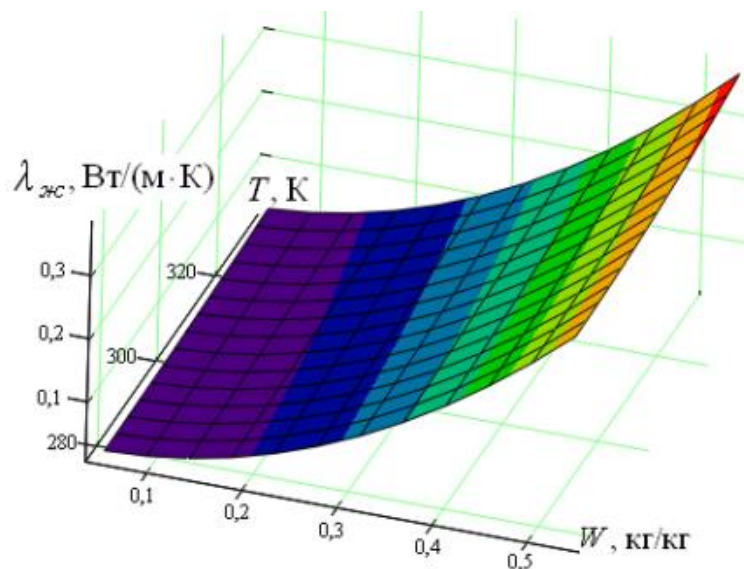


Рис. 2.6. Поле значень теплопровідності жовткової суміші для діапазону зміни вологовмісту  $W = 0,05 \div 0,54$  кг/кг і температури  $T = 278 \div 333^\circ\text{K}$

Отже, під час експериментального і аналітичного дослідження теплопровідності жовткової суміші курячих яєць отримані результати, які необхідні для наукового аналізу динаміки і кінетики тепломасообмінних процесів, їх моделювання і оптимізації для ресурсо- і енергозбереження під час сушіння продукту.

#### 2.1.4. Визначення температуропровідності жовткової суміші

Функціональна залежність коефіцієнта температуропровідності  $a_{жс}$  жовткової суміші від різних чинників впливу виражається формулою

$$a_{жс}(W, T) = \frac{\lambda_{жс}(W, T)}{c_{жс}(W) \cdot \rho_{жс}(W, T)} \quad (2.15)$$

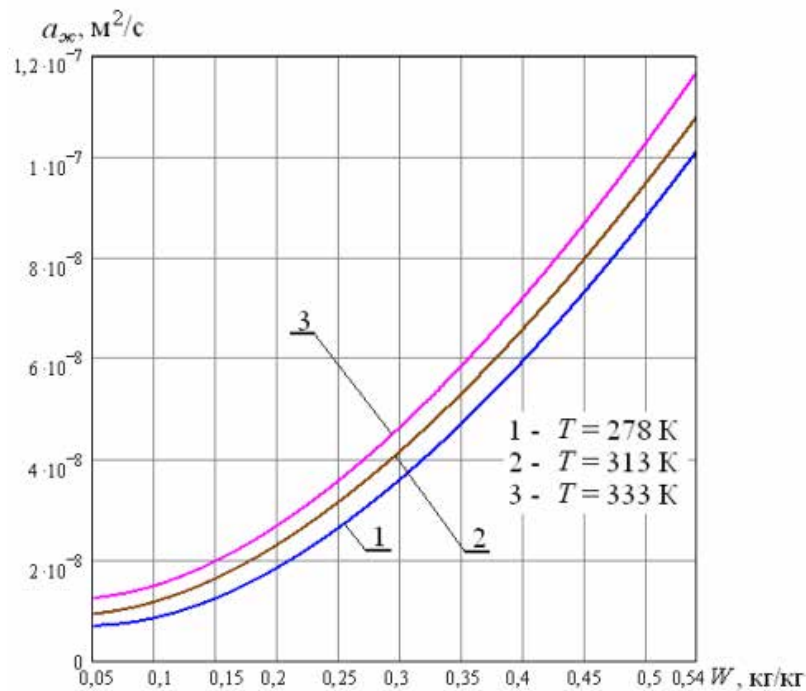


Рис. 2.7. Залежність температуропровідності  $a_{жс}$  жовткової суміші для робочого діапазону зміни її вологовмісту під час сушіння

Використавши отримані у попередніх пунктах функціональні залежності  $\lambda_{жс} = f(W, T)$ ,  $c_{жс}(W)$ ,  $\rho_{жс} = f(W, T)$ , за виразом (2.15) отримані значення коефіцієнта температуропровідності  $a_{жс}$  в залежності від вологовмісту для різних температур (рис. 2.7, 2.8).

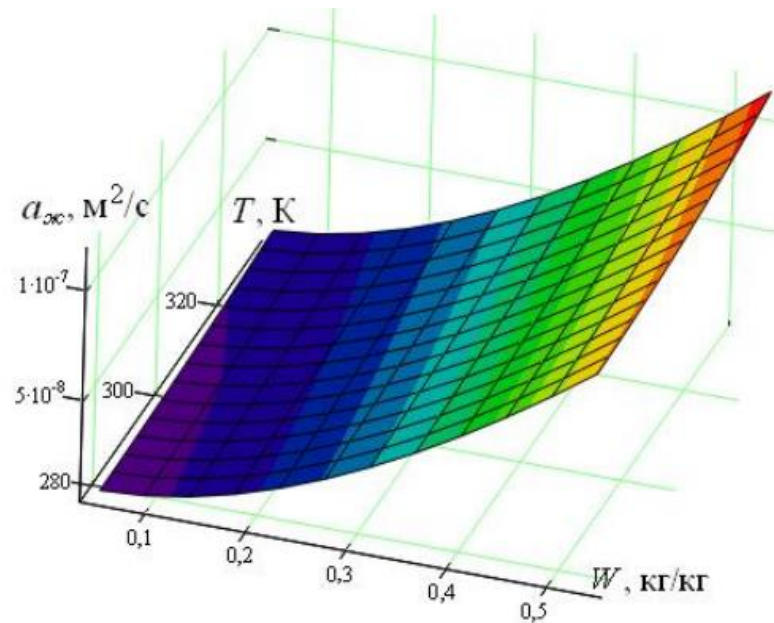


Рис. 2.8. Поле значень температуропровідності жовткової суміші для діапазону зміни вологовмісту  $W = 0,05 \div 0,54$  кг/кг і температури  $T = 278 \div 333^\circ\text{K}$

Отримана формула (2.15) дозволяє із будь-якою точністю визначити чисельні значення температуропровідності у робочому діапазоні зміни вологовмісту і температури в процесі сушіння продукту.

Графіки (рис. 2.7, 2.8) відображають нелінійний характер залежності температуропровідності жовткової суміші від вологовмісту і температури. Така нелінійність є характерною для більшості продуктів тваринного походження із біополімерною структурою.

Як і для інших отриманих показників, узагальнення і систематизація даних по температуропровідності для робочого діапазону зміни вологовмісту і температури під час зневоднення жовткової суміші необхідна для аналізу динаміки і кінетики тепломасообмінних процесів, їх моделювання та оптимізації для ресурсо- і енергозбереження при сушінні жовтків.

## 2.2. Закономірності взаємодії жовткової суміші з водою

При розробці раціональних режимів сушіння жовткової суміші необхідно враховувати вплив явищ поєднання вологи із сухою речовиною на характер протікання теплообмінних процесів.

При теоретичних розрахунках і практичних дослідження сушіння харчових продуктів значна увага приділяється питанням статички процесів зневоднення, тобто процесам взаємодії матеріалу та вологого газу, які призводять до гігротермічного рівноважного стану. Отримуються дані для побудови кривих сорбції (десорбції), які дозволяють класифікувати вологу за видом та енергетичним зв'язком її із матеріалом [39].

Дослідження гігроскопічних властивостей жовткової суміші проводилися із використанням тензиметричного методу Ван Бамелена [39]. Згідно із вказаним методом, досліджувані зразки матеріалу із певною початковою вологістю витримувались у ексикаторах над водним розчином сірчаної кислоти з метою створення в ексикаторі певного значення відносної вологості повітря  $\varphi$  (%) при відповідній температурі  $T$  (К).

Визначення рівноважної вологості  $W_p$  (кг/кг) у продукті, яка характеризує гігроскопічність, здійснювалася за допомогою установки (рис. 2.9), яка складається з: ваг, що відповідають класу точності 2 за ГОСТ 24104-88 (із допустимою похибкою не більше 0,1%), марки ОНАУС АR3130; хромель-копелевої термопари ХК(L) ТП-011 (номінальна статична характеристика відповідає ДСТУ EN 62460:2018 «Температура. Таблиці електрорушійної сили (ЕРС) для комбінованих термопар з елементами без домішок (EN 62460:2008, IDT; IEC 62460:2008, IDT)), допустима основна похибка не більше 0,5°K), яка підключається до мультиметру; ексикатора із водним розчином сірчаної кислоти.

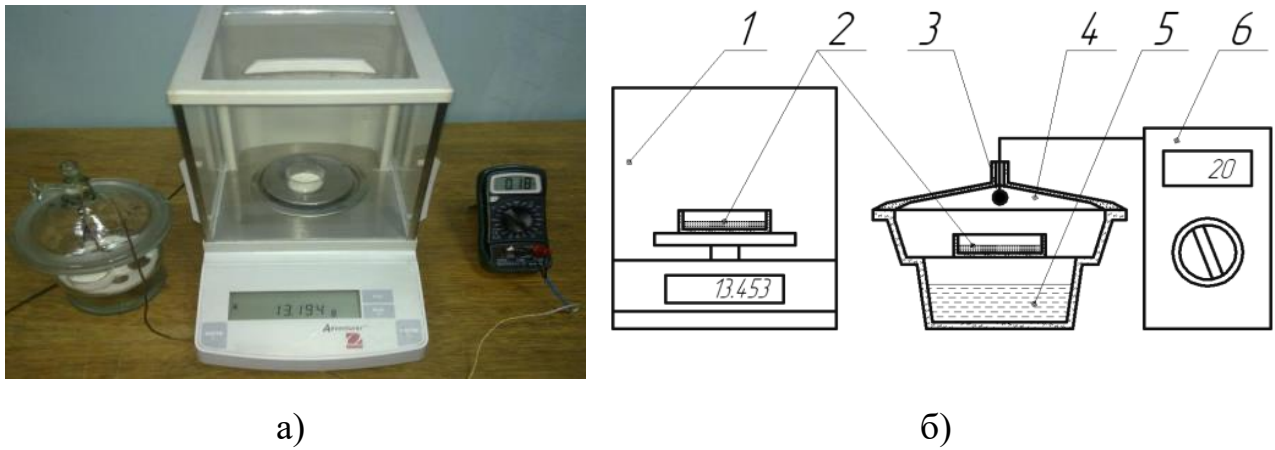


Рис. 2.9. Експериментальна установка для визначення гігроскопічних характеристик жовткової суміші методом Ван Бамелена:

1 – ваги; 2 – жовткова суміш; 3 – термопара ХК(L) ТП-011; 4 – ексикатор; 5 – розчин сірчаної кислоти; 6 – мультиметр

Експериментальні дослідження проводилися три рази. Визначення  $W_p$  здійснювалося для значень температури  $T_1 = 278^\circ\text{K}$  та  $T_2 = 333^\circ\text{K}$  у діапазоні  $\varphi = 10 \div 100\%$ . Вказані значення температури відповідають граничним значенням температури при сушінні жовткової суміші (таблиця 2.1).

Для побудови ізотерм сорбції та визначення гігроскопічної вологості були використані порошкові зразки, що були отримані при конвективній сушці методом розпилювання жовткової суміші. Початковий вологовміст  $W_{zp}$  зразків жовткової суміші складав 0,05 кг/кг. Під час проведення експериментів зразки витримувалися при постійній температурі над водним розчином сірчаної кислоти в ексикаторі, з якого періодично діставалися і зважувалися. Процес тривав до досягнення постійної маси навішування, при якій їх вологість вважалася рівноважною.

Рівноважна вологість  $W_{zp}$  зразків обчислюється за виразом

$$W_p = \frac{G_2 - G_1 \cdot (1 - W_{zp})}{G_2} \quad (2.16)$$

де  $G_1$  – початкова маса зразка, кг;  $G_2$  – маса зразка при досягненні гігротермічної рівноваги, кг.

При обчисленні рівноважної вологості жовткової суміші похибки були визначені за відомою послідовністю [11,22].

1. Складається таблиця вимірювань.

2. Визначається середнє значення рівноважної вологості за формулою

$$\overline{W}_p = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n W_{pi} \quad (2.17)$$

де  $W_{pi}$  – виміряне значення вологості ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $n$  – кількість вимірювань.

3. Визначаємо одиничні відхилення  $\Delta W_{pi} = W_{pi} - \overline{W}_p$  та перевіряємо, чи виконується умова  $\sum_1^n \Delta W_{pi} = 0$ .

4. Розраховуємо квадрати відхилення  $(\Delta W_{pi})^2$  та середні квадратичні відхилення за виразом

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta W_{pi})^2}{n-1}} \quad (2.18)$$

4. Виявляємо із подальшим виключенням невлучань із таблиці вимірювань (невлучання вимірювань – коли  $\Delta W_{pi} > 2S_n$ ). Визначаємо середні квадратичні відхилення середнього за формулою

$$S_{\overline{W}_p} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta W_{pi})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (2.19)$$

5. Визначаємо критерій Стюдента  $t_{an} = 4,3$  та обчислюємо похибку результатів вимірювань за виразом

$$\Delta W_p = t_{an} \cdot S_{\overline{W}_p} \quad (2.20)$$

6. Обчислюємо відносні похибки

$$\varepsilon_{W_p} = \frac{\Delta W_p}{W_p} \cdot 100\% \quad (2.21)$$

Експериментальні результати наведені у таблиці 2.6, де  $W_{p1}$ ,  $W_{p2}$ ,  $W_{p3}$  – відповідно рівноважні вологості, отримані під час 1, 2 та 3 дослідів.

Експериментальні дані при визначенні рівноважної вологості жовткової суміші та результати статистичної обробки

$T, \text{K}$	$\varphi, \text{кг/кг}$	$W_{p1}, \text{кг/кг}$	$W_{p2}, \text{кг/кг}$	$W_{p3}, \text{кг/кг}$	$W_p, \text{кг/кг}$	$S_n, \text{кг/кг}$	$S_{Wp}, \text{кг/кг}$	$\Delta W_p, \text{кг/кг}$	$\varepsilon_{Wp}, \%$
278	0,1	0,016	0,017	0,017	0,017	0,001	0,000	0,001	8,431
	0,2	0,032	0,035	0,034	0,034	0,002	0,001	0,004	11,154
	0,4	0,061	0,065	0,067	0,064	0,003	0,002	0,008	11,851
	0,6	0,091	0,088	0,085	0,088	0,003	0,002	0,007	8,463
	0,8	0,103	0,110	0,115	0,109	0,006	0,003	0,015	13,729
	1,0	0,136	0,135	0,123	0,131	0,007	0,004	0,018	13,710
333	0,1	0,015	0,016	0,016	0,016	0,001	0,000	0,001	8,958
	0,2	0,033	0,031	0,030	0,031	0,002	0,001	0,004	12,233
	0,4	0,063	0,059	0,061	0,061	0,002	0,001	0,005	8,140
	0,6	0,082	0,083	0,081	0,082	0,001	0,001	0,002	3,028
	0,8	0,105	0,103	0,096	0,101	0,005	0,003	0,012	11,616
	1,0	0,128	0,118	0,119	0,122	0,006	0,003	0,014	11,207

При визначенні рівноважної вологості  $W_p$  жовткової суміші курячих яєць не перевищила  $\varepsilon_{Wp} = 13,729\%$ .

За даними таблиці 2.6 побудовані ізотерми сорбції жовтком водяної пари (рис. 2.10).

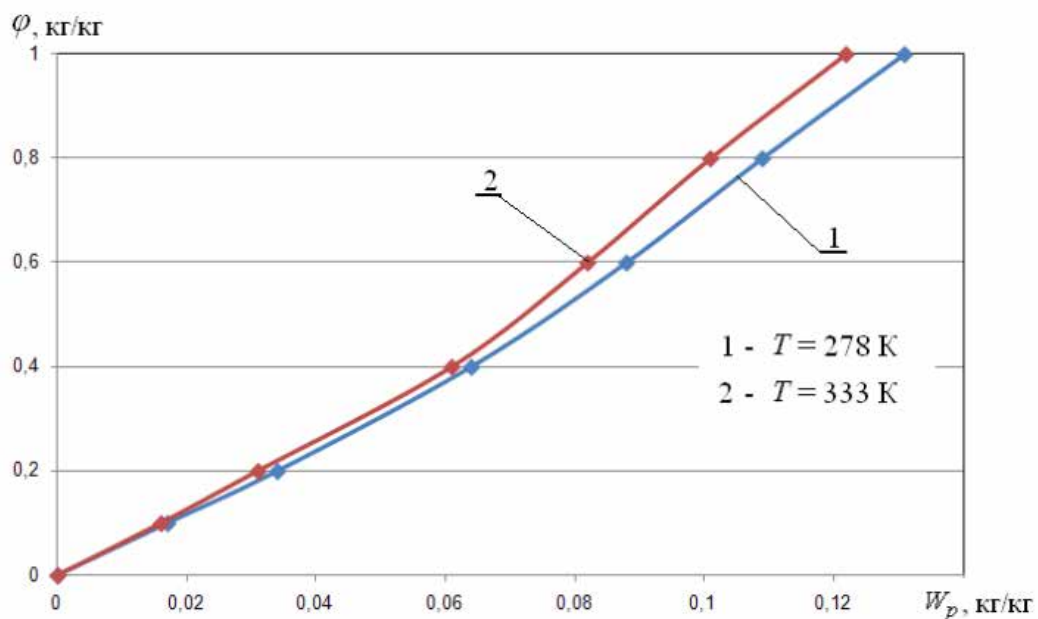


Рис. 2.10. Ізотерми сорбції водяної пари жовтковою сумішшю, отримані за експериментальними даними

Аналіз експериментальних даних дає такі результати.

При  $\varphi = 1$  кг/кг рівноважні вологості є максимальними – гігроскопічними (таблиця 2.7). Різкі перегини на ізотермах відсутні, що вказує на перевагу властивостей обмежено набухаючих колоїдних тіл.

Таблиця 2.7.

Рівноважні гігроскопічні вологості жовткової суміші  $W_p$ , кг/кг

	$T = 278^\circ\text{K}$	$T = 333^\circ\text{K}$
$\varphi = 1,0$ кг/кг	0,131	0,122
$\varphi = 0,8$ кг/кг	0,109	0,101

На ділянці ізотерм  $W_p \leq 0,05$  кг/кг сорбційна здатність жовткової суміші мало залежить від температури  $T$ . При сорбції водяної пари на цій ділянці утворюються енергетичні міцні гідратні комплекси (при цьому гідратація має «кулонівський» характер) за рахунок адсорбції сольватних молекул води молекулами поверхні міцел продукту. Таким чином, на початку процесу сорбції відбувається формування шару мономолекулярної адсорбції і сорбції рідини і супроводжується істотним виділенням тепла – теплоти гідратації (теплоти набухання).

При  $\varphi = 0,8$  кг/кг спостерігається плавний перегин ізотерм, що вказує на наявність вологи мікро- і макрокапілярів, порох за рахунок ефекту змочування. Значення рівноважної вологості, що відповідають точкам перегину при  $\varphi = 0,8$  кг/кг наведені у таблиці 2.7.

Отже, можемо виділити три характерні ділянки на ізотермах жовткової суміші (таблиця 2.8).

Таблиця 2.8.

Характерні ділянки ізотерм жовткової суміші при різних температурах

Температура $T$ , °K	1 ділянка	2 ділянка	3 ділянка
278	$W_p \leq 0,05$ кг/кг	$0,05 \leq W_p \leq 0,109$ кг/кг	$W_p > 0,109$ кг/кг
333	$W_p \leq 0,05$ кг/кг	$0,05 \leq W_p \leq 0,101$ кг/кг	$W_p > 0,101$ кг/кг

*Перші ділянки* ізотерм відповідають утворенню шару мономолекулярної адсорбції. При поляризації наступних шарів попередніми, молекули води продовжують знаходитися в орієнтованому стані [13,14]. *На других ділянках* (рис. 2.10) ізотерми спрямовані опуклістю до осі відносної вологості повітря, що є типовим для полімолекулярної адсорбції. Поглинання рідини у цьому випадку супроводжується також виділенням теплоти, однак кількість цієї теплоти зменшується із збільшенням вологовмісту, що свідчить про зниження фізико-хімічного зв'язку адсорбенту із молекулами води і поступовому наближенні до властивостей звичайної рідини. *Для третіх ділянок* ізотерм типовим є наявність води у об'ємі макро- і мікрокапілярів, пор за рахунок ефекту змочування без виділення теплоти.

Аналізуючи отримані результати процесу сорбції парів водяної пари, зазначимо, що для подальшого тривалого зберігання жовткової суміші курячих яєць доцільно рекомендувати кінцеву вологість при сушінні  $W_p = 0,05$  кг/кг (мономолекулярний адсорбційний шар), що відповідає ДСТУ 8719:2017 «Продукти яєчні. Технічні умови». Результати досліджень свідчать про те, яєчний порошок, отриманий методом розпилювання жовткової суміші, відноситься до порошоків із достатньо високим ступенем гігроскопічності. Тому подальші технологічні операції (дозування, фасування та пакування, а також подальша переробка) необхідно виконувати із урахуванням відносної вологості повітря у відповідному виробничому приміщенні. При тривалому зберіганні сухого жовткового порошку необхідно використовувати якісну герметичну упаковку, а у приміщенні забезпечити якісний контроль вологості повітря.

На основі експериментальних даних для математичного опису процесу сорбції водяної пари продуктом була отримана функціональна залежність відносної вологості повітря від т-тури  $T$  (°К) та рівноважної вологості  $W_p$ , кг/кг.

$$\varphi(W_p, T) = (a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h) \quad (2.22)$$

де  $a, b, c, d, e, f, g, h$  – емпіричні коефіцієнти, що наведені у таблиці 2.9.

Достовірність апроксимації  $R^2 = 0,999$ .

Таблиця 2.9.

Емпіричні коефіцієнти для побудови функціональної залежності  $\varphi(W_p, T)$

Коефіцієнт	Значення
a	-0,0884229
b	10,1736787
c	0,0886675
d	-2,1566524
e	0,0039533
f	3,8356502
g	0,0000255
h	-0,0031964

Функціональна залежність (2.22) необхідна для аналізу процесів внутрішнього масопереносу при сушінні жовткової суміші курячих яєць.

### 2.3. Термодинамічний аналіз внутрішнього масо переносу при взаємодії жовткової маси із водою

У роботах, присвячених теорії сушіння [9,17,19 та ін.], обґрунтовані перспективи термодинамічного підходу, який базується на відомих законах класичної термодинаміки, для аналізу та опису процесів масо переносу в об'єктах зневоднення. Для дослідження процесів переносу енергії або речовини введено поняття потенціалу масопереносу (вологпереносу)  $\Theta$  [9,17,19].

Хімічний потенціал  $\mu$  є потенціалом переносу пароподібної вологи у вологому повітрі, і вважається для вологих матеріалів в області гігроскопічного стану таким, що наближено дорівнює за абсолютною величиною потенціалу вологпереносу [9,17,19]

$$|\Theta| = |\mu| = R \cdot T \cdot \ln \varphi \quad (2.23)$$

де  $R = 8,314$  – універсальна газова константа, Дж/(моль·К).

Для аналізу рушійних сил у процесі сорбції з метою *вибору оптимальних режимів підведення енергії* отримаємо функціональну залежність термоградієнтного коефіцієнту масо переносу від вологості  $W_p$  і температури  $T$ . Термоградієнтний коефіцієнт  $\delta_p$  [17], є складовою частиною відносного коефіцієнта термодифузії  $\delta$ . При гіротермічній рівновазі  $\delta_p$  є термодинамічною характеристикою і дорівнює  $\delta$ . Згідно [17]

$$\delta_p = c_m \cdot \left( \frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p = \text{const}} \quad (2.24)$$

де  $c_m$  – питома ізотермічна вологоємність матеріалу:

$$c_m = \left( \frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu} \right)_{T = \text{const}} \quad (2.25)$$

Таким чином

$$\delta_p = \left( \frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p} \cdot \left( \frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu} \right)_T \quad (2.26)$$

Із урахуванням рівняння (2.23) отримаємо

$$\left( \frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p} = \left( \frac{\partial (R \cdot T \cdot \ln \varphi)}{\partial T} \right) \quad (2.26)$$

При чому вираз є диференціальною зміною ентропії сорбції і називається температурним коефіцієнтом.

Відповідно

$$\left( \frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu} \right)_T = \frac{1}{\left( \frac{\partial \Delta \mu}{\partial W_p} \right)_T} \quad (2.27)$$

Із урахуванням (2.23) та (2.26) отримаємо

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p} &= \frac{\partial (T \cdot R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)))}{\partial T} = \\ &= R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) + \\ &+ R \cdot T \cdot \frac{(a \cdot W_p^3 + c \cdot W_p^2 + e \cdot W_p + g)}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Із формули (2.23), враховуючи (2.27), матимемо

$$\left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta\mu}\right)_T = \frac{1}{\left(-T \cdot R \cdot \frac{(3 \cdot (a \cdot T + b) \cdot W_p^2 + 2 \cdot (c \cdot T + d) \cdot W_p + (e \cdot T + f))}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))}\right)} \quad (2.29)$$

Таким чином, підставляючи у вираз (2.26) вирази (2.28) та (2.29), із урахуванням (2.23), отримаємо функціональні залежності термоградієнтного коефіцієнту  $\delta_p$  від вологості  $W_p$  для жовткової суміші курячих яєць (рис. 2.11).

Характер зміни термоградієнтного коефіцієнту від рівноважної вологості у процесі сорбції водяної пари жовтковою сумішшю є типовою для більшості біополімерних систем [17]. Термоградієнтний коефіцієнт збільшується зі збільшенням вологості, досягаючи свого максимуму (рис. 2.11).

Максимум функції  $\delta_p = f(W_p)$  відповідає межі між коллоїдно пов'язаною і «вільною» вологою (макро- і мікрокапілярів) [17]. До максимального значення функція  $\delta_p = f(W_p)$  монотонно зростає, що вказує на переміщення вологи у першу чергу у вигляді пари.

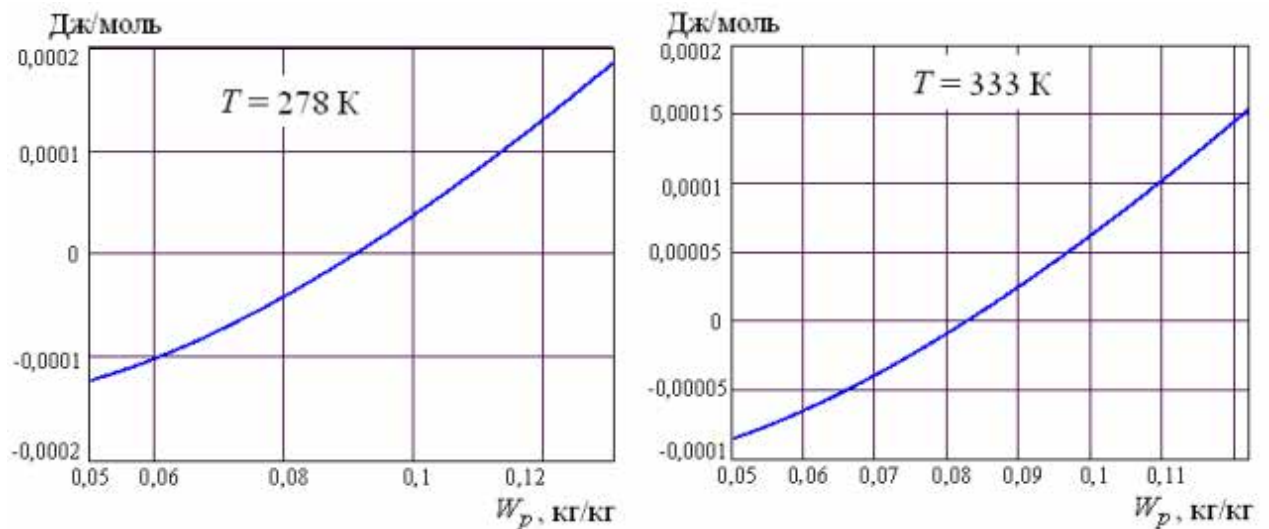


Рис. 2.11. Функціональні залежності термоградієнтного коефіцієнта від рівноважної вологості у процесі сорбції водяної пари жовтковою сумішшю

***Висновок по другому розділу.***

Зміна енергії зв'язку води із жовтковою сумішшю курячих яєць і характер переміщення вологи у продукті є типовими для харчових полімерів. *Для інтенсифікації/раціоналізації сушіння жовткової суміші доцільно збільшити поверхню масообміну диспергуванням продукту (розпилювання, киплячий шар) і використання об'ємних варіантів енергопідведення.*

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ВНУТРІШНЬОГО ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ЗНЕВОДНЕННІ ЖОВТКОВОЇ СУМІШІ МЕТОДОМ РОЗПИЛЮВАННЯ

Для розробки математичної моделі механізму тепломасообміну і подальшого аналізу процесу видалення вологи при сушці жовткової суміші методом розпилювання необхідно визначити закономірності змін у часі комплексу тих параметрів, які характеризують осушуваний продукт. До комплексу названих параметрів відносять щільність, вологовміст, температуру, дисперсність та ін. Зазначені параметри впливають не тільки на швидкість і характер перебігу тепломасообмінних процесів, але і обумовлює гідродинамічні характеристики взаємодії сушильного агента із продуктом.

Експериментальні та аналітичні дослідження кінетики процесу сушіння жовткової суміші методом розпилення здійснювалися для підтвердження ряду положень теорії сушіння, математичного моделювання процесів масопереносу при розпиленні продукту із подальшим їх аналізом.

Як об'єкт сушіння використовувалася жовткова суміш курячих яєць із початковим вологовмістом  $W_n = 0,54$  кг/кг, яка готується за традиційною технологією виготовлення яєчних емульсій і суспензій [8,20,31].

Кінцеве значення вологовмісту жовткової суміші  $W_k = 0,05$  кг/кг прийняте згідно з вимогами до показників якості сухих яєчних продуктів, які регламентовані ДСТУ 8719:2017 «Продукти яєчні. Технічні умови».

### 3.1. Установа для експериментальних досліджень процесу сушіння жовткової суміші методом розпилювання

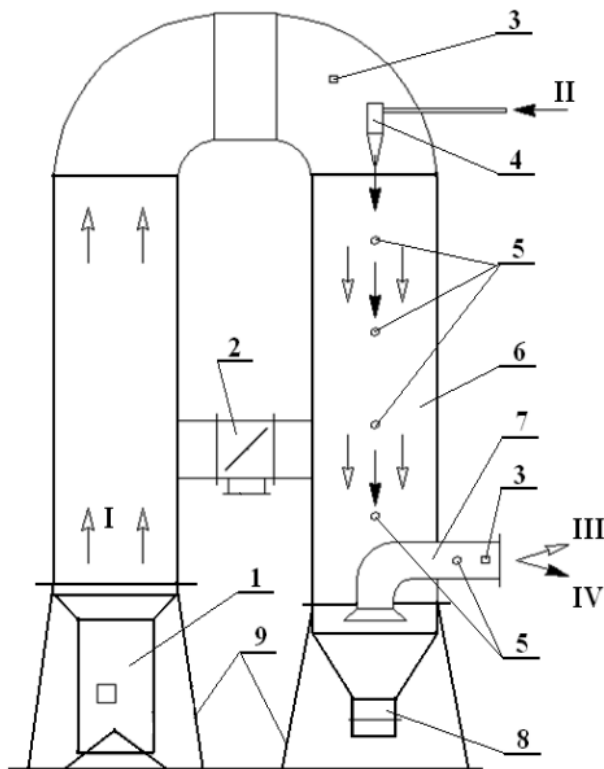
Розглянемо установку, що була використана для експериментального дослідження кінетики зневоднення яєчних продуктів, зокрема жовткової суміші курячих яєць (рис. 3.1, 3.2). При проведенні експериментів здійснювався відбір проб крапель продукту із зони сушки за допомогою вловлювання їх на поверхню гідрофобного матеріалу із подальшим досушуванням проб на аналітичних вагах.



Рис. 3.1. Зовнішній вигляд експериментальної установки для дослідження кінетики процесу сушки жовткової суміші методом розпилення

Експериментальна установка, до складу якої входить електричний калорифер марки СФО-20/10, оснащена байпасним трубопроводом (рис. 3.2). Це дозволяє керувати витратою сушильного агента IV при різних температурах в сушильній камері 6 (найбільша витрата  $Q_{ca} = 1200 \text{ м}^3/\text{год.}$ ,

найбільша температура сушильного агента  $T_{ca} = 250^{\circ}\text{C}$ ). Температура сушильного агента вимірювалася у двох точках (рис. 3.2) за допомогою мультиметрів, до яких приєднані хромель-копелеві термопари ЗХК(L) ТП-011 із номінальною статичною характеристикою, що відповідає ДСТУ EN 62460:2018 «Температура. Таблиці електрорушійної сили (ЕРС) для комбінованих термопар з елементами без домішок (EN 62460:2008, IDT; ІЕС 62460:2008, IDT)», допустима основна похибка не більше  $0,5^{\circ}\text{K}$ .



Потоки:

- I* – сушильний агент;
- II* – жовткова суміш на розпилення;
- III* – відпрацьований сушильний агент на циклон;
- IV* – сухий продукт на циклон

Рис. 3.2. Конструкція експериментальної установки для дослідження кінетики сушіння методом розпилювання:

1 – електричний калорифер СФО-20/10 УХЛЗ; 2 – байпас із регулювальною дросельною заслінкою; 3 – термопари; 4 – форсунки розпилення; 5 – штуцери для відбору проб продукту; 6 – сушильна камера; 7 – трубопровід відведення із зони сушіння сушильного агента і продукту; 8 – продуктозбірник; 9 – опори

Жовткова суміш *I* при зневодненні розпилювалася в об'єм сушильної камери форсункою 4. Для реалізації процесу розпилення використана акустична форсунка із газоструменевим випромінювачем Гартмана (додаток Б1, а), що здатна забезпечити стабільне розпилення емульсій із середнім

розміром краплинок 20÷30 мкм. Форсункам такого типу притаманні висока інтенсивність акустичних коливань, широкий діапазон регулювання продуктивності, високий ККД, простота конструкції і надійність в експлуатації.

Для подачі повітря на форсунку розпилення, для регулювання витрати цього повітря та його тиску, використаний поршневий компресор Atmos Bobby 4/46 із однофазним електродвигуном (додаток Б1, б). Характеристики факелу розпилення наведені у додатку Б2; технічні характеристики компресора і параметри робочого режиму розпилення наведені у додатку Б3.

При проведенні експериментальних досліджень, із урахуванням [32,33,39], як основні фактори, що впливають на ефективність процесу зневоднення, прийняті: початкова температура продукту  $T_{prod}$  (°К) і температура сушильного агента  $T_{ca}$  (°К). Межі зміни величин факторів (таблиця 3.1) встановлювалися згідно із технологічних обмежень для реалізації процесу сушіння. Нижня межа  $T_{prod} = 278^{\circ}\text{K}$  відповідає технологічним вимогам зберігання рідких яєчних продуктів, зокрема жовткової суміші. Верхня межа  $T_{prod} = 298^{\circ}\text{K}$  відповідає температурі навколишнього середовища у виробничому приміщенні.

Таблиця 3.1.

## Фактори і межі їх зміни

Рівні	Фактори	$T_{ca}$ , °К	$T_{prod}$ , °К
1		423	278
2		448	298
3		473	–

Експериментальні дослідження кінетики сушіння проводилися за допомогою ймовірно-статистичних методів планування і обробки експериментальних даних.

Неперервний процес сушіння жовткової суміші здійснювався у прямоточному контакті розпилюваного через форсунку продукту із нагрітим повітрям. Відбір проб літаючих частинок в усталеному режимі сушки

здійснювався через штуцери 5 (рис. 3.2) по висоті сушильної камери 6. Проби висушеного жовткового порошку відбиралися для визначення ступеню їх зневоднення на різних стадіях процесу сушіння. Відбірник проб (додаток Б4) виготовлений у вигляді металевого прута із пазом, в який встановлена мікрофібра для уловлення частинок продукту. Продукт із відбірників зважувався на аналітичних вагах із подальшим досушуванням до досягнення незмінної ваги, що відповідає кінцевій  $W_k$ . Розраховувався поточний вологовміст жовткової суміші у точках відбору по висоті камери протягом здійснення сушки (додаток В1).

Розрахунок похибок при визначенні вологовмісту продукту здійснювалося у послідовності, що була описана (див. п.2.1.1, формули (2.2)-(2.6)). Результати розрахунків наведені у таблиці (додаток В1), де прийняті наступні позначення:  $W_1, W_2, W_3$  – вологовміст у першому, другому і третьому досліді відповідно, кг/кг;  $W$  – середній вологовміст, кг/кг;  $S_n$  – середнє квадратичне відхилення при визначенні  $W$  (за виразом 2.3), кг/кг;  $S_w$  – середнє квадратичне відхилення середнього при визначенні  $W$  (за виразом 2.4), кг/кг;  $\Delta W$  – похибка результатів вимірювань за виразом (2.5), кг/кг;  $\varepsilon_w$  – відносна похибка за виразом (2.6). Бачимо, що відносна похибка при визначенні вологовмісту продукту  $W$  не перевищувала 15%.

### 3.2. Аналіз результатів експериментальних даних при визначенні кінетики сушіння жовткової суміші курячих яєць

На рис. 3.3, 3.4 наведені графічні інтерпретації (криві сушки) експериментальних даних, наведених у додатку В1.

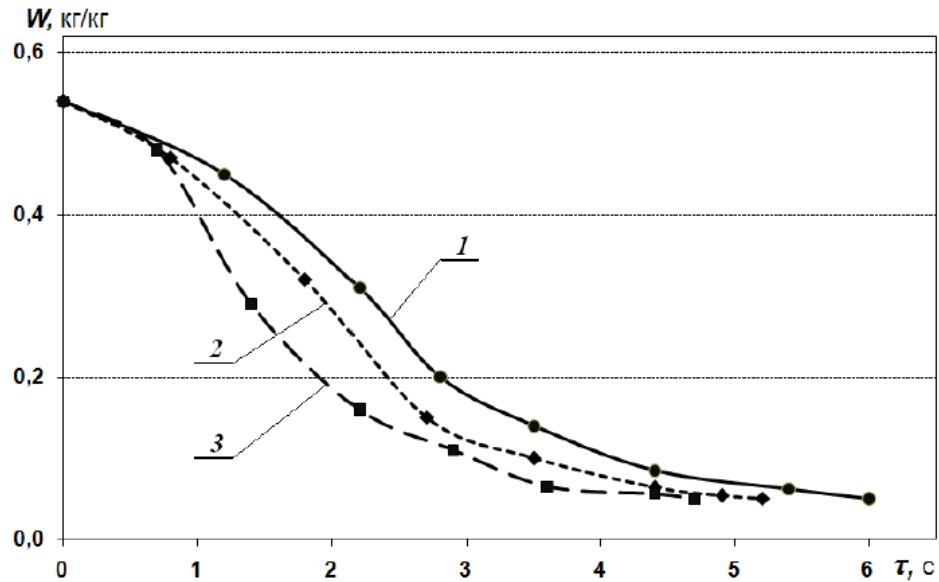


Рис. 3.3. Кінетика сушіння жовткової суміші методом розпилення при  $T_{\text{прод}} = 278^{\circ}\text{K}$ : 1 – при  $T_{\text{са}} = 423^{\circ}\text{K}$ ; 2 – при  $T_{\text{са}} = 448^{\circ}\text{K}$ ; 3 – при  $T_{\text{са}} = 473^{\circ}\text{K}$

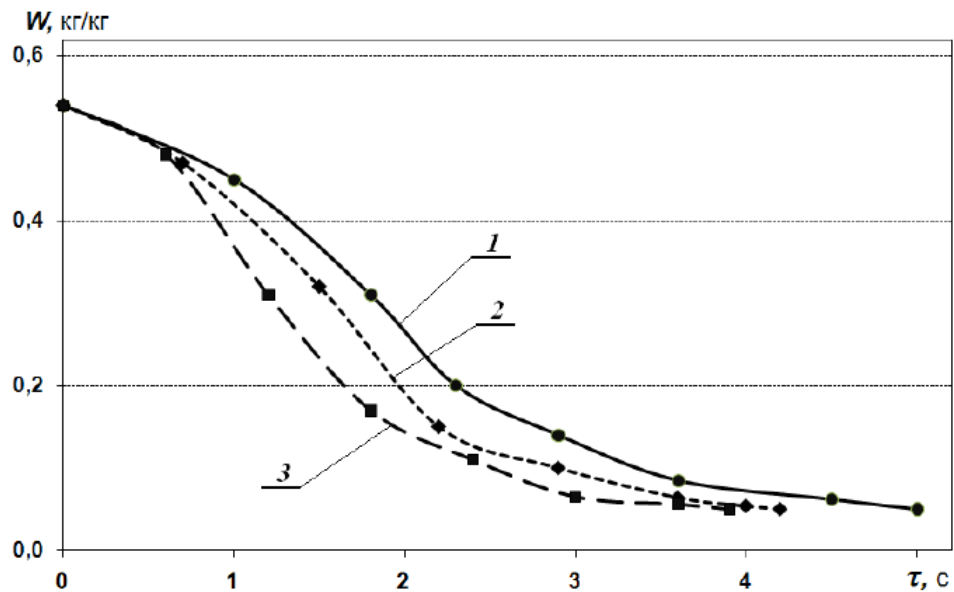


Рис. 3.4. Кінетика сушіння жовткової суміші методом розпилення при  $T_{\text{прод}} = 298^{\circ}\text{K}$ : 1 – при  $T_{\text{са}} = 423^{\circ}\text{K}$ ; 2 – при  $T_{\text{са}} = 448^{\circ}\text{K}$ ; 3 - при  $T_{\text{са}} = 473^{\circ}\text{K}$

Отримані графічні залежності (рис. 3.3, 3.4) можуть бути використані для подальшого моделювання і аналізу механізмів внутрішнього тепло- і масопереносу, а також для обчислення питомої продуктивності сушарки жовткової суміші.

Отримаємо функціональні залежності швидкості сушіння жовткової суміші від вологовмісту  $\frac{dW}{d\tau}$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{с}}$  або від вмісту сухої речовини  $\frac{dc}{d\tau}$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{с}}$  ( $c = 1 - W$ ). Для цього апроксимуємо експериментальні дані поліноміальною залежністю вигляду

$$\tau(W) = a_k \cdot W^4 + b_k \cdot W^3 + c_k \cdot W^2 + d_k \cdot W + e_k \quad (3.1)$$

де  $\tau(W)$  – швидкість сушіння, с;

$a_k, b_k, c_k, d_k, e_k$  – емпіричні коефіцієнти (таблиця 3.2).

Достовірність апроксимації  $R^2 = 0,99$ .

Продиференціювавши вираз (3.1) по  $W$ , отримаємо такий вираз

$$\frac{d\tau}{dW} = 4 \cdot a_k \cdot W^3 + 3 \cdot b_k \cdot W^2 + 2 \cdot c_k \cdot W + d_k, \quad (3.2)$$

за допомогою якого можемо визначити швидкість сушіння

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{1}{4 \cdot a_k \cdot W^3 + 3 \cdot b_k \cdot W^2 + 2 \cdot c_k \cdot W + d_k} \quad (3.3)$$

Враховуючи формулу зв'язку вологовмісту із вмістом сухої речовини

$$c = 1 - W, \quad (3.4)$$

після відповідних перетворень залежність (3.3) набуде вигляду

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{-1}{4 \cdot a_k \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot b_k \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot c_k \cdot (1-c) + d_k} \quad (3.5)$$

Графіки (рис. 3.5 та 3.6) відображають функціональні залежності швидкості сушіння жовткової суміші, побудовані за виразом (3.5).

Значення експериментальних коефіцієнтів залежностей часу і швидкості процесу сушіння для різних значень температури жовткової суміші  $T_{прод}$

Значення коефіцієнту виразу (3.5)	$T_{прод} = 278^{\circ}\text{K}$	$T_{прод} = 298^{\circ}\text{K}$
Температура сушильного агенту $T_{ca} = 423^{\circ}\text{K}$		
$a_k$	674,6006	549,4922
$b_k$	-957,9635	-784,1845
$c_k$	466,5027	383,9560
$d_k$	-97,4125	-80,6233
$e_k$	10,0881	8,3611
Температура сушильного агенту $T_{ca} = 448^{\circ}\text{K}$		
$a_k$	441,5547	325,0257
$b_k$	-660,9224	-500,0459
$c_k$	339,2705	262,2213
$d_k$	-75,1922	-59,1956
$e_k$	8,2186	6,6184
Температура сушильного агенту $T_{ca} = 473^{\circ}\text{K}$		
$a_k$	268,9942	250,0615
$b_k$	-455,1896	-406,3594
$c_k$	260,3063	224,3716
$d_k$	-63,5231	-53,0591
$e_k$	7,2259	5,9782

Для зручності проведення подальших розрахунків і математичного моделювання процесу сушіння були розраховані кінетичні коефіцієнти процесу. Для цього експериментальні дані у діапазоні зміни температури сушильного агенту  $T_{ca}$  були узагальнені за допомогою методу точного попадання у вузлові точки.

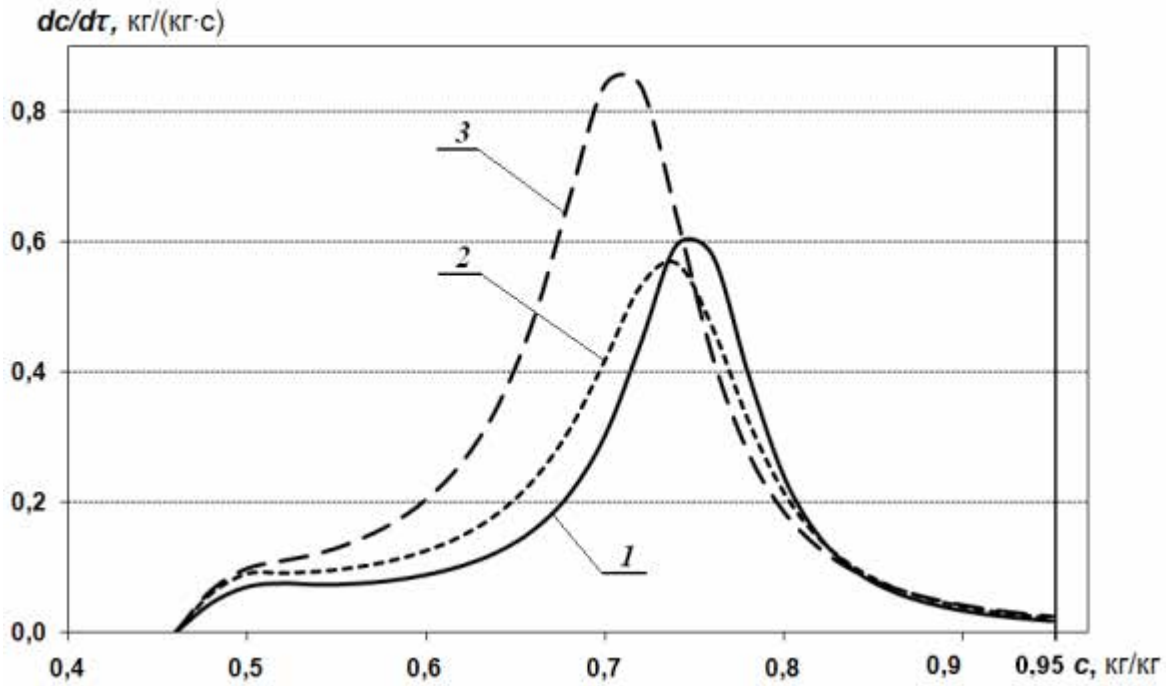


Рис. 3.5. Залежності швидкості сушіння жовткової суміші методом розпилення при  $T_{prod} = 278^{\circ}\text{K}$ :  
 1 – при  $T_{ca} = 423^{\circ}\text{K}$ ; 2 – при  $T_{ca} = 448^{\circ}\text{K}$ ; 3 – при  $T_{ca} = 473^{\circ}\text{K}$

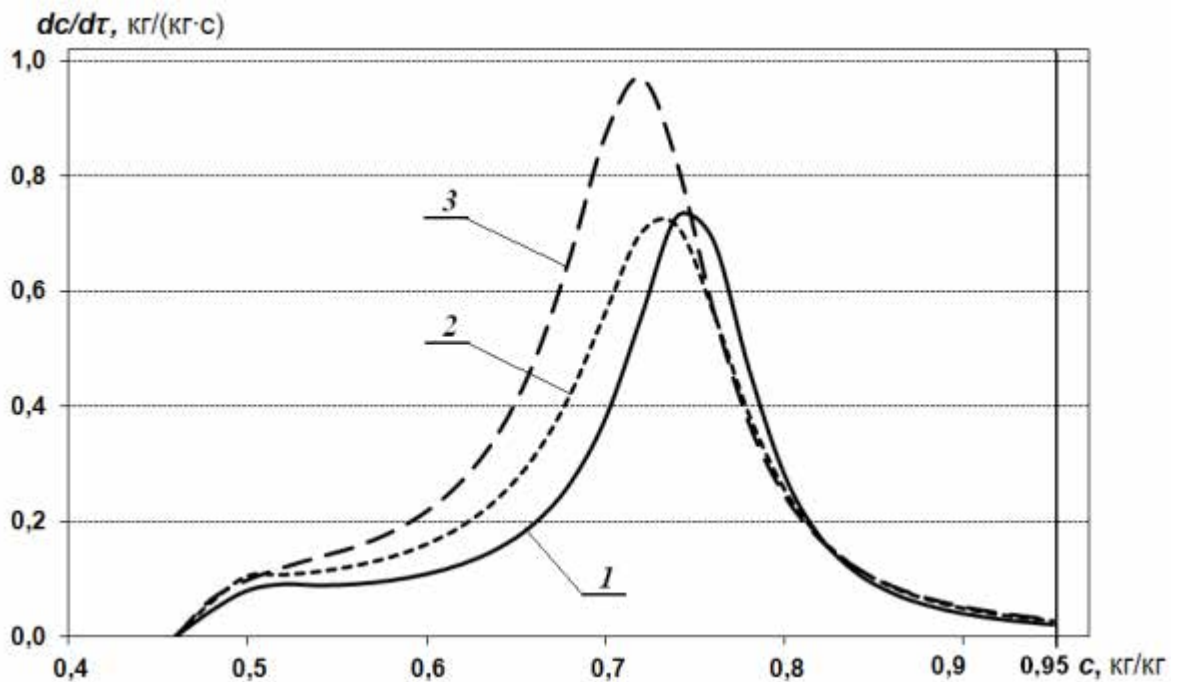


Рис. 3.6. Залежності швидкості сушіння жовткової суміші методом розпилення при  $T_{prod} = 298^{\circ}\text{K}$ :  
 1 – при  $T_{ca} = 423^{\circ}\text{K}$ ; 2 – при  $T_{ca} = 448^{\circ}\text{K}$ ; 3 – при  $T_{ca} = 473^{\circ}\text{K}$

Вираз (3.5) при цьому набуде такого вигляду

$$dc/d\tau = -1 / \left[ \begin{array}{l} 4 \cdot (A_k \cdot T_{ca} \cdot a^2 + B_k \cdot T_{ca} \cdot a + C_k) \cdot (1-c)^3 + \\ + 3 \cdot (D_k \cdot T_{ca} \cdot a^2 + E_k \cdot T_{ca} \cdot a + F_k) \cdot (1-c)^2 + \\ + 2 \cdot (G_k \cdot T_{ca} \cdot a^2 + H_k \cdot T_{ca} \cdot a + K_k) \cdot (1-c) + \\ + (L_k \cdot T_{ca} \cdot a^2 + M_k \cdot T_{ca} \cdot a + N_k) \end{array} \right], \quad (3.6)$$

де  $A_k, B_k, C_k, D_k, E_k, F_k, G_k, H_k, K_k, L_k, M_k, N_k$  – розрахункові кінематичні коефіцієнти процесу (таблиця 3.3).

Достовірність апроксимації  $R^2 = 0,99$ .

Таблиця 3.3.

Значення кінетичних коефіцієнтів функціональних залежностей швидкості процесу сушки для різних температур жовткової суміші  $T_{прод}$

Значення коефіцієнту виразу (3.6)	$T_{прод} = 278^\circ\text{K}$	$T_{прод} = 298^\circ\text{K}$
$A_k$	0,04838832	0,11960184
$B_k$	-51,46806272	-113,15186264
$C_k$	13787,51742128	27012,49246736
$D_k$	-0,07304664	-0,15236168
$E_k$	75,50526744	144,07256728
$F_k$	-19826,52937856	-34464,95741872
$G_k$	0,03861440	0,06710800
$H_k$	-38,72243040	-63,32045600
$K_k$	9936,85478160	15160,94155600
$L_k$	-0,00844096	-0,01223296
$M_k$	8,24088816	11,51201616
$N_k$	-2072,97565984	-2761,37483584

Вираз (3.6) та кінетичні коефіцієнти (таблиця 3.3) у подальшому можуть бути використані при організації сушіння жовткової суміші для встановлення *раціональних та комбінованих режимів процесу* для різних значень температури сушильного агента в межах  $T_{ca} = 423 \div 473^\circ\text{K}$  ( $150 \div 200^\circ\text{C}$ ).

Для прикладу, побудуємо за формулою (3.6) та визначеними кінетичними коефіцієнтами криві швидкості сушки жовткової суміші методом розпилення при температурі продукту  $T_{прод} = 298^\circ\text{K}$  (рис. 3.7).

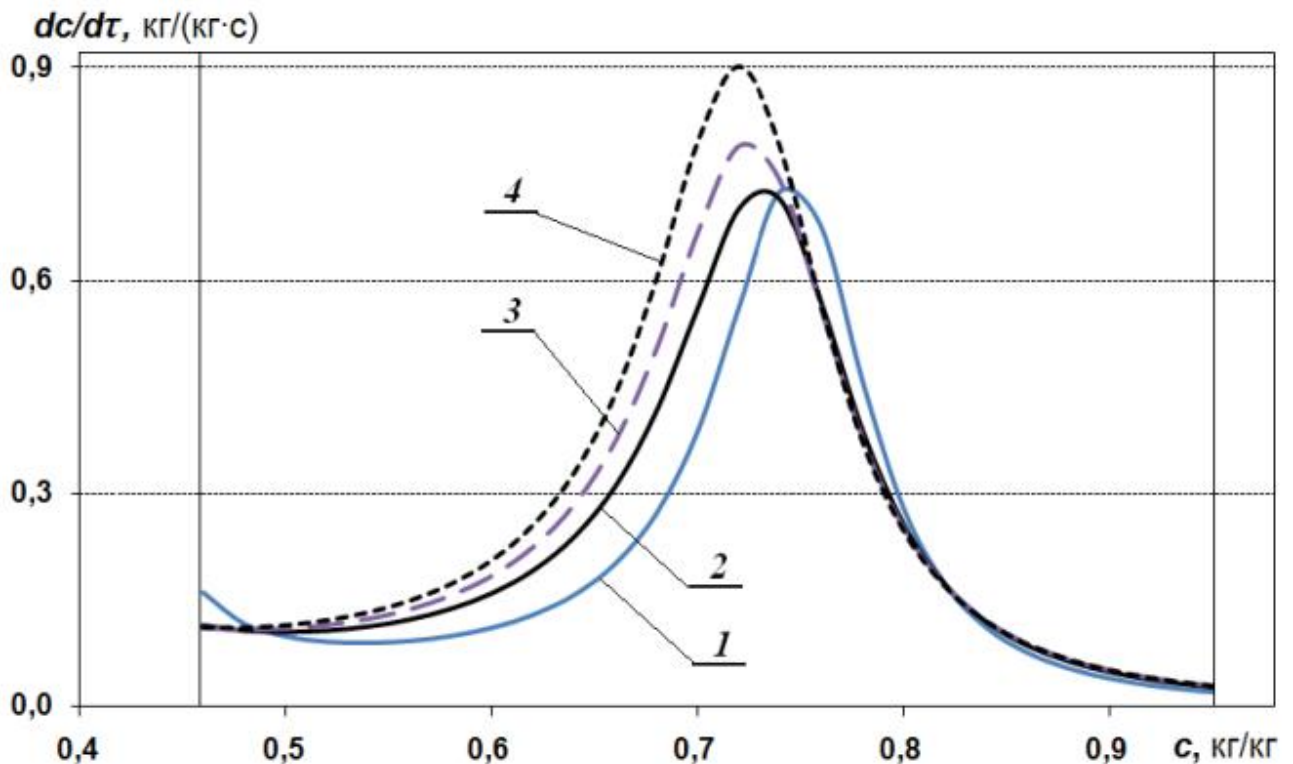


Рис. 3.7. Графічні залежності швидкості сушки жовткової суміші

методом розпилення при  $T_{прод} = 298^\circ\text{K}$ :

1 – при  $T_{са} = 425^\circ\text{K}$ ; 2 – при  $T_{са} = 448^\circ\text{K}$ ; 3 – при  $T_{са} = 458^\circ\text{K}$ ;

4 – при  $T_{са} = 468^\circ\text{K}$

Аналізуючи графіки швидкості сушки жовткової суміші (рис. 3.5, 3.6, 3.7) та зважаючи на роботи дослідників [14,24,25,26,32,33,38], робимо висновок, що під час сушіння жовткової суміші методом розпилення швидкість зневоднення є непостійною. Наявні екстремуми функціональних залежностей: функції  $dc/d\tau$  стрімко зростають до певного максимального значення із подальшим стрімким падінням. Такий характер функціональних залежностей обумовлений процесами формування капілярно-пористої структури частинок продукту при їх зневодненні.

### 3.3. Дослідження механізму внутрішнього масопереносу при сушці жовткової суміші методом розпилення

Під час інтенсивного зневоднення [2,14] на характер протікання процесу істотний вплив можуть здійснювати механізми формування капілярно-пористої структури матеріалу. Для розробки математичних моделей та дослідження тепломасообмінних процесів важливо розрізняти такі поняття, як тонкий та товстий шар [2,24,39 та ін.]. При розробці фізико-математичних моделей процесів інтенсивної сушки методом розпилення диспергованих частинок (розміром  $20 \div 30$  мкм) досліджуваного продукту, частинку у польоті доцільно розглядати як тонкий шар. Поняття «тонкий шар» для процесів тепло- і масообміну передбачає малі величини масообмінного і теплового чисел Біо

$$Bi_T \ll 1, \quad Bi_M \ll 1, \quad (3.7)$$

тобто поля вологості та температури у продукті є однорідними.

Аналіз результатів аналітичних і експериментальних досліджень різних авторів [14,24,25,26,32,33,3], а також основних положень сушки [9,17,39] свідчить про те, що при сушінні методом розпилення спостерігаються *два етапи зневоднення*.

Зростання швидкості сушіння (рис. 3.5, 3.6, 3.7) *на першому етапі* визначається перевагою випаровування вологи всередину частинки із утворенням пухирців пари і поверхневої плівки, яка у подальшому формуватиме тверду оболонку. Переміщення вологи через плівку частинки здійснюється в основному у вигляді пари. Автори [9,17,39] припускають, що при зменшенні розміру частинки за певне критичне значення, відбувається «розвертання» частинки, і пароподібна плівка опиниться вже не всередині, а «обволакує» поверхню частинки, і при цьому вивільняється структурна волога. Дифузія пари відбувається у вигляді послідовних процесів конденсації пари та випаровування вологи на рідких плівках [39].

При зниженні вологості внаслідок висихання плівок відбувається перехід плівкової структури у капілярно-порите тіло. Плівки розтріскуються із утворенням розгалуженої мережі капілярів, переміщення пари якою відбувається за рахунок ефузії із одночасним зниженням швидкості процесу.

Автори робіт [14,24,25,26,32,33,38] відзначають, що під час сушіння високої інтенсивності, не зважаючи на малі градієнти температури і вологовмісту, швидкість сушіння є високою. Вони пояснюють це збільшенням температури і тиску всередині частинки та значним впливом на механізми масопереносу градієнта надлишкового тиску пари, який є потужним інтенсифікатором переносу вологи.

Отримані експериментальні дані (рис. 3.5, 3.6, 3.7) свідчать, що сушінню жовткової суміші курячих яєць методом розпилення притаманне стрімке видалення вільної вологи з поверхні частинок. *При цьому за рахунок випаровування на початку процесу виключене перегрівання продукту.* На першому етапі зневоднення видаляється переважно вільна волога, відбувається стрімке зменшення об'єму розпиленої частинки та збільшення концентрації, що позитивно впливає на утворення плівки. При завершенні першого етапу вологість на поверхні плівки частинки досягає гігроскопічного значення.

Під час другого етапу, у процесі видалення адсорбційної вологи інтенсифікується прогрів матеріалу, при цьому практично не змінюється об'єм частинок [9,17]. Відбувається поглиблення зони випаровування в глибину частинки, здійснюється формування її твердої структури. Температура частинок продукту підвищується, наближуючись до температури сушильного агента  $T_{ca}$ , і інколи в об'ємі матеріалу утворюються пори і розтріскування. Отже, сушіння методом розпилення має деякі специфічні особливості, оскільки сушка рідких продуктів відбувається інтенсивно у капілярах малих розмірів.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ СУШІННЯ ЖОВТКОВОЇ СУМІШІ КУРЯЧИХ ЯЄЦЬ

Комплексне дослідження сушіння методом розпилення, включаючи аналіз результатів дослідження кінетики процесу, дозволяє вирішувати задачі удосконалення і раціоналізації сушильного процесу. Задачею раціоналізації є розробка рекомендацій з організації економічно доцільних режимів процесу сушіння для забезпечення найбільшої питомої продуктивності при найменших втратах якості готового продукту.

#### 4.1. Аналіз впливу основних факторів на питому продуктивність при сушінні жовткової суміші методом розпилення

Дослідження з метою раціоналізації процесу сушіння жовткової суміші методом розпилення проводилися із використанням експериментальних даних вивчення кінетики процесу (п. 3.1) із додатковим тестуванням встановлених різних режимів зневоднення на експериментальній установці (рис. 3.1, 3.2).

Для різного поєднання значень факторів впливу (таблиця 3.1) був визначений експериментальний час сушіння  $\tau_c$  жовткової суміші до прийнятого значення кінцевого вологовмісту  $W_k$ .

При раціоналізації процесу сушіння, враховуючи рекомендації [14,26,38], у якості *цільової функції* обрана *питома продуктивність*, яка відповідає отриманій кількості сухого жовткового порошку з одиниці об'єму камери в одиницю часу  $\Pi$ , кг/(м<sup>3</sup>·год.):

$$\Pi = \frac{G_{wk}}{V} \quad (4.1)$$

де  $G_{wk}$  – продуктивність установки по жовтковому порошку, кг/год.;

$V$  – робочий об'єм сушильної камери, м<sup>3</sup>.

$$G_{Wk} = \frac{G_{Wn} \cdot (1 - W_n)}{1 - W_k} \quad (4.2)$$

При неперервному усталеному процесі експериментальній прямоточній сушці методом розпилення довжина пробігу частинок продукту визначає величину задіяного об'єму сушильної камери установки, тобто робочий об'єм камери є функцією тривалості сушіння  $\tau_c$ .

Для початкового розміру частинок продукту 20÷30 мкм експериментально встановлена залежність робочого об'єму камери сушарки від часу сушіння  $\tau_c$ :

$$V = 0,333838 \cdot \tau_c \quad (4.3)$$

де  $\tau_c$  – експериментальна тривалість сушіння, с (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1.

Результати експериментального визначення питомої продуктивності розпилювальної сушарки (по жовтковому порошку)

№ експ.	$T_{ca}$ , °К	$T_{прод}$ , °К	$G_{Wn}$ , кг/год.	$G_{Wk}$ , кг/год.	$\tau_c$ , с	$V$ , м <sup>3</sup>	$\Pi$ , кг/(м <sup>3</sup> ·год.)
1	423	278	6	2,905263	6,0	2,00304	1,450
2	448	278	6	2,905263	5,2	1,735968	1,674
3	473	278	6	2,905263	4,7	1,569048	1,852
4	423	298	6	2,905263	5,0	1,6692	1,741
5	448	298	6	2,905263	4,2	1,402128	2,072
6	473	298	6	2,905263	3,9	1,301976	2,231

Базуючись на результатах розрахунків (таблиця 4.1) для жовткової суміші отримані апроксимуючі лінійно-степеневі залежності питомої продуктивності від факторів, що впливають на процес:

$$\begin{aligned} \Pi(T_{ca}, T_{прод}) = \\ = (a_{\Pi} \cdot T_{прод} + b_{\Pi}) \cdot T_{ca}^2 + (c_{\Pi} \cdot T_{прод} + d_{\Pi}) \cdot T_{ca} + (e_{\Pi} \cdot T_{прод} + f_{\Pi}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

де  $a_{\Pi}$ ,  $b_{\Pi}$ ,  $c_{\Pi}$ ,  $d_{\Pi}$ ,  $e_{\Pi}$ ,  $f_{\Pi}$  – емпіричні коефіцієнти (таблиця 4.2).

Оцінка достовірності апроксимації  $R^2$  залежності цільової функції від параметрів впливу  $R^2 = 0,95$ .

Емпіричні коефіцієнти функціональної залежності питомої продуктивності сушарки від факторів впливу (по жовтковому порошку)

Коефіцієнт	Значення коефіцієнту
$a_{\Pi}$	-0,000005081415
$b_{\Pi}$	0,00137655077
$c_{\Pi}$	0,00464267655
$d_{\Pi}$	-1,2503104026
$e_{\Pi}$	-1,040136025515
$f_{\Pi}$	279,994865691271

Із використанням функціональної залежності (формула (4.4)) та отриманих коефіцієнтів для жовткової суміші курячих яєць побудоване поле значень питомої продуктивності (рис. 4.1).

У таблиці 4.3 представлені чисельні значення питомої продуктивності сушарки для жовткової суміші для різного поєднання факторів впливу, отримані за допомогою функціональної залежності (4.4).

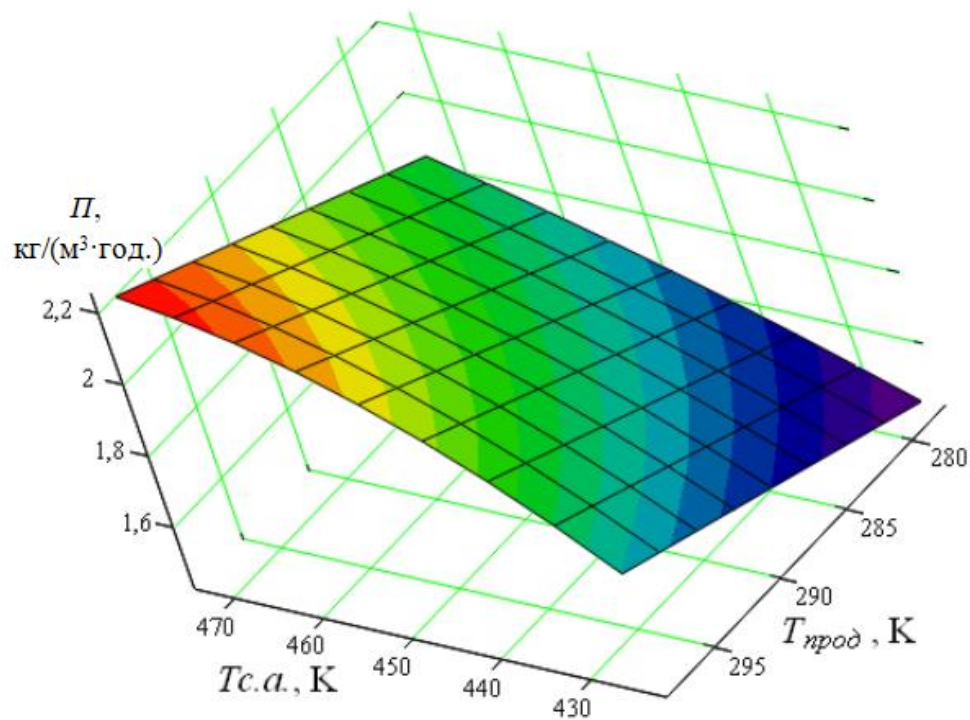


Рис. 4.1. Поле значень питомої продуктивності при сушці жовткової суміші

## Питома продуктивність при сушці жовткової суміші

Т <sub>прод</sub> , °К	Температура сушильного агенту Т <sub>са</sub> , °К					
	423	433	443	453	463	473
278	1,450	1,545	1,633	1,713	1,786	1,852
280	1,479	1,580	1,671	1,753	1,826	1,890
282	1,508	1,615	1,710	1,794	1,866	1,928
284	1,537	1,650	1,749	1,834	1,907	1,966
286	1,566	1,685	1,787	1,875	1,947	2,004
288	1,595	1,719	1,826	1,915	1,987	2,042
290	1,624	1,754	1,865	1,956	2,027	2,079
292	1,653	1,789	1,903	1,996	2,068	2,117
294	1,682	1,824	1,942	2,037	2,108	2,155
296	1,711	1,859	1,981	2,077	2,148	2,193
298	1,741	1,894	2,019	2,118	2,188	2,231

Використовуючи рівняння (4.4) за допомогою опції «maximize» в середовищі математичного пакету Mathcad, були визначені максимум питомої продуктивності (цільової функції) і відповідне йому раціональне поєднання значень режимних параметрів (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4.

Макимум питомої продуктивності, тривалість сушіння  
і раціональні значення режимних параметрів

Назва продукту	Параметр			
	П, кг/(м <sup>3</sup> ·год.)	τ <sub>с</sub> , с	Т <sub>са</sub> , °К	Т <sub>прод</sub> , °К
Жовткова суміш курячих яєць	2,23	3,9	473	298

Аналіз характеру поля значень питомої продуктивності (рис. 4.1) показує, що із зростанням температур жовткової суміші (продукту) і сушильного агенту значно інтенсифікуються тепломасообмінні процеси, що веде до зростання цільової функції за рахунок зменшення загальної тривалості процесу сушіння.

Очевидним є збільшення питомої продуктивності при збільшенні початкової температури продукту (рис. 4.1) діапазоні  $T_{prod} = 278...298^{\circ}\text{K}$ , оскільки знижуються витрати на прогрівання продукту. Верхня межа початкової температури обмежена на основі аналізу результатів попередніх досліджень і відповідає температурі у виробничих приміщеннях. Нижня межа  $T_{prod} = 278^{\circ}\text{K}$  відповідає температурі зберігання рідких яєчних продуктів [12,13,29].

Із зростанням температури сушильного агенту питома продуктивність сушарки істотно збільшується (рис. 4.1), однак при цьому підвищується температура частинок продукту. Термічний вплив, який призводить до перегрівання продукту вище за  $333^{\circ}\text{K}$  знижує якість термолабільність яєчних продуктів, зокрема жовткової суміші. На основі аналізу якісних показників отриманих порошків рекомендована верхня межа температури сушильного агенту  $T_{ca} = 523^{\circ}\text{K}$ . Температурні режими при сушінні яєчних продуктів, зокрема, яєчних жовтків, мають велике значення, відповідно, раціональний режим зневоднення повинен встановлюватися індивідуально для кожного продукту.

Аналіз якісних показників сухої жовткової суміші курячих яєць, отриманих під час експериментів, у тому числі при раціональному режимі (таблиця 4.4), показав відповідність зразків вимогам ДСТУ 8719:2017 «Продукти яєчні. Технічні умови».

## 4.2. Розробка раціональних комбінованих режимів сушіння жовткової суміші курячих яєць

Розробку раціональних режимів необхідно провести для вирішення таких задач при організації сушіння жовткової суміші:

1. Підвищення питомої продуктивності промислових сушильних комплексів для яєчних продуктів при скороченні часу процесу і зменшенні габаритів сушильної камери.

2. Підвищення показників якості виробленої продукції (розчинність, піноутворююча здатність, обміненія та ін.) при скороченні термічного впливу на термолабільні продукти.

3. Розробка раціональної конструкції сушарки.

4. Удосконалення конструкцій діючих сушарок.

Під час протікання процесу розпилювального сушіння відбувається стрімка зміна параметрів об'єкта зневоднення (вологості, температури, структури та ін.), що обумовлює створення різних варіацій режимних параметрів у процесі сушіння для створення умов, що сприяють отриманню високої якості продукції при максимальній інтенсивності тепломасообмінних процесів.

Реалізація неперервної варіації режимних параметрів під час сушіння з метою створення раціональних / оптимальних умов сушіння на сучасному рівні розвитку сушильної техніки є невиправданою з економічної точки зору, але доцільною є по-зонна дискретна раціоналізація процесу сушіння.

Приймаючи до уваги характер кривих швидкості сушіння методом розпилення і наявність характерних ділянок (рис. 3.5, 3.6, 3.7), для жовткової суміші запропонована 2-х зонна сушка і визначені параметри вмісту сухої речовини  $c_{zp}$ , кг/кг, що відповідають межам зон. За межу прийнятий вміст сухих речовин  $c_{zp}$ , який відповідає максимальній швидкості процесу. Максимальне значення швидкості сушки  $(dc/dt)^{\max}$  і  $c_{zp}$  для будь-якого

варіативного поєднання  $T_{\text{прод}}$  і  $T_{\text{са}}$  можна визначити, використовуючи формули (3.3) і (3.5) і опцію «maximize» в середовищі математичного пакету Mathcad Professional. Для раніше встановлених раціональних режимів (таблиця 4.4) у таблиці 4.5 представлені визначені  $(dc/d\tau)^{\text{max}}$  і  $c_{\text{зр}}$ .

За допомогою виразу (4.1) при заміні  $W = 1 - c$  визначений час сушіння  $\tau_c^{\text{зр}}$ , с, до досягнення  $c_{\text{зр}}$ , тобто встановлена тривалість першого періоду процесу волого видалення (таблиця 4.5). Значення  $\tau_c^{\text{зр}}$  із урахуванням витрати сушильного агента, дозволяє здійснити розрахунок робочого об'єму і висоти сушильної камери для реалізації першої зони сушіння.

Таблиця 4.5.

Максимум швидкості сушіння, вміст сухих речовин, що відповідає максимальній швидкості процесу і раціональні значення параметрів

Продукт	Значення параметра				
	$(dc/d\tau)^{\text{max}}$ , кг/(кг·с)	$c_{\text{зр}}$ , кг/кг	$\tau_c^{\text{зр}}$ , с	$T_{\text{са}}$ , °К	$T_{\text{прод}}$ , °К
Жовткова суміш курячих яєць	0,973	0,718	1,327	473	298

*Запропонована 2-х зонна раціоналізація розпилювального сушіння при комбінації прямої течії, на створення якої витрачається 2/3 потоку сушильного агента, і додаткової перехресної подачі 1/3 загальної витрати сушильного агента у періоді спадаючої швидкості сушіння. У порівнянні із традиційним прямоточним контактом, запропонована організація процесу дозволяє створити більш активну нестационарну аеродинамічну обстановку взаємодії фазових потоків у сушильній камері, і рівномірний розподіл температур і вологості сушильного агента по висоті камери. Співвідношення витрат прийнято на основі результатів дослідження кінетики сушіння та серії експериментів.*

Значення емпіричних коефіцієнтів функціональних залежностей  $\tau(W)$  і швидкості процесу сушіння  $dc/d\tau$  при раціональних режимах в комбінації «пряма течія – перехресна течія» (для жовткової суміші)

Коефіцієнт	Значення коефіцієнта
$a_k$	211,5668
$b_k$	-346,0441
$c_k$	190,0514
$d_k$	-44,8993
$e_k$	5,3809

Проведені дослідження кінетики 2-х зонної розпилювальної сушки при раціональних значеннях варіативних параметрів (таблиця 4.4) на експериментальній установці (рис. 3.1, 3.2) по описаній вище методиці. Результати досліджень зведені у таблицю (додаток В2). Для перехресної подачі сушильного агенту був задіяний байпас 2 із регулювальною дросельною заслінкою (рис. 3.2). Під час експерименту отримані криві сушіння (рис. 4.2), визначені емпіричні коефіцієнти залежностей у часі (3.1) та швидкості (3.5) процесу сушіння (таблиця 4.6), а також побудовані залежності швидкості процесу від  $c$  (рис. 4.3).

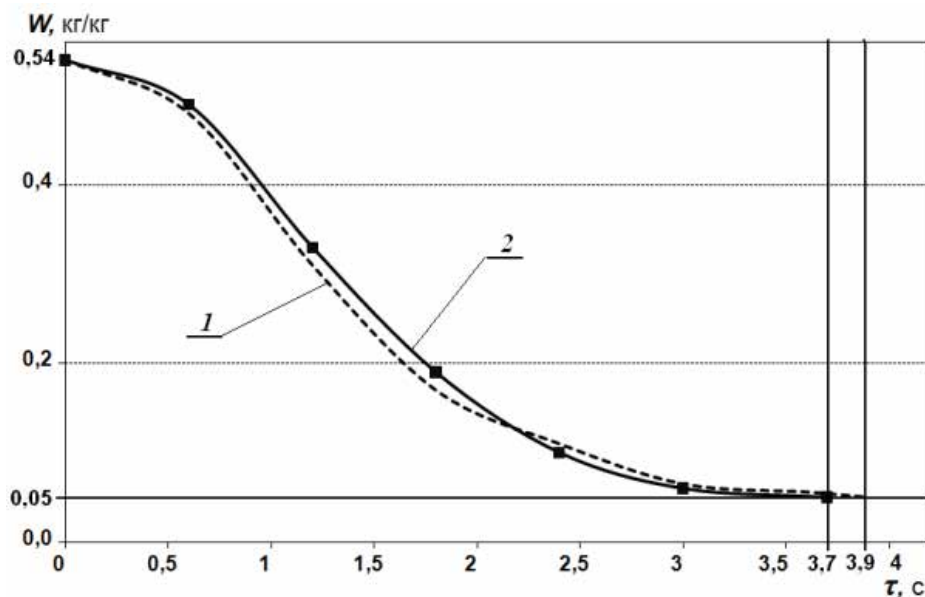


Рис. 4.2. Кінетика сушки жовткової суміші методом розпилення при  $T_{\text{прод}} = 298^{\circ}\text{K}$  і  $T_{\text{са}} = 473^{\circ}\text{K}$ :

1 – пряма течія; 2 – пряма течія – перехресна течія

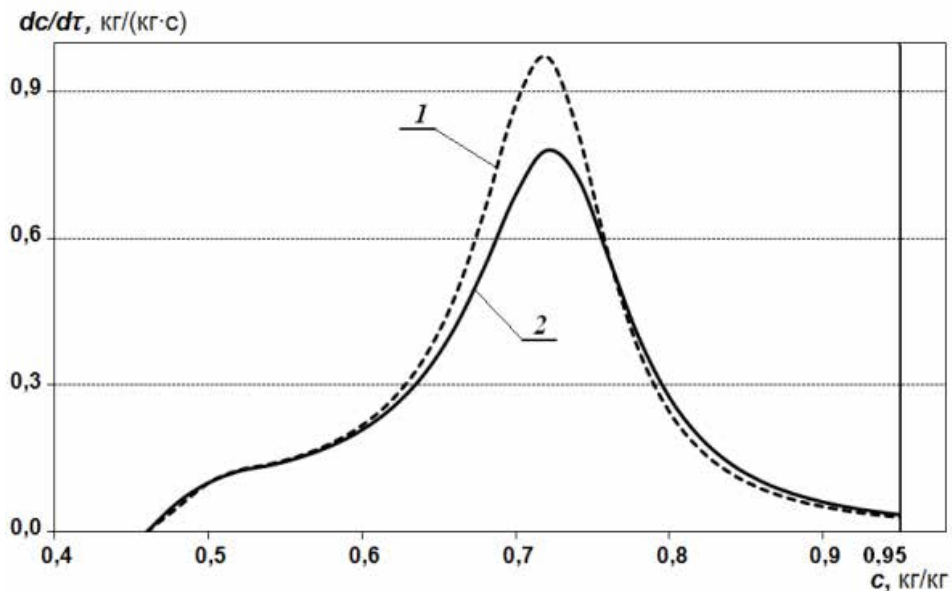


Рис. 4.3. Криві швидкості сушіння жовткової суміші методом розпилення при  $T_{\text{прод}} = 298^{\circ}\text{K}$  і  $T_{\text{са}} = 473^{\circ}\text{K}$ :  
1 – пряма течія; 2 – пряма течія – перехресна течія

Встановлено (п. 3.1), що робочий об'єм камери є функцією тривалості сушіння. Під час серії експериментів отримана залежність  $V$  від часу  $\tau_c$  для 2-х зонної сушки і початкового розміру частинок продукту  $20 \div 30$  мкм

$$V = 0,3325 \cdot \tau_c \quad (4.5)$$

де  $\tau_c$  – експериментальний час сушіння, с (таблиця 4.7).

На основі результатів досліджень встановлений експериментальний час сушіння до необхідного кінцевого вологовмісту продукту, і за виразом (4.1) визначена питома продуктивність сушарки при 2-х зонному сушінні методом розпилення (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7.

Результати експериментального визначення питомої продуктивності 2-х зонної розпилювальної сушарки (для жовткової суміші)

$T_{\text{са}},$ °K	$T_{\text{прод}},$ °K	$G_{\text{вн}},$ кг/год.	$G_{\text{вк}},$ кг/год.	$\tau_c,$ с	$V,$ м <sup>3</sup>	$\Pi,$ кг/(м <sup>3</sup> ·год.)
473	298	6	2,905263	3,7	1,23025	2,362

*Порівняння отриманих результатів (таблиця 4.8) визначення питомої продуктивності при різній організації процесу сушіння методом розпилення (таблиця 4.4 та 4.7) дозволяє зробити висновок, що питомий об'єм сухого продукту підвищується при створенні більш активної аеродинамічної обстановки при взаємодії потоків.*

Таблиця 4.8.

Порівняння питомої продуктивності при різній організації процесу методом розпилення (для жовткової суміші)

<i>П, кг/(м<sup>3</sup>·год.); пряма течія</i>	<i>П, кг/(м<sup>3</sup>·год.); пряма течія – перехресна течія</i>	<i>Приріст, %</i>
2,23	2,362	5,92

Таким чином, створення більш активної аеродинамічної обстановки взаємодії потоків при 2-х зонному сушінні інтенсифікує тепломасообмінні процеси, і у порівнянні із прямоточним сушінням дозволяє:

- збільшити питомий вихід готової продукції при модернізації діючих сушарок;
- підвищити якість продукції за рахунок пом'якшення режиму термічного впливу при збереженні рівня продуктивності;
- знизити енергетичні витрати на процес сушіння;
- зменшити розміри сушильної камери при проектуванні сушарок.

*Отриману функціональну залежність (4.4) рекомендується використовувати для розрахунку раціональних параметрів при проектуванні, пуску та налаштуванні, експлуатації установок для сушіння жовткової суміші методом розпилення. Рекомендовані раціональні режими (таблиця 4.4 та 4.7) дозволяють використати для зневоднення жовткової суміші типові конструкції розпилювальних сушарок. При уточненні параметрів при здійсненні пуско-налагоджувальних робіт, розроблені режими можна рекомендувати для практичного впровадження на підприємствах різної потужності, які спеціалізуються на переробці яєчних продуктів.*

### 4.3. Визначення передатної функції сушарки для яєчних продуктів для каналу керування температурою теплоносія

Визначимо такі параметри передатної функції сушарки для яєчних продуктів для каналу керування температурою теплоносія (агенту сушіння), як час транспортного запізнення  $\tau_{oy}$ , коефіцієнт передачі  $k_{oy}$  та постійна часу об'єкта  $T_{oy}$ .

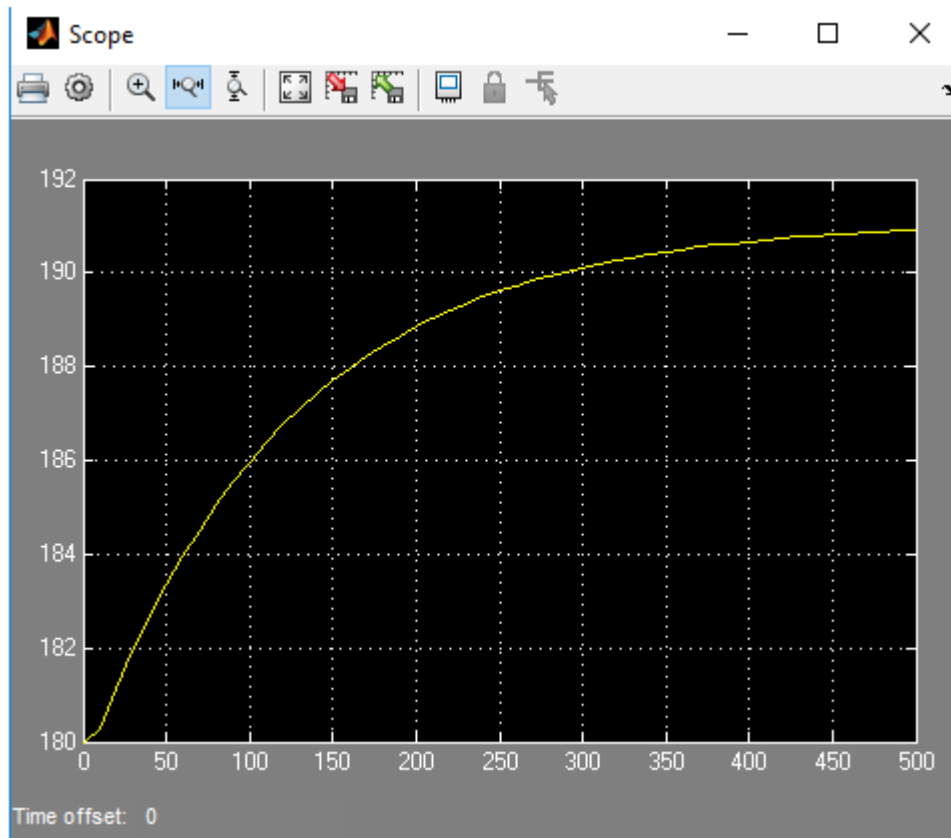


Рис. 4.4. Розгінна характеристика сушарки для яєчних продуктів для каналу керування температурою теплоносія

Для визначення передатної функції сушарки для вказаного каналу керування був використаний графічний метод [6]. Для цього розгінна характеристика, отримана експериментальним шляхом, (рис. 4.4) була пронормована за виразом:

$$h(t_i) = \frac{\theta_B(t_i) - \theta_B(0)}{\theta_B(t_{\max}) - \theta_B(0)} = \frac{\theta_B(t_i) - 180}{191 - 180} \quad (4.6)$$

де  $\Theta_B(t_i)$  – проміжне значення параметра в  $i$ -й момент часу  $t_i$ ;  $\Theta_B(0)$  – початкове значення параметра;  $\Theta_B(t_{\max})$  – кінцеве значення параметра в усталеному режимі;  $h(t_i)$  – значення нормованої кривої розгону в  $i$ -й момент часу.

Коефіцієнт передачі об'єкта розраховується як відношення різниці температури теплоносія на виході теплогенератора (або на вході в сушильну камеру) і температури повітря, що подається на нагрів,  $\Delta t$  (регульований параметр) до витрат природного газу на нагрівання теплоносія  $\Delta G_g$  (параметр керування)

$$k = \frac{\Delta t}{\Delta G_g}. \quad (4.7)$$

За виразом (4.7), враховуючи технічні характеристики теплогенератора, отримаємо, що  $k = (190-50)/210 = 0,67 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{м}^3/\text{кг})$ .

Чисельне значення постійної часу  $T_{ov}$  та часу запізнення  $\tau_{ov}$  об'єкта знаходимо за допомогою дотичної, яку проводимо до точки перегину нормованої розгінної характеристики (рис. 4.5). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст ординати кривої розгону.

Передатна функція агрегату для каналу керування температурою теплоносія на виході теплогенератора має вигляд

$$W_{ov}(s) = \frac{0,67 \cdot e^{-20s}}{100 \cdot s + 1} \quad (4.8)$$

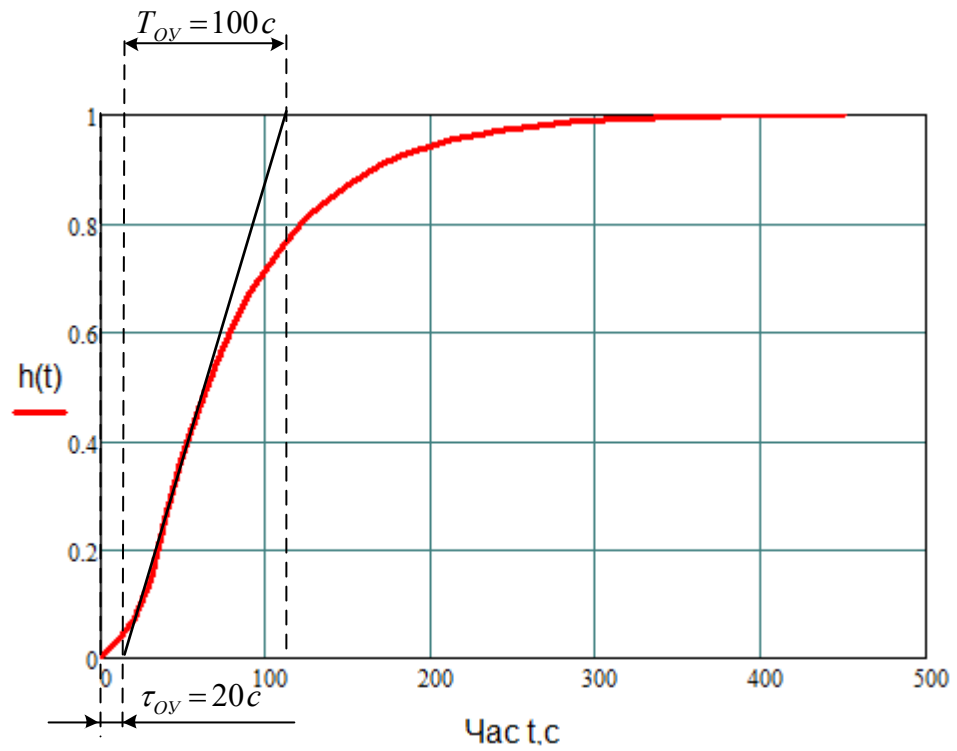


Рис. 4.5. Нормована розгінна характеристика сушарки яєчних продуктів для каналу керування температурою теплоносія

## РОЗДІЛ 5

### ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

#### 5.1. Вибір алгоритму керування

Для визначення алгоритму керування визначимо динамічні властивості об'єкта та показники якості, які повинні бути забезпечені по технологічним вимогам.

Алгоритм керування вибирають за величиною відношення часу запізнення до постійної часу об'єкта  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}}$  [6]:

- якщо  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 0,2$ , перевагу віддають позиційному (релейному)

алгоритму керування, але можливе використання і неперервного алгоритму. Рішення приймається в залежності від технологічних вимог до процесу управління.

- якщо  $0,2 < \frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 1,0$ , перевагу віддають неперервному або

цифровому алгоритму керування (П-, ПП- або ППД-алгоритм керування)

- якщо  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} > 1,0$ , вибирають спеціальний цифровий регулятор з

екстраполятором, який компенсує запізнювання в контурі керування.

Крім того, для обґрунтування алгоритму керування і вибору регулятора, який реалізує такий алгоритм, необхідно знати не тільки властивості об'єкта та вимоги до технологічного процесу, але й деякі конструктивні особливості самих регуляторів. Промислові регулятори реалізують алгоритм керування з певною похибкою, що обов'язково повинно враховуватись при виборі усіх технічних засобів, що входять до складу системи автоматичного керування.

В даному випадку за отриманою передатною функцією (4.8)

$$\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} = \frac{20}{100} = 0,2.$$

За вказаною методикою необхідно обрати неперервний алгоритм керування. Крім того, необхідно врахувати особливості роботи власне самої сушарки для яєчних продуктів. Згідно із функціональною схемою автоматизації (рис. 1.6), після запуску установки сушіння яєчної суміші відбувається неперервно. Продукт сушіння під значним тиском подається на форсунки розпилення високого тиску неперервно, і при цьому можна змінювати лише температуру і швидкість руху (і відповідно кількість) сушильного агента (гарячого повітря на виході теплогенератора):

- кількість гарячого повітря змінюється за допомогою частотного перетворювача;

- температура гарячого повітря регулюється за допомогою зміни кількості газо-повітряної суміші, що спалюється в топці теплогенератора.

Вказані обставини також вказують на те, що алгоритм керування має бути неперервним.

Методика вибору найкращого алгоритму керування для певного об'єкта полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання.

Для статичних об'єктів:

$$R_d = \frac{y_1}{K_{oy} \cdot y_{макс}}, \quad (5.1)$$

де  $K_{oy}$  – коефіцієнт передачі об'єкта керування;

$y_{макс}$  – макс. допустиме збурення по навантаженню, в % ходу РО;

$y_1$  – максимальне динамічне відхилення, %.

Проведемо розрахунки за умов наступних значень показників якості:

- максимальне динамічне відхилення  $y_1 = 1,5\%$ ;
- статична похибка  $\Delta y = 2,0^\circ\text{C}$ ;
- допустимий час регулювання  $t_p = 500 \text{ с}$ ;
- перерегулювання за збуренням  $\sigma = 0,2$ ;

- допустиме можливе значення збурення за навантаженням (у % переміщення регульовального органу)  $u_{МАКС} = 20\%$ .

За вихідними значеннями величина динамічного коефіцієнту

$$R_d = \frac{1,5}{0,67 \cdot 20} = 0,12.$$

Вибираємо для даного об'єкта перехідний процес із 20% перерегулюванням.

За графічними залежностями [6], визначаємо алгоритм керування – це ПІ-алгоритм.

Перевіримо, чи забезпечуватиметься при цьому необхідний час регулювання за виразом

$$t = \psi \cdot \tau, \quad (5.2)$$

де  $\psi$  - відносний час регулювання, для статичного об'єкту із ПІ-алгоритмом керування  $\psi = 12$  [6].

Тоді  $t_{P.II} = \psi \cdot \tau = 12 \cdot 20 = 240$ , видно, що  $240 < 500$ , тобто необхідний час регулювання забезпечується.

Перевіримо на виникнення при цьому статичної похибки.

За графічними залежностями [6], визначаємо

$$\frac{\Delta y}{k_{OY} \cdot u_{МАКС}} = 0,14, \quad \Delta y = k_{OY} \cdot u_{МАКС} \cdot 0,14 = 0,67 \cdot 20 \cdot 0,14 = 1,876^\circ C. \quad (5.3)$$

Умова  $1,876^\circ C < 2,0^\circ C$  виконується, тобто ПІ-алгоритм керування задовольняє технологічні вимоги до процесу керування температурою теплоносія в сущарці для яєчних продуктів.

## 5.2. Реалізація алгоритму керування

Згідно із функціональною схемою автоматизації (рис. 1.6), система керування температурою теплоносія складається з програмованого логічного контролера (ПЛК), який виконує функції керування різними контурами в залежності від інформації від різноманітних датчиків технологічного процесу

сушки яєчних продуктів, різних виконавчих механізмів, а також електрообладнання для керування цими виконавчими механізмами.

### 5.2.1. Вибір промислових пристроїв керування

Для отримання інформації від датчиків технологічного процесу, керування перетворювачем частоти та іншими виконавчими механізмами згідно із завданням на виконання магістерської роботи обраний програмований логічний контролер MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric (рис. 5.1).

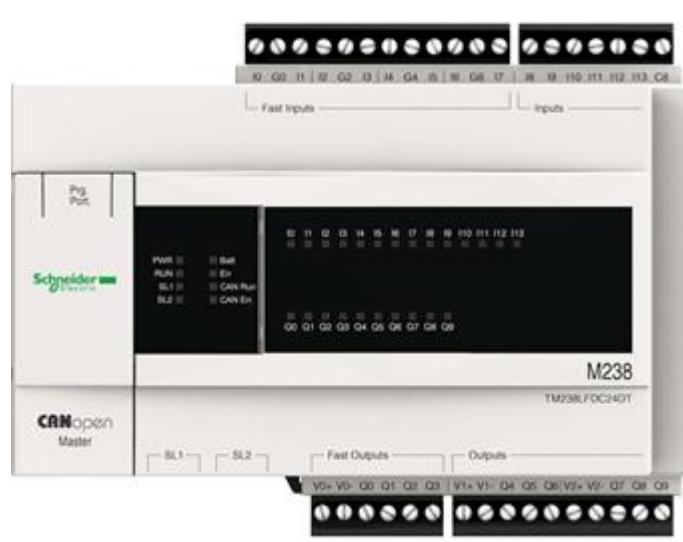


Рис. 5.1. Програмований логічний контролер MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric

Контролер MODICON TM238 – це універсальний модульний програмований контролер для вирішення задач автоматичного керування низького та середнього ступеня складності. Ефективному використанню контролерів сприяє наявність широкої гама центральних процесорів, модулів вводу-виводу дискретних і аналогових сигналів, функціональних і комутаційних модулів, модулів блоків живлення та інтерфейсних модулів.

Основні технічні характеристики ПЛК MODICON TM238 наведені в таблиці 5.1.

Для підключення датчиків температури та датчиків тиску використовується модуль розширення аналогових входів TM2AMM6HT Schneider Electric (рис. 5.2), розроблений для збільшення технічних можливостей ПЛК різних типів компанії Schneider Electric, зокрема MODICON TM238.

Таблиця 5.1.

## Технічні характеристики ПЛК MODICON TM238LFDC24DT

Напруга живлення	24 В постійного струму
Допустимі межі напруги живлення	19,2...28,8 В
Споживана потужність	17,2 Вт
Кількість дискретних входів/виходів	24
Кількість дискретних входів	8 швидкодіючих входів за EN/МЕК 61131-2 (тип 1) 6 входів за EN/МЕК 61131-2 (тип 2)
Напруга дискретних входів	24 В постійного струму
Кількість дискретних виходів	4 швидкодіючих виходів за EN/МЕК 61131-2 (тип 1) 6 виходів за EN/МЕК 61131-2 (тип 2)
Напруга дискретних виходів	24 В постійного струму
Пам'ять	Вбудована 1000 кБ
Напруга живлення датчиків	19,2...30,0 В
Струм дискретного входу	8 мА – швидкодіючий вхід 10,4 мА звичайний вхід
Струм дискретних виходів	500 мА швидкодіючий вихід (нормальний режим) 100 мА швидкодіючий вихід (режим ШІМ, режим РТО)
Час відклику	300 нс швидкодіючий вхід 3 мс звичайний вхід 0,25 мс швидкодіючий вихід < 1 мс звичайний вихід
Швидкість передачі даних CANopen	50 Кбіт/с (1000 м) 125 Кбіт/с (500 м) 250 Кбіт/с (250 м) 425 Кбіт/с (125 м) 800 Кбіт/с (50 м) 1000 Кбіт/с (20 м)
Робоча температура навк. середовища	-10...+55°C
Відносна вологість	95% без утворення конденсату
Ступінь захисту	IP20



Рис. 5.2. Модуль розширення аналогових входів TM2AMM6HT

### 5.2.2. Обґрунтування вибору датчика температури

Вибір датчика температури теплоносія, що подається в камеру сушіння, проводимо за методикою [6].

Так, за технологічним регламентом сушіння яєчних продуктів (таблиця 4.5. *Максимум швидкості сушіння, вміст сухих речовин, що відповідає максимальній швидкості процесу і раціональні значення параметрів*), оптимальна температура теплоносія, у потоці якого здійснюється сушіння яєчних продуктів, повинна складати 473°K, або 200°С.

Для того, щоб датчик у процесі вимірювання температури на заданому рівні не вносив недопустиму динамічну похибку вимірювання, його постійна часу  $T_{CE}$  повинна бути на порядок меншою від постійної часу об'єкта  $T_{OY}$ .

Постійна часу об'єкта для каналу керування  $T_{OY} = 100$ с. З огляду на сказане, постійна часу датчика повинна бути не більше 10 с.



Рис. 5.3. Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом  
Siemens Sitrans TS500-3G

Враховуючи вимоги за діапазоном вимірювання та інерційністю, а також особливості підключення датчиків температури до програмованих логічних контролерів, для вимірювання температури теплоносія обраний термоперетворювач опору загальнопромислового виконання Siemens Sitrans TS500-3G (рис. 5.3), технічні характеристики якого наведені в таблиці 5.2.

Датчик Siemens Sitrans TS500-3G широко використовується в енергетиці, у хімічній, нафтохімічній промисловості, у системах водопідготовки та водовідведення. Його перевагою є висока точність і можливість роботи при порівняно високих температурах (до 400°C).

Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом Siemens Sitrans TS500-3G призначені для неперервного перетворювання температури різних середовищ у пропорційний струмовий сигнал 4-20 мА дистанційної передачі. Датчик складається із вбудованого в головку вимірювального перетворювача із вихідним сигналом 4-20 мА та термозонду.

## Технічні характеристики термоперетворювача Siemens Sitrans TS500-3G

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур, °C	-30...+400
Показник теплової інерції, с	7
Клас допуску за ДСТУ 6651	A,B,C
Номінальна статична характеристика (НСХ)	Pt100
Клас точності	0,25%, (Pt100)
Кількість чутливих елементів, шт.	1
Схема внутрішніх з'єднань провідників	двохпровідна, трьохпровідна, чотирьохпровідна
Матеріал захисної арматури	сталь 12x1810T
Ступінь захисту	IP54, IP67

Вимірюваний параметр – температура – лінійно перетворюється термочутливим елементом у пропорційну зміну омичного опору, який, в свою чергу, перетворюється вимірювальним перетворювачем у струмовий вихідний сигнал.

За динамічними властивостями датчик є інерційною ланкою, передатна функція якого має вигляд  $W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1}$ .

Коефіцієнт передачі  $k_{CE}$  (чутливість), визначається за формулою

$$k_{CE} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{400 - (-30)} = 0,037 \text{ mA}/^{\circ}\text{C} \quad (5.4)$$

де  $\Delta T$  – різниця значень вимірюваних датчиком температур, °C (таблиця 5.2);

$\Delta I$  – різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, mA;

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає 7 с (таблиця 5.2), передатна функція датчика Siemens Sitrans TS500-3G

$$W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} = \frac{0,037}{7 \cdot s + 1} \quad (5.5)$$

### 5.2.3. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму САК температурою теплоносія

Регулюючим органом і виконавчим механізмом САК температурою теплоносія в камері для сушіння яєчних продуктів є відповідно регулювальний клапан зміни подачі газу і сервопривод, який обертає цей клапан.

Регулювальний орган – один із самих відповідальних елементів САК (від його працездатності багато в чому залежать надійність системи в цілому і надійність регулювання), безпосередньо діючих на об'єкт управління.

Вихідними даними для вибору регулюючого органу (РО) є:

$\gamma = 1 \text{ г/см}^3$  – об'ємна маса газоподібного палива;

$\nu = 0,2$  – в'язкість палива;

$Q_{\max} = 100 \text{ м}^3/\text{год.}$ ,  $Q_{\min} = 20 \text{ м}^3/\text{год.}$  – максимальна та мінімальна об'ємна витрати палива;

$P_1 = 15 \text{ кг/см}^2$  – абсолютний тиск в системі постачання палива до РО;

$\Delta P_c = 10 \text{ кг/см}^2$  – перепад тиску в системі;

$\Delta P_{L \max} = 4 \text{ кг/см}^2$  – максимальний перепад тиску в лінії.

Під час вибору регулюючих органів є певна послідовність розрахунків:

1. Обчислюють максимальну пропускну здатність регулюючого органу та його умовний діаметр.
2. Визначають робочий відрізок витратної характеристики.
3. Знаходять теоретичну витратну характеристику (для клапанів).
4. Визначають для рідини робочу ділянку кривої зміни перепаду тиску (для газу та пари знаходять максимальний та мінімальний перепади тиску).

Обчислюємо максимальну пропускну здатність РО:

$$K_{\gamma \max} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\min}}} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_c - \Delta P_{L \max}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{10 - 4}} = 41 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (5.6)$$

Регулювальний орган вибирають за умови, що

$$K_{\gamma} \succ 1,2 \cdot K_{\gamma \max} . \quad (5.7)$$

Тоді  $K_{\gamma} \geq 1,2 \cdot K_{\gamma \max} = 1,2 \cdot 41 = 49,2 \text{ м}^3/\text{год}.$

Таблиця 5.3.

Формули для розрахунку пропускної здатності [6]

Вид гідравлічного опору	Перепад тиску	Витрата		
		рідини Q	газу G	пари G
ВП	$\Delta P < P_1/2$	$K_{\gamma} = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\Delta P \cdot P_2 \cdot \gamma_n}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\Delta P}}$
	$\Delta P \geq P_1/2$		$K_{\gamma} = \frac{G}{257 \cdot P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\gamma_n}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{22,4} \cdot \sqrt{\frac{V}{\Delta P}}$
Лінія	$\Delta P_{л} < P_2/2$	$K_{\gamma_{л}} = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{л}}}$	$K_{\gamma_{л}} = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\Delta P_{л} \cdot P_3 \cdot \gamma_n}}$	$K_{\gamma_{л}} = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_3}{\Delta P_{л}}}$
	$\Delta P_{л} \geq P_2/2$		$K_{\gamma} = \frac{G}{257 \cdot P_2} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\gamma_n}}$	$K_{\gamma_{л}} = \frac{G}{2,4} \cdot \sqrt{\frac{V_1}{P_2}}$

За довідниковими даними [6] вибираємо регулювальний клапан з умовним діаметром  $D_y = 50\text{мм}$  і пропускною здатністю  $K_{\gamma \text{PO}} = 50 \text{ м}^3/\text{год}.$

В якості регулюючого елемента в клапані, зазвичай, застосовується або шток спеціальної конструкції, який може рухатися у вертикальному напрямку, або куля чи заслінка яка може повертатися навколо осі. При цьому регулюючий елемент не здійснює повне перекриття клапана, а перерозподіляє потоки рідин, тим самим виробляючи їх змішування.

Поправки на в'язкість не вводимо, оскільки індекс в'язкості:

$$z = 420 \cdot \frac{Q_{\max}}{\nu \cdot \sqrt{K_{\gamma \max}}} = 420 \cdot \frac{100}{0,2 \cdot \sqrt{41}} = 32813 > 1000. \quad (5.8)$$

Знаходимо робочу ділянку витратної характеристики вибраного регулюючого органу. Для цього скористуємось виразом з таблиці 5.3:

$$K_{\gamma_{л}} = Q_{\max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{л \max}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 50 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (5.9)$$

Визначаємо відношення перепаду тиску на РО при максимальній витраті до перепаду тиску в лінії:

$$n = \frac{K_{\gamma_{PO}}}{K_{\gamma_L}} = \frac{50}{50} = 1. \quad (5.10)$$

Уточнюємо перепад тиску на виконавчому пристрої:

$$\Delta P_{ВП} = \frac{\Delta P_C}{1+n^2} = \frac{10}{1+1^2} = 5 \text{ кгс/см}^2. \quad (5.11)$$

Визначаємо витрату рідини через виконавчий пристрій в разі перепаду тиску на ньому:

$$Q_{ВП} = K_{\gamma_{PO}} \sqrt{\frac{\Delta P_{ВП}}{\gamma}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{5}{1}} = 112 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (5.12)$$

Знаходимо відносну максимальну та мінімальну витрату рідини:

$$\mu_{\max} = \frac{Q_{\max}}{Q_{ВП}} = \frac{100}{112} = 0,89; \quad \mu_{\min} = \frac{Q_{\min}}{Q_{ВП}} = \frac{20}{158} = 0,18. \quad (5.13)$$

За графіком (додаток Г1) вибираємо витратну характеристику ВМ, згідно якої відносний хід затвора регулювального органа (плунжера):

$$l_{\min}=0,12; \quad l_{\max}=0,8.$$

При цьому відношення перепаду тиску на РО до перепаду тиску в системі змінюється від  $\beta_{\max}=0,95$  до  $\beta_{\min}=0,68$  (додаток Г2), що відповідає наступним перепадам:

$$\beta_{\max} = \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_c}; \quad \beta_{\min} = \frac{\Delta P_{\min}}{\Delta P_c}. \quad (5.14)$$

Потім розраховуємо значення:

$$\Delta P_{\max} = \beta_{\max} \cdot \Delta P_c = 0,95 \cdot 10 = 9,5 \text{ кг/см}^2; \quad (5.15)$$

$$\Delta P_{\min} = \beta_{\min} \cdot \Delta P_c = 0,68 \cdot 10 = 6,8 \text{ кг/см}^2. \quad (5.16)$$

Таким чином, після розрахунку необхідного регулюючого органу, отримуємо дані для вибору виконавчого механізму.

**Вибір виконавчого механізму САК температурою пари на виході котлоагрегату.** Виконавчим механізмом (ВМ) називається пристрій автоматики, який діє безпосередньо або через погоджуючі елементи на регулюючий орган об'єкта управління. ВМ, як частина системи

автоматичного керування, призначений для відпрацювання управляючого сигналу, який формується управляючими елементами автоматики таким чином, щоб відхилення регулюючої величини від заданого значення становило якнайменше значення. Виконавчі механізми, які з'єднані безпосередньо з регулюючими органами, переміщують їх відповідно до сигналу, що надходить від пристрою, який формує алгоритм керування.

До ВМ пред'являють ряд вимог:

- здатність розвивати необхідне переставне зусилля або момент, достатні для перестановки регулюючого органу об'єкта,
- забезпечити перестановку регулюючого органу на потрібну величину,
- забезпечити потрібну швидкість і прискорення переміщення регулюючого органу,
- мати високі техніко-економічні показники (надійність, ціна та ін.).

ВМ обираються залежно від величини обертального моменту необхідного для переміщення регулюючого органу [6]:

$$M_z = k \cdot (M_p + M_m), \quad (5.17)$$

де  $M_p$  – реактивний момент:

$$M_p = 0.07 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^3 = 0.07 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^3 \approx 0.83 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_m = 0.785 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^2 \cdot r_m \cdot \lambda = 0.785 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0.15 \approx 0.28 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_z = 2 \cdot (0.83 + 0.28) = 2.22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент обертання валу обраного виконавчого механізму повинен бути більшим за момент, необхідний для обертання заслінки:  $M_H > M_z$ .

В якості електроприводу, яким комплектується регулюючий клапан, виступає сервопривод, побудований на електродвигуні невеликої потужності і системі передач.

Для приводу клапана обраний сервопривод BELIMO LM24A-SZ-TPC (рис. 5.4), що за технічними характеристиками задовольняє зазначені умови.

Передатна функція виконавчого механізму (сервоприводу) є інтегруючою ланкою

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{s}, \quad (5.18)$$

де  $k_{BM}$  - коефіцієнт передачі виконавчого механізму, град./с.;

$$k_{BM} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (5.19)$$

$\Delta t$  - проміжок часу, с;

$\Delta\varphi_{OB}$  - кут повороту вихідного валу за проміжок часу  $\Delta t$ , град.

Таблиця 5.4.

Технічні характеристики сервоприводу BELIMO LM24A-SZ-TPC

Тип	Максимальний момент навантаження, Н·м	Час повного ходу, сек/90°	Температура навколишнього середовища, °С	Ступінь захисту	Маса, кг
LM24A	10	58	0...+60	IP65	3,5



Рис. 5.4. Виконавчий механізм - сервопривод BELIMO LM24A-SZ-TPC

Напруга живлення 24 В.  $k_{BM} = \frac{90}{58} = 1,56 \frac{\text{град}}{\text{сек}}$ .

$$W_{BM}(s) = \frac{1,56}{s}.$$

Оскільки конструктивно у сервоприводі реалізований зворотний зв'язок за положенням (реостатний датчик положення), то остаточна передатна функція виконавчого механізму визначається як

$$W_{BM}(s) = \frac{W_{CEEP}(s)}{1 + W_{CEEP}(s)} = \frac{\frac{1,56}{s}}{1 + \frac{1,56}{s}} = \frac{1,56}{s + 1,56} = \frac{1}{\frac{1}{1,56} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,64 \cdot s + 1}.$$

#### 5.2.4. Вибір частотного перетворювача

Згідно із розробленою функціональною схемою (рис. 1.6), в якості пристрою для керування електродвигуном приводу відцентрового вентилятору подачі теплоносія в камеру сушіння яєчних продуктів передбачається використання частотного перетворювача серії **Altivar ATV312** фірми **Schneider Electric** (рис. 5.5).

Промисловий перетворювач частоти Altivar ATV312 відноситься до серії продуктів Altivar Process ATV300 компанії Schneider Electric і розроблений для керування моментом обертання, плавного пуску та зупинки синхронних та асинхронних трифазних електродвигунів. Перетворювач частоти Altivar ATV312 використовується у різних галузях промисловості та сільського господарства: у вентиляційних системах, у нафтогазовій, металургії, харчовій, у системах водопостачання та водовідведення.

Ці перетворювачі оснащені вбудованим модулем реалізації ПД-алгоритму керування.

Частотні перетворювачі (інвертори) служать для плавного, безступінчастого регулювання швидкості трифазних асинхронних електродвигунів. Регулювання відбувається за рахунок створення на виході трифазного струму змінної частоти. Перетворювач дозволяє відстежувати і відображати на цифровому табло основні параметри – задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність і момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача і т.д.

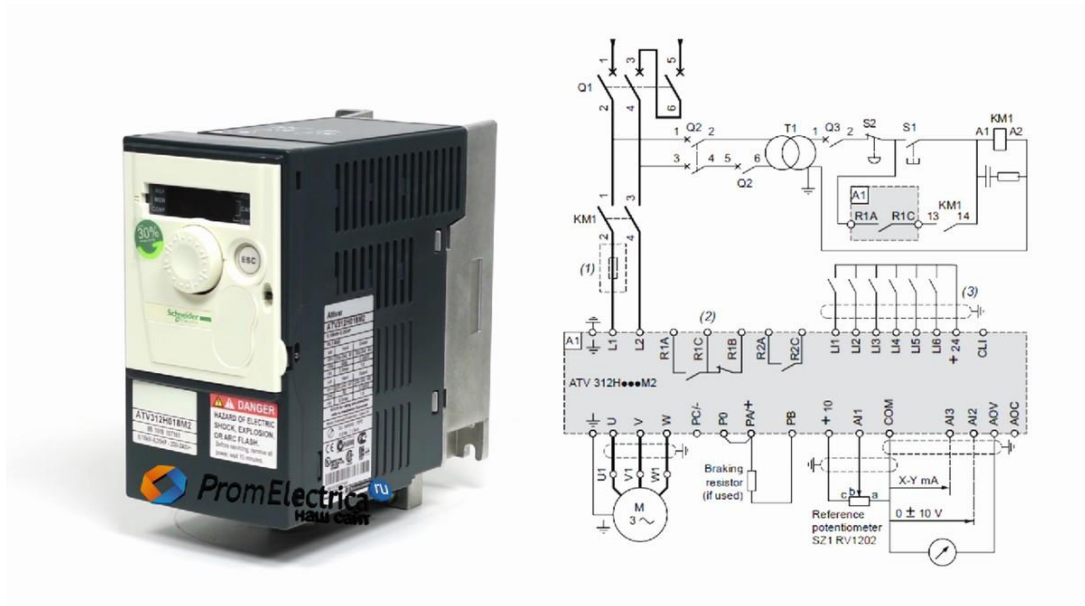


Рис. 5.5. Зовнішній вигляд перетворювача частоти  
Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

Технології, реалізовані у частотних перетворювачах типу Altivar ATV312, роблять дану серію однією з самих досконалих розробок в даному класі. Серія ATV312 охоплює діапазон потужності від 0,75 до 75 кВт.

Можливості перетворювача Altivar ATV312:

- діапазон вихідних частот: 0,2-400 Гц;
- 15 програмованих установок швидкості;
- векторне керування із самоналагодженням на двигун або  $U/f$ -керування (поєднання векторного керування та функції компенсації ковзання дозволяє забезпечувати не менше 150% від початкового моменту двигуна, починаючи з частоти 1 Гц);
- функція оптимізації часу розгону/гальмування;
- вбудований ПД-регулятор (із прямою та зворотною характеристикою) може бути використаний, наприклад, для регулювання температури, витрати або тиску;
- передбачено два способи зупинки двигуна: контрольованим гальмуванням або вільним вибігом;

- автоматичний перезапуск після провалу живлення із можливістю пуску на двигун, що обертається;
- вбудований інтерфейс RS-485 зв'язку з ПК (швидкість обміну даними складає до 19500 бод).
- види захисту електродвигуна або групи двигунів:
  - вимикання при перевищенні крутного моменту;
  - захист від перевантаження, обриву/перекоосу фаз;
  - захист від перегріву;
  - захист від коротких замикань.

У перетворювач частоти вбудована функція "Stop&Go", яка зменшує споживання електроенергії у режимі очікування до 60%.

Altivar ATV312 дозволяє не тільки вимірювати кількість спожитої електроенергії із похибкою менше 5%, але і проконтролювати відхилення енергоспоживання системи від номінальних значень. Причому розрахунок витрати спожитої енергії перетворювач частоти ATV312 виконує без додаткового датчика і у тих одиницях вимірювання, що вибрані користувачем.

Наявність вбудованого порту Ethernet дозволяє швидко отримати доступ до параметрів налаштування і конфігурації ATV312.

Технічне виконання перетворювача частоти залежить від електродвигуна, яким він керує, і визначається за таблицею 4.6.

Оскільки для приводу відцентрового вентилятора TCF200 BC - SIS W подачі теплоносія в камеру сушіння яечних продуктів використовується асинхронний трифазний електродвигун потужністю 18,5 кВт (таблиця 1.3, Розділ 1), згідно з табл. 5.5 необхідно використати перетворювач Altivar ATV312HD18N4.

Технічні характеристики моделей перетворювачів частоти  
типу Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

Номер за каталогом	Потужність, кВт	Струм в усталеному режимі, А	Перевантаження за струмом, 60 сек., А	Габарити, ВхШхГ	Маса, кг
ATV312U075N4	0,75	2,2	2,4	143x107x150	2
ATV312U15N4	1,50	3,7	4	143x107x150	2
ATV312U22N4	2,20	5,1	5,6	143x107x150	2
ATV312U30N4	3	7,2	7,9	184x142x150	3,350
ATV312U40N4	4	9,1	10	184x142x150	3,350
ATV312U55N4	5,5	12	13,2	184x142x150	3,350
ATV312U75N4	7,5	16	17,6	232x180x170	6,450
ATV312HD11N4	11	22,5	24,8	232x180x170	6,450
ATV312HD15N4	15	30,5	33,6	232x180x170	11,650
ATV312HD18N4	18,5	37	40,7	330x245x190	11,650
ATV312HD22N4	22	43,5	47,9	330x245x190	26,400

## РОЗДІЛ 6

### РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Цифрові системи керування – це системи, в яких безперервні сигнали перетворюються в цифрові коди і керування здійснюється з використанням алгоритмів обробки цифрової інформації.

Цифрові системи керування передбачають перетворення безперервних сигналів у цифрові коди та зворотне перетворення цифрових кодів у безперервні сигнали. Такі перетворення здійснюють аналогово-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі. У таких перетворювачах здійснюється квантування як за часом так і за рівнем.

#### 6.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Види дискретизації:

- за часом
- за рівнем
- одночасна дискретизація за рівнем і за часом

Задача вибору раціонального періоду квантування  $T_k$  є однією з основних проблем реалізації ЦСК. При зменшенні часу керування точність керування цифровою системою збільшується, але при цьому зростає завантаження мікроЕОМ масивами інформації. При збільшенні часу квантування втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування  $T_k$ , який задовольнив би такі суперечливі вимоги.

Згідно з теоремою Котельникова, для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати  $2\omega_c$ , де  $\omega_c$  – найвища частота вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж  $\omega_c$  рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу за інтервалом  $T_k = \pi/\omega_c$ .

При подальших розрахунках нехтуємо передатною функцією виконавчого механізму внаслідок його малої інерційності.

Визначення передатної функції неперервної частини розімкненої системи

$$W_{PO3}^{HЧ}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} \cdot \frac{k_{OY}}{T_{OY} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} = \frac{k_{CE} \cdot k_{OY} \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot s^2 + (T_{CE} + T_{OY}) \cdot s + 1} \quad (6.1)$$

$$W_{PO3}^{HЧ}(s) = \frac{0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}{700 \cdot s^2 + 107 \cdot s + 1}.$$

Передатна функція замкненої неперервної частини

$$W_{3AM}^{HЧ}(s) = \frac{W_{PO3}^{HЧ}(s)}{1 + W_{PO3}^{HЧ}(s)} \quad (6.2)$$

$$W_{3AM}^{HЧ}(s) = \frac{0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}{(700 \cdot s^2 + 107 \cdot s + 1) + 0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}.$$

У результаті розв'язання рівняння

$$\frac{k_{CE} \cdot k_{OY}}{\sqrt{(-T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot \omega^2 + 1 + k_{CE} k_{OY})^2 + (T_{CE} \cdot T_{OY})^2 \cdot \omega^2}} = 0,01 \cdot A(\omega = 0). \quad (6.3)$$

отримаємо в кінцевому рахунку час квантування.

Скориставшись математичним пакетом Mathcad, отримаємо значення частоти (рис. 6.1) та періоду квантування.



## 6.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування

Аналогічно з неперервними системами, в цифрових системах можна реалізувати ПІ-алгоритм керування (рис. 6.2).

Синтез ПІ-регулятора полягає у знаходженні параметрів  $K_p, K_i$ .

Параметр інтегральної складової регулятора, який залежить від добротності за швидкістю  $K_v$  неперервної частини, визначається за виразом

$$K_i = \frac{K_v}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{н.ч.}(z)} \quad (6.5)$$

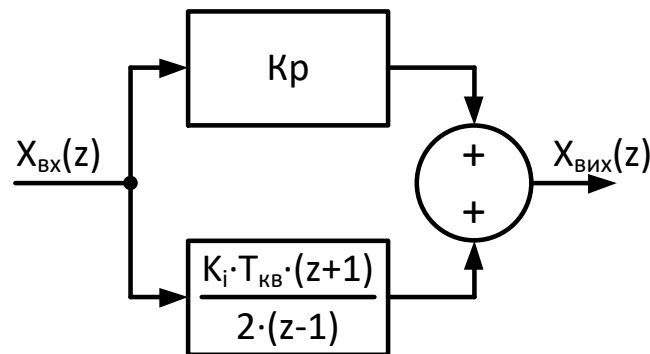


Рис. 6.2. Структурно-алгоритмічна схема цифрового ПІ-регулятора:  $K_p, K_i$  – параметри відповідно пропорційної та інтегральної складових ПІ-регулятора,  $T_{кв}$  – період квантування

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (табл. 6.1).

Таблиця 6.1.

Визначення добротності за швидкістю

$T_o, c$	$K_v$
~1	3...10
~10	0,3...1
~100	0,01...0,04
~1000	0,004...0,012

Згідно з таблицею  $K_v = 0,025$ , оскільки  $T_{oy} = 100$  с.

Для визначення передатної функції  $W_{н.ч.}(z)$  застосовуємо пакет імітаційного моделювання MATLAB (Лістинг 6.1), використовуючи операції завдання передатної функції неперервної системи

$$w = \text{tf}([K_0], [T_V \cdot T_0 \quad T_V + T_0 \quad 1])$$

та Z-перетворення неперервної передатної функції на дискретну  $W_z = \text{c2d}(w, T_K)$ , де  $w$  – змінна, що отримала вираз неперервної передаточної функції,  $T_K$  – період квантування.

```
>> Wou=tf([0.67],[100 1],'OutputDelay',20)

Transfer function:
          0.67
exp(-20*s) * ----
          100 s + 1

>> Wce=tf([0.037],[7 1])

Transfer function:
    0.037
-----
    7 s + 1

>> W=Wou*Wce

Transfer function:
          0.02479
exp(-20*s) * ----
          700 s^2 + 107 s + 1

>> Wz=c2d(W,8.468)

Transfer function:
0.0002933 z^2 + 0.03046 z + 0.008044
-----
          z^3 - 0.8239 z^2 + 0.04038 z

Sampling time: 8.468
```

Лістинг 6.1. Z-перетворення неперервної частини розімкненої САК у  
MATLAB

При синтезі ПІ-регулятора ми нехтуємо малою постійною часу СЕ, оскільки ПІ-регулятор компенсує лише один полюс Z-перетворення неперервної частини:

```

>> Wou=tf([0.67],[100 1])

Transfer function:
    0.67
-----
 100 s + 1

>> Wouz=c2d(Wou,8.468)

Transfer function:
    0.0544
-----
  z - 0.9188

Sampling time: 8.468

```

Лістинг 6.2. Полюс Z-перетворення неперервної частини,  
що компенсується регулятором у MATLAB

Тоді

$$K_i := \frac{0.025}{\left( \frac{0.0002933 \cdot 1^2 + 0.03046 \cdot 1 + 0.008044}{1^3 - 0.8239 \cdot 1^2 + 0.04038 \cdot 1} \right)} = 0.179$$

Після знаходження  $K_i$  параметр  $K_p$  визначаємо таким чином, щоб компенсувати полюс Z-перетворення неперервної частини системи.

Передатна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{PI}}(z) &= \frac{K_i \times T z + 1}{2} \frac{1}{z - 1} = \frac{2 \times K_p \times z - 2 \times K_p + K_i \times T \times z + K_i \times T}{2z - 2} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T)z + (K_i \times T - 2 \times K_p)}{2(z - 1)} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[ z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z - 1)}
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий  $K_p$ , який би задовольняв рівняння:

```

Kp := 1

Given

(Ki*Ts - 2*Kp) / (Ki*Ts + 2*Kp) = -0.7716

Find(Kp) = 16.357

```

Лістинг 6.3. Знаходження параметра  $K_p$  цифрового ПІ-регулятора  
у пакеті Mathcad

Для дослідження показників якості роботи цифрової системи використана модель у пакеті імітаційного моделювання MATLAB/Simulink (рис. 6.3) та отримаємо перехідний процес цифрової системи з ПІ-регулятором (рис. 6.4).

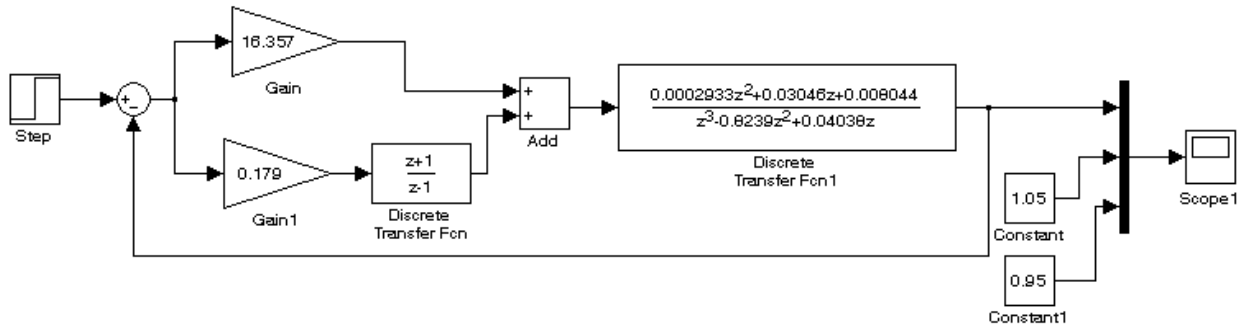


Рис. 6.3. Структурно-алгоритмічна схема цифрової системи керування температурою теплоносія у пакеті MATLAB/Simulink

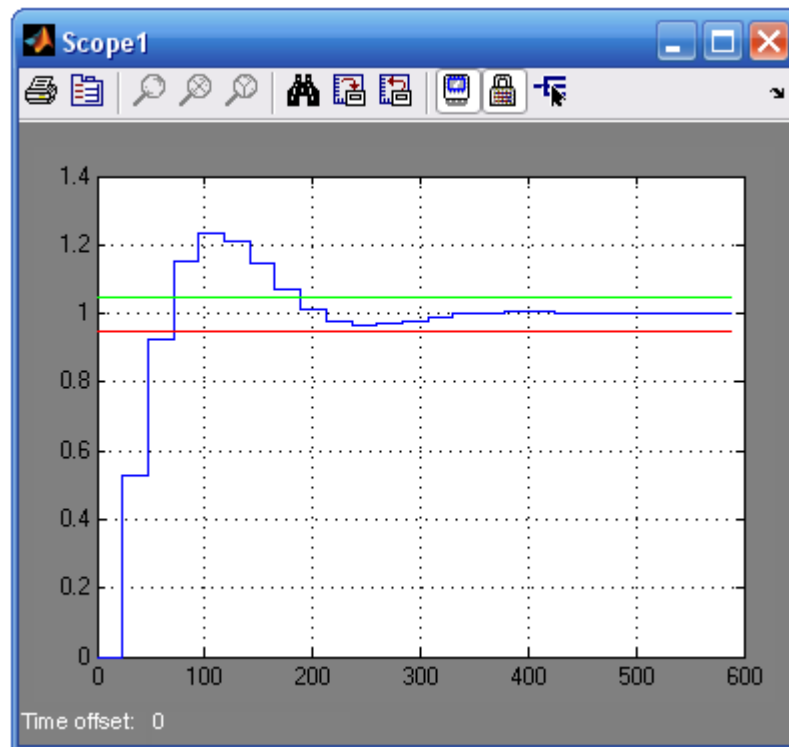


Рис. 6.4. Перехідний процес цифрової САК температурою теплоносія у камері для сушіння яєчних продуктів

За характером перехідного процесу видно, що система є стійкою із наступними показниками якості роботи:

- час регулювання  $t_p = 177$  с;
- перерегулювання  $\sigma = 22\%$ ;
- коливальність  $n=1$ ;
- відсутня статична похибка.

Отримані показники задовольняють технологічні вимоги до процесу керування температурою теплоносія в сушарці для яечних продуктів.

## РОЗДІЛ 7

### РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ЗАСОБІВ ЛЮДИНО-МАШИННОГО ІНТЕРФЕЙСУ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ

#### 7.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування сушаркою для яєчних продуктів

Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування обладнанням установки для сушіння яєчних продуктів наведений на рис. 7.1.

Для технічної реалізації обраного алгоритму керування процесом сушіння яєчними продуктами використовується програмований логічний контролер MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric (**D1**).

Інформація про стан технологічних параметрів системи надходить до контролера від

- датчиків температури Siemens Sitrans TS500-3G **D5, D6, D7, D8** (відповідають датчикам TE (1-3), TE (1-4), TE (1-9), TE (1-10) на функціональній схемі автоматизації);

- датчиків тиску XMLG010D21 **D9, D10, D11, D12** (PE (1-5), PE (1-6), PE (1-7), PE (1-8) на функціональній схемі автоматизації). Вказані датчики передають свої значення через модуль розширення аналогових входів TM2AMM6HT (**D2**).

Для керування електродвигуном (**M1**) потужністю 18,5кВт приводу відцентрового вентилятора подачі теплоносія (нагрітого повітря) у камеру сушіння, де у потоці цього повітря здійснюється сушка яєчних продуктів, використовується частотний перетворювач Altivar ATV312HD18N4 (**U1**), який, в свою чергу, отримує сигнали керування через інтерфейс RS-485 від програмного логічного контролера (**D1**).

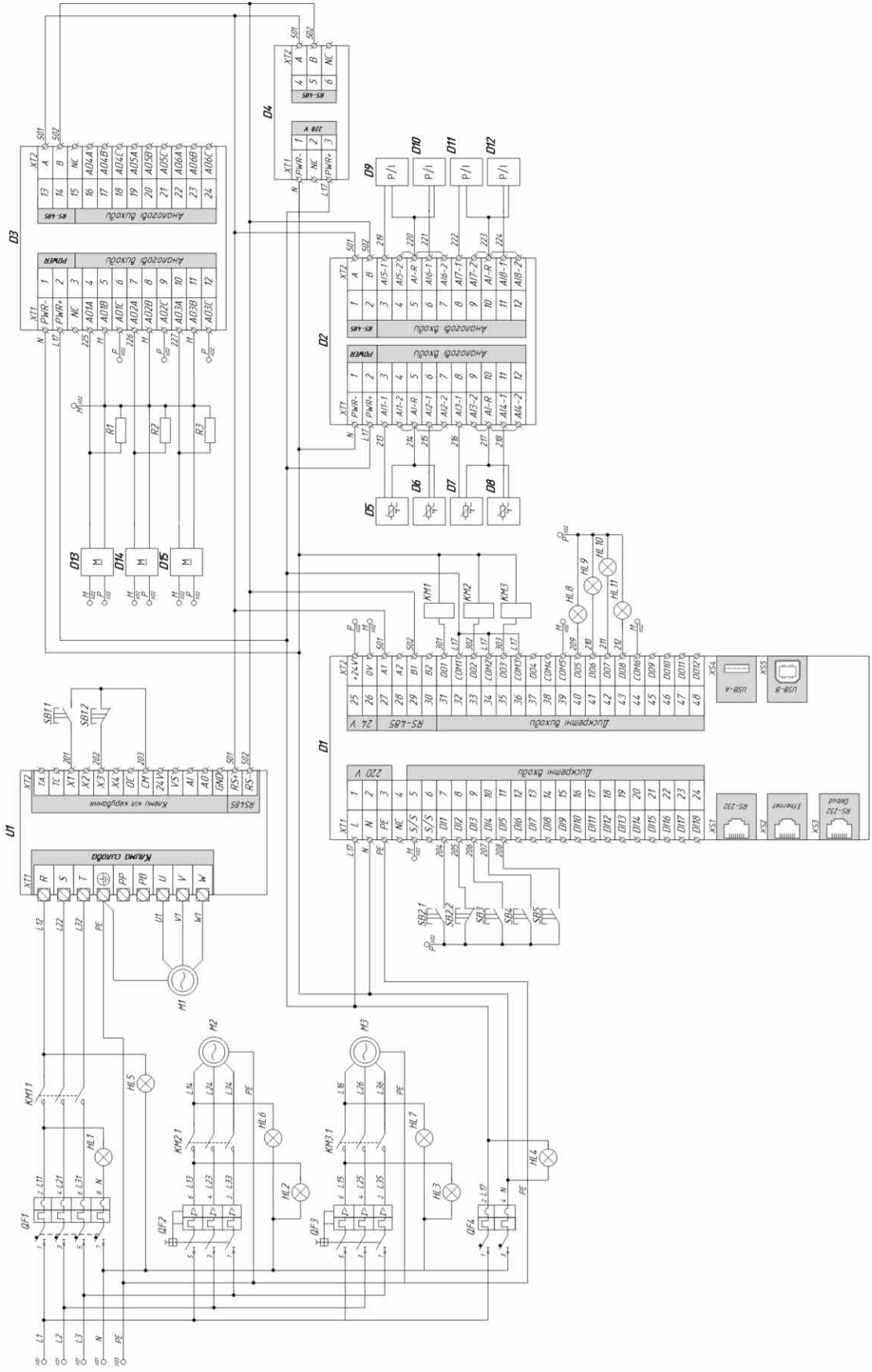


Рис. 7.1. Фрагмент схеми електричної принципової системи керування сушаркою для яєчних продуктів

Аналогічним чином здійснюється керування електродвигуном (**M5**) потужністю 22кВт приводу витяжного відцентрового вентилятора за допомогою подібного частотного перетворювача ATV312HD22N4 (на принциповій схемі цей контур керування не показаний).

Для керування виконавчими механізмами – сервоприводами BELIMO SM24A (**D13**, **D14**, **D15**) використовується модуль аналогового виведення TM2AMM6HT (**D3**), який також отримує сигнали керування від ПЛК.

На фрагменті електричної принципової схеми зображене також обладнання керування електродвигуни (**M2**) приводу насоса подачі робочої яєчної суміші (потужність 0,75кВт) та основного електродвигуна (**M3**) компресора високого тиску (потужністю 11,25кВт).

## **7.2. Розробка засобів візуалізації процесу керування сушаркою для яєчних продуктів**

*Система RSVIEW32* – це інтегроване програмне забезпечення **людино-машинного інтерфейсу (HMI)** для збору даних, оперативного контролю та управління автоматизованими пристроями й технологічними процесами. Виробник RSVIEW32 – компанія **Rockwell Automation**, визнаний світовий лідер у сфері виробництва комплексних засобів для автоматизації. RSVIEW32 – це програмний продукт, що є одним із компонентів комплексу засобів для візуалізації технологічних процесів **ViewAnyWare** компанії Rockwell Automation.

ViewAnyWare – це набір операторських інтерфейсів, PC-сумісних робочих станцій і програмного забезпечення, що має такі спільні риси:

- висока надійність обладнання та ПЗ;
- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача;
- використання лише відкритих комунікаційних стандартів;
- сумісність із повним спектром апаратних платформ **Allen Bradley**;

- відкрита та гнучка архітектура, заснована на **DNA for Manufacturing** компанії Microsoft.

Варто зазначити, що попри те, що компанія **Rockwell Automation** виробляє засоби автоматизації Allen-Bradley, система RSVIEW32 призначена не лише для роботи з цим обладнанням. RSVIEW32 підтримує всі сучасні технології Windows і легко інтегрується з більшістю апаратних платформ за допомогою **OPC** і **DDE**, а також із програмними продуктами **Rockwell Software**, **Microsoft** та іншими, ефективно використовуючи технології **ActiveX**, **VBA**, **OLE** та **ODBC**.

Особливості **SCADA-системи RSVIEW32**. Загалом **SCADA** – це програмне забезпечення, призначене для допомоги інженеру у створенні надійної та швидкодіючої системи управління процесом у найкоротші терміни. Саме тому користувачів **SCADA** перш за все цікавлять такі аспекти ПЗ для управління: зручність розробки проєктів; продуктивність; комунікації.

#### *Розглянемо, як ці вимоги реалізовані в RSVIEW32.*

**1) Розробка графічного представлення процесу.** Система розробки **RSVIEW32** використовує сучасні технології Windows і надає користувачеві інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для створення «екранів» – графічних представлень ділянок технологічного процесу. Кожен проєкт RSVIEW32 може містити будь-яку кількість екранів, кожен із яких відображає певну деталізацію керованого об'єкта. Екрани **RSVIEW32** можуть містити як прості графічні об'єкти (еліпси, прямокутники тощо), так і складніші елементи, такі як тренди або звіти за сигналами тривоги.

RSVIEW32 пропонує низку засобів і технологій для зменшення часу розробки та спрощення створення візуалізації, серед яких:

- **Об'єктно-орієнтоване проєктування**, що спрощує реалізацію проєктів;
- **Великий набір графічних бібліотек**, що складається з сотень об'єктів;

- **Можливість імпорту растрової графіки** популярних графічних форматів, а також креслень і векторної графіки, створених у **CorelDRAW** або **AutoCAD**;
- **Створення власних бібліотек графічних об'єктів**;
- **Використання графічних об'єктів і елементів керування ActiveX.**

Оператор отримує візуальну інформацію про всі зміни керованого процесу, що передається через анімацію екранів. Анімація в **RSView32** реалізується за допомогою керування видимістю, кольором, заповненням, положенням, розміром та обертанням.

**RSView32** надає такі можливості анімації:

- Технологія **«Object Smart Path»** – для визначення діапазону руху графічного об'єкта на дисплеї достатньо просто розмістити його у початковій і кінцевій позиціях. **RSView32** автоматично розрахує всі проміжні стани об'єкта;
- **Групування об'єктів** та виконання анімації над групами;
- **Копіювання елементів анімації** із одного об'єкта на інший.
- Якщо розробнику проекту недостатньо вбудованих можливостей **RSView32**, він може автоматизувати НМІ-додатки за допомогою потужної вбудованої мови програмування **Visual Basic for Applications (VBA)**. Середовище **VBA** призначене для розширення функціональності **RSView32**. Запускати **VBA**-підпрограми можна за подією, у макрокоманді або вручну з командного рядка. Фрагменти коду **VBA**, які реалізують багато типових задач, можна вільно отримати на сайті виробника.
- **Контроль значень і протоколювання:** Незважаючи на те, що у добре розробленому **НМІ-проекті** всі основні критичні ділянки виконання системи повинні бути візуалізовані, у великих проєктах оператору неможливо контролювати всю систему одночасно. Для його підтримки використовуються спеціальні **сигнали сповіщення**. Крім того, стани деяких об'єктів необхідно

протоколювати для подальшої обробки даних. **RSView32** пропонує цілий комплекс засобів для **сповіщення оператора та протоколювання даних**.

- **Відстеження трендів:** Тренди – це візуальне представлення поточних або накопичених параметрів процесу, що дозволяє операторам відстежувати роботу промислового об'єкта через графіки. **RSView32** дозволяє будувати графіки з використанням до 16 змінних на один тренд та застосовувати затінення, що виділяє момент перетину параметром контрольного значення.

- **Виявлення подій:** Події в **RSView32** – це арифметичні або логічні вирази, що застосовуються до тегів і параметрів процесів у керованій системі. Ці вирази визначають настання події та ініціюють реакцію SCADA-системи. Реакція може включати **автоматичне виконання команд або макросів**.

- **Контроль сигналів тривоги:** Сигнали тривоги – це сповіщення, які попереджають оператора про настання критичних чи аварійних подій, що потребують негайного втручання. Вони можуть бути визначені як для дискретних, так і для **аналогових параметрів** процесу.

- При надходженні **сигналів тривоги** **RSView32** виконує визначені користувачем дії, серед яких може бути зупинка процесу, видача світлової або звукової сигналізації чи попередження. Для аварійних подій ведеться спеціальний журнал сигналів тривоги, що дозволяє переглядати інформацію про критичні ситуації. Журнал повністю налаштовується, тобто користувач може визначити, яка інформація повинна міститися в ньому і в якому форматі.

#### **Користувач може протоколювати:**

- **Діяльність системи**, записуючи інформацію про її роботу, зокрема виконання команд, макрокоманд, системні повідомлення та помилки або проблеми зі зв'язком;

- **Дані**, забезпечуючи запис значень тегів (або даних) при настанні певних подій. Зареєстровані дані зберігаються у файлах і можуть переглядатися за допомогою трендів;

- **Сигнали тривоги**, фіксуючи інформацію про аварійні ситуації, коли певні теги переходять у стан тривоги або виходять із нього, при підтвердженні сигналів тривоги чи їх придушенні за допомогою механізму контролю тривоги.

Вся запротокольована інформація зберігається у форматі **dBase IV (dbf)** або може бути передана до бази даних у форматі **ODBC**.

**2) Зв'язок із обладнанням.** Для комунікації з керованими пристроями RSVIEW32 використовує високопродуктивні стандарти **OPC або DDE**, які стали основними технологіями зв'язку між верхнім і нижнім рівнями автоматизації. Практично всі виробники промислового обладнання постачають свої пристрої разом із **OPC/DDE-сервером**.

**OPC (OLE for Process Control)** дозволяє RSVIEW32 виступати як клієнт або сервер, забезпечуючи передачу даних як між різними станціями RSVIEW32, так і з іншими серверами OPC. Для обміну даними через DDE, RSVIEW32 підтримує стандартний DDE або високошвидкісний Advanced DDE.

**3) Моніторинг тегів.** У складі пакета RSVIEW32 є утиліта моніторингу тегів, що дає змогу перевірити наявність зв'язку SCADA-системи з кожним виконавчим пристроєм у будь-який момент часу.

**4) Налагодження проєктів.** Налагодження є важливою частиною процесу розробки. Згідно з деякими даними, час на тестування складного проєкту може кілька разів перевищувати час його розробки. Потужне засіб налагодження системи автоматизації дозволяє мінімізувати час тестування, а також запобігти помилкам у готовій системі.

RSVIEW32 пропонує унікальні засоби тестування та налагодження:

- **Тестовий запуск окремих ділянок** для швидкого тестування певного екрана, графічного об'єкта чи анімації, що дозволяє отримати дані з об'єкта та запустити лише окрему частину проєкту без запуску всієї системи;

- **Редагування проєкту в режимі онлайн** – у RSVIEW32 можна змінювати інтерфейс без завершення процесу; всі зміни набудуть чинності під час наступного відкриття відповідного вікна;

- **Тестування за різних умов**, використовуючи набори параметрів, які розглядаються як єдиний стан системи («рецепти»).

**5) Захист проєктів.** При запуску важливо обмежити доступ різних операторів до окремих частин проєкту. RSVIEW32 надає можливість захисту проєктів за допомогою 16 рівнів доступу та системного захисту.

- Захист на рівні проєкту дозволяє обмежити доступ користувачів або груп до певних дисплеїв або заборонити зміну значень тегів.
- Захист на системному рівні заблоковує користувачів всередині проєкту RSVIEW32, не дозволяючи вихід до операційної системи Windows.

Розглянемо **графічне представлення деяких елементів процесу роботи системи керування установкою для сушки яєчних продуктів, виконане у пакеті RSVIEW32**, що забезпечує збір даних, оперативний контроль та керування окремими пристроями і технологічним процесом в цілому. Розгляд здійснимо

На рис. 7.2 представлено вікно візуалізації процесу приготування робочої суміші яєчної сировини і підготованої води, з чого і починається робота установки.

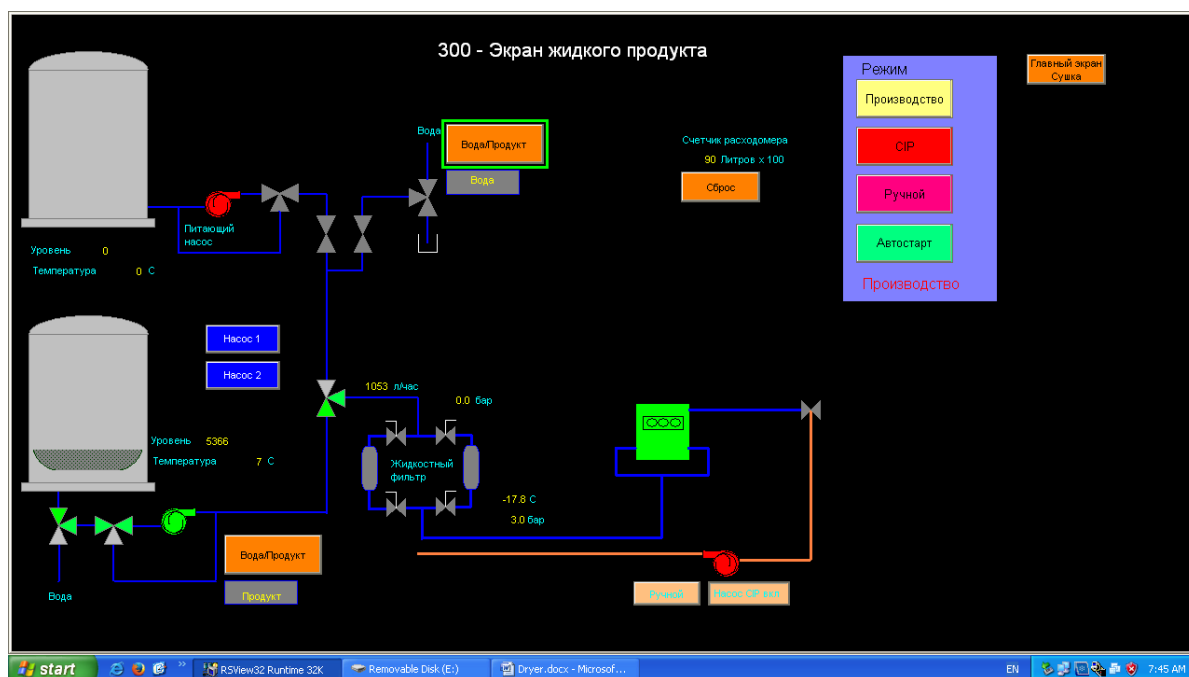


Рис. 7.2. Екран візуалізації контролю і керування процесом приготування робочої суміші

На рис. 7.3 наведено одне із вікон налаштування датчиків технологічного процесу.

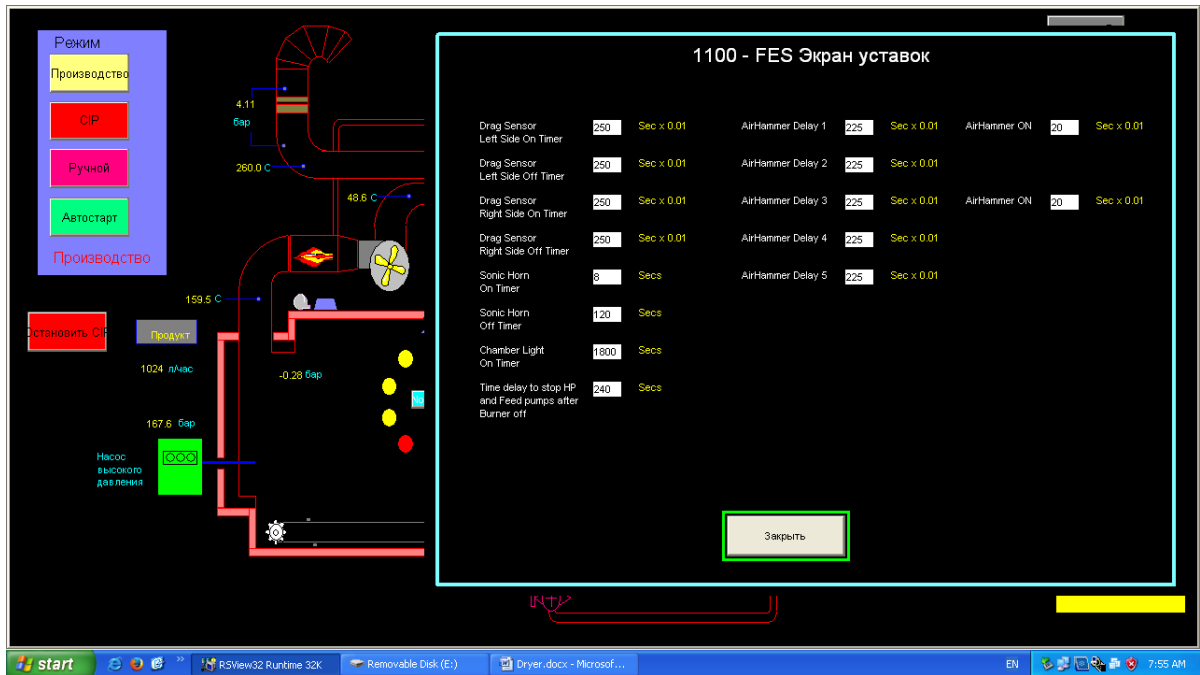


Рис. 7.3. Вікно налаштування датчиків технологічного процесу

Оскільки передбачене як ручне, так і автоматичне керування технологічним процесом сушки яєчних продуктів, то для кожного із цих режимів передбачене окреме вікно оператора (рис. 7.4 та 7.5 для ручного режиму, 7.6 для автоматичного відповідно).

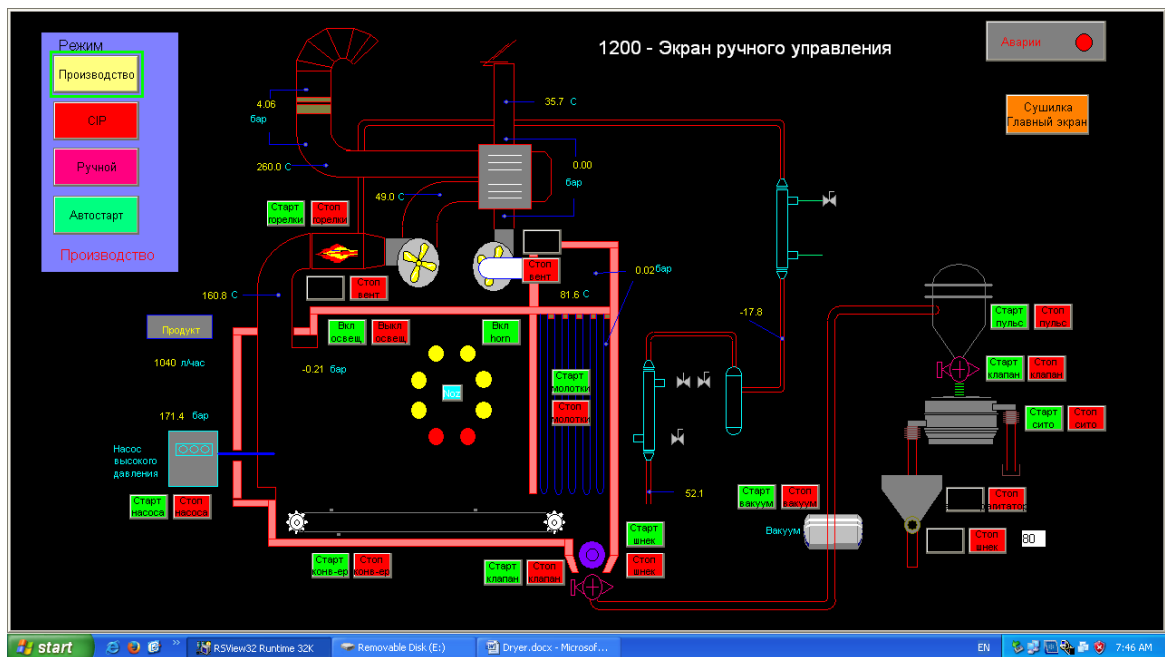


Рис. 7.4. Вікно для ручного керування оператором

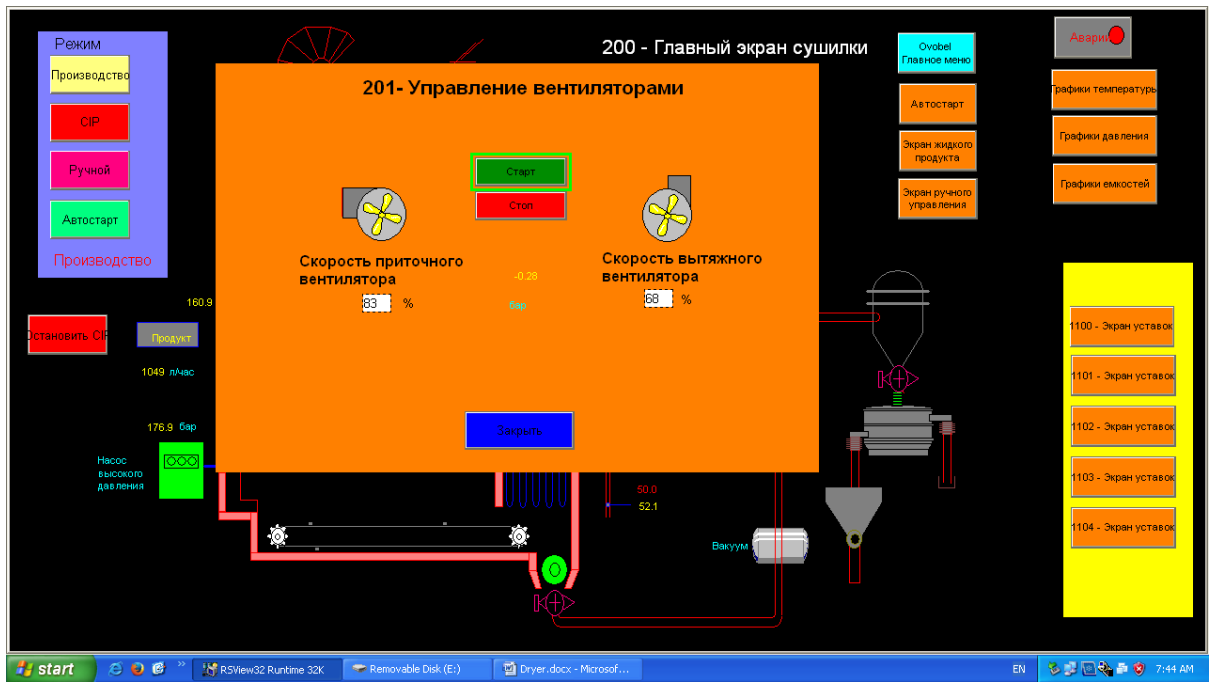


Рис. 7.5. Вікно ручного керування припливним та витяжними вентиляторами

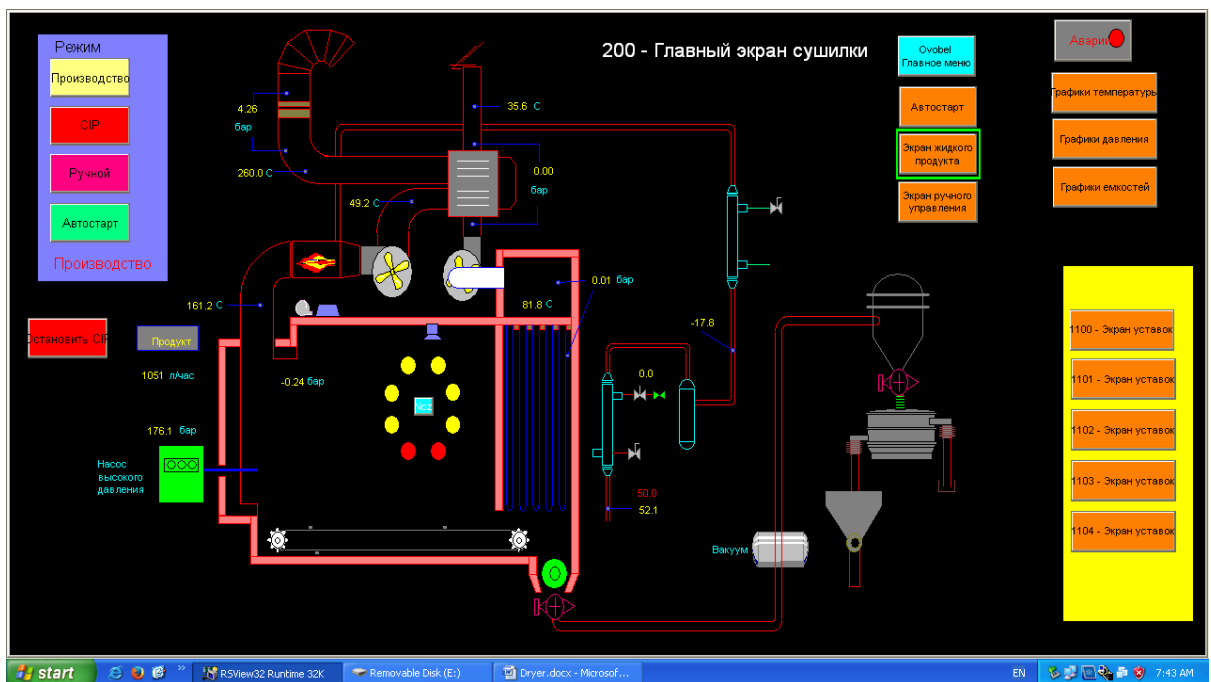


Рис. 7.6. Вікно роботи установки в автоматичному режимі

Розроблений проект передбачає виведення на екран необхідних графіків зміни технологічних параметрів у часі (рис. 7.7). Температурні значення окремих ділянок технологічного процесу можна виводити на екран як у градусах Цельсія, так і у градусах Фаренгейта.



Рис. 7.7. Графічне представлення зміни технологічних параметрів сушки у часі

## ВИСНОВКИ

При виконанні кваліфікаційної магістерської роботи отримані наступні результати.

1) Визначені перспективні напрямки удосконалення тепломасообміну при сушінні яєчних продуктів на основі аналізу способів сушки та конструкторських рішень для їх здійснення із урахуванням енергетичних затрат, інтенсивності процесу і вимог до сировини і якості готового продукту.

2) Досліджені статика процесу зневоднення і властивості жовткової суміші як об'єкту сушіння. Досліджений механізм та термодинамічні закономірності взаємодії жовткової суміші із водою. Рекомендовані кінцеві значення вологості жовткової суміші курячих яєць, яких необхідно досягти при сушці для подальшого тривалого зберігання жовткового порошку. Проведені експериментальні дослідження та визначені щільність та теплопровідність жовткової суміші для реальних діапазонів зміни вологості та температури у процесі сушки.

3) Досліджений механізм внутрішнього тепломасопереносу при сушці жовткової суміші на основі дослідження кінетики сушки. Встановлено, що на відміну від зневоднення твердих капілярно-пористих структур при сушці розпиленням наявні певні специфічні особливості внаслідок того, що сушка рідкої жовткової суміші відбувається інтенсивно у краплинах малих розмірів.

4) Розроблені і рекомендовані до впровадження раціональні режими сушки яєчних продуктів. Запропонована 2-х зонна раціоналізація розпилювальної сушки при комбінації прямого та додаткової перехресної подачі сушильного агенту у періоді спадаючої швидкості сушіння. Порівняно із традиційним прямоточним контактом, запропонована організація процесу дозволяє збільшити питому продуктивність сушарок і забезпечити якісні показники готової продукції за рахунок пом'якшення режиму термічного впливу. Рекомендовані раціональні режими зневоднення жовткової суміші дозволяє використовувати типові конструкції розпилювальних сушильних

установок. Впровадження розроблених режимів дозволяє вирішити ряд задач при організації сушіння: підвищити питому продуктивність промислових сушильних комплексів при скороченні часу процесу та зменшення габаритів сушильної камери; підвищити показники якості продукції при скороченні термічного впливу на продукт.

5) Розроблений алгоритм отримання комбінованих раціональних режимів 2-х зонної розпилювальної сушки. Реалізація запропонованих заходів при відповідній модернізації розпилювальної сушильної техніки збільшить продуктивність та термічний коефіцієнт корисної дії установок без додаткових енергетичних витрат.

6) Обґрунтований вибір алгоритму керування температурою теплоносія сушарки, вибраний комплекс технічних засобів автоматизації компанії Schneider Electric, визначені показники якості роботи цифрової системи керування. Розроблені електрична принципова схема системи керування обладнанням установки для сушіння яєчних продуктів та засоби візуалізації системи керування із людино-машинним інтерфейсом.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Агафоничов, В.П. Білок і жовток яєчні сухі з покращеними функціональними якостями [Текст] / В.П. Агафоничов, С.С. Кругальов, Т.П. Петрова, Л.І. Каренін // Птиця і продукти птахівництва. 2006. - №3. - С. 48 - 50.
2. Алексанян, І.Ю. Математичне моделювання тепломасопереносу при сушінні методом розпилення рослинних екстрактів [Текст] / І.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова // Вісник ХГПУ. Науковий журнал. Серія: Управління, обчислювальна техніка та інформатика. 2013. №1 (Лютий). Харків: ХДПУ, 2013. С. 9 – 13.
3. Бесулін В. І. Птахівництво і технологія виробництва яєць та м'яса птиці : підруч. / В. І. Бесулін, В. І. Гужва, С. М. Куцак. – Біла Церква, 2003. – 448 с.
4. Боженко Л.І. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація. – Львів: Афіша, 2006. - 324 с.
5. Вінникова Л.Г., Поварова Н.М., Синиця О.В. Основи птахівництва та переробки птиці. – К.: «Освіта України», 2020. – 216 с.
6. В.П. Лисенко, І.М. Болбот, В.А. Наливайко, К.В. Наконечна, Т.І. Лендел, Д.Є. Жук. Проектування систем автоматизації для АПК: Підручник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2022. – 626 с.
7. В.П. Лисенко, І.М. Болбот, С.А. Шворов, В.В. Коваль, Н.А. Заєць, Т.І. Лендел, К.В. Наконечна, А.І. Болбот. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи магістрів: Навчальний посібник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2023. – 462 с.
8. Гвоздєв О.В., Ялпачик Ф.Ю., Рогач Ю.П., Кюрчева Л.М. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: Навч. посібник /За ред. О.В. Гвоздева. – Суми: Довкілля, 2004. – 420 с.
9. Гінзбург А.С. Масовологообмінні характеристики харчових продуктів / А.С. Гінзбург, І.М. Савіна. – М.: Легка і харчова промисловість, 1982. - 280 с.
10. Головінський Б.Л. Теорія автоматичного управління: навч.посіб. / Б.Л. Головінський, Ю.В. Шуруб, В.П. Лисенко. – К.: Вид.Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
11. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005. – Т.2. Вимірювальна техніка. – 656 с.
12. Домарецький В.А., Остапчук М.В., Українець А.І. Технологія харчових продуктів . Київ, 2003. – 572 с.
13. ДСТУ 8719:2017 «Продукти яєчні. Технічні умови». Затверджені наказом від 27.06.2017 № 161 Про прийняття національних нормативних документів та скасування національних та міждержавних нормативних документів.

14. Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини: навч. посібник / М. І. Погожих, В. О. Потапов, А. О. Пак, М. В. Жеребкін. – Х. : ХДУХТ, 2016. – 234 с.
15. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів / В. Лисенко, С. Чернищенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов. – К.: АграрМедіаГруп, 2016. – 476 с.
16. Кругальов, С.С. Досягнення і перспективи в області переробки яєць [Текст] / С.С. Кругальов, Т.Н. Петрова // Птиця і продукти птахівництва. 2004. - № 6. - С. 28-31.
17. Ликов, А.В. Теорія сушіння [Текст] / А.В. Ликов. - М.: Енергія, 1968. – 471 с.
18. Мойса, В.Ю. Гарантія якості харчових продуктів: перспективи у Європі та США [Текст] / В.Ю. Мойса // Птиця та її переробка, 2000. - № 2. - С. 39 – 42.
19. Никитина, Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах [Текст] / Л.М. Никитина. - М.: Энергия, 1968. – 500 с.
20. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с.
21. Орлова Є.І., Лещенко В.О., Бухкало С.І. Приклади і задачі до курсу «Загальна технологія харчових виробництв». Харків: НТУ «ХП», 2001. – 140 с.
22. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко . – Вінниця: ВНТУ , 2012. – 522 с.
23. Патрєва Л.С. Технологія виробництва продукції птахівництва: курс лекцій / Л.С. Патрєва, О. А. Коваль. – Миколаїв : МНАУ, 2018. – 248 с.
24. Погожих М.І. Наукові основи теорії та техніки сушіння харчової сировини у масообмінних модулях. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківська державна академія технології та організації харчування Міністерства освіти і науки України, Харків, 2002.
25. Сидоров Ю.І., Влязло Р.Й., Новіков В.П. Процеси і апарати мікробіологічної та фармацевтичної промисловості. — Львів: Інтеллект Захід, 2008. – 736 с.
26. Скокан, Л.Є. Оцінка якості основних видів сировини, що використовується у кондитерському виробництві, по мікробіологічним показникам [Текст] / Л.Є. Скокан // К.: Зберігання і переробка сільськогосподарської сировини. 2000. №2. - С. 18-24.
27. Сміт Р., Клемеш Й., Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Уль'єв Л.М. Основи інтеграції теплових процесів. – Харків: НТУ «ХП», 2000. – 457 с.

28. Технічні засоби автоматизації (Частина 2) / М.В. Лукінюк, В.П. Лисенко, В.Є. Лукін, А.М. Гладкий, С.А. Шворов, А.А. Руденський, А.А. Заверткін. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2018. – 455 с.
29. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., БУХКАЛО С.І., КАПУСТЕНКО П.О., ОРЛОВА Є.І. Загальна технологія харчових виробництв у прикладах і задачах. Київ, 2005. – 496 с.
30. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., БУХКАЛО С.І., КАПУСТЕНКО П.О., ХАВІН Г.Л. Основні технології харчових виробництв і енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2005. – 460 с.
31. ХОМИК Н.І. Механізація переробки та зберігання сільськогосподарської продукції: курс лекцій / Н.І. Хомик, В.П. Олексюк, О.П. Цьонь – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2016. – 288с.
32. Цуркан Н.М., Погожих Н.І., Потапов В.А. Експериментальний метод визначення ефективних теплообмінних характеристик капілярно-пористих тіл // Технології у машинобудуванні: Вісник ХДПУ. Харків: ХДПУ, 2000. Вип.89.С. 57-60.
33. Цуркан Н.М., Погожих Н.І., Потапов В.А. Вплив ступеню заповнення функціональних ємностей на кінетику СТП-сушки / Нові технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб.наук.пр. Харків: ХДАТОХ, 1999. С.171-174.
34. Черепанов, С.В. Глибока переробка яєць: світова практика і тенденції [Текст] / С.В.Черепанов // Птахівництво. - 2005.-№1.- С.32-34.
35. Штелє, Л. Харчова цінність яєць різної маси і моделювання їх калорійності [Текст] / Л. Штелє, Л. Філатов // Птахівництво. 2012.- №6.-С.40-43.
36. Chen, X.D. Drying Technologies in Food Processing [Text] / X.D. Chen, Mujumdar A.S. – Oxford: Blackwell Publishers, 2008.- 360 p. ISBN: 1405157631 ISBN-13(EAN): 9781405157636
37. Dietary Reference Intakes: Energy, Carbohydrates, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids (Macronutrients) [Text] / National Academies Press. – Washington, 2002. - 46 p.
38. May, B.K. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs [Text] / B.K. May, P. Perré // Journal of Food Eng. – 2002. - Vol. 54, № 4. – P. 271–282.
39. Shah R.K., Sekulic D.P. Fundamental of Heat Exchanger Design. – John Wiley & Sons, Inc, 2003. – 976 p.
40. Прогноз розвитку ринку яєць і яєчних продуктів. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://pro-capital.ua/press\\_center/expert/prognoz-razvitiya-rynka-yaicz-i-yaichnyx-produktov-%E2%80%93-kommentarii-analitikov-pro-consulting.-delovaya-stolicza/](https://pro-capital.ua/press_center/expert/prognoz-razvitiya-rynka-yaicz-i-yaichnyx-produktov-%E2%80%93-kommentarii-analitikov-pro-consulting.-delovaya-stolicza/)
41. Шнайдер Електрик Україна. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/>

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А1

## Органолептичні показники яєчних продуктів

Назва показника	Характеристика яєчного продукту	
	Рідкого	Сухого
Зовнішній вигляд і консистенція	Однорідний продукт без сторонніх домішок	
	Без залишків шкаралупи, плівок, твердий в замороженому стані, рідкий в охоложеному розморожених стані, при цьому жовток - більш густий	Порошкоподібний або у вигляді гранул, грудочки легкоруйнуються при натисканні пальцем
колір: - меланжу і жовтка - білка	Від жовтого до помаранчевого Від світло-жовтого до світло- зеленого	Від світло-жовтого до оранжевого Від білого до жовтуватого
Запах і смак	Властивий яєчним продуктам, без сторонніх	

## ДОДАТОК А2

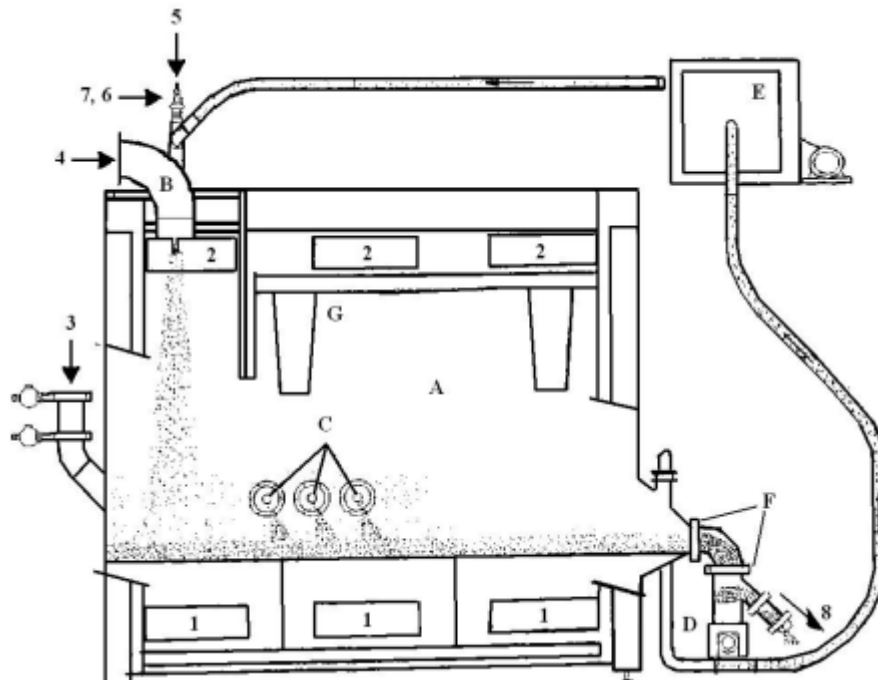
## Фізико-хімічні показники яєчних продуктів

Назва показника	Норма для яєчного продукту					
	Рідкого			Сухого		
	меланжу	білку	жовтка	меланжу	білку	жовтка
Масова частка, %, не менше: сухої речовини	23,5	11,5	43,0	95,0	92,0	95,0
Жиру	10,0	—	26,0	38,0	—	53,0
Білкових речовин	10,0	11,0	15,0	45,0	85,0	35,0
Масова частка вільних жирних кислот у жирі, в перерахунку на олеїнову, %, не більше	—	—	—	3,5	—	3,5
Розчинність, %	—	—	—	Неменше8 5,0	Неменше9 0,0	Не більше 40,0
Концентрація водневих іонів, рН	Неменше 7,0	Неменше 8,0	Неменше 5,9	—	—	—
Альфа-амілазний	Негативний					
Сторонні домішки	Не допускаються					

## ДОДАТОК АЗ

**Узагальнена технологічна схема установки сушарки  
із розпилювальною колонною:**

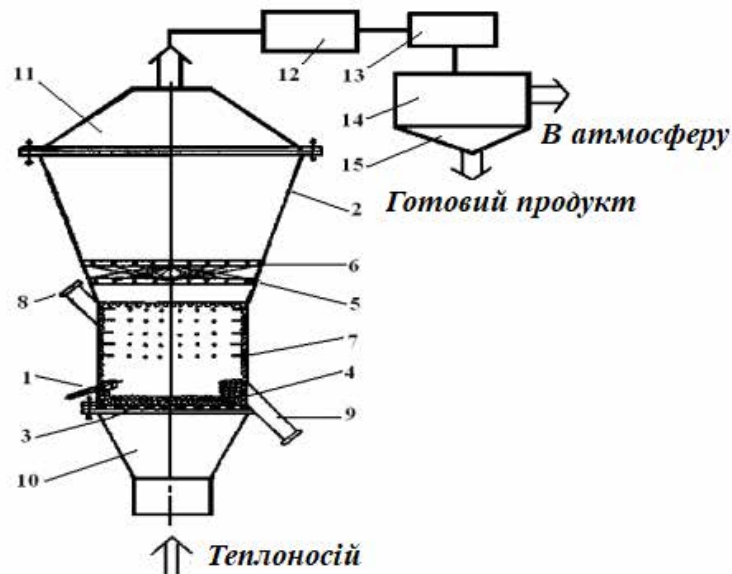
- 1 – камери введення повітря, 2 – камери видалення повітря, 3 – завантаження,  
 4 – подача гарячого повітря, 5 – подача рідини, 6 – розпорошене повітря,  
 7 – нагрівачий агент, 8 – продукт, 9 – порошок,  
 А – установка з псевдозрідженим шаром, В - модуль розпилювальної сушки,  
 С - грануляційні сопла, D - дозуючий пристрій для порошку, Е - вентилятор  
 для повернення порошку, F - лопатевий клапан, G - динамічний фільтр



## ДОДАТОК А4

## Розпилювальна сушарка з інертною насадкою:

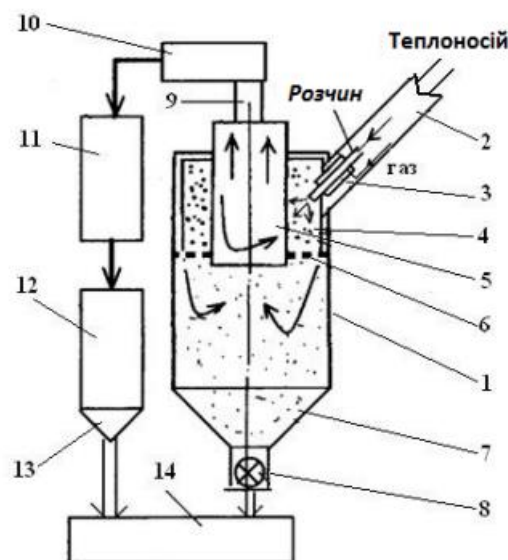
- 1 - акустична пневматична форсунка, 2 - камери, 3- газорозподільна решітка, 4 - інертні тіла, 5 і 6 ободи, 7 - відбійник, 8 і 9 патрубки, 10 - короб, 11 - кришка, 12 - акустична установка, 13 - циклон, 14 - рукавний фільтр, 15- бункер



## ДОДАТОК А5

## Розпилювальна сушарка типу ВЗП з інертним носієм:

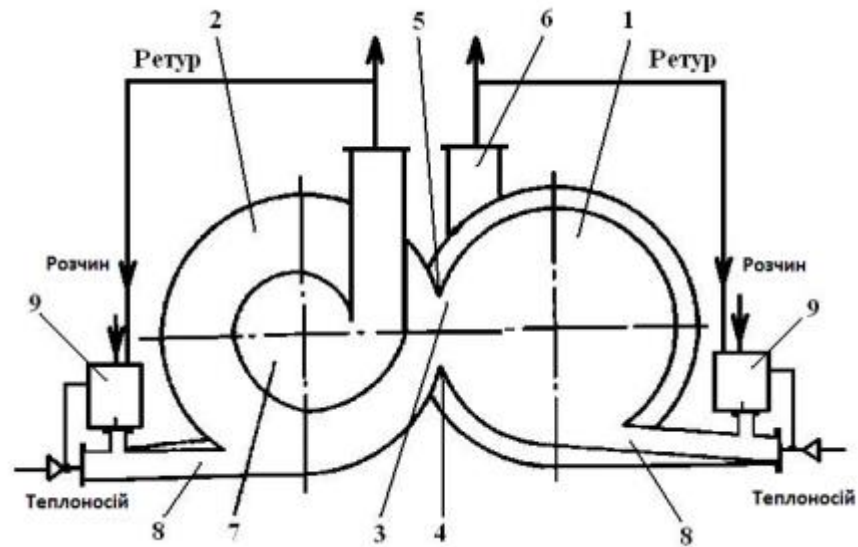
- 1 - циліндричний корпус, 2 - тангенціальні сопла, 3 - пневматичні форсунки, 4 - шар інертного матеріалу, 5 - центральний газохід, 6 - перфорована решітка, 7 - бункер, 8 - затвор, 9 - трубопровід, 10 - акустична установка, 11 - циклон, 12 - рукавний фільтр, 13 - бункер, 14 – транспортер



## ДОДАТОК А6

## Установка для вихрової розпилювальної сушки:

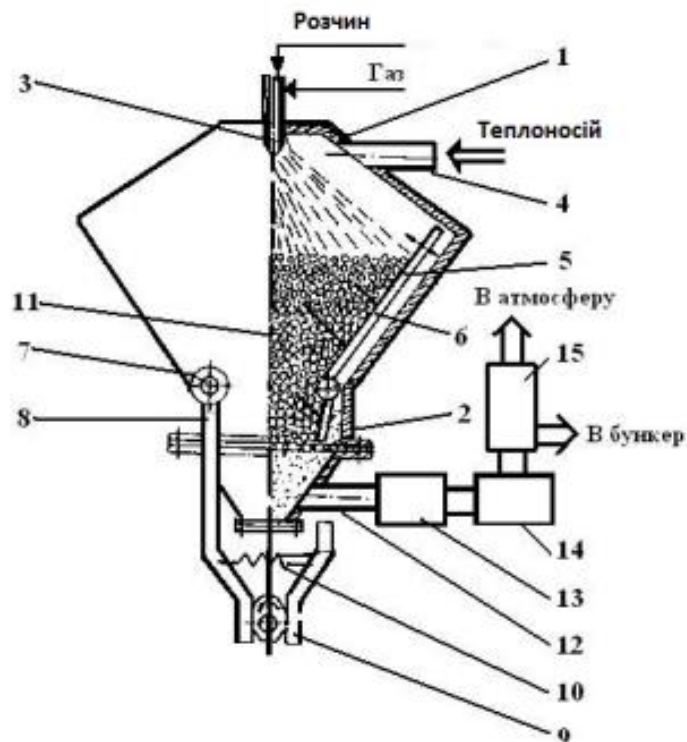
1, 2 - вихрові камери, 3 - вікно, 4,5- гребені, 6,7- патрубок, 8 - патрубок,  
9 - пристрій подачі вихідного розчину



## ДОДАТОК А7

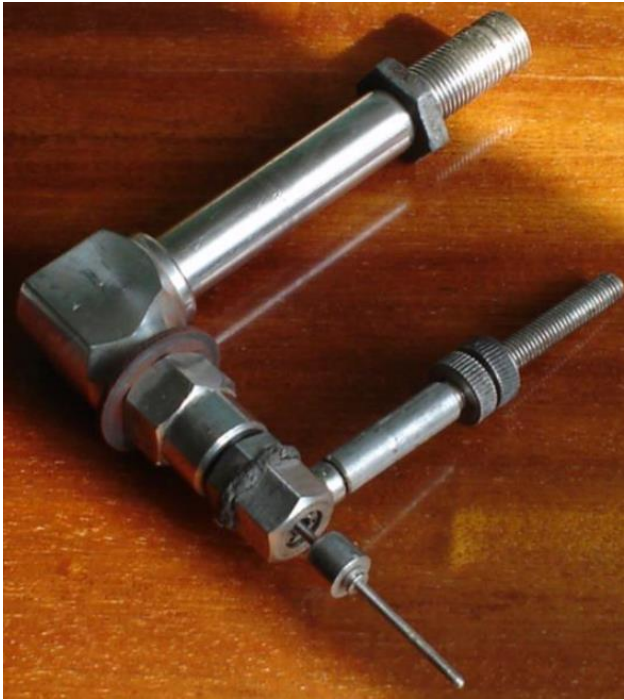
## Розпилювальна сушарка киплячого шару з інертною насадкою:

1 - сушильна камера, 2 - газорозподільна решітка, 3 - акустична форсунка, 4 - патрубок введення теплоносія, 5 - інертна насадка, 6 - вібруючі пластини, 7 - вал, 8 - штанги, 9 - кулачок, 10 - пружина, 11 - додаткові пластини, 12- патрубок виведення теплоносія, 13 - акустична установка, 14 - циклон, 15 - рукавний фільтр



## ДОДАТОК Б1

Акустична форсунка із газоструменевим випромінювачем Гартмана (а) та поршневий компресор Atmos Bobby 4/46 із однофазним електродвигуном (б)



а)



б)

## ДОДАТОК Б2

Характеристика факелу розпилювання жовткової суміші курячих яєць

Кореневий кут, град.	120÷135
Далекобійність, м	0,3÷0,65
Середній характерний розмір розпилених краплин, мкм	20÷30

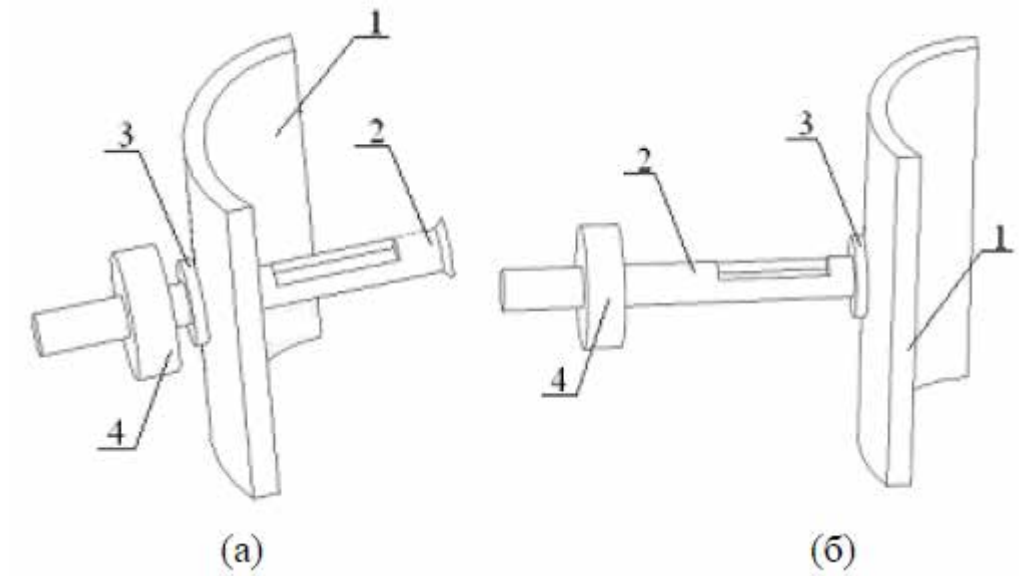
## ДОДАТОК БЗ

Технічні характеристики компресора Atmos Bobby 4/46 і параметри  
робочого режиму розпилення жовткової суміші

<b>Технічні характеристики компресора</b>	
Об'єм ресивера, л	46
Потужність однофазного електродвигуна, кВт	4
Напруга живлення, В	220 В, 50 Гц
Кількість всмоктуваного повітря, л/год.	550
Максимальний тиск повітря, бар	8
Номінальна швидкість обертання валу двигуна, об./хв.	2850
Габаритні розміри, мм	700x410x660
Маса, кг	46
<b>Робочий режим розпилення</b>	
Тиск повітря, бар	3÷6
Витрата продукту на розпилення $G_{W_n}$ , кг/год.:	
Жовткова суміш із початковою вологістю $W_n = 0,54$ кг/кг	6
Відстань від соплових отворів форсунки до резонатора, мм	2÷6

## ДОДАТОК Б4

## Конструктивне виконання відбірника проб



а) завантаження відбірника проб; б) його розвантаження;

1 – стінка сушильної камери; 2 – відбірник проб; 3 – штуцер; 4 – запобіжник

$\tau, c$	$W_1, \text{кг/кг}$	$W_2, \text{кг/кг}$	$W_3, \text{кг/кг}$	$W, \text{кг/кг}$	$S_m, \text{кг/кг}$	$S_W, \text{кг/кг}$	$\Delta W, \text{кг/кг}$	$\varepsilon_W, \%$
$T_{\text{прод}} = 278\text{К}$ и $T_{c.a.} = 423\text{К}$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,452	0,457	0,44	0,450	0,009	0,005	0,022	4,820
1,8	0,31	0,32	0,3	0,310	0,010	0,006	0,025	8,008
2,3	0,19	0,2	0,21	0,200	0,010	0,006	0,025	12,413
2,9	0,145	0,138	0,138	0,140	0,004	0,002	0,010	7,167
3,6	0,086	0,084	0,086	0,085	0,001	0,001	0,003	3,373
4,5	0,063	0,065	0,059	0,062	0,003	0,002	0,008	12,233
5,0	0,051	0,049	0,05	0,050	0,001	0,001	0,002	4,965
5,4	0,045	0,046	0,045	0,045	0,001	0,000	0,001	3,185
6,1	0,04	0,041	0,038	0,040	0,002	0,001	0,004	9,481
$T_{\text{прод}} = 278\text{К}$ и $T_{c.a.} = 448\text{К}$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,7	0,485	0,465	0,46	0,470	0,013	0,008	0,033	6,988
1,5	0,32	0,31	0,33	0,320	0,010	0,006	0,025	7,758
2,2	0,149	0,147	0,155	0,150	0,004	0,002	0,010	6,891
2,9	0,1	0,105	0,095	0,100	0,005	0,003	0,012	12,413
3,6	0,065	0,064	0,064	0,064	0,001	0,000	0,001	2,240
4,0	0,052	0,055	0,055	0,054	0,002	0,001	0,004	7,963
4,2	0,05	0,048	0,051	0,050	0,002	0,001	0,004	7,584
4,8	0,044	0,043	0,04	0,042	0,002	0,001	0,005	12,305

## ДОДАТОК ВІ

Результати експериментального визначення вологості та їх статистичної обробки при дослідженні  
Кінетики конвективної розпилювальної сушки жовткової суміші курячих яєць

$\tau, c$	$W_1, \text{кг/кг}$	$W_2, \text{кг/кг}$	$W_3, \text{кг/кг}$	$W, \text{кг/кг}$	$S_n, \text{кг/кг}$	$S_w, \text{кг/кг}$	$\Delta W, \text{кг/кг}$	$\epsilon_w, \%$
$T_{\text{прод}} = 278\text{К}$ и $T_{c.a.} = 473\text{К}$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,6	0,479	0,47	0,49	0,480	0,010	0,006	0,025	5,181
1,2	0,282	0,29	0,3	0,291	0,009	0,005	0,022	7,720
1,8	0,165	0,155	0,161	0,160	0,005	0,003	0,012	7,810
2,4	0,105	0,11	0,115	0,110	0,005	0,003	0,012	11,285
3,0	0,062	0,064	0,068	0,065	0,003	0,002	0,008	11,668
3,6	0,055	0,058	0,054	0,056	0,002	0,001	0,005	9,228
3,9	0,05	0,049	0,051	0,050	0,001	0,001	0,002	4,965
4,3	0,043	0,044	0,041	0,043	0,002	0,001	0,004	8,819
$T_{\text{прод}} = 298\text{К}$ и $T_{c.a.} = 423\text{К}$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,46	0,457	0,435	0,451	0,014	0,008	0,034	7,531
1,8	0,31	0,32	0,3	0,310	0,010	0,006	0,025	8,008
2,3	0,19	0,205	0,21	0,202	0,010	0,006	0,026	12,920
2,9	0,145	0,135	0,14	0,140	0,005	0,003	0,012	8,866
3,6	0,086	0,084	0,085	0,085	0,001	0,001	0,002	2,921
4,5	0,06	0,065	0,059	0,061	0,003	0,002	0,008	12,872
5,0	0,052	0,048	0,05	0,050	0,002	0,001	0,005	9,930
5,4	0,044	0,047	0,045	0,045	0,002	0,001	0,004	8,427
6,1	0,041	0,041	0,038	0,040	0,002	0,001	0,004	10,750

### ДОДАТОК В1 (продовження)

Результати експериментального визначення вологості та їх статистичної обробки при дослідженні  
Кінетики конвективної розпилювальної сушки жовткової суміші курячих яєць

$\tau$ , с	$W_1$ , кг/кг	$W_2$ , кг/кг	$W_3$ , кг/кг	$W$ , кг/кг	$S_p$ , кг/кг	$S_{ш}$ , кг/кг	$\Delta W$ , кг/кг	$\epsilon_{ш}$ , %
$T_{прод} = 298K$ и $T_{с.а.} = 448K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,7	0,48	0,468	0,46	0,469	0,010	0,006	0,025	5,317
1,5	0,31	0,32	0,33	0,320	0,010	0,006	0,025	7,758
2,2	0,147	0,15	0,155	0,151	0,004	0,002	0,010	6,689
2,9	0,105	0,1	0,095	0,100	0,005	0,003	0,012	12,413
3,6	0,063	0,064	0,065	0,064	0,001	0,001	0,002	3,879
4,0	0,052	0,055	0,056	0,054	0,002	0,001	0,005	9,570
4,2	0,051	0,048	0,051	0,050	0,002	0,001	0,004	8,600
4,8	0,044	0,043	0,04	0,042	0,002	0,001	0,005	12,305
$T_{прод} = 298K$ и $T_{с.а.} = 473K$								
0,0	0,54	0,54	0,54	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
0,6	0,47	0,448	0,49	0,469	0,021	0,012	0,052	11,097
1,2	0,31	0,32	0,33	0,320	0,010	0,006	0,025	7,758
1,8	0,148	0,15	0,154	0,151	0,003	0,002	0,008	5,056
2,4	0,105	0,1	0,096	0,100	0,005	0,003	0,011	11,195
3,0	0,062	0,064	0,066	0,064	0,002	0,001	0,005	7,758
3,6	0,053	0,054	0,056	0,054	0,002	0,001	0,004	7,023
3,9	0,051	0,049	0,051	0,050	0,001	0,001	0,003	5,733
4,3	0,042	0,044	0,041	0,042	0,002	0,001	0,004	9,029

### ДОДАТОК В1 (закінчення)

Результати експериментального визначення вологості та їх статистичної обробки при дослідженні  
Кінетики конвективної розпилювальної сушки жовткової суміші курячих яєць

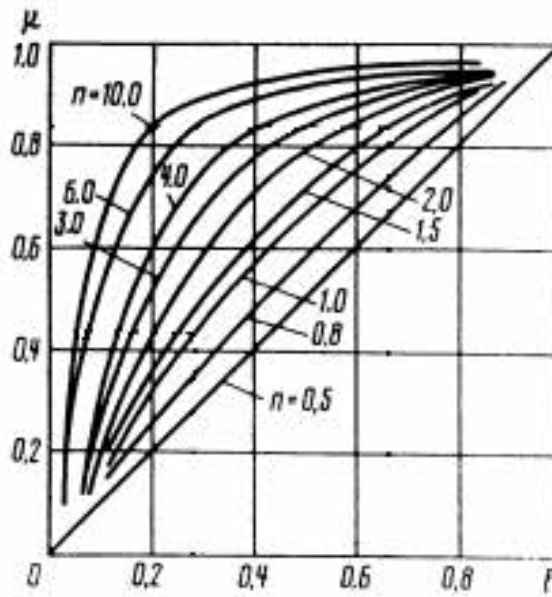
$\tau$ , с	$W_1$ , кг/кг	$W_2$ , кг/кг	$W_3$ , кг/кг	$W$ , кг/кг	$S_n$ , кг/кг	$S_W$ , кг/кг	$\Delta W$ , кг/кг	$\varepsilon_W$ , %
0,0	0,54	0,54	0,54	0,54	0,000	0,000	0,000	0,000
0,6	0,5	0,48	0,49	0,49	0,010	0,006	0,025	5,067
1,2	0,33	0,325	0,335	0,33	0,005	0,003	0,012	3,762
1,8	0,195	0,19	0,186	0,19	0,005	0,003	0,011	5,892
2,4	0,105	0,1	0,096	0,1	0,005	0,003	0,011	11,195
3,0	0,062	0,058	0,06	0,06	0,002	0,001	0,005	8,275
3,7	0,047	0,053	0,05	0,05	0,003	0,002	0,007	14,896

### ДОДАТОК В2.

Результати експериментального визначення вологості та їх статистичної обробки при дослідженні кінетики конвективної розпилювальної сушки жовткової суміші (комбінація пряминок – перехресний ток при  $T_{\text{прод}} = 298^{\circ}\text{K}$  та  $T_{\text{са}} = 473^{\circ}\text{K}$ )

## ДОДАТОК Г1

Робочі витратні характеристики для регулювальних клапанів



## ДОДАТОК Г2

Зміни перепадів тисків на ВМ для регулювальних клапанів

