

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових  
виробництв

Допущений до захисту:  
завідувач кафедри  
Севостьянов Іван Вячеславович

---

«\_\_\_» листопада 2022 р.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МАКАРОННИХ ВИРОБІВ ІЗ  
ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»  
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Виконав: студент групи 71-Маш  
Цвігун Дмитро Володимирович

---

Керівник: к.т.н., доцент  
Полевада Юрій Алікович

---

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових  
виробництв

Затверджую:

завідувач кафедри

Севостьянов І.В.

\_\_\_\_\_ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

студенту Цвігуну Дмитру Володимировичу

на тему:

«Дослідження процесу виробництва макаронних виробів

із застосуванням ультразвуку»

затверджену наказом від «21» лютого 2022 р. № 19-м

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План магістерської роботи.
3. Підручники і навчально-методичні посібники.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТЕІ, тощо).
5. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

## Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг сторінок	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		1-2		
Вступ		2-5		
РОЗДІЛ 1	АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА МАКАРОННИХ ВИРОБІВ	20-35		
РОЗДІЛ 2	ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ВИРОБНИЦТВО МАКАРОННИХ ВИРОБІВ	20-35		
РОЗДІЛ 3	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ	20-25		
РОЗДІЛ 4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕСУВАННЯ МАКАРОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ	10-15		
Загальні висновки		1-2		
Список використаних джерел		2-4		

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 р.

Завдання видав керівник " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 р.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	6
ВСТУП.....	8
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА МАКАРОННИХ ВИРОБІВ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Класифікація макаронних виробів.....	11
1.2 Показники якості макаронних виробів.....	13
1.3 Дефекти макаронних виробів та причини їх виникнення.....	21
1.4 Робочий процес виробництва макаронних виробів.....	24
1.4.1 Функціональні схеми макаронних пресів.....	25
1.4.2 Пресування макаронного тіста.....	26
1.4.3 Матриці.....	27
1.5 Аналіз конструкцій макаронних пресів вітчизняного та закордонного виробництв.....	28
1.6 Висновки до першого розділу .....	27
<b>РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ВИРОБНИЦТВО МАКАРОННИХ ВИРОБІВ.....</b>	<b>28</b>
2.1 Дія ультразвуку на харчову сировину.....	28
2.2 Поглинання ультразвукових хвиль .....	32
2.3 Швидкість поширення хвиль ультразвуку.....	34
2.4 Обладнання для ультразвукової обробки сировини.....	35
2.5 Ультразвукова дія випромінювача на макаронне тісто.....	37
2.6 Висновки до другого розділу .....	41

РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ .....	42
3.1 Удосконалення технології виробництва макаронних виробів .....	42
3.2 Особливості високотемпературного пресування макаронних виробів .....	42
3.3 Процес нагрівання тіста з використанням ультразвуку при пресуванні макаронних виробів .....	44
3.4 Математичне моделювання макаронних виробів при дії ультразвуку .....	46
3.5 Методика проведення експериментальних досліджень .....	47
3.6 Висновки до третього розділу .....	64
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕСУВАННЯ МАКАРОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ .....	51
4.1 Опис експериментальної установки та методика проведення експерименту .....	51
4.2 Аналіз ефективності макаронного преса від параметрів ультразвуку .....	54
4.3 Визначення гігроскопічності макаронних виробів .....	57
4.4 Висновки до четвертого розділу .....	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	68

## АНОТАЦІЯ

Цвігун Д.В. – Дослідження процесу виробництва макаронних виробів із застосуванням ультразвуку. – Рукопис.

Робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування. – Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця, 2022.

В магістерській роботі проведено аналіз існуючих способів виробництва та конструкцій макаронних пресів, який показав необхідність розробки принципово нового способу пресування макаронних виробів із застосуванням ультразвуку.

В роботі досліджувався модернізований макаронний прес, який відрізняється наявністю додаткового ультразвукового пристрою, що підвищує якість процесу пресування.

Складено математичну модель, що враховує вплив накладання ультразвукових коливань на «розбухання» при пресуванні макаронного тіста і розмірні показники фільтр преса. Отримано емпіричні залежності параметрів процесу пресування макаронного тіста від амплітуди ультразвуку.

Експериментально доведено вплив амплітуди ультразвуку на продуктивність макаронного пресу та показники якості макаронних виробів. Виявлено найбільш раціональне значення параметрів ультразвуку при пресуванні макаронного тіста з хлібопекарського борошна вищого гатунку.

*Ключові слова:* прес макаронний, ультразвук, процес пресування, математична модель, фільтри, матриця, технологічний процес.

## ANNOTATION

Zvigun D.V. – Study of the process of pasta production using ultrasound. – Manuscript.

Work to obtain a master's degree in 133 Industrial engineering. – Vinnytsia National Agrarian University. – Vinnytsia, 2022.

In the master's thesis, an analysis of existing production methods and constructions of pasta presses was carried out, which showed the need to develop a fundamentally new method of pressing pasta products using ultrasound.

The work investigated a modernized pasta press, which is distinguished by the presence of an additional ultrasonic device, which increases the quality of the pressing process.

A mathematical model was developed that takes into account the influence of superimposing ultrasonic vibrations on «increasing the dough» during pasta dough pressing and the dimensional parameters of the press die. Empirical dependences of the parameters of the pasta dough pressing process on the ultrasound amplitude were obtained.

The influence of the ultrasound amplitude on the productivity of the pasta press and quality indicators of pasta products has been experimentally proven. The most rational value of ultrasound parameters during pressing of pasta dough from high-grade bakery flour was revealed.

*Keywords:* pasta press, ultrasound, pressing process, mathematical model, dies, matrix, technological process.

## ВСТУП

Однією з найбільш поширених і відповідальних технологічних операцій, що застосовуються при виробництві макаронних виробів, є процес пресування. Від виконання цієї операції багато в чому залежить якість, зовнішній вигляд і вихід готової продукції, а також питомі витрати енергії. Проаналізувавши досвід практики пресування макаронних виробів можна стверджувати, що технологічні процеси та конструкції пресів можуть бути вдосконалені [4, 5, 6, 17].

На сьогоднішній день успішно впроваджується у низці галузей промисловості пресування з використанням ультразвуку. Технологічні процеси з використанням механічних коливань низької частоти в сучасній вітчизняній та зарубіжній практиці харчової промисловості отримали певне поширення [1, 16, 17, 30]. Відомо, що використання віброуючих органів у машинах харчової промисловості та громадського харчування дозволяє інтенсифікувати процеси перемішування, ущільнення, пресування. Аналіз літературних джерел і практика застосування більш високих частот вібрацій в інших галузях промисловостей показує виняткову ефективність ультразвуку – підвищення якості готових виробів, зниження зусилля пресування та збільшення продуктивності обладнання. У зв'язку з розвитком ультразвукової техніки та технології з'явилася можливість отримати макаронні вироби високої якості з м'яких сортів пшениці. Вплив ультразвуку на макаронне тісто при пресуванні підвищує щільність і міцність готових виробів за рахунок більш щільного укладання шарів тіста і зменшення його пористості, що значно впливає на зменшення кількості відходів і крихт виробів при транспортуванні. У зв'язку з вищевикладеним, проблема пресування макаронних виробів із застосуванням ультразвуку є актуальним завданням.

Мета досліджень – підвищення ефективності процесу пресування макаронних виробів і поліпшення їх показників якості з використанням ультразвуку.

Виходячи з поставленої мети, необхідно вирішити такі завдання дослідження:



- проаналізувати та узагальнити відомі в науково-технічній літературі дані щодо методів та обладнання для пресування макаронних виробів;

- запропонувати спосіб та установку для інтенсифікації процесу пресування макаронних виробів із застосуванням ультразвуку;

- провести експериментальні та теоретичні дослідження процесу пресування макаронного тесту із застосуванням ультразвуку;

- експериментально дослідити вплив параметрів ультразвуку на показники якості макаронних виробів.

Об'єкт дослідження – технологічний процес пресування макаронних виробів із застосуванням ультразвуку.

Предмет дослідження – макаронні вироби, виготовлені на макаронному пресі із використанням ультразвуку.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано установку для обробки ультразвуком макаронних виробів на стадії пресування;

- отримана залежність, що дозволяє визначити рекомендований мінімальний час знаходження тіста в матриці з певною інтенсивністю ультразвуку;

- отримані емпіричні залежності та визначені рекомендовані режими обробки макаронного тіста ультразвуком на стадії пресування.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА МАКАРОННИХ ВИРОБІВ

#### 1.1 Класифікація макаронних виробів

Для виробництва макаронних виробів зазвичай використовується борошно першого та вищого сортів пшениці.

Вироби для дієтичного та дитячого харчування виробляють з використанням фруктових та овочевих пюре, вітамінів групи В, гліцерофосфату заліза тощо.

На сьогоднішній день затверджено технічну документацію на виробництво нових сортів виробів: вироби макаронні зернові, вироби макаронні з рослинними білками, вироби макаронні «Покращені», макаронні вироби «Домашні», вироби макаронні «Білкові», макаронні вироби з інуліном, макаронні вироби «Білково-морквяні», вироби макаронні вівсяні та інші.

Макарони з пшениці твердих сортів мають жовтувато-золотистий відтінок. Існують також кольорові макарони. Залежно від добавок, колір може змінюватися. Додавання томатної пасти, бурякового соку, паприки надає червоного відтінку, шпинату – зеленого, яєць – яскраво-жовтого, а чорнила каракатиці – чорного [7, 9, 15, 17].

Макаронні вироби у висушеному вигляді можуть мати термін зберігання більше року, тому що вони мають знижену вологість (13 - 14%), а також відрізняються гарною транспортабельністю та механічною міцністю. Макаронні вироби включають щонайменше 11% білкових речовин, 71...73% вуглеводів і 0,5...0,8% жиру. Клітковина і мінеральні речовини містяться в незначних кількостях [23]. Як правило, добавки, за винятком консервантів, знижують термін зберігання виробів, погіршуються показники розварюваності і злипання, що частково усувається підвищенням тисків пресування і якісним вакуумуванням [21, 22, 27, 32].

Для виробництва свіжої пасти зазвичай використовується борошно з

твердих сортів пшениці. Свіжа паста – різні сорти макаронних виробів, які готуються з тіста свіжого замісу, що не піддаються високотермічній та шоківій обробці для збільшення термінів зберігання, тому всі смакові та біологічно активні якості зберігаються [17].

Збільшують термін зберігання свіжої паста завдяки харчовим консервантам (лимон і оцтова кислота), пастеризації та спеціальній упаковці [31].

Макаронні вироби поділяють на 1 та 2 класи, а також на групи А, Б, В:

- 1 клас – макарони з вищого гатунку борошна;
- 2 клас – макарони з першого сорту борошна;
- група А – вироби з борошна твердих сортів пшениці та з борошна твердих сортів пшениці з підвищеною дисперсністю;
- група Б – вироби з м'яких сортів борошна склоподібної пшениці;
- група В – вироби з борошна хлібопекарського пшеничного, у яких кількісні характеристики клейковини нижче макаронного борошна з пшениці м'яких сортів.

Органолептичні показники макаронів мають відповідати державному стандарту ДСТУ (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

#### Основні органолептичні показники макаронів

Найменування показника	Характеристика
Колір	Відповідає сорту борошна. З використанням додаткової сировини колір виробів змінюється та залежить від виду цієї сировини
Форма	Відповідає типу виробів
Смак	Без стороннього смаку, властивий даному виробу
Запах	Без стороннього запаху, властивий даному виробу

Макаронні вироби за формою бувають п'яти видів:

1. Макаронні вироби довгі:

- Капеліні (від італ. Capellini) – дуже тонкі, округлі і довгі.
- Вермішель (від італ. Vermicelli) – досить тонкі, округлі і довгі (1,4 мм – 1,8 мм).
- Спагеті (італ. Spaghetti) – це найвідоміші у світі макарони: середньої товщини, круглясті та довгі.
- Спагетіні (від італ. Spaghettini) – тонше спагеті.
- Тальятеле (від італ. Tagliatelle) – локшина.
- Фетучіне (від італ. Fettuccine) – плоскі смужки тіста, ширина яких становить приблизно 2,5 см. Злегка вигнуті або прямі.
- Лазанья (від італ. Lasagne) – широкі і довгі вироби, з кучерявими або з прямими краями.
- Лінгвіні (від італ. Linguine) – вузькі, довгі і плоскі, трохи довші за спагеті. Назва їх перекладається з італійської, як «язички».

- Макарони (від італ. Maccheroni) – трубчасті вироби.

2. Макаронні вироби короткі:

- Фузілі (від італ. Fusilli) – вироби у формі гвинта (спіралі).
- Пенне (від італ. Penne) – трубочки (пір'я) з діагональними і зрізаними краями.
- Пенне рігате (від італ. Pennerigate) – рифлене пір'я.
- Канеллоні (від італ. Cannelloni) – трубочки до 30 мм в діаметрі і до 100 мм завдовжки.
- Челлентані (від італ. Cellentani) – трубочки спіралеподібні.

3. Паста для супів:

- Анеллі (від італ. Anelli) – невеликі кільця для супів.
- Стелліне (від італ. Stelline) – зірочки.

4. Паста фігурна:

- Фарфалле (від італ. Farfalle) – метелики.
- Конкілье (від італ. Conchiglie) – черепашки.

- Конкільйоні – великі черепашки.
- Джемеллі – порожнисті джгути або спіральки.
- Казереччи – ріжки.

#### 5. Паста з начинкою:

- Равіолі (від італ. Ravioli).
- Аньолотті – конвертики у формі півмісяця або прямокутні, традиційно з м'ясною начинкою.
- Капелетті – вироби невеликі фаршировані у формі капелюшка.
- Тортелліні – невеликі кільця з начинкою.
- Тортеллоні – квадрати великі з начинкою.
- Каннеллоні – трубочки великі, виготовлені для наповнення їх фаршем [17].

За фізико-хімічними показниками макаронні вироби мають відповідати зазначеним нормам (табл.1.2).

Таблиця 1.2

#### Фізико-хімічні показники макаронних виробів

Найменування	Норма						
	Група А			Група Б		Група В	
	сорт	1 сорт	рій сорт	ший сорт	вий сорт	ший сорт	вий сорт
Вологість виробів, %, не більше	13	13	13	13	13	13	13
Кислотність вироб. град, не більше:							
- томатних	10	-	-	10	-	10	-
- другого сорту	-	-	5	-	-	-	-
- решти	4	4	-	4	4	4	4

Зола в 10% HCl, %, не більше	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Масова частка золи у перерахунку на суху речовину, %, не більше овочевих, яєчних	1,4	1,7	2,4	1,1	1,25	1,1	1,25
Суха речовина, що перейшла в варильну воду, %, не більше	6,0	6,0	6,0	9,0	9,0	9,0	9,0

## 1.2 Показники якості макаронних виробів

Рівень якості макаронних виробів показує відповідність властивостей та складу продукту нормам, які встановлені для певного класу товару. Як правило, рівень якості відзначають словами в назві товару, наприклад: 1 сорт, вищий сорт, екстра і т. д.

Факторами, які визначають рівень якості макаронних виробів, є умови та способи виробництва, характеристика сировини, зберігання та транспортування готової продукції. Навіть з хорошої сировини не можна отримати високоякісні вироби, якщо не будуть дотримані необхідні технологічні режими виробництва. Одночасно з цим, хороші вироби можуть бути зіпсовані під час транспортування та не належного зберігання [8, 10].

Сьогодні для макаронної промисловості властива тенденція об'ємного впровадження сучасної техніки, що одночасно вносить у виробництво безліч нових елементів технологічних розробок [11].

Якість продукції – це комплекс властивостей виробів, які обумовлюють їх доцільність використання і придатність з точки зору споживання. Фізіологічні та органолептичні переваги, доброчесність, хімічний склад, енергетична здатність, біологічна цінність та засвоюваність визначають харчову цінність продукції

тощо [13].

Доброякісними вважаються макаронні вироби, що не містять речовин, які шкідливі для організму (хімікатів, солей, важких металів, токсинів, продуктів розпаду органічних речовин і сторонніх домішок). Особливо необхідно остерігатися ураження макаронних виробів через яйцепродукти (сухий яечний порошок, меланж) паратифозними бактеріями роду сальмонел, які відносяться до сімейства кишкових бактерій.

Органолептичні властивості макаронних виробів характеризуються, як і всі харчові продукти смаком, кольором, запахом та станом поверхні [15].

Якість макаронних виробів має відповідати вимогам ДСТУ або ТУ виробника [15].

Відповідно до державного стандарту, показники якості макаронів поділяються на органолептичні (форма, колір, запах, стан після варіння та стан поверхні); фізико-хімічні (міцність, вологість, кислотність, вміст металевих домішок та крихти).

Комплекс вищеперерахованих показників обумовлює головні властивості даного продукту: поживні властивості, смак, запах, засвоюваність, форму, зовнішній вигляд, стійкість при транспортуванні та зберіганні.

У запаху та смаку сухих і зварених виробів не повинно відчуватися підвищеної кислотності та гіркоти, пліснявого та затхлого запаху, або якихось інших сторонніх запахів та присмаків.

Макаронні вироби легко вбирають сторонні запахи під час зберігання і транспортування, так як мають високу адсорбційну активність.

Про недоліки та смакові переваги виробів можна судити за їх кислотністю, яка відповідно до ДСТУ не має перевищувати 4°Н. Кислотність виробів з додаванням томатопродуктів може бути 10°Н. Смакові переваги продукту залежать від природи та складу кислореагуючих речовин. Наприклад, оцтова кислота робить смак різким, а жирні кислоти надають присмаку і запах гіркості.

Молочна кислота робить смак приємним. Тому завдяки накопиченню молочної кислоти вироби природного тривалого сушіння високо цінуються за їх

смак.

Вміст білкових речовин і вологість визначає харчові переваги макаронних виробів. Стандартами не обумовлюється вміст білкових речовин, але про нього можна побічно судити за вимогами до якості борошняних продуктів за вмістом у них кількості клейковини [24].

Вміст золи в макаронах не зазначається у вимогах, але за граничною зольністю борошняних продуктів можна судити про її кількість: для крупи з твердої пшениці – не більше 0,75%, для напівкрупки – 1,10%, для борошна I сорту – 0,75%, для борошна найвищого гатунку з м'якої пшениці – 0,55%.

Один з найважливіших показників якості макаронних виробів – поведінка при варінні, що визначає при варінні не більше 20 хв водопоглинальну здатність або збільшення обсягу. Відомо, що збільшення обсягу, як мінімум, має бути дворазовим. Іноді ця величина сягає цифри 3,5 і більше. Збереження сухої речовини – інша важлива властивість, пов'язана з варінням. Чим менше у варильну воду переходить екстрактивних речовин, тим більше цінуються вироби. Макарони з борошна твердої пшениці менш набухають, ніж із борошна м'якої пшениці.

Зовнішній вигляд виробів визначається станом поверхні, кольором, відсутністю зламаних макаронів і крихт, формою, властивою даному виду. Дані показники якості не такі значні для харчової цінності продукту, але за ними зазвичай споживач судить про загальну якість.

Колір виробів має бути жовтуватим. Білий колір із сіруватим відтінком або білуватий вказує на порушення технологічного процесу сушіння (жорсткий режим) та пресування (висока температура) або на доброякісну сировину. На колір виробів впливає ряд факторів: здатність борошна до потемніння, колір сировини, умови ведення технологічного процесу тощо.

Борошняний білий злам вказує на дефекти обробки тіста або сировини. Поверхня повинна бути злегка матовою, гладкою або лощеною. Шорсткість виробів не рекомендується, не дивлячись на те, що при варінні вона зникає. Стан поверхні визначається органолептично.



Важливе значення має збереження форми виробів. Під формою мається на увазі безліч зовнішніх ознак: однакова прямизна і розмір довгих виробів; товщина стінок рівномірна у трубчастих виробів; товщина пластин однакова для супових засипок. Викривлені вироби знижують пропускну здатність сушильних установок, погано заповнюють тару і є причиною появи крихти та брукхту. Нерівномірна товщина стінок ускладнює також сушіння виробів.

Товщина стінок трубчастих висушених виробів повинна бути при діаметрі виробів до 4 мм не більше 1,1 мм; не більше 1,3 мм – від 4,1 до 5,5 мм; не більше 1,5 мм – понад 5,5 мм. Товщина стінок рифлених виробів вимірюється у місцях впадин.

Деформовані вироби та зламані обумовлені стандартом. Дані дефекти, як погіршують зовнішній вигляд виробів і вказують на відхилення від оптимальних режимів обробки чи недоброякісність сировини. Шматки виробів коротше 1/3 від звичайного розміру та дрібні уламки вважають крихтою. Причини, що спричиняють дефекти, можуть бути різними. В основному це пов'язано з високою крихкістю виробів, що викликається неправильним режимом сушіння. Іншою можливою причиною є механічні пошкодження при упаковці виробів, зберіганні та транспортуванні. Механічним пошкодженням найбільше схильні викривлені і деформовані вироби. Для того щоб підвищити наповнюваність тари, їх вминають і викривлені вироби, налягаючи один на одного можуть зруйнуватися [25].

Наступні граничні форми вмісту крихти і зламів визначені стандартом: для виробів, упакованих у ящики – 6-7%, для розфасованих виробів – 8-4%. Дані норми прийнято для виробів вищого гатунку та яечних сортів.

Причиною інтенсивних мікробіологічних або біохімічних процесів може стати збільшення стандартної вологості, що викликає гідролітичні зміни головних компонентів виробів: жирів, вуглеводів і білків. Накопичені продукти гідролізу, в першу чергу продукти гідролізу жирів, призводять до погіршення запаху та смаку виробів. Мікробіологічні процеси, що у більшості випадків є причиною плісняви виробів, що абсолютно неприпустимо. Захист від псування гарантує нормальна вологість макаронних виробів [25].

### 1.3 Дефекти макаронних виробів та причини їх виникнення

При порушенні умов зберігання та технології виробництва, у макаронних виробках з'являються дефекти запаху, зовнішнього вигляду та смаку: гіркий смак (у виробках із збагачувальними добавками), кислий смак (неправильне дотримання режиму сушіння), сторонні присмаки (через підвищену адсорбційну спроможність), деформації, тріщини, викривлення, пліснява (через порушення умов зберігання та високу гігроскопічність).

Зовнішні дефекти:

1. Потемнілий колір може бути в результаті:

- використання неякісного борошна, з підвищеним вмістом редукованих цукрів і вільних амінокислот і надмірною активністю тирозинази – ферменту;
- тривалого сушіння виробів: ферментативне окислення, утворення меланоїдів;
- підвищеної температури (понад 18°C) при довготривалому зберіганні.

2. Крихкі та неміцні вироби можуть вийти в результаті:

- використання зі зниженим вмістом клейковини неякісного борошна, або клейковини, що сильно тягнеться;
- відсутності процесу вакуумування тесту;
- низької температури при замісі та тривалої механічної дії;
- занадто інтенсивного сушіння макаронних виробів [26].

### 1.4 Робочий процес виробництва макаронних виробів

Процес виробництва макаронних виробів поділяється на три основні етапи; приготування спеціального тіста, формування з нього виробів, частіше всього методом випресовування та подальше сушіння їх до постійної вологості. Тістомісильні машини для приготування макаронного тіста (тістозмішувачі) здійснюють лише частину загального процесу, який включає первинне змішування компонентів із утворенням невеликих гранул, подальше їх злипання

та утворення грудок, їх ущільнення та утворення однорідної маси, видалення з неї повітряних включень та формування виробів [21].

Основною особливістю тіста для макаронних виробів є суттєва різниця його реологічних властивостей порівняльно з тістом, яке використовується для хлібопекарських виробів. Макаронне тісто виробляється із пшеничного борошна спеціального крупного помолу та води і має вологість 28 - 32,5%, що значно менше від вологості, наприклад, тіста для хліба. В деяких випадках до згаданих компонентів додається ряд речовин, які покращують смакові властивості кінцевого продукту.

При замішуванні тіста з низькою вологістю в ньому практично не відбуваються всі три стадії тістоутворення в класичній формі. Просторова клейковинна основа утворюється на заключній стадії процесу змішування тіста. Його щільність та пластичність відрізняються від аналогічних показників хлібного тіста. Приготування макаронного тіста відбувається в два етапи. Перший проходить у тістозмішувачах, в яких безперервно змішуються компоненти до утворення крихтоподібної маси. Поняття «замішування» для макаронного тіста використовується умовно, оскільки в змішувачах не отримують готового тіста. На другому етапі крихтоподібна маса подається у шнекову камеру і під впливом механічного тиску в каналі шнека поступово ущільнюється та пластифікується, набираючи властивостей, які необхідні для наступного формування. Для отримання однорідного за структурою пластичного тіста загальна тривалість замішування має бути близько 20 хв. Процес приготування тіста закінчується перед етапом випресовування його через матриці, які надають виробам кінцеву форму.

Найчастіше вологість тіста утримується в межах 29 - 30%. У цьому випадку тісто складається з дрібних грудочок та добре заповнює пресувальний шнек. Після формування такого тіста вироби добре зберігають форму, не деформуються та не злипаються, навіть якщо сушіння відбувається насипним способом в декілька шарів. Іноді використовується тісто вологістю 28 - 29%, яке має порошкоподібний вигляд, важко обробляється. Таке тісто використовується для

виробів складної форми, які отримують методом штампування. Якщо вологість тіста підвищити до 31 - 32,5%, тісто характеризується наявністю крупних грудок, що погано заповнюють порожнину шнека. Таке тісто більш пластичне, легше формується, вироби з нього мають гладку поверхню. Використовується воно лише у випадках, якщо треба отримати гнучкі вироби, для яких потрібне фігурне укладання, наприклад у моток чи бант [17, 28].

Однією з особливостей приготування макаронного тіста є механічна обробка його з одночасним видаленням повітряних включень – вакуумування. Воно дозволяє отримати більш щільну структуру тіста, а також надає заготовкам та висušеним виробам підвищеної міцності. Видалення з тіста повітря зменшує руйнування киснем фарбувальних речовин, що належать до групи каротиноїдів, і які надають виробам приємного жовтувато-кремового кольору. Вакуумування тіста може відбуватися або в процесі замісу тіста прямо в місильних камерах, які герметично закриваються, або після змішування на стадії пресування на дільниці шнеку. У першому випадку якість вакуумування значно вища, тому що в порожнині шнека тісто знаходиться вже в достатньо щільному вигляді і повітря важко з нього видалити. Для проведення вакуумування тиск повітря в камерах змішувачів знижують до залишкового тиску 10 - 40 кПа. У цьому випадку тривалість процесу видалення повітря 5 - 7 хв.

1.4.1. Функціональні схеми макаронних пресів. До складу сучасного макаронного пресу входить ряд вузлів та пристроїв, що забезпечують отримання виробів високої якості. До них належать борошнозволожувачі, тістозмішувачі, шнекові преси з матрицями, механізми для різання сирих виробів, пристрої для створення вакууму в місильних камерах та порожнині шнека, пристрої для нагрівання та охолодження матриць, для обдування сирих виробів на виході з матриці, допоміжні механізми для зміни матриць. До складу сучасного макаронного пресу входить також комплекс дозувальної апаратури для борошна та рідких компонентів. В подальшому макаронним пресом будемо називати зазначений комплекс обладнання, в якому шнековий прес є основною складовою

частиною. Розглянемо структурні схеми макаронних пресів по мірі їх розвитку та вдосконалення для того, щоб зрозуміти тенденцію проектування та конструювання сучасних моделей цього обладнання [21].

1.4.2. Пресування макаронного тіста. Для отримання сирих макаронних виробів певних форм та розміру в додаток до операцій, описаних вище, тісто з'єднується в однорідну масу в порожнині шнекового преса, пресується в його передматричній камері та продавлюється через отвори в матриці. В ході здійснення цих операцій тісто додатково обробляється механічно, вакуумом, високим тиском. Структура його значно змінюється, тому можна вважати, що стадія змішування, тобто механічної проробки тіста, продовжується і під час пресування. Під пресуванням тіста будемо розуміти ущільнення його в однорідну масу, видалення повітряних включень із неї, а також доведення тіста до постійних реологічних показників; щільності, пружності, в'язкості. Тільки після цього можливе надійне, якісне формування виробів із рівномірною внутрішньою структурою та гладкою поверхнею.

Найбільш придатним для пресування виявився однозахідний шнек, який щільно прилягає периферичною частиною витків до внутрішньої поверхні корпусу. Енерговитрати на механічну проробку тіста у пресувальному корпусі пропорційні діаметру витка шнека в четвертому ступені. Це накладає обмеження на максимальні розміри шнеків. Вони менші порівняно з габаритами корпусів змішування, коливаються у різних конструкціях в межах 120 - 150 мм, а крок витків знаходиться в діапазоні 80 - 100 мм. Довжина ділянки пресування 1400 - 1700 мм. Для узгодження по продуктивності змішувальної та випресовуючої частин макаронних пресів їх обладнують декількома шнековими корпусами: двома, трьома, чотирма. Кожен шнек має індивідуальний привід, котрий включає редуктор та електродвигун, потужність якого може досягати 25 кВт.

На вихідному кінці шнекового преса розташовується під кутом матриця з отворами для випресовування сирих виробів. Вісь її звичайно перпендикулярна до осі шнека чи близька до 90°.

1.4.3. Матриці. Матриця є важливим робочим органом макаронного преса, вона потрібна для надання тісту визначеної форми. Її конструкція повинна забезпечувати стійкість форми виробів при подальшому обробленні, високу продуктивність пресу та необхідну якість продукту. Матриця являє собою металічний диск (кругла матриця) чи прямокутну пластину (тубусна) із наскрізними отворами, профіль яких визначає форму та зовнішній вигляд виробу (трубка, нитка, стрічка тощо). Існують три типи формувальних отворів макаронних матриць: з вкладишем для формування трубчастих виробів, без вкладишів для формування локшини та вермішелі та щілинні для формування тістових стрічок, ракушок та інших видів макаронних виробів. Матриці виготовляють із міцних антикорозійних матеріалів, таких як латунь ЛС59-1, тверда фосфориста бронза БрАЖ9-4 та нержавіюча сталь 1Х18Н9Т чи 2Х12, 3Х13. Одна з основних вимог, яким повинна задовольняти матриця – це її антиадгезійні властивості, тобто протистояння прилипанню тіста до формувальних отворів. Тому у них вмонтовуються спеціальні вставки із фторопласта або внутрішню поверхню матриці полірують, хромують. Останні засоби менш ефективні [21].

Матриці без вкладишів. Із матриць з формувальними отворами без вкладишів найбільше розповсюдження в промисловості отримали матриці з дисковими вставками для виробництва вермішелі різних діаметрів. Діаметр матриці 298, товщина 60 мм. Вона має 102 колодязі, всередину яких вставляються диски діаметром 20 і товщиною 9 мм. У кожному диску посвердлено по 19 отворів діаметром 1,5 мм. Дискові вставки армовані фторопластом. Дискова вставка складається з корпусу, фторопластової прокладки товщиною 4 мм та верхнього диска, який захищає фторопласт від навантажень та пошкоджень при попаданні в колодязь сторонніх предметів. Матриці для виробництва локшини мало чим відрізняються від матриць для вермішелі. Різниця тільки в конструкції дискових вставок, у дискових вставок для локшини формувальні отвори мають в перерізі форму прямокутника з заокругленими краями, щоб вироби не розривались по довжині. Матриці для формування тістових стрічок, ракушок та

інших подібних виробів мають отвори щілиноподібної форми різного профіля. Специфічна форма ракушок отримується при випрасовуванні тіста через щілину серпоподібної форми за рахунок різниці швидкостей при проході тістом вузької та широкої частин щілини. Через центральну широку частину щілини тісто рухається швидше, а через вузькі – повільніше, тому частина тіста, яка пройшла широку щілину, не відривається від основної маси, а вигинається та потім зрізається ножом. Аналогічний результат буде досягнуто, якщо формувальна щілина має по всій довжині постійну ширину, але на периферійних ділянках висота її більша, ніж в центральній; тоді за рахунок більшого опору на даних ділянках швидкість виходу тіста буде менша, ніж в центральній частині щілини. Для формування тістової стрічки матриця має вигляд латунного диску, в якому є одна щілина довжиною 600 та шириною 1,2 мм. Такі матриці встановлюються для формування тістової стрічки, яка в подальшому поступає в штампувальну машину.

Матриці з вкладишами. Матриці для формування трубчастих виробів мають наскрізні отвори з закріпленими в них вкладишами. Відомо декілька конструкцій вкладишів: триопорні, двоопорні та з трубчастим вкладишем. Найбільше розповсюдження отримали вкладиші з трьома опорами. Вони добре центруються в отворах матриць та прості у виготовленні.

Формування через матрицю відбувається в такій послідовності. Пластифіковане тісто під великим тиском входить у циліндричну частину отвору найбільшого діаметру, розсікається опорами вкладиша на три потоки, обходить їх та поступає в вужчу перехідну частину каналу, де три потоки тіста об'єднуються. Потім тісто попередньо ущільнюється та, обтікаючи вкладиш, перетворюється на трубку. Кінцеве формування та ущільнення виробу відбувається у формувальній щілині матриці. Якщо треба отримати вироби зігнутої форми, наприклад, ріжки, то для цього в ніжці вкладиша передбачена виїмка. В результаті зменшення опору швидкість виходу тіста з цієї сторони збільшується, через що виріб загинається в протилежний бік [21].

## 1.5 Аналіз конструкцій макаронних пресів вітчизняного та закордонного виробництв

Процес пресування дає можливість надання необхідної форми для тіста при виготовленні макаронних, хлібобулочних, кондитерських та інших виробів. При пресуванні переважно застосовують екструзію.

Преси, які застосовуються при виробництві пластичних матеріалів за способом дії поділяються на:

- штампуючі,
- закаточні,
- нагнітальні.

Для пресування вермішелі, макаронів, локшини та інших продуктів широко застосовуються преси, що нагнітальної дії. Вони складаються з формуючої матриці з отворами необхідних розмірів та перерізу та нагнітального пристрою (шнека) [17, 21].

Таблиця 1.3

Характеристики макаронних пресів, що випускаються в Україні та за кордоном

Назва (Країна)	Потужність, кВт	Продуктивність, кг/год	Питома потрібна потужність, кВт·год/кг	Вартість, грн
«Niditrice» (Казахстан)	3,1	120	0,025	200000
ПМ-75 (Україна)	3,8	75	0,05	51200
«Імператор» (Україна)	14	400	0,035	119673
Р30 (Італія)	6	100	0,06	90000
«Imperia i La Mop» (Італія)	0,9	20	0,045	16000



Прес макаронний ПМ-75.

Габаритні розміри – 1600×800×1800 мм. Продуктивність – 75 кг/год. Встановлена потужність – 4,6 кВт. Потужність, що споживається – 3,8 кВт. Здійснює заміс тіста.

Прес макаронний ПМ-75 (рис. 1.1) призначений для пресування короткорізаних макаронних виробів різної форми з пшеничного, кукурудзяного, рисового або гречаного борошна.

Макаронний прес проводить заміс тіста та подальше його пресування. Режими замісу тіста та пресування – безперервний. Система охолодження макаронного преса – водяна.



Рис. 1.1 - Прес макаронний ПМ-75 (Україна, Полтава)

Прес макаронний P30 La monferrina – відмінна модель, що використовується для промислового виробництва макаронних виробів на підприємствах малого та середнього бізнесу (рис. 1.2).



Рис. 1.2 - Прес макаронний Р 30 La monferrina (Італія)

Прес макаронний La Monferrina може працювати з різними типами борошна, але як відомо найкращим варіантом для виробництва макаронних виробів є борошно з твердих сортів пшениці.

Прес вакуумний УІМІ-7,8/380-130 з продуктивністю 130 кг/год (рис. 1.3).

Технічні характеристики.

Місткість робочого бункера, борошна 22 кг. Продуктивність – 130 кг/год. Номінальна потужність – 7,8 кВт. Габаритні розміри: довжина – 3,32 м; ширина – 1,55 м; висота – 2,75 м; маса – 1500 кг.



Рис. 1.3 - Прес вакуумний УІМІ-7,8/380-130 (Україна, Харків)

Шнековий макаронний прес ЛПЛ-2М (рис. 1.4) складається з наступних основних вузлів: дозувального пристрою, тістозмішувача, пресуючого корпусу, пресуючої головки, обдувального пристрою, механізму різання.

Дозувальний пристрій розташований над тістозмішувачем та має шнековий дозатор борошна, роторний дозатор води, привод та спеціальний черв'ячний редуктор.

Шнековий дозатор розміщений в циліндричному корпусі із завантажувальним патрубком і направляючим лотком, для надходження борошна тістозмішувач. Усередині корпусу встановлено однозахідний шнек. Роторний дозатор води має бачок, усередині якого на валу обертається крильчатка з кишнями. Кишні при обертанні крильчатки захоплює певну кількість води, яка через отвори вала зливається у відсік бачка.

Тістозмішувач має однокамерну ємність довжиною 1500 мм з листової нержавіючої сталі. Усередині встановлено вал діаметром 60 мм із укріпленими на ньому робочими органами; ніж для очищення торцевої стінки камери від тіста, що налипає; одинадцять пальців і п'ять лопаток для забезпечення необхідного рівня тіста в камері, його переробки та переміщення всередині камери; штовхач для забезпечення надходження тіста в пресуючий корпус. Пресуюча головка призначена для установки круглої матриці і являє собою литу конструкцію куполоподібної форми. На верхній торцевій частині головки є отвір, закритий фланцем, який служить для виїмки шнека з пресуючого корпусу без зняття головки. На головці встановлений манометр контролю тиску пресування.



Рис. 1.4 - Макаронний шнековий прес ЛПЛ-2М

Прес макаронний Fimar PF25E (рис. 1.5). Макаронна установка для приготування свіжих макаронів ідеально підходить для замішування та екструзії свіжих макаронних виробів різних форм. Корпус виконаний з нержавіючої сталі AISI 304. Містить контейнер, тримач, тестовий гачок та спіраль. Насадки: вставки для локшини різних форм та ніж для макаронних виробів.

#### Характеристика та особливості

Матеріал: зносостійка фарба.

Матеріал діжі та місильного органу: нержавіюча сталь.

Тісто за цикл кг: 2.

Діаметр насадок, мм: 57.

Габарити (Д×Ш×В), мм: 330×550×425.

Потужність, кВт: 0,37.

Напруга, В: 220.

Вага нетто, кг: 26,5.

Габарити в упаковці (Д×Ш×В) мм: 650×390×560.

Вага брутто, кг: 33,5.

Виробник: Fimar (Італія).



Рис. 1.5 - Прес макаронний Fimar PF25E (Італія)

Автоматичний макаронний прес модель Р-100 (рис. 1.6).

Автоматичний макаронний прес з продуктивністю 100 кг/год є автоматичною та надійною машиною, яка може використовуватися з будь-яким типом борошна та виробляє всі види коротких та довгих макаронних виробів. Р100 може також використовуватися для безперервного виробництва розкатаного тіста для подачі на формувальні машини для виробництва локшини, гнізд, равіолі та капелетті. Легка в експлуатації. Вона повністю виготовлена з нержавіючої сталі. Оснащена панеллю управління відповідно до діючих норм з безпеки. Краще рішення для початківців макаронних виробів [22].

Технічні характеристики та особливості.

Продуктивність 90-100 кг/год при виробництві свіжої пасти середніх форматів; подвійний тістозаміс з місткістю 30/35 кг тіста; вал змішувача з нержавіючої сталі, який знімається для обслуговування та очищення; матриці для коротких та довгих макаронних виробів (на вибір за каталогом); одна матриця в комплекті (на вибір); розмір матриці – 153 мм; автоматичний ріжучий пристрій з варіатором швидкості та ножами з нержавіючої сталі (тільки для короткої пасти); водяне охолодження; вентилятор для обдування свіжої пасти; один лоток для пасти; загальні габарити машини: 815×1600×1600 мм; вага: 372 кг.

Електроживлення: 380 В, 3 фази, 50 Гц. Встановлена потужність: Електродвигун 1 – 4,0 кВт. Електродвигун 2 – 1,8 кВт. Електродвигун 3 – 1,8 кВт.



Рис. 1.6 - Автоматичний макаронний прес P-100

Також був проведений патентний пошук обладнання. В результаті патентного пошуку виявлено напрями здійснення технологій щодо пресування макаронних виробів і пристроїв для їх здійснення, які показують, що процес пресування макаронних виробів енергетично високовитратний і вимагає застосування нових фізичних ефектів для їх зниження. Деякі патенти частково вирішують ці проблеми. Зокрема, знижується витрата електроенергії у 2-3 рази, підвищується міцність макаронів на 20-23%, підвищуються показники розвареності макаронів і т. д.

Аналіз технологій та обладнання з підвищеною ефективністю пресування макаронних виробів показує, що пропозиція із використанням ультразвуку істотно підвищить ефективність роботи будь-яких макаронних пресів, у тому числі виробляючих вироби з великим вмістом потрібних добавок, у той час як більшість пропозицій направлено на модернізацію деталей власне преса [17].

## 1.6 Висновки до першого розділу

Під час проведення аналізу обладнання встановлено, що для виготовлення тіста та пресування з нього сирих виробів призначені макаронні шнекові преси безперервної дії. Дозатор води та борошна, тістозмішувач, матриця і пресуючий корпус є головними вузлами сучасних макаронних пресів. Кожен прес має систему вакуумування.

Преси відрізняються розташуванням камер тістозмішувача та їх числом, будовою дозатора, конструкціями пресуючих головок, кількістю шнеків, що пресують, місцем вакуумування і формою матриць. Досліджуваний нами прес відрізняється наявністю додаткового ультразвукового пристрою, що підвищує якість процесу пресування.

## РОЗДІЛ 2

## ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ВИРОБНИЦТВО МАКАРОННИХ ВИРОБІВ

## 2.1 Дія ультразвуку на харчову сировину

Термін «ультразвукова» технологія певною мірою умовний. Багато розглянутих процесів краще протікають на високих звукових частотах. Турбота про захист обслуговуючого персоналу від шумового впливу спонукає при виробництві серійного обладнання застосовувати, як правило, такі частоти, на яких не чути робочої частоти. Ультразвуковий метод обробки тіста – це електрофізичний вплив на середовище, що обробляється. Частота ультразвукових коливань відповідає діапазону звуків, що не чує вухом людини (частота 16–22 кГц). Хвиля ультразвуку переносить певну енергію при розподілі в середовищі, яка може бути використана безпосередньо в різних технологічних процесах і конвертуватися в різні види енергії (хімічну, внутрішню, механічну).

Існують різні джерела ультразвукових коливань: механічні, аеродинамічні, гідродинамічні, електродинамічні електромагнітні, п'єзоелектричні та магнітострикційні випромінювачі. Зміна розміру (подовження або укорочення) кристалічної пластинки при впливі високочастотного електричного поля (в діапазоні до 3 мГц) являє собою зворотний п'єзоелектричний ефект [17, 29].

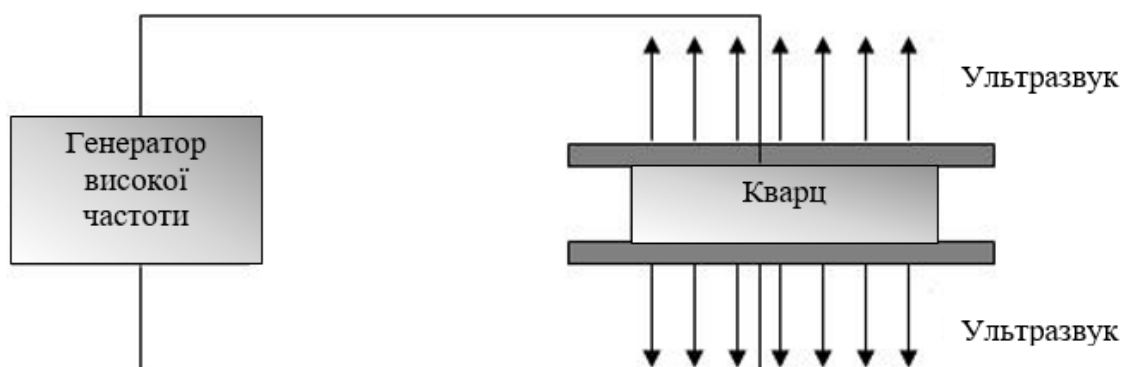


Рис. 2.1 - Ультразвуковий п'єзоелектричний випромінювач

Передача енергії здійснюється частинками хвилі, що коливаються біля середнього положення їх рівноваги.



Швидкість коливання частинок визначається за наступним рівнянням

$$V = U \cdot \sin(2\pi ft + G), \quad (2.1)$$

де  $U$  – амплітуда;

$f$  – частота коливань;

$t$  – час;

$G$  – різниця фаз між змінним ультразвуковим тиском і коливальною швидкістю.

Амплітуда швидкості коливань описує максимальну швидкість руху частинок при коливаннях і її можна визначити за допомогою амплітуди зміщення частинок середовища та частоти коливань за рівнянням:

$$U = 2\pi fA, \quad (2.2)$$

де  $A$  – амплітуда зміщення частинок середовища.

## 2.2. Поглинання ультразвукових хвиль

Поширення ультразвукових хвиль у середовищі, де є процеси внутрішнього тертя, теплопровідність, в'язкість, призводить до поглинання звуку, так як амплітуда ультразвукових коливань у міру віддалення від джерела зменшується, як і енергія, що переноситься. Середовище вступає у взаємозв'язок з енергією, що проходить через ультразвук, і частково поглинає її. Значна частина енергії, що поглинається перетворюється на теплоту, менша частина призводить до незворотних структурних змін у середовищі. Поглинання відбувається в результаті тертя частинок, у різних середовищах воно проходить по-різному. Також поглинання взаємопов'язане із частотою коливань. З теоретичної точки зору, поглинання пропорційне квадрату частоти ультразвуку.

Коефіцієнт поглинання характеризує величину поглинання і показує зміну інтенсивності ультразвуку в середовищі. Він збільшується з підвищенням частоти.

Інтенсивність коливань в опромінюваному середовищі знижується за експоненціальним законом. Це викликано внутрішнім тертям, структурою

поглинаючого середовища та його теплопровідністю. Цей процес орієнтовно описує значення напівпоглинаючого шару, що вказує, на якій глибині частота коливань зменшується приблизно вдвічі (у 2,718 рази або на 38%). За дослідженнями, середні величини напівпоглинаючого шару при частоті, що дорівнює 0,8 МГц для окремих тканин такі: м'язова тканина – 3,6 см, жирова – 6,8 см; м'язова і жирова тканини – 4,9 см. Значення напівпоглинаючого шару з зростанням частоти ультразвуку знижується. Наприклад, інтенсивність ультразвуку в м'язовій і жировій тканині зменшується в 2 рази при частоті коливань 2,4 МГц на глибині 1,5 см, що необхідно враховувати під час розрахунків впливу ультразвуку на геометрію макаронних виробів. Таким чином, глибина проникнення ультразвукових хвиль невелика. Також можливе аномальне поглинання ультразвуку в певних частотних діапазонах, що залежить від особливості будови тканини. Встановлено, що 75% ультразвукової енергії згасає на молекулярному рівні та 1/3 лише на рівні молекулярних структур тканин.

Глибина проникнення ультразвуку – така глибина, при якій інтенсивність зменшується вдвічі. Вона обернено пропорційна ультразвуковому поглинанню: чим більше середовище поглинає хвилі ультразвуку, тим менша та відстань, на якій величина інтенсивності ультразвуку зменшується вдвічі.

### 2.3 Швидкість поширення хвиль ультразвуку

Хвилі ультразвуку в тісті чи овочах поширюються з певною кінцевою швидкістю, яка визначається густиною середовища та її пружними властивостями. Швидкість звуку повітря становить 330 м/с, у воді 1482 м/с (при 20°C), у твердих середовищах, а саме, в кістковій тканині, дорівнює приблизно 4000 м/с, а тісті становить приблизно 2000 м/с [16, 17, 36].

Головним елементом ультразвукового випромінювача є п'єзоелектричний або магнітострикційний перетворювач. Він поєднаний з узгоджувальним пристроєм, за допомогою якого відбувається передача енергії ультразвуку від перетворювача в технологічне середовище з певною інтенсивністю ультразвуку.

Як правило, хвилеподібні акустичні концентратори використовують, як узгоджувальні пристрої.

Узгоджувальний пристрій також може разом з тим виступати у вигляді пресуючого, ріжучого або іншого інструменту (наприклад, матриця преса).

Ультразвуком називаються механічні коливання, які розташовані вище від діапазону частот, що сприймаються вухом людини (приблизно 20 кГц). Коливання ультразвуку переміщуються як хвилі, аналогічно поширенню світла. Але відмінність ультразвукових хвиль від хвиль світла, які можуть також поширюватися у вакуумі, полягає в тому, що вони вимагають пружне середовище (тверде тіло, рідина або газ). Головні параметри хвилі – період хвилі і її довжина зображені на рис. 2.2. Частота – кількість циклів, що здійснюються за секунду, вона вимірюється у Герцах. Період – час, який потрібно зробити цикл, він вимірюється в секундах. У формулі наведено взаємозв'язок між періодом і частотою хвилі [1]:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (2.3)$$

де  $f$  – частота;

$T$  – період.

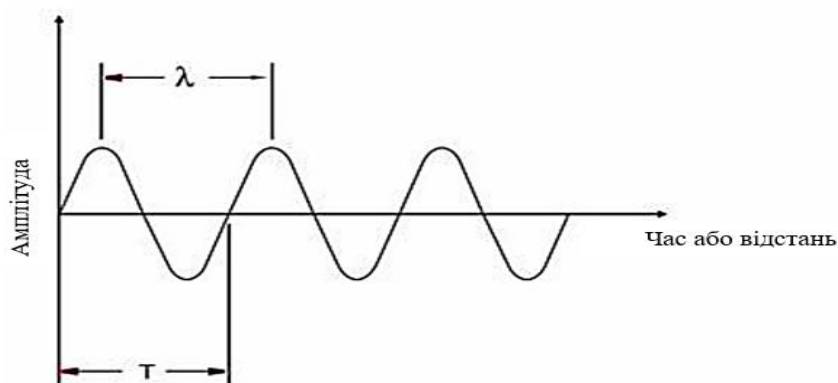


Рис. 2.2 - Основні параметри хвилі ультразвуку

Швидкість ультразвуку в пружному матеріалі при певному тиску та температурі є постійною. Між довжиною хвилі та швидкістю ультразвуку наступний зв'язок [1, 17]:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.4)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі;

$c$  – швидкість ультразвуку.

Для поздовжніх ультразвукових хвиль, що поширюються у твердих речовинах, швидкість ультразвуку знаходиться за формулою:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (2.5)$$

де  $E$  – модуль пружності;

$\mu$  – коефіцієнт Пуасона;

$\rho$  – густина середовища.

Інтенсивність (сила) ультразвуку – середня енергія, що передається хвилею ультразвуку через одиничний майданчик, яка перпендикулярна до напрямку розподілу хвилі, за одиницю часу. Це величина, що виражає потужність поля ультразвуку в точці [1].

Ультразвукові випромінювачі, які створюють плоску хвилю, характеризуються інтенсивністю випромінювання, а саме питомою потужністю випромінювача, тобто ставленням потужності, що випромінюються ультразвуку до одиниці площі поверхні, що випромінює ультразвук [1, 16, 37].

У системі СІ інтенсивність ультразвукового впливу вимірюється у Вт/м<sup>2</sup>. Діапазон варіювання інтенсивності ультразвуку в техніці досить великий – від 10<sup>-12</sup> Вт/м<sup>2</sup> до сотень кВт/м<sup>2</sup> у фокусі концентраторів ультразвуку.

Потужністю звуку називають енергію, що передається хвилею ультразвуку через поверхню за одиницю часу.

Під впливом ультразвуку змінюються важливі фізико-хімічні властивості середовищ: поверхневий натяг на межах розчин – форма або розчин – тверда фаза, дифузія, температура і в'язкість.

В'язкість середовища після обробки ультразвуком зменшується, але характер зміни в'язкості показує, що зменшення в'язкості викликане не тільки тепловою дією ультразвуку, так як одночасно з тепловим впливом є й інші

ефекти, наприклад, зміна сили тертя між нерозчинними твердими домішками, які знаходяться у розчині. Цьому закону підпорядковується тісто і його в'язкість може зменшитися на поверхні виробу, що проходить через фільтри на 30-50%. Це суттєво знижує гідравлічний тиск перед матрицею та витрати електроенергії на шнеку [19, 20, 34].

Фізична сутність впливу ультразвуку на теплообмін полягає у проникненні ультразвукових хвиль у ламінарний та прикордонний підшар видавленого газу та рідини, що викликає їх деформацію, перемішування та турбулізацію. У результаті швидкість теплообміну і коефіцієнт теплопередачі збільшуються і в матриці, і в передматричній зоні, виключаючи заварювання тіста на поверхні виробів [7, 8].

#### 2.4 Обладнання для ультразвукової обробки сировини

На рисунку 2.3 зображено структурну схему технологічного ультразвукового апарату, що складається з джерела живлення, інвертора, що задає генератор ультразвукової частоти, пристрої управління та контролю, пристрої узгодження, ультразвукової коливальної системи (п'єзоперетворювача, концентратора та випромінювача) та технологічного середовища (тіста) [17].

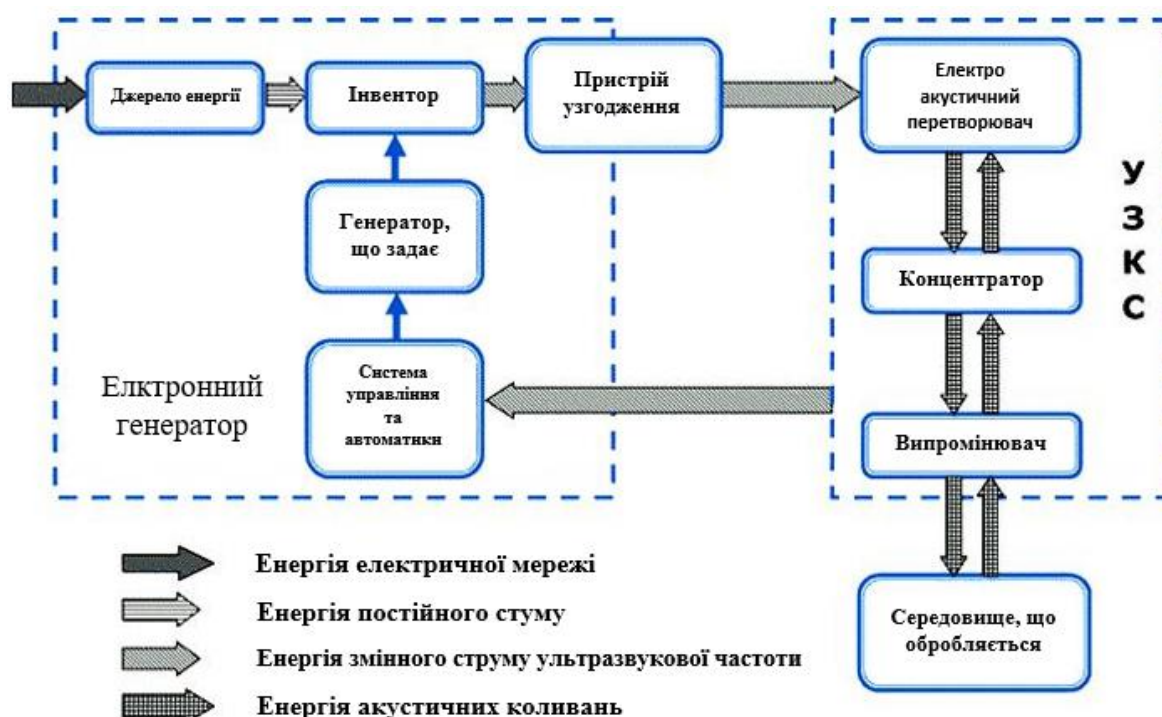


Рис. 2.3 - Структурна схема ультразвукового апарату

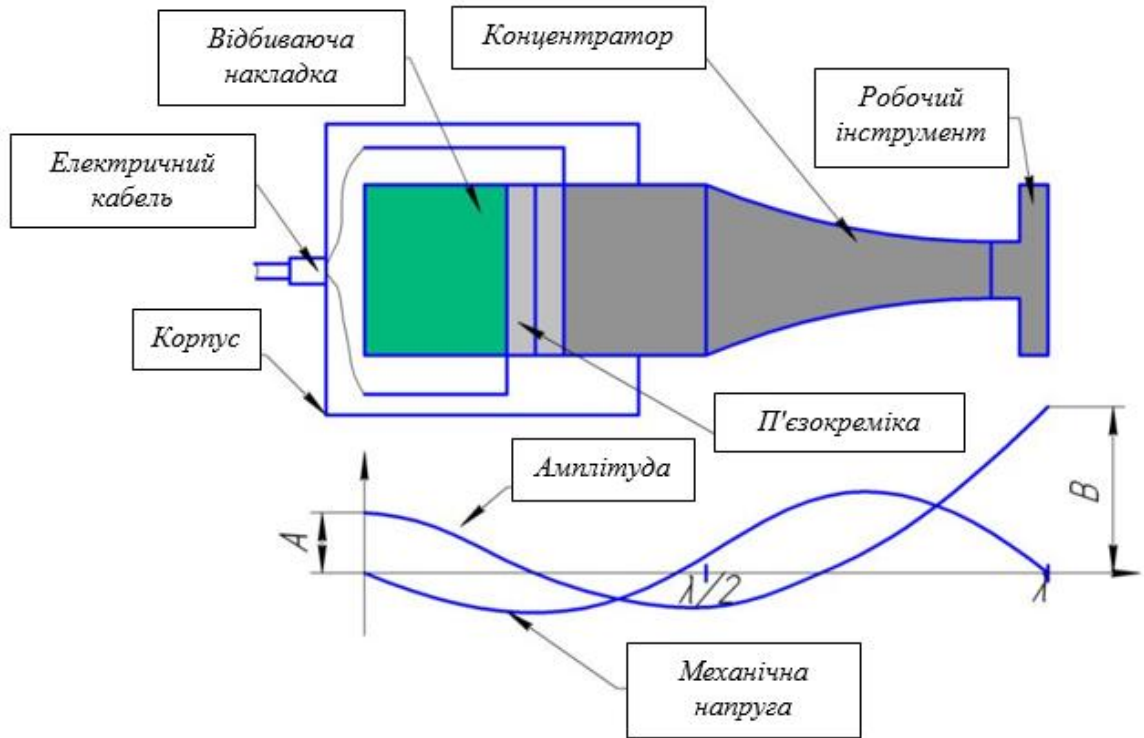


Рис. 2.4 - Схема п'єзоелектричної коливальної ультразвукової системи у металевому корпусі



Рис. 2.5 - Механізм впливу на процеси, що відбуваються в гетерогенних середовищах



Рис. 2.6 - Фактори ультразвукового впливу на тісто в матриці преса

Передбачається, що кавітація може погіршити варильні властивості макаронних виробів, тому діапазон інтенсивності ультразвуку вимагає ретельного додаткового дослідження.

## 2.5 Ультразвукова дія випромінювача на макаронне тісто

Ультразвукове поле випромінювача включає дальню та ближню зони. Близька зона знаходиться безпосередньо перед випромінювачем, де амплітуда проходить через цикл мінімумів та максимумів. Ближня зона закінчується на останньому максимумі, що знаходиться на відстані  $N$  від випромінювача. Положення останнього максимуму називається природним фокусом випромінювача. У цьому фокусі має бути матриця макаронного преса. Дальня зона знаходиться за  $N$ , де тиск ультразвукового поля з часом знижується до нуля і ця зона зазвичай не використовується.

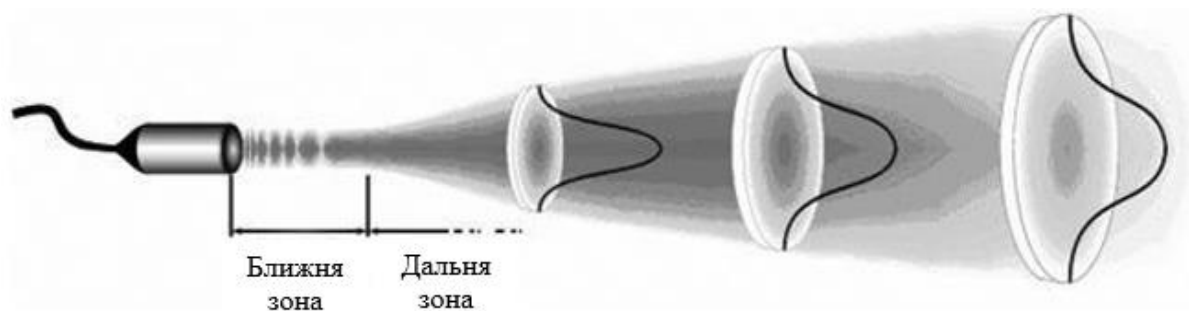


Рис. 2.7 - Дальня та ближня зони ультразвукового поля випромінювача

Характеристики ультразвукового поля формуються конструкцією випромінювача. Поширення ультразвуку в середовищі і чутливість датчика залежить від форми випромінювача. Випромінювачі ультразвуку характеризують загальною випромінювальною потужністю, що вимірюється в Вт і питомою потужністю, тобто середньою потужністю, що припадає на одиницю площі випромінюючої поверхні, або середньою інтенсивністю випромінювання в ближньому полі, що вимірюється в  $\text{Вт}/\text{м}^2$  [1, 17, 36, 37].

Використання коливань ультразвуку високої інтенсивності – перспективний напрямок у різних галузях промисловості. Це викликано тим, що дія ультразвукових коливань на хімічні та технологічні процеси має інтенсифікуючий характер: коли коливання підвищують швидкість процесу (при акустичній кристалізації, розчиненні і сушінні); стимулюючий – коли коливання являють собою рушійну силу процесу (при акустичному очищенні та диспергуванні); оптимізуючий – коли ультразвукові коливання регулюють перебіг процесу (при акустичному пресуванні, грануляції, центрифугуванні).

Ультразвук знаходить застосування практично по всіх відомих хімічних та технологічних процесах: гідромеханічних, теплових, масообмінних, механічних, хімічних [1, 2, 14].

Ультразвукові хвилі підпорядковуються тим самим фізичним законам, як і хвилі чутного діапазону. Але, у ультразвукових хвиль є характерні особливості, які і визначили широке застосування ультразвуку в науці та техніці. Головна з них це:



### 1. Невелика довжина хвилі.

Довжина хвилі для найнижчого ультразвукового діапазону не перевищує кількох сантиметрів у більшості середовищ. Така довжина хвилі визначає променевий характер розподілу ультразвукових хвиль. Біля випромінювача ультразвук поширюється у формі пучків, які за розміром близькі до розміру випромінювача. Ультразвуковий пучок, потрапляючи в неоднорідне середовище, як світловий промінь, зазнає заломлення, розсіювання, відображення, що дає можливість сформувати ультразвукові зображення в непрозорих середовищах, використовуючи оптичні ефекти.

2. Невеликий період коливань, який дає можливість випромінювати ультразвук імпульсами і проводити в середовищі точний тимчасовий відбір сигналів, що поширюються.

3. При невеликій амплітуді існує можливість набуття найбільших значень енергії ультразвукових коливань, так як вона пропорційна квадрату частоти. Що дає можливість виробляти ультразвукові поля та пучки з найвищим рівнем енергії, не використовуючи великогабаритної апаратури.

4. Ультразвукове поле викликає суттєві акустичні рухи. Що формує характерні ефекти: хімічні, фізичні, медичні та біологічні. Так при пресуванні тіста відбувається ущільнення, звукокапілярний ефект, кавітація, диспергування, дегазація емульгування, локальний нагрів, знезараження та інші процеси.

5. При елементарному захисті ультразвук є нечутним для обслуговуючого персоналу і не створює дискомфорту.

З досліджень відомо, що накладення ультразвуку на матрицю істотно змінює властивості і характер перебігу тіста через фільтри матриці, знижує тиск і енергетичні витрати, підвищує продуктивність макаронного преса [21]. Незважаючи на деякі витрати на модернізацію преса, вони економічно вигідні, що експериментально і теоретично доведено дослідженнями [17]. Ультразвук, впливаючи на частинки борошна, змушує їх робити високоінтенсивні коливальні рухи. При цьому в середовищі виникає різниця тисків (від одиниць до десятків атмосфер), на відстані, яке дорівнює половині довжини хвилі ультразвуку. Такі

високоінтенсивні впливи на структуру тіста призводять до деяких ефектів, пов'язаних з поширенням ультразвуку у в'язкому середовищі: фізико-хімічних, теплових і механічних.

Ультразвук проводить різний механічний вплив на біологічні тканини в залежності від тривалості опромінення та його інтенсивності. Так, за невеликих інтенсивностей (приблизно до 2 - 3 Вт/см<sup>2</sup> на частотах близько 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> Гц) коливаються частинки середовища створюють свого роду мікромасаж, який сприяє кращому обміну речовин. Підвищена інтенсивність ультразвукових коливань може викликати кавітацію, а потім, і механічне руйнування тканин і клітин; зародками кавітації служать завжди присутні у біологічних середовищах бульбашки газу.

При ультразвуковому поглинанні в біологічних тканинах відбувається перетворення звукової енергії в теплову. Найбільш помітно утворення тепла на межах середовищ з різними хвильовими опорами і здійснюється не однаково по всій товщині тканини. Місцеве нагрівання тканини на одиниці градусів призводить до функціонування біологічних об'єктів, оскільки процеси обміну речовин сильно залежать від температури. Але суттєве збільшення інтенсивності ультразвуку і тривалості його дії можуть викликати надмірне нагрівання і руйнування біологічних структур тканин.

Зміни, що виникають у біологічних об'єктах при дії ультразвуку, можуть бути також спричинені вторинними ефектами фізико-хімічного характеру. Наприклад, внаслідок утворення акустичних потоків виникає інтенсивне перемішування мікроструктур усередині клітин. Кавітація спричиняє розрив зв'язків між молекулами. Наприклад, молекули води поділяються на вільні радикали, що являє собою першу причину впливу ультразвуку, що окислює. Подібним чином під дією ультразвуку здійснюється розпад в біологічних об'єктах високомолекулярних сполук, наприклад, білкових речовин, нуклеїнових кислот, крохмалю. Відомо, що ультразвук призводить до зміни рН тканин в кислу або лужну сторону, в залежності від тривалості впливу та його інтенсивності.

Пластична деформація під дією ультразвуку обумовлена його впливом на

структуру та властивості тіста. Завдяки чому за невеликий відрізок часу здійснюється місцеве нагрівання навколо джерел поглинання, розблокування дислокацій, зняття напруг, збільшення їх рухливості, що призводить до більш інтенсивного ходу пластичної деформації. Різко знижується контактне тертя (на 20-50%). Після ультразвукової обробки тіста в'язкість верхньої скоринки макаронів зменшується на 10 - 40%, а структура виходить гладкою за рахунок компактного укладання полімерних молекул білка і крохмалю.

## 2.6 Висновки до другого розділу

Накладення ультразвуку на матрицю істотно змінює властивості і характер перебігу тіста через фільтри матриці, знижує тиск і енергетичні витрати, підвищує продуктивність макаронного преса.

При ультразвуковій обробці тіста в'язкість верхньої скоринки макаронів зменшується на 10 - 40%, а структура виходить гладкою за рахунок компактного укладання полімерних молекул білка і крохмалю.

## РОЗДІЛ 3

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ

#### 3.1 Удосконалення технології виробництва макаронних виробів

Для пресування макаронних виробів використовували борошно пшеничне вищого гатунку. Вміст вологи тіста становив 32%. На заміс подавалась вода із температурою 22 - 23°C. Сутність ультразвукової технології при пресуванні макаронних виробів передбачається зниження витрати електроенергії в 1,4 - 1,6 разів, підвищення міцності макаронів на 20 - 30%, зміна показників розварюваності макаронів [16, 32, 33]. На основі теоретичного пошуку створено експериментальну установку для створення методики розрахунку промислових макаронних пресів.

Обладнання відноситься до харчової промисловості, конкретно до пристроїв, що використовують фізичні ефекти ультразвуку у в'язких структурах (тісті), воно може застосовуватися для виробництва високоякісних макаронних виробів з добавками. Відомо, що зараз у споживачів великим попитом користуються макарони з петрушкою, кропом, томатною пастою та іншими харчовими добавками. Добавки знижують варильні та інші властивості виробів у гірший бік, а це вимагає збільшення тиску при пресуванні. Але в сучасних пресах тиск сягає 200 кгс/см<sup>2</sup>, що не сприятливо позначається на реологічних властивостях готових виробів і вимагає потужних систем охолодження.

Використання ультразвуку зменшує витрати електроенергії та необхідний тиск при пресуванні в'язко-пластичних матеріалів, збільшує продуктивність харчового обладнання, та покращує якість виробів. Проведений аналіз показав, що вібрації перспективні й у технологічних процесах виробництва макаронних виробів. Ефекти, що спостерігаються при пресуванні тесту, виражаються різного ступеня, що залежить від амплітуди та частоти коливань, вологості матеріалу, методу підведення вібрацій до шнекової труби або до матриці макаронного преса. Огляд досліджень підтверджує, що ультразвукове пресування має безліч

відмінностей від низькочастотного вібраційного пресування, що застосовується в харчовій промисловості:

- значне зменшення сили тертя при пресуванні макаронного тіста в шнековій трубі та матриці преса;
- локальне виділення тепла в місці деформації на поверхні формованих виробів;
- прояв ефекту «цементації» поверхневого наношару виробу при зіткненні з високо рухомими фільсерами матриці;
- збільшення пластичності та зниження щільності дефектів та внутрішніх напруг. У цьому межа міцності макаронних виробів зростає.

Відомі преси з низькочастотними вібраторами в яких представляється пристрій для пресування макаронних виробів, що включає нагнітач, передматричну камеру з встановленим всередині вібратором і матрицю. Вібратор зроблений у вигляді двоопуклої лінзи для виправлення швидкості пресування та підвищення за рахунок цієї якості макаронів. Пропоноване технічне рішення дає незначне підвищення якості продукції, особливо для макаронних виробів з добавками. Ця конструкція має суттєві недоліки в тому, що макаронні вироби мають знижену міцність і високу пористість, що знижують терміни зберігання і варильні властивості продукту у зв'язку з недостатнім зв'язком частинок борошна та інгредієнтів. Мабуть, процес пресування в низькочастотному діапазоні вібрацій не забезпечує розкриття зв'язків рослинних полімерів. Ультразвуковий вплив обумовлює більш рівномірний розподіл частинок оброблюваного матеріалу по всьому обсягу виробу, зменшення пористості матеріалу. Таким чином, здобувається рівномірна структура оброблюваного макаронного тіста, підвищується його густина. В результаті накладення ультразвукової енергії на пресований матеріал відбувається більш рівномірний прояв ефекту акустичного укладання матеріалу, що покращує процес його пресування при дії статичного тиску. Що призводить до високих фізико-механічних показників виробів, чого не можливо досягти використовуючи інші відомі методи пресування.

Накладання поля ультразвуку може здійснюватися, наприклад, шляхом

закріплення концентратора ультразвукових коливань через фланець коливальної системи з тримачем матриці, які спрямовані перпендикулярно по відношенню до напрямку просування макаронних виробів у матриці [21, 35].

Найближчий аналог даного винаходу – прес макаронний Б6 - ЛПШ - 500.

Перед початком формування макаронного тіста включають ультразвуковий генератор і налаштовують роботу концентратора в резонанс із вузлом формування – матрицею (рис. 3.1).

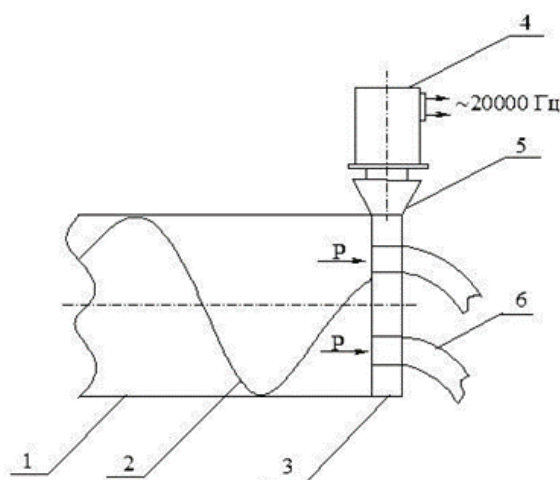


Рис. 3.1 - Схема пресування макаронних виробів з накладенням ультразвуку на матрицю: 1 – шнекова труба; 2 – шнек; 3 – матриця; 4 – магнітний перетворювач; 5 – ультразвуковий концентратор; 6 – макаронні вироби

Після цього по шнековій трубці 1 подається шнеком 2 спресоване тісто до матриці 3 і у зв'язку з проявом акустичного ефекту тиск значно знижується, як і споживана потужність електродвигуна. Ультразвуковий генератор працює з частотою 22 кГц; інтенсивність 1,5-2,0 Вт/см<sup>2</sup> (докавітаційний режим); амплітуда від 10 мкм; зусилля пресування шнека  $P = 4 - 6$  МПа [17, 21].

У процесі пресування магнітострикційний перетворювач 4 збуджується і починає створювати коливання з частотою ультразвуку, концентратор 5 посилює коливання і передає їх матриці 3, яка так само починає здійснювати поперечні коливання, що передаються макаронній масі, що пресуються. За впливу цих коливань, частинки тіста поглинають енергію, особливо поверхневі шари. При

цьому суттєво зменшується тертя між частинками, зникають напружені і застійні зони, повітряні пори і нерівномірність пресування, таким чином, ущільнення макаронного тіста досягає максимального значення.

Проведений аналіз прототипу відомого та запропонованого макаронного преса виявляє його суттєві переваги. Розрахунки показують, що витрати на модернізацію макаронного преса дозволяють зменшити собівартість макаронних виробів на 17-20%, підвищити їх термін зберігання, міцність, варильні та смакові якості [21, 23].

Таким чином, запропонований спосіб та пристрій має елементи новизни і значні відмінності від прототипу, які забезпечують йому нові та корисні характеристики.

### 3.2 Особливості високотемпературного пресування макаронних виробів

Використання ультразвуку веде до нагрівання макаронного тіста і збільшення продуктивності самого преса. Підігрів макаронного тіста під час замісу застосовувався і раніше в інтервалі температур від 60 до 65°C, але для більшого підвищення продуктивності преса можливе тимчасове нагрівання тіста і до температур вищих [16]. Додатково під дією ультразвуку відбувається нагрівання лише матриці. У цьому випадку, під час секундного проходження ущільненого тіста через канали матриці, навіть досить високі температури впливу ультразвуку на тісто не призводять до глибоких змін у білку. Крім цього, пресовані крізь нагріту матрицю макаронні вироби мають позитивні зміни властивостей крохмалю і білка в поверхневому шарі.

Результати дослідів деяких авторів вказують на двократне збільшення продуктивності преса з температурою матриці від 70 до 80°C порівняно зі стандартним режимом (температурою матриці 50°C). Подальше підвищення температури веде до підвищення швидкості пресування. Але якщо температура матриці піднімається вище 120°C, то внаслідок істотної різниці температур повітря і виробів і моментального випаровування вологи з нагрітих виробів,

спостерігається спучування поверхні пресованих сирих готових виробів.

При пресуванні виробів через нагріту приблизно до  $110^{\circ}\text{C}$  металеву матрицю вироби, що пресуються, мають дуже гладку поверхню. Це відбувається у зв'язку з тим, що волога, що випаровується з виробів і пресуються при контакті з нагрітою поверхнею каналів матриці утворює паровий прошарок між пресуючою щільною матрицею і поверхнею виробів, яка запобігає прилипанню поверхні щілини до поверхні виробу. Цей ефект найбільш виражений при впливі ультразвуку через утворення безлічі акустичних явищ [17].

При утворенні прошарку пари значно збільшується і швидкість пресування виробів. Розмірний характер наростання її в діапазоні температур  $50 - 100^{\circ}\text{C}$  викликаний підвищенням пластичності пресованого тіста. Через тимчасову взаємодію виробу з поверхнею каналів матриці до її температури нагрівається тільки поверхневий шар виробу, що пресується. Внутрішні шари нагріваються не вище  $60^{\circ}\text{C}$ , тому заварювання тіста за цієї температури не відбувається. Плинність тіста в каналах матриці максимальна, через відсутність внутрішнього зміщення шарів [13, 21].

Разом із підвищенням плинності тіста за впливу ультразвуку та температури відбувається не тільки збільшення швидкості пресування, а й зниження тиску пресування. При цьому необхідно мати на увазі, що існують деякі межі тиску пресування: не менше 6 МПа без ультразвуку і не менше 4-5 МПа при пресуванні в ультразвуковому полі. У цьому випадку можна отримати досить міцну структуру макаронних виробів [32].

Наші дослідження показали, що зі збільшенням матричної температури до  $50 - 70^{\circ}\text{C}$  і при вологості макаронного тіста 31%, продуктивність макаронного преса підвищується майже в 1,4 рази, а тиск пресування зменшується на 27%. Пресування тіста з нижчою вологістю (28%) дає можливість збільшити тиск пресування до значення, характерного для стандартного режиму (з температурою матриці  $50^{\circ}\text{C}$  і вологістю тіста 32%). Незважаючи на те, що продуктивність макаронного преса при цих режимах майже однакова, витрата теплоти на подальше сушіння істотно зменшується. Пресування сирих макаронних виробів



через нагріту матрицю веде до випаровування вологи з виробів, і їх вологість знижується ще майже на 3% у порівнянні зі стандартним режимом. Це дозволяє запобігти злипанню сирих макаронних виробів у сушарці та суттєво полегшити режим сушіння, забезпечивши високу міцність виробів.

Збільшити тиск пресування, майже не змінюючи при цьому вологість тіста, можна також за допомогою подачі в сорочку шнекової камери холодної води. Причому підвищення продуктивності преса при нагрітій матриці зберігається.

Високотемпературне пресування найбільше ефективно при виробництві виробів з хлібопекарського борошна, напівкрупки, виробів з яєчними добавками, а також при застосуванні матриць з невисокою пропускною здатністю (низьким коефіцієнтом живого перерізу). Підвищення продуктивності преса має проводитися разом з відповідним підвищенням подачі маси тіста в камеру шнека, в іншому випадку це призведе до зниження тиску пресування та зниження якості виробів [33, 34].

При високотемпературному методі пресування рекомендовані наступні оптимальні температури матриць:

- 75...85°C – для матриць зі вставками з тефлону. Через зниження міцності вставок, вищі температури не рекомендуються і сприяють підвищенню якості виробів;

- 110 ... 120°C – при застосуванні матриць без вставок з тефлону, так як при цьому можна досягти максимального підвищення продуктивності макаронного преса і отримати продукт найкращої якості (найкращі варильні властивості і гладка поверхня).

Готові сирі вироби бажано продувати не нагнітанням повітря в отвори обдувача (вентилятора), а всмоктуванням, у зв'язку з істотним випаровуванням вологи з пресованого через нагріту матрицю напівфабрикату.

При переході на режим високотемпературного пресування з підвищенням продуктивності преса режим сушіння сирих виробів не змінюється, так як маса виробів, що надходять у сушарку, підвищується, а вологість зменшується.

А при переході на високотемпературний режим пресування без підвищення продуктивності преса (зі зменшенням вологості тіста в камері замісу на 2% і більше) режим сушіння сирих виробів необхідно зробити більш м'яким. Для чого знижують температуру в сушарці, знижуючи тиск при вході в сушарку пари, що нагріває.

### 3.3 Процес нагрівання тіста з використанням ультразвуку при пресуванні макаронних виробів

Використання звичайних макаронних пресів при всій їх різноманітності у своїй модернізації досягло певної межі. Але так, як макаронне тісто є біополімерної масою, модифікується і ущільнюється в матриці преса, то за аналогією з відомими технологіями в деревообробній промисловості та сільському господарстві є сенс для зниження енергетичних витрат та підвищення якості виробів застосувати обробку в полі ультразвуку, на що є достатньо багато наукових робіт. У спрощеному вигляді тісто перед пресуванням представляє пористу структуру, що складається з частково набряклих клейковинних ниток, пов'язаних крохмалем, бульбашками повітря, пари і води, як розчинника. Вплив на макаронне тісто ультразвуку в процесі пресування знижує тертя між частинками і тертя частинок макаронного тіста стінки шнекової труби і матриці, частково руйнує великі частинки і агломерати, збільшує поверхневу активність молекулярних зв'язків і рівномірно їх розподіляє. Що зумовлює підвищення щільності пресованого виробу, збільшення швидкості дифузійних процесів, обмеження набухання макаронних мас при виході їх з матриці і збереження наноструктури, що утворилася.

При пресуванні в присутності знакозмінного тиску ультразвуку довгомірні молекули стають високорухливими і відбувається інтенсивне «розрідження». Тісто набуває більш плинного стану і легше ущільнюється.

На виробництві завдання модифікації та ущільнення тіста частіше вирішується застосуванням пресів з високим тиском і тому порушується

структура білкових та крохмальних ланцюгів, що негативно впливає на харчову цінність та інші якісні показники виробів [15].

Дослідження показують про можливість ущільнення та значної модифікації макаронного тіста при дозованій обробці ультразвуком [1, 16, 17]. Знакозмінна радіальна силова складова акустичного поля, перпендикулярна до пасма макаронів, сприяє «відтисканню» поверхні формованих виробів від стінок фільтер і разом з постійно діючою силою від шнека, дозволяє транспортувати пасма без руйнування і налипання на виході з фільтер матриці. Теоретично це дозволяє знизити значення статичної сили, необхідної для пресування, більше, ніж удвічі. Присутність у макаронному тісті акустичного поля підвищує його пластичність і веде до того, що борошняні частинки, подолавши сили пружності стисненого матеріалу, проводять періодичні тривимірні зміщення. Рівномірне ущільнення набряклих глобул відбувається в основному під час продавлювання через фільтери пасмів макаронних виробів. Швидкість введення тіста в матрицю обмежується температурою нагріву і допустимими залишками напругами, при яких макаронні вироби не руйнуються на виході з матриці і не змінюють розміри вище допустимих.

Технічна складність полягала в реалізації процесу, а саме в накладанні коливальних ультразвуку на матрицю при заданих енергетичних і геометричних обмеженнях.

Конструкція коливальної системи (рис. 3.2) складається з електромеханічного перетворювача 22000 Гц (1), робочого інструменту (2) з кріпленням (3), стакана-хомута (4), який призначений для монтажу ультразвукової коливальної системи до корпусу гайки матриці (5).

Задані геометричні обмеження звукопровода – вхідний діаметр до накидної гайки шнекової труби, що утримує матрицю прес-форми 68 мм, а вихідного перетворювача – 25 мм і напівхвильова конструкція робочого інструменту стали передумовами виникнення небажаних паразитних діапазонів.

Для запобігання деформуванню матриці при приєднанні ультразвукової коливальної системи була застосована спеціальна акустична розв'язка –

стягуючий стакан-хомут. Монтаж ультразвукової коливальної системи до накидної гайки здійснювався через прокладки з капрону для виключення повітряних зазорів між корпусом гайки матриці і стягуючим стаканом-хомутом.



Рис. 3.2 - Конструкція ультразвукової коливальної системи: 1 – електро-механічний п'єзоелектричний перетворювач; 2 – робочий інструмент з конічною внутрішньою випромінюючою поверхнею; 3 – кріпильний поясок; 4 – стягуючий стакан-хомут; 5 – корпус гайки матриці

Це дозволить виключити втрату ультразвукової енергії, що вводиться в тісто і виключити виникнення механічних коливань ультразвукової та звукової частоти на кріпильних елементах коливальної системи та пов'язаних з ними вузлах шнекового пристрою. Таким чином, забезпечені хороші умови передачі ультразвукової енергії до матриці і власне макаронного тіста.

Існує два види поглинання енергії ультразвуку тістом: при нагріванні в обсязі та при підвищенні міцності поверхні пресованих виробів. При цьому не можна допускати денатурацію білків тіста та клейстеризацію крохмалю ні в обсязі кожного виробу, ні на його поверхні [21].

Загальна потужність поглинання ультразвуку  $P$  всіх пасмів дорівнює сумі потужності  $q_1$ , що витрачається на нагрівання приконтальної поверхневої області пасм до температури  $50-55^{\circ}\text{C}$  (через дисипативність сили тертя вся ця потужність, швидше за все, витрачається на нагрівання приконтальної області зразка) і

потужності  $q_2$ , що витрачається на ущільнення поверхневого шару переміщуваних набряклих частинок.

Другий вид поглинання виникає в результаті ультразвукового впливу це в'язке тертя набряклих частинок в обсязі кожного виробу при перебудові хаотичної структури інгредієнтів тіста в упорядковано-витягнуту вздовж пасм макаронних виробів.

Для того, щоб у тісті не відбулася денатурація білка та клейстеризація крохмалю, його не можна нагрівати вище рекомендованої температури.

Продуктивність преса безпосередньо залежить від часу знаходження тіста у фільерах матриці.

Як впливає з наведених співвідношень, всередині тіста при обробці ультразвуком має місце істотна неоднорідність розподілу теплової потужності: при збільшенні потужності ультразвуку вище деякої порогової спостерігалось заварювання поверхні зразка.

Запропонована методика дозволяє оцінювати та визначати потужність впливу ультразвуку, необхідну для якісної обробки макаронного тіста.

Теоретичні дослідження показали, що застосування високочастотних (ультразвукових) механічних коливань, що накладаються на пресуючий пристрій, знижує процеси тертя і сприяє збільшенню ресурсу фільер матриці, що узгоджується з деякими науковими роботами [16, 17, 21]. Відомо, що в борошні досить багато абразивного мінерального пилу, у зв'язку з чим навіть високоміцні імпорتنі матриці набувають наднормативного зносу через 500-2000 годин роботи преса в залежності від виробничих умов, якості сировини, дотримання параметрів догляду за обладнанням. Тому можливість зниження зносу матриць приваблює своїм нескладним виконанням.

Незначна частина потужності ультразвуку також витрачається на інактивацію мікрофлори тіста. Виявлено зниження кількості патогенної мікрофлори на 35-40% та кислотності готових сирих виробів на  $0,5-0,7^\circ\text{T}$ .

Запропонована методика дозволяє оцінювати та визначати потужність впливу ультразвуку, необхідну для якісної обробки макаронного тіста.

### 3.4 Математичне моделювання макаронних виробів при дії ультразвуку

Відомо велика кількість досліджень, пов'язаних з впливом вібрацій та ультразвуку в різних галузях промисловості на швидкість технологічних процесів та якість продукції. У практиці виробництва макаронів явище розбухання пресованого через матрицю макаронного тісту добре відомо, як і вплив його на розміри та параметри міцності високоякісних виробів. Набухання тіста на виході з фільтр матриці відбувається, в першу чергу, через перебудову швидкостей з параболічного профілю на стрижнеподібний. Що веде до стиснення тіста та утворення локальних розтягувань і, таким чином, перекручування поперечного перерізу. Крім цього виникає релаксація деформацій, які накопичені матеріалом під час течії, що пов'язано з проявом його в'язкопружності. Накопичені матеріалом деформації викликані дією напруг зсуву [12, 18].

У ряді робіт з переробки пластичних мас та органічних волокнистих матеріалів дана кількісна оцінка цього процесу [17]. Використання спрощених моделей дає, як правило, приблизне рішення, недостатньо адекватне експериментальним даним, а більш складні моделі досить громіздкі при практичному застосуванні. У зазначених моделях не розглядається одна з найважливіших експлуатаційних і технологічних характеристик – «розбухання» пресованих виробів складного профілю, одержуваних в умовах впливу ультразвукових коливань. Опис явища «розбухання» обмежується, як правило, зразками у вигляді прутка круглого поперечного перерізу або плоского листа, хоч макаронні вироби мають значно більш розвинені форми в перерізі.

Тому інтерес представляє математична залежність, що дозволяє кількісно визначити ефект розбухання при пресуванні макаронного тіста через канали будь-якого складного перерізу при використанні інтенсивних ультразвукових вібрацій.

На величину «розбухання» макаронного тіста впливають, в першу чергу, молекулярні характеристики та фізичні властивості матеріалу, технологічні умови переробки (температура, швидкість, напруга зсуву), а також геометричні розміри формуючих фільтр матриці. Так явище підвищення в'язкості тіста характерне

лише для невеликих швидкостей зсуву [12]. При підвищених швидкостях деформації, наприклад, під час пресування під дією високочастотного знакозмінного тиску ультразвуку у фільерах матриці утворюється розрив молекулярних зв'язків компонентів тіста. Молекулярні та кінетичні явища, які відбуваються при деформації без ультразвуку, переходять у стан збудження і в тісті виникає «лавиноподібний» процес перебудови та порушення міжмолекулярних зв'язків компонентів тіста. А саме, з підвищенням швидкості деформації (частоти ультразвуку) з більшою швидкістю виникає розрив зв'язків, що вказує на зниження величини ефективної в'язкості [1, 11, 17].

При моделюванні ефекту «розбухання» тіста будемо вважати, що при перебігу його через канал довгомірні ланцюги білків і крохмалю піддаються зсувній деформації, подовжуються, а після виходу з каналу фільери за рахунок релаксації дещо скорочуються і розширюються, при цьому розтягування та скорочення носить частково пружний характер.

Таким чином, у виразі (3.1), що описує математично коефіцієнт «розбухання»  $K$ , обов'язково слід враховувати довжину каналу  $L$  і його площ  $S_k$ . Крім цих величин суттєво впливають тиск  $P$  при пресуванні макаронного тіста, ефективна в'язкість  $\eta_{\text{эф}}$ , градієнт швидкості зсуву  $\dot{\gamma}$  та параметр  $\theta$ , що враховує еластичні властивості макаронного тіста:

$$K = A \cdot \dot{\gamma}^{n_1} \cdot \theta^{n_2} \cdot P^{n_3} \cdot \eta_{\text{эф}}^{n_4} \cdot L^{n_5} \cdot S_k^{n_6}, \quad (3.1)$$

де  $A$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує природу макаронного тіста;

$n_1$ -  $n_6$  – показники ступенів.

Показники ступенів  $n_1$ - $n_6$  як і постійна  $A$  визначаються експериментально.

Для фільер складної форми необхідно у вираз (3.1) ввести коефіцієнт форми каналу  $a$  і  $b$ , які також зумовлені експериментально.

$$K = A \cdot a^{m_1} \cdot b^{m_2} \cdot (\dot{\gamma} \cdot \theta)^{n_1} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{эф}}}{P \cdot \theta}\right)^{n_2} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_k}}\right)^{n_3}, \quad (3.2)$$

де  $m_1, m_2$  – показники ступенів.

Вплив ультразвуку на пресовані пасма макаронних виробів супроводжується істотним зниженням коефіцієнта «розбухання». У першу чергу

за рахунок зниження ефективної в'язкості тіста з  $\eta_{эф}$  до деякого значення, що залежить від частоти ультразвуку  $\eta_{\omega}$ .

Вводимо в рівняння (3.2) замість  $\eta_{эф}$  параметр  $\eta_{\omega}$ , що характеризує вплив ультразвуку на ступінь «розбухання» макаронного тіста:

$$K = A \cdot a^{m_1} \cdot b^{m_2} \cdot (\dot{\gamma} \cdot \theta)^{n_1} \cdot \left(\frac{\eta_{\omega}}{P \cdot \theta}\right)^{n_2} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_K}}\right)^{n_3}, \quad (3.3)$$

Таким чином, рівняння (3.23) представляє математичну модель, що враховує не тільки вплив накладання ультразвукових коливань на «розбухання» при пресуванні макаронного тіста, але й розмірні показники фільєр складної форми.

Надалі слід провести експериментальні дослідження з оцінки коефіцієнта «розбухання» в залежності від геометрії фільєр, параметрів процесу пресування, фізичних властивостей використовуваного типу тіста, а також від характеристик ультразвукових коливань в цілому та підтвердити адекватність теоретичних досліджень.

Для проведення експериментів використовувалася дослідна установка [17], що включає шнековий прес з завантажувальним бункером. Для створення ультразвукових коливань до матриці преса хомутом із нержавіючої сталі був приєднаний п'єзоелектричний перетворювач, пов'язаний з генератором ультразвукових коливань. Зміна характеристик ультразвуку, що підводяться, проводилося на самому генераторі. Експериментальні дані знімалися для макаронних виробів з борошна хлібопекарського пшеничного вищого гатунку в інтервалі температур 323 - 338 К, тиску пресування до 4 МПа та амплітуді ультразвуку – 30, 40 та 50 мкм. Діапазон температур пресування прийнятий з міркувань мінімальної зміни білків та вуглеводів макаронного тіста.

При аналізі значень коефіцієнта «розбухання»  $K$  виявлено такі особливості:

- для макаронного тіста, що досліджуємо, зі зростанням довжини каналу (на спеціально виготовленій потовщеній матриці з 7 мм до 12 мм), характерне зменшення коефіцієнта «розбухання». Це є суттєвим фактором при конструюванні формуючого каналу;



- зниження коефіцієнта «розбухання» макаронного тіста при впливі ультразвуку на 15-18% спостерігалось для всіх досліджуваних форм каналів у фільєрах. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними становить близько 12%;

- амплітуда ультразвукових коливань впливає на продуктивність материнки та масову витрату макаронного тіста. При цьому найкращі результати (зростання продуктивності преса на 20%) отримано при амплітуді ультразвуку 30 мкм;

- найбільший позитивний вплив ультразвуку виявлено для каналів фільєр складної форми (зірочка). Мабуть в цих каналах є більше застійних зон, але при впливі ультразвуку прилипання;

- розриви і тріщини тіста при виході з матриці істотно зменшуються;

- ультразвук, збільшуючи температуру пресування, за відомими законами підвищує продуктивність преса. При цьому коефіцієнт «розбухання» також росте, мабуть, за рахунок малого часу знаходження тіста у фільєрах.

Таким чином, отримані результати з оцінки коефіцієнта «розбухання»  $K$ , можуть бути застосовані при розрахунку фільєр матриць з урахуванням впливу ультразвуку на розмірні параметри високоякісних макаронних виробів.

### 3.5 Методика проведення експериментальних досліджень

Будь-який фактор при активному плануванні має бути керованим, щоб можна було встановлювати значення на різних рівнях. У багатофакторному експерименті, необхідно, щоб фактори були незалежні і щоб будь-хто з них міг формуватися вільно від рівнів інших факторів, наприклад, потужність випромінювача ультразвуку, швидкість обертання валу шнека і т. д. При повному факторному експерименті (ПФЕ) зустрічаються всі допустимі поєднання рівнів досліджуваних факторів. Кількість випробувань  $n$  в цьому випадку дорівнює взаємному добутку чисел рівнів кожного з факторів, що вивчаються. Якщо число рівнів  $K$  кожного з факторів однаково, то:

$$n = K^p, \quad (3.4)$$

де  $p$  – кількість факторів.

Для п'яти факторів, що мають по чотири рівні,  $n=4^5$  і рівне 1024.

У таких випадках практично неможливо реалізувати схему ПФЕ. Активні експерименти ставляться так, що в кожному досліді за спеціальним планом варіюються незалежні фактори. Пропущені поєднання рівнів може бути нейтралізовані методами активного планування експерименту. Засновником напряму є англійський вчений Р. А. Фішер. Подальший розвиток він отримав у роботах Г. Є. Бокса, К. В. Вілсона, В. В. Налімова. Припустимо, що знаходиться рівняння моделі об'єкта у формі полінома (відривка статичного ряду Тейлора).

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{\substack{j,l=1 \\ j < l}}^p b_{lj} x_j x_l + \sum_{j=1}^p b_{jj} x_j^2 + \dots \quad (3.5)$$

Метою планування експерименту є розшук оцінок коефіцієнтів  $b$ . Рівняння моделі за результатами проведених дослідів у  $n$ -точках факторного простору. Поверхня відгуку зазвичай досліджується, доки не буде виявлено область, близька до оптимального (мінімального або максимального) значення  $y$ . Після цього дослідження припиняють.

### 3.6 Висновки до третього розділу

У розділі складено математичну модель, що враховує вплив накладання ультразвукових коливань на «розбухання» при пресуванні макаронного тіста і розмірні показники фільтер преса.

Аналіз результатів обробки дослідних даних, з урахуванням наведеної вище методики оцінки їх адекватності свідчить про те, що запропонована модель відображає належною мірою специфіку процесів, що відбуваються. Отримані результати свідчать про адекватність емпіричної моделі. Похибка теоретичної моделі щодо побудованої адекватної емпіричної моделі не перевищує 8 - 11%, що свідчить про можливість використання прийнятих модельних допущень для розрахунку та аналізу запропонованого преса з ультразвуковим генератором.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕСУВАННЯ МАКАРОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

4.1 Опис експериментальної установки та методика проведення експерименту

Загальна схема роботи здійснювалася у 4 етапи:

1. Здійснено аналіз патентної інформації та науково-технічної літератури на тему ультразвукового пресування макаронних виробів.

2. Створено наукову концепцію пресування макаронів у полі ультразвуку, визначено безпеку виробів та їх харчову цінність.

3. Розроблено та експериментально перевірено конструкцію преса та технологічні режими виробництва макаронів з використанням ультразвуку.

4. Встановлено вплив випробуваного способу на показники якості та безпеки пресованих макаронів.

Зовнішній вигляд дослідної установки з пресування макаронних виробів у полі ультразвуку представлено на рисунку 4.1.



Рис. 4.1 - Дослідна установка з пресування макаронних виробів у полі ультразвуку: 1 – комп'ютер з програмним забезпеченням; 2 – генератор ультразвуку; 3 – макаронний прес; 4 – ультразвуковий випромінювач з магнітно-стрикційним перетворювачем

Комплект технологічного ультразвукового обладнання для здійснення експерименту складається з:

- генератора ультразвуку, який є джерелом живлення системи коливань ультразвуку;
- генератора, що забезпечує отримання необхідного технологічного ефекту;
- системи коливань ультразвуку, яка перетворює електричні коливання в механічні коливання із частотою ультразвуку;
- технологічної установки пресування (преса), що забезпечує послідовне виконання пресування і потім пресування тіста в пасмі сирих макаронів.

Схема експериментальної установки з пресування макаронних виробів із застосуванням ультразвуку зображено на рисунку 4.2.

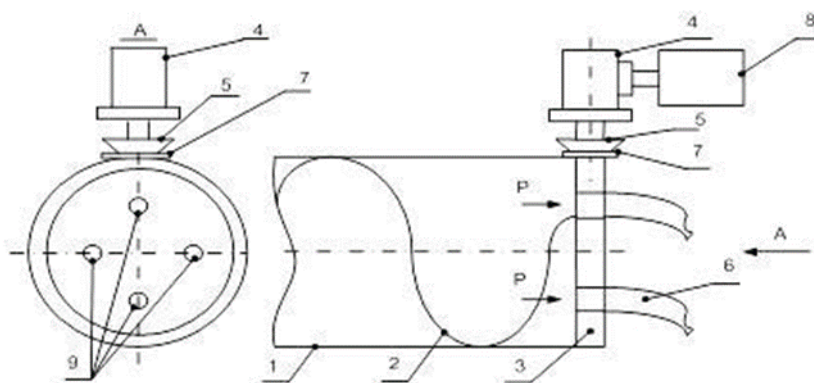


Рис. 4.2 - Схема експериментальної установки: 1 – шнекова труба; 2 – шнек; 3 – матриця; 4 – магнітострикційний перетворювач; 5 – ультразвуковий концентратор; 6 – пресовані вироби; 7 – фланець; 8 – ультразвуковий генератор; 9 – отвори матриці

Ультразвуковий генератор 8 (високочастотний генератор «Хвиля-М»), що працює з амплітудою 10-40 мкм, частотою  $22 \pm 0,5$  кГц, інтенсивністю від 1,5-2,0 Вт/см<sup>2</sup>. П'єзоелектрична коливальна система використовувалася в якості магнітострикційного перетворювача 4 з споживаною потужністю до 1 кВт.

Підвищення якості готових макаронних виробів, підвищення продуктивності преса, збільшення терміну придатності виробів це все є технічною задачею розробленого преса.

Конструкція макаронного преса, який містить тістомісильний бункер, шнек в шнековій камері, матрицю, також включає в себе ультразвукову систему, що складається з ультразвукового концентратора, магнітострикційного перетворювача, ультразвукового генератора. Причому вхід магнітострикційного перетворювача пов'язаний з виходом ультразвукового генератора. А вихід магнітострикційного перетворювача пов'язаний з входом ультразвукового концентратора, який за допомогою фланця нерухомо закріплений на матриці в площині матриці.

Перед початком пресування макаронного тіста ультразвуковий генератор 8 включають і разом з вузлом формування – матрицею налаштовують роботу концентратора 5.

Потім по шнековій камері 1 спресоване макаронне тісто подають шнеком 2 до матриці 3, але у зв'язку з акустичним ефектом тиск при пресуванні значно знижується, за рахунок чого збільшується продуктивність преса.

У зоні матриці відбувається дія ультразвукових коливань на структуру тіста, за рахунок якої видаляються напружені зони в тесті, зменшується тертя між його шарами і видаляються повітряні пори, значно знижується тиск при пресуванні. Під час процесу пресування магнітострикційний перетворювач 4 виробляє ультразвукові коливання з частотою 22 кГц, які через хомут передаються концентратором 5 до матриці 3, що починає також здійснювати коливання, діючи на макаронне тісто, що пресується в ній. Енергія поглинається шарами тіста під дією коливань, особливо поверхневими шарами. Під час цього значною мірою зменшується тертя між шарами, видаляється нерівномірність розподілу за обсягом частинок пресованого тіста, повітряні пори та напружено-застійні зони, і в зв'язку з цим ущільнення тіста досягає свого максимального значення. При цьому поверхня виробів за рахунок ультразвукового капілярного ефекту змочується виділеною вологою, що також значною мірою впливає на зменшення тертя поверхні виробів, що пресуються, з фільерами матриці.

Сушіння макаронних виробів у подальшому прискорюється за рахунок того, що волога з центру виробу під час пресування вже виділилася на поверхню

виробу під дією звукокапілярного ефекту. У зоні матриці відбувається ефект додаткового ультразвукового тиску на продукцію – в кожен напівперіод виріб торкається лише половиною поверхні фільтри, що також призводить до зменшення сили тертя в матриці з поверхнею виробів і до збільшення продуктивності макаронного преса. При цьому поверхня виробів за рахунок ультразвукового капілярного ефекту змочується виділеною вологою, що також значною мірою впливає на зменшення тертя поверхні виробів, що пресуються, з фільтрами матриці.

Візуальний ефект накладання поля ультразвуку при пресуванні макаронних виробів без ультразвуку та з ультразвуком представлений на рисунку 4.3. На (рис. 4.3, а) помітно видно шорстку поверхню виробу. Із застосуванням ультразвуку на матриці макаронного преса одержали гладку поверхню макаронних виробів, без ознак непромісу (рис. 4.3, б).

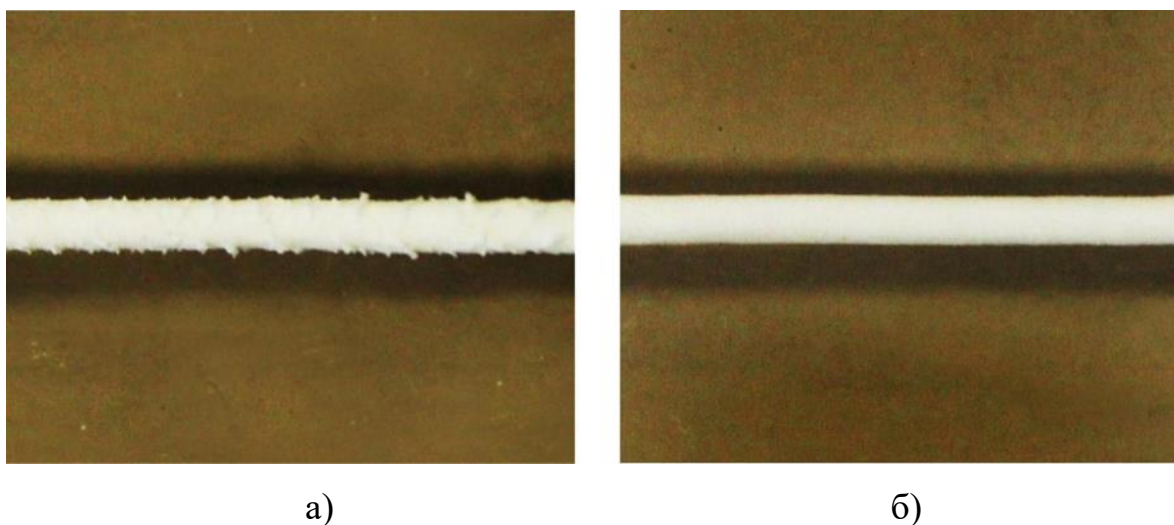


Рис. 4.3 - Візуальний ефект накладання поля ультразвуку при пресуванні макаронних виробів: а) – без ультразвуку; б) – з ультразвуком

Таким чином, запропонований пристрій має новизну, нові корисні характеристики і суттєві відмінності від звичайних пресів [16, 17].

## 4.2 Аналіз ефективності макаронного преса від параметрів ультразвуку

Залежність продуктивності макаронного преса від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача простежується на рисунку 4.4. При амплітуді ультразвукових коливань від 20 до 40 мкм продуктивність підвищується до 24-26%. Подальше збільшення амплітуди призводить до денатурації білка та клейстеризації крохмалю.

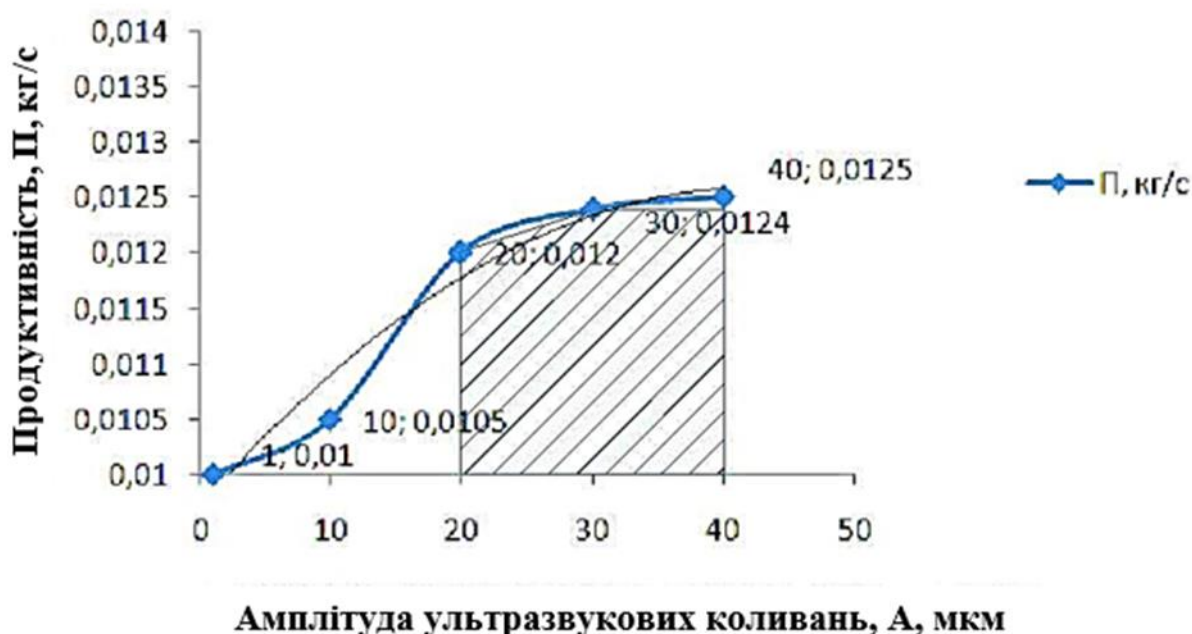


Рис. 4.4 - Залежність продуктивності макаронного преса від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача

На графіку (рис. 4.4) продуктивність макаронного преса після амплітуди 10 мкм зростає з певним прискоренням. Помічено, що при досягненні зміщення коливань агломератів або частинок борошна більше 40 мкм при дії ультразвуку йде помітний спад продуктивності.

Тому, при зміні гранулометричного і якісного складу борошна необхідно змінювати амплітуду ультразвукових коливань, що підводяться до матриці, відповідно до розміру частинок тіста. Таким чином, головною причиною, яка впливає на продуктивність пресованого тіста, є зниження опору матриці через тимчасове розрідження тіста і зменшення коефіцієнта тертя. Отримано

апроксимаційну залежність для продуктивності макаронного преса від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача:

$$P = -1,6 \cdot 10^{-6} \cdot A^2 + 1,35 \cdot 10^{-4} \cdot A + 9,7 \cdot 10^{-3}. \quad (4.1)$$

Ставилося завдання до мінімуму уникнути впливу на вироби процесів бокового (пристінного) тертя. При цьому необхідно було це зробити не додаванням води або іншого пластифікатора в тісто (олії, спирту і т. д.). Після проведених нами експериментів, знизити ступінь негативного впливу пристінного тертя без використання пластифікаторів можливо механічними ультразвуковими коливаннями з достатньою інтенсивністю формоутворюючих поверхонь матриці, коли в парі тертя «стінка фільтри - поверхня виробу» виникатиме періодичний відрив поверхні виробу і сили тертя діятимуть тільки в моменти їхнього дотику. Час дотику та час контакту будуть зовсім різні.

Таким чином, коефіцієнт пристінного тертя, зменшиться пропорційно відношенню періодів часу контакту і відриву. Експеримент показав, що за 1/4 часу таке тертя падає до нуля, тому продуктивність піднімається практично на цю величину.

За рахунок такого впливу, можна також знизити сили тертя між частинками борошна в тісті, що важливо для збільшення густини при їх упаковці, а відповідно і густини сухих макаронів та їх міцності.

То ж потужний ультразвуковий вплив є способом механоактивації та деагломерації наночастинок у процесі компактування частинок борошна у виробі.

Судячи з графіка, продуктивність преса зростає не рівномірно, а спонтанно після амплітуди більше 10 мкм, що можна порівняти з довжиною або розміром частинок борошна. Помічено, що при досягненні зміщення коливань агломератів або частинок борошна більше 30 мкм при дії ультразвуку йде помітний спад продуктивності.

Отже, необхідно знаходити відповідну амплітуду ультразвукових коливань, що підводяться до матриці. Таким чином, головною причиною, яка впливає на продуктивність пресованого тіста, є зниження опору матриці через зниження тертя.



Правильний підбір спеціалізованого оснащення може істотно змінювати продуктивність преса з ультразвуковим впливом.

Підведення коливань ультразвуку до матриці можна зробити двома способами. У першому, напрям зміщення коливань збігається з віссю випресовування, у другому – коливання ультразвуку розташовані перпендикулярно осі випресовування. У другому випадку передача енергії ультразвукових коливань до тіста здійснюється через границю «стінка фільери матриці - бічна поверхня виробу». Акустична розв'язка деталей преса і коливальної системи досягається застосуванням ізолюючих звуків, наприклад, пінопластикових прокладок і відповідним розміщенням ультразвукового оснащення на тримачі. Для проведення експериментів щодо здійснення впливу ультразвуку на пресоване тісто були вироблені і створені різні конструкції ультразвукових передавальних пристроїв, але хомут з нержавіючої сталі зі зниженим значенням акустичного опору виявився найбільш ефективним.

Для досягнення необхідного акустичного контакту матриця сполучалася з випромінювачем напруженою посадкою. Таким чином, залежність продуктивності макаронного преса від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача чітко простежується зі злегка вираженим падінням її при підвищенні амплітуди. Кавітаційні процеси розпушують тісто, роблять його менш щільним, і відповідно, маса випресованих макаронів в одиницю часу зменшується при тій же швидкості випресовування.

При розробці процесу екструзії необхідно звернути увагу на зниження енергоємності процесу, спрощення обслуговування та ремонтоспроможності обладнання. Для того щоб підприємствам вистояти в умовах конкуренції, що посилюється, і умовах відкритого ринку, необхідно вирішувати проблеми підвищення якості продукції, зниження собівартості виробництва, її просування на споживчий ринок, як у країні, так і за кордоном. Тому необхідно впроваджувати нові технології, розширювати асортимент продукції, проводити технічне переоснащення виробництв. І що не менш важливо, слід готувати висококваліфікованих фахівців харчової промисловості.

Підвищити конкурентоспроможність продукції, можливо, тільки покращуючи її якість, або знижуючи відпускну ціну.

На рисунку 4.5 представлена залежність щільності (густини) макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача, з якої випливає, що при амплітуді 30 мкм щільність готових макаронних виробів збільшується на 13-15% за рахунок більш щільного укладання частинок тіста та зменшення пористості на зовнішній поверхні виробів. Виведено апроксимаційну залежність для щільності макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача (рис. 4.5):

$$\rho = -0,26 \cdot A^2 + 12,44 \cdot A + 1018,8. \quad (4.2)$$

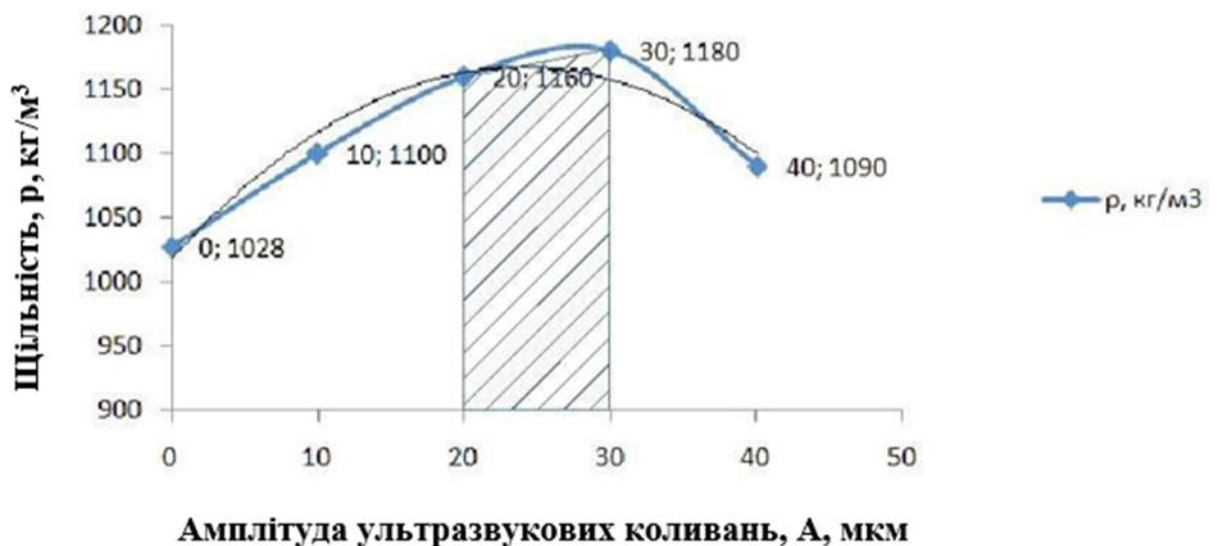


Рис. 4.5 - Залежність щільності (густини) макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача

Залежність межі міцності макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача зображено на рисунку 4.6. Міцність виробів визначали за способом визначення міцності сухих макаронних виробів, розробленого в роботі [4, 5, 6].

З графіка на рисунку 4.6 випливає, що при амплітуді ультразвукових коливань 20 мкм межа міцності підвищується на 20-23%, при подальшому збільшенні амплітуди відбувається кавітаційний ефект, що руйнує структуру тіста

і знижується міцність макаронних виробів. Отримано апроксимаційну залежність для межі міцності макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача (рис. 4.6):

$$\sigma = 0,404 \cdot A^2 + 16,83 \cdot A + 1634. \quad (4.3)$$



Рис. 4.6 - Залежність межі міцності макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача

Залежність межі міцності макаронних виробів від часу пресування представлена рисунку 4.7. Експеримент показав, що тісто має знаходитися у фільтрі матриці 1,5 секунди. За цей час відбудуться релаксаційні ефекти ущільнення частинок тіста та їх спрямоване укладання. Цей час обмежений за величиною, щоб уникнути перегріву пасм, і навіть їх розпушення, через процеси клейстеризації та денатурації. Таким чином, за час знаходження тіста у фільтрі матриці 1,5 секунди міцність виробів підвищується: без впливу ультразвуку – на 12-13%; з впливом ультразвуку – на 17-20%, що показує позитивний ефект накладання поля ультразвуку. Виведено апроксимаційну залежність для межі міцності макаронних виробів від часу пресування (рис. 4.7):

$$\text{з ультразвуком: } \sigma_{\text{ЗВ}} = -270 \cdot \tau^2 + 813 \cdot \tau + 1352; \quad (4.4)$$

$$\text{без ультразвуку: } b = -255 \cdot \tau^2 + 760,5 \cdot \tau + 1353. \quad (4.5)$$

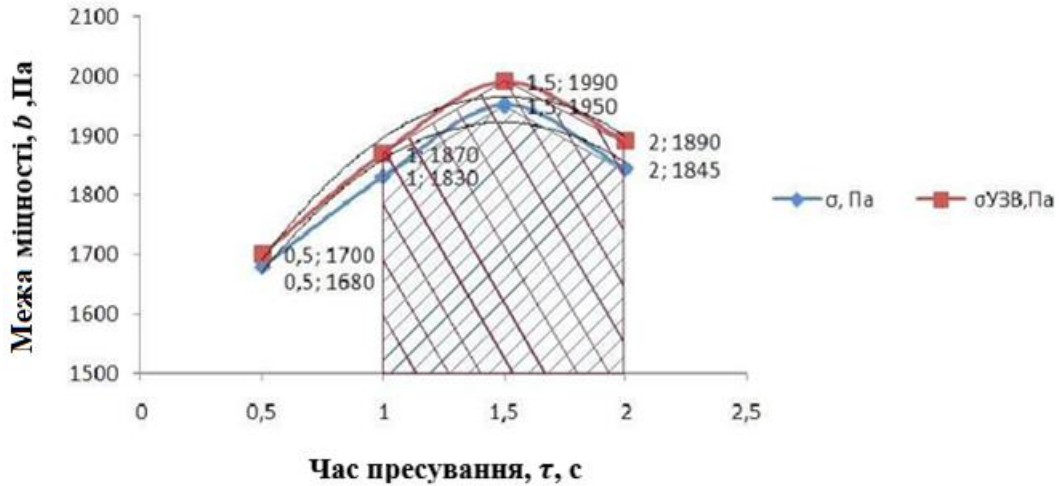


Рис. 4.7 - Залежність межі міцності макаронних виробів від часу пресування

#### 4.3 Визначення гігроскопічності макаронних виробів

Залежність гігроскопічності макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача простежується на рисунку 4.8. На даному графіку показано, що при амплітуді 20-40 мкм гігроскопічність макаронних виробів зменшується на 30-32% за рахунок більш щільного укладання частинок



Рис. 4.8 - Залежність гігроскопічності макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача

тіста. Отримана апроксимаційна залежність для гігроскопічності макаронних виробів від амплітуди коливань ультразвукового випромінювача (рис. 4.8).

Зменшення гігроскопічності макаронних виробів уповільнює мікробіологічне псування і пліснявіння, що призводить до збільшення терміну зберігання готових виробів.

Таким чином, експериментально досліджено вплив амплітуди ультразвуку на продуктивність макаронного пресу та показники якості макаронних виробів. Виявлено найбільш раціональне значення параметрів ультразвуку при пресуванні макаронного тіста з борошна хлібопекарського вищого гатунку – амплітуду  $20 \pm 5$  мкм при частоті  $22 \pm 0,5$  кГц.

#### 4.3 Висновки до четвертого розділу

Таким чином, експериментально досліджено вплив потужності та амплітуди ультразвуку на показники якості макаронних виробів. Виявлено діапазон показників ефективності процесів пресування тіста та режими, що забезпечують попадання в них. Ці межі – амплітуда  $20 \pm 5$  мкм, частота  $22 \pm 0,5$  кГц. Вони найбільш раціональні при виробництві макаронних виробів із хлібопекарського борошна вищого гатунку.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз існуючих способів виробництва та конструкцій макаронних пресів, який показав необхідність розробки принципово нового способу пресування макаронних виробів із застосуванням ультразвуку.

2. Запропоновано спосіб і обладнання для обробки ультразвуком макаронних виробів на стадії пресування.

3. Отримано залежність, що дозволяє визначити рекомендований мінімальний час знаходження тіста в матриці з відомою інтенсивністю ультразвуку, яку можна контролювати.

4. Отримано емпіричні залежності параметрів процесу пресування макаронного тіста від амплітуди ультразвуку.

5. На підставі експериментальних досліджень впливу амплітуди ультразвуку на параметри процесу пресування макаронного тіста, обґрунтовано та запропоновано раціональне значення амплітуди при ультразвуковому пресуванні макаронних виробів.

6. Експериментально встановлено, що у стадії пресування макаронного тіста із застосуванням ультразвуку при амплітуді  $20 \pm 5$  мкм відбувається збільшення продуктивності макаронного преса на 24-26%.

7. Експериментально досліджено вплив амплітуди ультразвуку на показники якості макаронних виробів і встановлено раціональне значення амплітуди –  $20 \pm 5$  мкм, при якій відбувається поліпшення поверхні, підвищення межі міцності макаронних виробів на 20-23%, що призводить до зменшення зломів та викришування виробів при транспортуванні, і зниження їх гігроскопічності на 30-32%, що уповільнює мікробіологічне псування виробів і призводить до збільшення терміну придатності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аренков А. Б. Ультразвукова обробка матеріалів. Л.: Машинобудування. 1971. 168 с.
2. Берник П. С., Стоцько З. А., Паламарчук І. П. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. Київ : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. 336 с.
3. Бандура В. М., Курило В. Л., Серeda Л. П., Пришляк В. М., Швець Л. В. Методичні рекомендації до написання й оформлення магістерських робіт магістрантами денної та заочної форм навчання інженерно-технологічного факультету спеціальності 208 «Агроінженерія» галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство. Вінниця: ВНАУ, 2019. 39 с.
4. Волощук Г. І., Кочура Н. М., Юрчак В. Г. Шляхи підвищення якості макаронних виробів. *Експрес-новини: наука, техніка, виробництво*. К.: УкрІНТЕІ, 1999. № 3–4. С. 30–31.
5. Волощук Г. І., Кочура Н. М., Юрчак В. Г. Технологічні властивості макаронного тіста з овочевими порошками. *Експрес-новини: наука, техніка, виробництво*. К.: УкрІНТЕІ, 1999. № 3–4. С. 31–32.
6. Волощук Г. І., Кочура Н. М., Юрчак В. Г. Вплив овочевих порошоків на кінетику і режими сушіння макаронних виробів. *Експрес-новини: наука, техніка, виробництво*. К.: УкрІНТЕІ, 1999. № 5–6. С. 9–11.
7. Волощук Г. І., Кочура Н. М., Волкова Г. А., Юрчак В. Г. Вплив дисперсності овочевих порошоків на технологію виготовлення та якість макаронних виробів. *Харчова промисловість*. К.: УДУХТ, 2000. № 45. С. 68–72.
8. Волощук Г. І., Юрчак В. Г. Дослідження та обґрунтування механізму поліпшуючої дії пектиновмісних добавок на якість макаронних виробів. *Наук. праці УДУХТ*. 2001. № 10. С. 95–96.
9. Вироби макаронні. Терміни та визначення понять. Чинний від 2014.01.01. Київ: Мінекономрозвитку України, 2013. III, 26 с. Режим доступу к

електронному каталогу Наукової бібліотеки ім. В. І. Вернадського:  
<http://irbisnbu.gov.ua>.

10. Гвоздев А. В. Механізація виробництва хлібобулочних, мучних кондитерських і макаронних виробів. Курс лекцій. Мелітополь. ТГАТА, 2002. 64 с.

11. Гончарук А. Г. Підвищення ефективності підприємств макаронної промисловості. *Економіка харчової промисловості*. 2011. № 3. С. 13–17.

12. Гуць В. С., Полевода Ю. А., Коваль О. А. Визначення структурно-механічних характеристик в'язкісних дисперсних систем. *Журнал «Упаковка»*. Національний університет харчових технологій. 2011. № 1. С. 46–47.

13. Головка М. П., Пак А. О., Чуйко М. М. Вивчення гігроскопічних властивостей макаронних виробів, збагачених біоорганічними сполуками кальцію. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2011. Вип. 2(14). С. 245–250.

14. Гончарук А. Г. Про потенціал та перспективи ефективного розвитку підприємств макаронної промисловості. *Зернові продукти і комбікорми*. 2012. № 2 (46). С. 18–21.

15. ДСТУ 7043:2009 «Вироби макаронні. Загальні технічні умови».

16. Кобида Є. В., Верболоз Є. І. Ефективність пресування макаронних виробів з накладенням ультразвуку. *Збірник праць V Міжнародної науково-практичної конференції, ДонНУЕТ, Донецьк*. 2013. Вип. 5. С. 204–206.

17. Кобыда Е. В. Совершенствование процесса прессования макаронных изделий с применением ультразвука: дис. кандидата техн. наук: 05.18.12. Санкт-Петербург. 2015. 112 с.

18. Механічні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва. Том 1.: Навчальний посібник / І. П. Паламарчук та ін. Львів, Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2004. 336 с.

19. Клендій В. М., Скиба О. П., Третьяков О. Л., Пиндус Т. Б., Дмитренко В. П. Обґрунтування конструкцій гвинтових робочих органів екструдерів. «Перспективні технології та прилади» збірник наукових праць.



Луцьк, 2016. Вип. №8 (1). С. 22–28.

20. Кондратюк Д. Г., Волошиненко В. М. Математична модель динаміки: середовище – пружний шнек екструдера. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Випуск №1 (93), 2016р. С.43–47.

21. Лісовенко О. Т., Руденко - Гріцюк О. А., Літовченко І. М. Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв. К.: Наукова думка. 2000. 283 с.

22. Сайт Національної бібліотеки ім. В. І. Вернадського – Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua>.

23. Юрчак В. Г. Наукове обґрунтування та розроблення технології макаронних виробів поліпшеної якості та профілактичного призначення шляхом використання нетрадиційної сировини і харчових добавок: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. К., 2003. 40 с.

24. Юрчак В. Г., Волощук Г. І., Худайкулова О. О., Дробот В. І., Корзун В. Н. Дослідження радіозахисних властивостей макаронних виробів з пектиновмісними добавками. *Вісник аграрн. науки*. 1999. № 3. С. 57–58.

25. Юрчак В. Г., Левадна Т. І., Хрутьба В. О. Оптимізація технологічних режимів виготовлення макаронних виробів з добавками антиоксидантної дії. *Харч. та перероб. промисловість*. 2000. № 2. С. 28–29.

26. Ширкунова О. В., Годунова Л. Ю., Юрчак В. Г., Манк В. В. Структура макаронного тіста з білковими добавками. *Харчова промисловість*. К.: УДУХТ, 2000. № 45. С. 44–49.

27. Сучасні технології борошняних, кондитерських виробів та харчоконцентратів спеціального призначення [Електронний ресурс]: конспект лекцій для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спец. 181 «Харчові технології» освітньо-професійної програми «Технології хліба, кондитерських, макаронних виробів та харчоконцентратів» денної та заочної форм навчання / В. Г. Юрчак, В. В. Дорохович, Ю. В. Бондаренко, І. М. Зінченко. К.: НУХТ. 2019. 108 с.

28. Юрчак В. Г. Роль нетрадиційної сировини і добавок у макаронному

виробництві. *Харчова промисловість*. 2003. № 2. С. 7–10.

29. Євсеєнко Т. П. Удосконалення технології макаронних виробів, збагачених яєчними продуктами. Автореф. канд. дис. К.: НУХТ. 2005. 20 с.

30. Полєвода Ю. А. Перспективи застосування вібраційних ефектів в рідких технологічних системах харчових і переробних виробництв. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету, серія технічні науки*. 2015. №1 (89). Т. 1. С. 124–130.

31. Рожно О. В. Розробка технології безглютенкових макаронних виробів. Дис....канд. техн. наук., 2018. 160 с.

32. Макаронне виробництво: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс]: наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2018. 70 с.

33. Устенко І. А. Аналіз номенклатури та товарного асортименту підприємства з виробництва макаронних виробів. *Зберігання і переробка зерна*. 2015. № 2 (191). С. 43–48.

34. Паливода С. Д. Удосконалення технології макаронних та хлібних виробів використанням харчових добавок структуроутворювальної дії: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.18.01. Паливода Світлана Дмитрівна; Національний університет харчових технологій. Київ, 2010. 266 с.

35. Технологічне обладнання малих харчових та переробних виробництв: навч. посібник: Ч. 3: Технологічне обладнання малих хлібопекарських і макаронних виробництв / О. І. Черевко, В. М. Михайлов, І. В. Бабкіна та ін.; Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків : Харків. держ. ун-т харчування та торгівлі, 2010–2013. 95 с.

36. Akbari Mousavi, Feizi H., Madoliat R. Investigations ultrasonic vibrations в extrusion process. *Journal of Materials Proc. Tech.* 2007. P. 187–188, 657–661.

37. Mortazavi A., Tabatabaie, F. Study of ice cream freezing process after treatment with ultrasound. *World Applied Sciences Journal*. 4 (2), 2008. P. 188–190. Li D., Mu C., Cai S., Lin W. Ultrasonic irradiation in the enzymatic extraction of collagen. *Ultrasonics Sonochemistry*. 16, 2009. P. 605–609.