

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

**Інститут (факультет) Навчально-науковий Інженерно-технічний
інститут ім.акад. І.С. Гулого**

**Кафедра Технологічного обладнання та комп'ютерних технологій
проектування**

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

_____ Сергій БЛАЖЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 20__ р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Микола ЯКИМЧУК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 20__ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

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

освітньо-професійної програми Інжиніринг харчових виробництв
на тему Підвищення ефективності роботи двошнекового змішувача для виробництва
хліба продуктивністю 5 т/год

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

Олійник Андрій Вікторович _____
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник Олішевський Валентин Вікторович _____
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Консультанти _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

_____ (ім'я та прізвище) _____ (підпис)

_____ (ім'я та прізвище) _____ (підпис)

Рецензент _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

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

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТОКТП
Микола ЯКИМЧУК

«__» _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Олійника Андрія Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Підвищення ефективності роботи двошнекового змішувача для виробництва хліба продуктивністю 5 т/год

керівник проекту (роботи) Олішевський Валентин Вікторович, проф., д.т.н.

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

затвердені наказом закладу вищої освіти від «17» 09 2025 р. № 712-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 01.12.2025р.

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

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

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

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

Загальний вигляд обладнання – 1 аркуш; Деталі та вузли обладнання – 1 аркуш; Схема автоматизації – 1 аркуш; Технологічна карта збирання вузла – 1 аркуш, Наукова частина – 6 аркушів.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: 18.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	<i>Примітка</i>
1	<i>Вступ</i>	24.09.2025 р.	
2	<i>Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування основного напрямку дослідження</i>	01.10.2025 р.	
3	<i>Розробка нового технічного рішення об'єкту дослідження</i>	14.10.2025 р.	
4	<i>Дослідна частина та узагальнення результатів</i>	25.10.2025 р.	
5	<i>Розрахункова частина</i>	05.11.2025 р.	
6	<i>Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування</i>	10.11.2025 р.	
7	<i>Заходи з охорони праці та охорони довкілля</i>	14.11.2025 р.	
8	<i>Маркетингове обґрунтування проекту</i>	16.11.2025 р.	
9	<i>Висновки</i>	18.11.2025 р.	
10	<i>Список використаних джерел</i>	20.11.2025 р.	
11	<i>Додатки</i>	28.11.2025 р.	
12	<i>Графічна частина формату А1 – 10 шт.</i>	30.11.2025 р.	
13	<i>Подача кваліфікаційної роботи на кафедру</i>	01.12.2025 р.	

Здобувач

(підпис)

Андрій ОЛІЙНИК

(ім'я та прізвище)

Керівник роботи

Валентин ОЛШЕВСЬКИЙ

Реферат

Магістерський проєкт на тему «Підвищення ефективності роботи двошнекового змішувача для виробництва хліба продуктивністю 5000 кг/годин» присвячений удосконаленню процесу безперервного замішування пшеничного тіста у промислових умовах. У роботі виконано аналіз сучасного стану хлібопекарського виробництва, розглянуто конструкції двошнекових змішувачів, тенденції їх розвитку та обґрунтовано доцільність переходу до енергоефективних, керованих систем замісу. На основі критичного огляду літературних джерел та промислових аналогів сформульовано мету підвищення однорідності тіста й зниження питомих енерговитрат шляхом модернізації геометрії шнеків та оптимізації режимів роботи змішувача.

Запропоновано нове технічне рішення двошнекового змішувача, у якому виділено функціональні зони живлення, попереднього транспортування, інтенсивного змішування та вирівнювання потоку. Модернізована зона інтенсивного змішування виконана на основі комбінованої геометрії шнеків, що забезпечує підвищений рівень зсувних деформацій і покращення структури тіста. У дослідній частині побудовано реологічну модель пшеничного тіста з використанням залежностей типу Carreau, проведено обробку експериментальних реометричних даних та реалізовано тривимірне CFD-моделювання течії тіста у робочій камері змішувача. Це дало змогу оцінити розподіли швидкості й в'язкості, виявити «мертві зони» та порівняти ефективність базового і модернізованого варіантів конструкції.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Олішевський В.В.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Олійник А.В.	<i>Назва, додаткова назва</i> Підвищення ефективності роботи двошнекового змішувача для виробництва хліба продуктивністю 5 т/год	24.0250.M.P.07.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Якимчук М.В.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 4/104

У розрахунковій частині виконано перевірку продуктивності модернізованого обладнання, підбір конструкційних матеріалів, розрахунки на міцність основних елементів (вал шнека, шпонкові з'єднання, підшипникові опори), а також розглянуто основні аспекти технології машинобудування, монтажу, технічного сервісу та принципи автоматизованого керування змішувачем у складі хлібопекарної лінії. Окремий розділ присвячено заходам з охорони праці та довкілля, де визначено основні виробничі небезпеки під час експлуатації змішувача та наведено організаційно-технічні рішення щодо їх мінімізації. У розділі маркетингового обґрунтування проаналізовано стан і структуру ринку хлібобулочних виробів та обладнання для замішування тіста, охарактеризовано конкурентне середовище, споживачів та постачальників, зроблено висновок про доцільність впровадження модернізованого змішувача як фактора підвищення конкурентоспроможності хлібопекарського підприємства.

Предмет дослідження – процес безперервного замішування пшеничного тіста та робота двошнекового змішувача в зоні інтенсивного змішування.

Об'єкт дослідження – двошнековий змішувач для виробництва хліба продуктивністю 5000 кг/годин у складі хлібопекарної технологічної лінії.

Ключові слова: двошнековий змішувач, хлібопекарне тісто, CFD-моделювання, реологічна модель Carreau, продуктивність 5000 кг/год, модернізація обладнання, інтенсивне змішування, енергоефективність.

Abstract

The master's project entitled "Improving the Efficiency of a Twin-Screw Mixer for Bread Production with a Capacity of 5000 kg/h" is devoted to the enhancement of continuous wheat dough mixing under industrial conditions. The work analyses the current state of bread production, reviews existing twin-screw mixer designs, key development trends and substantiates the feasibility of implementing energy-efficient and controllable mixing systems. Based on a critical review of scientific literature and industrial analogues, the aim is formulated as improving dough homogeneity and reducing specific energy consumption by modernising screw geometry and optimising the operating modes of the mixer.

A new technical solution for a twin-screw mixer is proposed, in which functional zones of feeding, preliminary conveying, intensive mixing and flow equalisation are distinguished. The modernised intensive mixing zone is based on a combined screw geometry that provides increased shear deformation and improved dough structure. In the research part, a rheological model of wheat dough is developed using a Carreau-type relationship, experimental rheometric data are processed, and three-dimensional CFD modelling of dough flow in the mixer working chamber is carried out. This makes it possible to evaluate velocity and viscosity fields, identify "dead zones" and compare the performance of the basic and modernised design variants.

In the design (calculation) section, the performance of the modernised equipment is verified, construction materials are selected, and strength calculations are performed for the main elements (screw shaft, key connections, bearing supports). The main aspects of manufacturing technology, installation, maintenance and principles of automatic control of the mixer as a part of a bread production line are also considered. A separate section is devoted to occupational health and environmental protection measures, identifying the main industrial hazards during mixer operation and defining organisational and technical solutions to minimise them. In the marketing justification section, the state and structure of

the bread and bakery market and the dough mixing equipment market are analysed; the competitive environment, consumers and suppliers are characterised; and a conclusion is drawn on the feasibility of implementing the modernised mixer as a factor in improving the competitiveness of a bakery enterprise.

Subject of research – the process of continuous wheat dough mixing and the operation of a twin-screw mixer in the intensive mixing zone.

Object of research – a twin-screw mixer for bread production with a capacity of 5000 kg/h as part of an industrial bakery production line.

Key words: twin-screw mixer, bakery dough, CFD modelling, Carreau rheological model, capacity 5000 kg/h, equipment modernisation, intensive mixing, energy efficiency.

ЗМІСТ

Вступ	9
1. Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування напрямку	11
1.1. Огляд літературних джерел, аналіз прогресивних конструкційних рішень.	11
1.2. Обґрунтування актуальності дослідження, формулювання мети та завдання дослідження.	19
1.3. Висновки.	22
2. Розробка нового технічного рішення об'єкту дослідження	24
2.1. Постановка завдань нового технічного рішення, визначення необхідних технічних параметрів, розробка і опис нового технічного рішення, устрій та принцип його роботи.	24
2.2. Висновки.	26
3. Дослідна частина та узагальнення результатів	28
3.1. Об'єкт та предмет досліджень.	28
3.2. Опис експериментальної установки чи імітаційної моделі об'єкту досліджень.	30
3.3. Методика проведення досліджень.	33
3.4. Висновки.	53
4. Розрахункова частина	55
4.1. Розрахунок продуктивності модернізованого обладнання	55
4.2. Підбір конструкційних матеріалів	62
4.3. Розрахунки на міцність елементів конструкції модернізованого обладнання.	67
4.4. Технологія машинобудування	71
4.5. Правила монтажу, та технічного сервісу модернізованого обладнання.	79
5. Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування	84
6. Заходи з охорони праці та охорони довкілля	88
7. Маркетингове обґрунтування проекту	93
Висновки	100
Список використаних джерел	103

Вступ

Процес змішування (або перемішування) полягає в поєднанні певних об'ємів різних речовин з метою отримання однорідної суміші. Під час змішування частинки окремих компонентів розподіляються по всьому об'єму, формуючи рівномірну структуру. Такий розподіл відбувається завдяки їх перегрупованню під дією зовнішніх сил, які створюються робочими органами обладнання. Крім утворення сумішей, операцію змішування застосовують для інтенсифікації процесів теплообміну та масообміну, а також для стабілізації властивостей продукту в заданих режимах.

Режим замішування хлібного тіста визначається якістю та властивостями борошна, рецептурою, особливостями технології виготовлення виробів і конструкцією тістомісильної машини. Під час замісу тісто насичується повітрям. Одночасно із цим білки борошна активно поглинають вологу. Нерозчинні у воді білкові фракції – глютенін і гліадин – взаємодіють між собою та утворюють клейковинний каркас. У процесі формування клейковинного скелета виникають поперечні зв'язки між сусідніми білковими ланцюгами. Ці зв'язки підсилюють структуру тіста, зменшують його липкість і забезпечують необхідну еластичність та газоутримувальну здатність.

У різних галузях харчової промисловості операція перемішування рідких та пастоподібних продуктів є однією з основних. Її виконують для:

- змішування двох чи більше рідин;
- підтримання стійкого стану емульсій і суспензій;
- розчинення твердих компонентів у рідкому середовищі;
- рівномірного розподілу твердих частинок у рідині;
- прискорення теплових процесів і хімічних реакцій;

- отримання або підтримання заданої температури й в'язкості (консистенції) продукту.

Змішування харчових продуктів здійснюють у спеціальних машинах – змішувачах різних типів. Найбільш поширеними є шнекові, лопатеві, барабанні, пневматичні (з перемішуванням стисненим повітрям), а також комбіновані апарати, у яких поєднано декілька способів дії на продукт. Шнекові змішувачі, зокрема двошнекові, широко застосовують у виробництві хліба, оскільки вони забезпечують інтенсивний заміс тіста при безперервному режимі роботи та дають можливість підвищувати ефективність усього технологічного процесу.

Розділ 1. Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування напрямку

1.1. Огляд літературних джерел, аналіз прогресивних конструкційних рішень.

Призначення та класифікація змішувачів

Обладнання для змішування харчових продуктів є одним із ключових елементів технологічних ліній з виробництва хлібобулочних виробів. Від якості перемішування сировини значною мірою залежать перебіг подальших технологічних операцій та показники готового хліба: структура м'якушки, об'єм виробів, стійкість форми, смак і аромат.

Основним призначенням змішувальних машин є:

- одержання однорідної суміші з двох чи більшої кількості компонентів;
- підтримання рівномірної консистенції продукту при зберіганні або транспортуванні;
- інтенсифікація процесів теплообміну та масообміну під час виробництва;
- створення і підтримання заданих реологічних властивостей (в'язкості, пластичності тощо).

Змішувачі для харчових середовищ класифікують за кількома ознаками.

За призначенням:

- для змішування;
- для розчинення компонентів;
- для темперування та підтримання певної температури;
- для приготування емульсій, суспензій, пастоподібних продуктів тощо.

За розташуванням апарата в просторі:

- вертикальні;
- горизонтальні;

- нахилені (апарати з похилою віссю);
- спеціальні конструкції (наприклад, апарати складної форми для обмежених виробничих приміщень).

За характером обробки робочого середовища:

- змішування в усьому об'ємі робочої камери;
- змішування в окремій частині об'єму (локальне чи зональне);
- плівкове змішування, коли продукт розподіляється тонким шаром по поверхні.

За характером руху рідини чи тіста в апараті:

- з переважно радіальним рухом;
- з осьовим рухом;
- з тангенціальним рухом;
- з комбінованим або складним просторовим рухом потоків.

За принципом дії:

- механічні (змішування за рахунок роботи робочих органів – шнеків, лопатей, мішалок);
- пневматичні (використання стисненого повітря або газу);
- ежекторні;
- циркуляційні;
- спеціальні апарати, що поєднують декілька принципів.

За відношенням до теплових процесів:

- апарати з поверхнею теплообміну на стінках (рубашка, сорочка з теплоносієм);
- апарати з погружними теплообмінними елементами;
- апарати без теплового впливу, призначені тільки для механічного змішування.

У хлібопекарській промисловості окреме місце посідають змішувачі для замішування тіста. До них висувають підвищені вимоги щодо інтенсивності перемішування, рівномірності розподілу компонентів та можливості роботи в

безперервному режимі при заданій продуктивності. Саме до цієї групи належать двошнекові змішувачі, які розглядаються в даному магістерському проєкті.

Аналіз сучасних конструкцій двошнекових змішувачів

На сучасних підприємствах харчової промисловості застосовують різні за конструкцією змішувачі. Для виробництв невеликої потужності часто використовують комбіновані машини, у яких поєднано функції дозування та змішування. Такі рішення дозволяють зменшити займану площу, скоротити кількість окремих одиниць обладнання та знизити капітальні витрати підприємства.

Поряд із цим застосовують і роздільні схеми, коли дозувальні пристрої та змішувачі виконані як окремі апарати. У таких системах тісто або інша суміш переміщується від одного вузла до іншого за допомогою транспортерів, насосів або шнекових живильників. Незважаючи на більшу гнучкість при компоновці лінії, роздільні конструкції потребують додаткового обладнання для транспортування продукту та ускладнюють обслуговування.

Існують також машини, формально розміщені в одному корпусі, де змішувальна камера і дозувальний вузол об'єднані конструктивно. Проте з технологічної точки зору такі агрегати фактично працюють як роздільні, оскільки продукт послідовно проходить декілька операцій, переміщуючись між зонами змішування та дозування.

Найбільш раціональною та енергоефективною вважають конструкцію, у якій змішувач інтегрований безпосередньо в дозувальну станцію. У такому апараті:

- ✓ сировина надходить у зону змішування;
- ✓ там відбувається інтенсивне перемішування та формування однорідної маси;

- ✓ далі тісто (або інший продукт) одразу ж порційно дозується без додаткових стадій транспортування.

Подібне поєднання операцій дає змогу:

- ✓ зменшити втрати продукту при переміщенні;
- ✓ скоротити тривалість технологічного циклу;
- ✓ знизити енерговитрати за рахунок відсутності проміжного транспортування;
- ✓ полегшити автоматизацію процесу дозування та змішування;
- ✓ покращити стабільність якості тіста завдяки більш рівномірному режиму роботи.

Для двошнекових змішувачів важливим є також вибір геометрії шнеків (крок, діаметр, форма витків), взаємне розташування валів та режим обертання (співнапрямлений або зустрічно-обертовий рух). Сучасні конструкції орієнтовані на забезпечення інтенсивного зсувного деформування тіста, усунення «мертвих зон» у робочій камері та оптимізацію часу перебування продукту в апараті при заданій продуктивності 5 т/год.

Таким чином, аналіз сучасних технічних рішень показує доцільність створення або модернізації двошнекового змішувача, конструктивно інтегрованого з дозувальною станцією. Це є технічно обґрунтованою основою для вибору теми магістерського проєкту, спрямованого на підвищення ефективності роботи такого обладнання.

Ваkміx – безперервний двошнековий міcтоміc (Fava Storci, Італія)

Виробник: Fava Storci

Ваkміx – це автоматичний двошнековий змішувач безперервної дії для приготування різних видів тіста: для хліба, піци, сухарів, сухих і свіжих макаронів, ньокі тощо. Машина має окремі системи дозування сухих і рідких компонентів, які подаються в змішувальну камеру, де два шнеки забезпечують інтенсивне й одночасно контрольоване замішування.

Основні особливості:

Двошнекова система дає змогу гнучко регулювати інтенсивність замісу за рахунок зміни швидкості й конфігурації шнеків.

Продуктивність – орієнтовно від 100 до 2000 кг/год, що відповідає вимогам промислових ліній.

Точне зволоження: конструкція забезпечує правильну гідратацію сипких інгредієнтів незалежно від їхнього розміру частинок.

Автоматизоване керування – PLC з рецептами, можливість зберігати й відтворювати параметри процесу.

Принцип роботи базується на безперервній подачі сировини в змішувальну зону, де шнеки одночасно перемішують і транспортують тісто до виходу, формуючи стабільний потік однорідної маси.

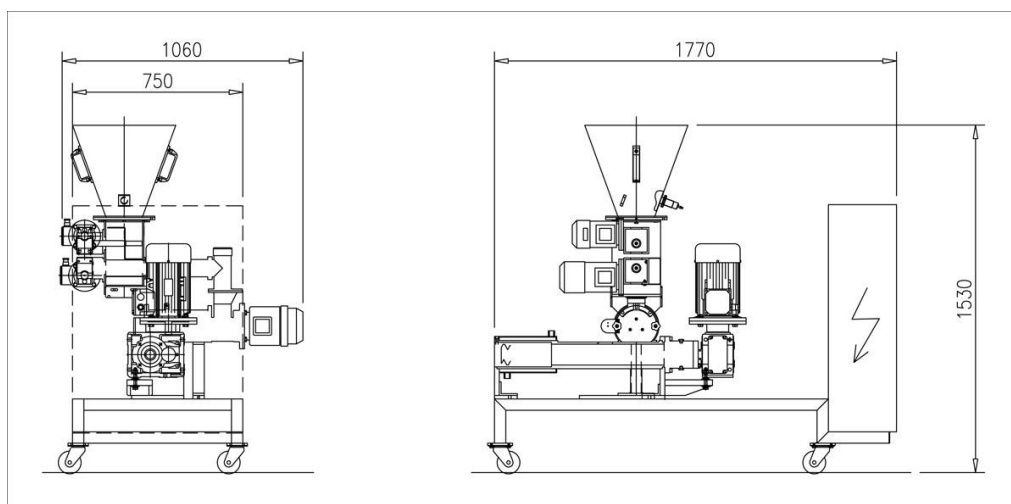


Рис. 1. Vakmix – безперервний двошнековий тістоміс (Fava Storci, Італія)

ContiMix – безперервний екструдер-змішувач для тіста (Bühler)

Виробник: Bühler Group

ContiMix – це безперервний апарат, який поєднує в одному корпусі змішування, заміс, деаерацію та екструзію тіста. Його застосовують для виробництва тіста для круасанів, листкового тіста, печива та інших виробів.

Ключові риси:

Об'єднання кількох стадій: змішування інгредієнтів, інтенсивний заміс, обробка під тиском/вакуумом.

Можливість скорочення числа одиниць обладнання у подальшій лінії (зменшення кількості тістомісів, проміжних бункерів тощо).

Поліпшення однорідності структури тіста та стабільності температури завдяки контрольованому режиму енерговкладення.

Призначений для інтеграції у високоавтоматизовані лінії з великою продуктивністю.

Сировина (борошно, вода, дріжджі, жири та інші компоненти) дозується в змішувальну секцію, де робочі органи формують однорідну масу. Далі тісто проходить через зону інтенсивного замісу та вакуумної/тискової обробки і на виході подається на наступні операції у вигляді безперервного потоку.



Рис. 2. ContiMix – безперервний екструдер-змішувач для тіста (Bühler)

HDX Continuous Mixer – безперервний змішувач для хлібного тіста (Exact Mixing)

Виробник: Exact Mixing (Reading Bakery Systems)

HDX Continuous Mixer спеціально розроблений для виробництва високогідратованого, добре розвиненого тіста для хліба, булок, багетів, багатозернових виробів тощо. Система працює в безперервному режимі та забезпечує низьку температуру тіста при високому ступені розвитку клейковини.

Основні особливості:

Призначений для високовологого тіста з великою водопоглинальною здатністю.

Забезпечує стабільний рівень розвитку тіста при постійній подачі сировини.

Дозування всіх інгредієнтів здійснюється автоматично, з подальшим інтенсивним перемішуванням у змішувальній камері.

Оптимізований для інтеграції в великі хлібопекарські лінії з продуктивністю у декілька тонн на годину.



Рис. 3. HDX Continuous Mixer – безперервний змішувач для хлібного тіста (Exact Mixing)

Принцип роботи: борошно, вода та інші компоненти безперервно надходять у змішувач через систему точного дозування. Далі в змішувальній зоні створюється інтенсивне зсувне деформування, що сприяє розвитку клейковинного каркаса при мінімальному нагріванні тіста. На виході отримують стабільний потік тіста, готового до подальшого поділу.

High Development Continuous Mixer – двоступенева система безперервного замісу (Reading Bakery Systems)

Виробник: Reading Bakery Systems

Це двоступенева система безперервного змішування для хлібного тіста. На першій стадії використовується двошнековий змішувач, який формує однорідну масу з усіх інгредієнтів. На другій стадії встановлено одношнековий змішувач-кнідер, що доводить тісто до необхідного рівня розвитку.

Ключові параметри:

Діапазон продуктивності – приблизно від 1500 до 10 000 кг/год.

Розділення процесу на стадію змішування (двошнекова секція) і стадію кінцевого замісу (одношнекова секція), що дає змогу гнучко регулювати енерговкладення.

Висока повторюваність якості тіста завдяки автоматизованому контролю параметрів (час перебування, температура, крутний момент).

У першій зоні двошнековий змішувач інтенсивно перемішує борошно, воду та інші компоненти до утворення рівномірної маси. Потім тісто надходить у другу зону, де одношнековий орган завершує механічний розвиток клейковини. Така структурована схема дозволяє окремо оптимізувати процеси змочування та механічного опрацювання тіста.

1.2. Обґрунтування актуальності дослідження, формулювання мети та завдань дослідження

Виробництво хліба на сучасних підприємствах поступово переходить від періодичних тістомісильних машин до безперервних або комбінованих схем замішування. Двошнекові змішувачі при цьому розглядають як один із найперспективніших типів обладнання, оскільки вони здатні забезпечити високу продуктивність, стабільну якість тіста та можливість автоматизованого керування процесом. Однак практика експлуатації таких апаратів показує, що навіть за достатньої продуктивності вони не завжди забезпечують необхідну однорідність тіста та раціональне використання енергії.

У базових конструкціях, до яких належить і досліджуваний змішувач, шнеки мають просту гвинтову форму з постійним кроком по довжині. Така схема добре працює як транспортер, але не забезпечує оптимального режиму змішування. У робочому об'ємі утворюються ділянки з пониженими швидкостями, частина маси тіста рухається скороченими траєкторіями, виникають «мертві зони» біля стінок і в торцевих частинах. Це знижує ступінь механічної обробки, збільшує тривалість замісу і призводить до зайвих енерговитрат.

Актуальність дослідження підвищення ефективності роботи двошнекового змішувача пов'язана з необхідністю отримувати більш однорідне тісто за коротший час та з меншими витратами енергії, не змінюючи при цьому принципової схеми роботи й компоновки обладнання. З огляду на це найбільш доцільним напрямом удосконалення є модернізація саме робочих органів – шнеків. Зміна їх геометрії дозволяє суттєво вплинути на структуру потоків, характер зсувних деформацій та час перебування тіста в апараті, не вимагаючи складних і дорогих переробок корпусу, приводу та рами.

У даній роботі як основний напрям модернізації прийнято розробку комбінованого шнека, у якому по довжині змішувача виділяють зону транспортування і зону інтенсивного змішування. У зоні інтенсивного змішування передбачається використання переривчастих витків або спеціальних лопатевих елементів, що створюють зворотні й поперечні потоки та сприяють глибшому перемішуванню. Як додатковий, допоміжний напрям удосконалення розглядається застосування простих стаціонарних ребер на внутрішній поверхні корпусу для ліквідації «мертвих зон» біля стінок.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності роботи двошнекового змішувача для виробництва хліба продуктивністю 5 т/год шляхом удосконалення геометрії шнеків та, за потреби, внутрішньої поверхні корпусу, з метою поліпшення однорідності тіста та зниження питомих енерговитрат.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання. Необхідно проаналізувати сучасний стан конструкцій двошнекових змішувачів і наявні підходи до інтенсифікації змішування; виявити недоліки базової конструкції досліджуваного змішувача за результатами теоретичного аналізу та узагальнення літературних даних; обґрунтувати вибір комбінованої схеми шнека із виділенням зони інтенсивного змішування та розробити його конструкцію з урахуванням вимог до технологічності й міцності. Далі необхідно виконати розрахунок основних геометричних і силових параметрів модернізованого робочого органа, розробити схему можливої експериментальної перевірки або імітаційної моделі, яка дозволить порівняти роботу базової та модернізованої конструкцій за показниками однорідності тіста й енергоємності процесу, а також сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження запропонованого технічного рішення в умовах діючого виробництва.

Окремо передбачається оцінити доцільність застосування додаткових стаціонарних ребер у корпусі як простого засобу покращення циркуляції продукту в приповерхневих зонах та уточнити, у яких режимах і при яких видах тіста ця міра є ефективною.

1.3. Висновки

У першому розділі було проведено аналіз сучасного стану технології безперервного змішування хлібного тіста та конструкцій двошнекових змішувачів, що використовуються у хлібопекарській промисловості. Встановлено, що двошнекові змішувачі мають значні переваги перед традиційними періодичними тістомісильними машинами за продуктивністю, можливістю автоматизації та стабільністю технологічного процесу. Водночас виявлено характерні недоліки базових конструкцій, пов'язані з використанням шнеків із постійним кроком по всій довжині: утворення «мертвих зон», нерівномірний час перебування частинок тіста у робочому об'ємі, підвищені енерговитрати при недостатній інтенсивності механічної обробки.

Узагальнення літературних даних і практичного досвіду показало, що найбільш ефективним і технологічно простим способом впливу на процес змішування є цілеспрямована зміна геометрії робочих органів. Перспективними визнано рішення, у яких у складі шнека формують локальні зони інтенсивного перемішування за рахунок переривчастих витків, лопатевих елементів або зворотного кроку, а також конструкції з додатковими внутрішніми елементами корпусу, що поліпшують циркуляцію продукту. Такі заходи не потребують докорінної зміни компоновки машини, можуть бути реалізовані шляхом заміни лише робочих органів і добре поєднуються з існуючими системами приводу та керування.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір напрямку модернізації досліджуваного змішувача. Основним технічним рішенням прийнято розробку комбінованого шнека, у якому виділяється зона транспортування та зона інтенсивного змішування з модифікованою геометрією витків. Додатковим напрямом удосконалення визначено можливість встановлення стаціонарних відбійних ребер на внутрішній поверхні корпусу для зменшення об'єму «мертвих зон» і покращення промивання апарата.

Сформульовано мету роботи, що полягає у підвищенні ефективності роботи двошнекового змішувача продуктивністю 5 т/год, та визначено комплекс завдань, спрямованих на розробку нового робочого органа, його розрахункову перевірку й експериментальне або модельне обґрунтування отриманого ефекту. Одержані висновки є підґрунтям для подальшої розробки нового технічного рішення в розділі 2 та планування дослідної частини в розділі 3 магістерської роботи.

2. Розробка нового технічного рішення об'єкта дослідження

2.1. Постановка завдань нового технічного рішення, визначення необхідних технічних параметрів, розробка і опис нового технічного рішення, устрій та принцип його роботи

Результати аналізу базової конструкції двошнекового змішувача показали, що існуюча форма шнеків з постійним кроком по всій довжині робочої камери забезпечує надійне транспортування тіста, але не створює достатньо інтенсивного режиму змішування. У середині об'єму і особливо біля стінок корпусу спостерігаються ділянки зі зниженою швидкістю руху, а траєкторії окремих частинок тіста мають укорочений шлях. Це призводить до нерівномірності структури суміші, збільшення часу замісу та підвищених питомих енерговитрат.

У зв'язку з цим нове технічне рішення має забезпечити, з одного боку, збереження продуктивності на рівні 5 т/год і існуючої компоновки машини, а з іншого – формування в робочій камері інтенсивніших зсувних деформацій, усунення «мертвих зон» та вирівнювання часу перебування частинок тіста в об'ємі. Основну роль у досягненні цих вимог покладено на змінену геометрію шнеків, а допоміжну – на вдосконалення внутрішньої поверхні корпусу.

До основних технічних параметрів модернізованого змішувача належать: номінальна продуктивність 5 т/год; ступінь заповнення робочої камери, що забезпечує безрозривний потік тіста без перевантаження приводу; діапазон частоти обертання шнеків, у межах якого досягаються необхідні реологічні характеристики тіста; допустимі рівні крутного моменту та споживаної потужності приводу; величина зазорів між витками шнеків і внутрішньою поверхнею корпусу, а також між шнеками один щодо одного.

Запропоноване технічне рішення передбачає перетворення кожного із шнеків на комбінований робочий орган, який по довжині поділяється на декілька функціональних зон. На ділянці завантаження з боку приймального

патрубка зберігається гвинтовий виток із практично тим самим кроком, що й у базовій конструкції. Ця зона виконує роль живильника, плавно захоплює тісто з бункера та запобігає утворенню переповнених кишень, що особливо важливо для стабільної подачі при високій продуктивності.

У середній частині робочої камери формується зона інтенсивного змішування. Тут суцільний гвинтовий виток замінюється на систему переривчастих витків та лопатевих елементів, розташованих під певним кутом до осі шнека. Лопаті мають обмежену довжину і рознесені вздовж гвинта таким чином, щоб сусідні елементи на правому та лівому шнеку створювали взаємодію потоків і спрямовували частину маси тіста у зворотному напрямку. У результаті в цій зоні виникають додаткові зсувні та розтягувальні деформації, тісто багаторазово перетинає міжшнековий простір, руйнуються великі агломерати і значно зменшується ймовірність того, що окремі порції суміші пройдуть камеру майже без перемішування.

Ближче до вихідного патрубка передбачається зона вивантаження. Тут крок гвинтових витків дещо збільшується порівняно із зоною завантаження, що сприяє плавному виведенню тіста з апарата та зменшує гідродинамічний опір на виході. За потреби на одній–двох останніх витках може бути виконаний короткий відрізок зі зворотним кроком невеликої довжини, який створює локальний зворотний потік і додатково вирівнює структуру маси перед подачею на наступні операції.

Сумарно така схема дозволяє поєднати функції транспортування й інтенсивного змішування без зміни загальної довжини шнека та без переробки корпусу. Конструкція залишається зварною: гвинтові витки та лопаті приварюються до центрального вала, при цьому обираються такі товщина металу і форма перерізу, щоб забезпечити достатню жорсткість і технологічність виготовлення. Розрахункова перевірка виконується за умовами міцності на кручення і згин для вала та за умовами стійкості й міцності для витків і лопатей.

Допоміжним елементом модернізації є встановлення на внутрішній поверхні корпусу невисоких стаціонарних відбійних ребер, які розміщуються вздовж стінок у верхній частині робочої камери. При русі тіста шнеки періодично притискають масу до цих ребер, що сприяє відриву прилиплому шару від стінки й поверненню його в активну зону змішування. Таким чином зменшується об'єм «мертвих зон» і покращується самоочищення апарата під час роботи та промивання.

Принцип роботи модернізованого змішувача залишається в цілому таким самим, як і в базового. Тісто з завантажувального бункера надходить на вхід шнеків, захоплюється витками з нормальним кроком та поступово заповнює робочу камеру. При переміщенні в середню частину воно потрапляє в зону інтенсивного змішування, де лопатеві елементи й переривчасті витки багаторазово змінюють напрямок руху окремих порцій суміші, примушують її переміщуватися між шнеками і від стінок до центру. У цей час відбувається основна механічна обробка тіста, формування клейковинного каркаса та вирівнювання вмісту вологи, солі й інших компонентів. Далі, у зоні вивантаження, гвинтові витки з більшим кроком перетворюють накопичене в камері тісто в рівномірний потік, який надходить до наступного обладнання лінії.

Таким чином нове технічне рішення, зберігаючи загальні габарити, схему приводу та розташування опор, забезпечує інший характер гідродинаміки в робочій камері і створює передумови для підвищення однорідності тіста та зменшення питомих енерговитрат на заміс.

2.2. Висновки

У цьому розділі сформульовано завдання нового технічного рішення та розроблено конструкцію модернізованого робочого органа двошнекового змішувача. Поставлено вимогу зберегти продуктивність 5 т/год і існуючу компоновку машини, одночасно підвищивши інтенсивність змішування та

усунувши недоліки базової схеми, пов'язані з утворенням «мертвих зон» і нерівномірним часом перебування тіста в робочому об'ємі.

Запропоновано використати комбінований шнек, у якому по довжині апарата виділені зона живлення з традиційним гвинтовим витком, зона інтенсивного змішування з переривчастими витками та лопатевими елементами і зона вивантаження з трохи збільшеним кроком гвинта. Така структура дозволяє локально посилити зсувні деформації та створити зворотні потоки в середині робочої камери, не змінюючи при цьому загальних габаритів та умов кріплення шнеків. Додатково запропоновано встановити всередині корпусу прості відбійні ребра, які зменшують об'єм приповерхневих «мертвих зон» і полегшують очищення поверхонь.

Сформований варіант модернізації є технологічно нескладним: не вимагає заміни приводу та опор, реалізується в основному за рахунок виготовлення нових зварних шнеків та приварювання відбійних ребер. Це робить його придатним як для впровадження на діючому обладнанні, так і для використання як базової конструкції в нових машинах.

Подальші розділи магістерської роботи будуть присвячені розрахунковому обґрунтуванню основних параметрів модернізованого шнека та оцінці ефективності запропонованого технічного рішення на основі експериментальних або модельних досліджень.

Розділ 3. Дослідна частина та узагальнення результатів

3.1. Об'єкт та предмет досліджень

Об'єктом дослідження в даній магістерській роботі є двошнековий змішувач для замішування пшеничного хлібного тіста продуктивністю 5 т/год, конструкція якого наведена на робочих кресленнях базової машини. Змішувач належить до горизонтальних апаратів безперервної дії з двома співобертовими шнеками, розташованими в спільному коритоподібному корпусі. Машина працює у складі технологічної лінії хлібопекарського виробництва і забезпечує безперервне приготування тіста з борошна, води, дріжджів, солі та інших рецептурних компонентів.

У роботі розглядаються дві конструктивні модифікації цього об'єкта. Перша – базова, у якій обидва шнеки мають просту гвинтову форму з постійним кроком по всій довжині робочої камери. Друга – модернізована, де шнеки виконані комбінованими: вхідна частина зберігає функцію живлення, середня ділянка перетворена на зону інтенсивного змішування з переривчастими витками та лопатевими елементами, а вихідна ділянка забезпечує упорядковане транспортування та виведення тіста. Додатково для модернізованого варіанта розглядається можливість застосування простих стаціонарних відбійних ребер на внутрішній поверхні корпусу.

Отже, об'єкт дослідження можна охарактеризувати як реальний промисловий двошнековий змішувач, що працює в умовах хлібопекарського виробництва, та його конструктивно вдосконалений варіант із комбінованими шнеками. Усі подальші теоретичні та експериментальні побудови орієнтовані саме на цю машину, її геометричні та режимні параметри.

Предметом дослідження є процес механічного змішування та транспортування хлібного тіста в робочій камері двошнекового змішувача, а також зміна основних показників цього процесу при переході від базової до модернізованої конструкції робочих органів. До складу предмета досліджень

входить характер руху тіста у міжшнековому просторі й біля стінок корпусу, ступінь однорідності розподілу компонентів по об'єму, тривалість перебування окремих порцій суміші в зоні інтенсивного змішування, величина крутного моменту на валах та питома витрата енергії на заміс.

Таким чином, якщо об'єктом є сам змішувач як технічна система (базовий і модернізований варіанти), то предметом дослідження виступають гідродинамічні та енергетичні характеристики процесу замішування, що формуються геометрією шнеків і умовами роботи машини та безпосередньо впливають на якість отриманого тіста. Саме на виявлення закономірностей у зміні цих характеристик і буде спрямована дослідна частина роботи.

3.2. Опис експериментальної установки чи імітаційної моделі об'єкту досліджень.

У харчовій промисловості процеси інтенсивної механічної обробки й замішування в'язкопластичних мас, зокрема пшеничного хлібного тіста, є об'єктом постійних досліджень. Однією з ключових особливостей таких систем є їх неньютонівська поведінка: реологічні властивості залежать не лише від складу, а й від умов обробки – напружень зсуву, швидкості деформації, температури, вмісту вологи та взаємодії крохмалю з білками та іншими компонентами. Ці фактори суттєво впливають на структуру тіста, формування клейковинного каркаса та, у кінцевому підсумку, на якість готового хліба.

Пшеничне тісто, як і крохмальні маси, що розглядаються у сучасних роботах з моделювання екструзії, поводить себе як псевдопластичний неньютонівський матеріал: його ефективна в'язкість зменшується зі зростанням швидкості зсуву. На це додатково накладається вплив температури, тривалості механічної дії, гідратації білків і крохмалю, а також наявності цукру, жирів, емульгаторів та інших речовин. Правильний підбір режимів замішування (швидкість обертання, ступінь заповнення, час перебування тіста в апараті) є критичним для отримання стабільної структури м'якуша, пористості та об'єму хліба.

Двошнекові апарати у хлібопекарській галузі можуть працювати як змішувачі безперервної дії, які поєднують транспортування та заміс у спільному коритоподібному корпусі. На відміну від класичних періодичних тістомісильних машин, вони дозволяють стабілізувати час перебування тіста в робочій камері, краще контролювати подачу сировини й інтегрувати процес у автоматизовані лінії. При цьому співобертові шнеки створюють широкий діапазон напружень і швидкостей зсуву, а також інтенсивну циркуляцію маси між осями шнеків і стінками корпусу, що робить їх особливо придатними для отримання однорідного тіста.

Разом з тим, складна тривимірна геометрія двох шнеків, наявність вузьких зазорів між витками і корпусом, а також сильна неньютонівська поведінка тіста ускладнюють аналітичну оцінку гідродинаміки процесу. Як показано в сучасних роботах з чисельного моделювання двошнекових екструдерів, повноцінний опис течії можливий лише із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) у поєднанні з адекватною реологічною моделлю продукту.

У нашій магістерській роботі аналогічний підхід перенесено з задач екструзії крохмальних мас на задачу змішування пшеничного хлібного тіста у горизонтальному двошнековому змішувачі продуктивністю 5 т/год. Об'єктом аналізу є не екструзія крізь фільтеру, а циркуляція тіста всередині робочої камери, зокрема в модернізованій зоні інтенсивного змішування, де передбачено комбіновану геометрію шнеків. Спочатку тісто розглядається як неньютонівська рідина, реологічні параметри якої (наприклад, за моделлю Carreau) можуть бути отримані з лабораторних реометричних випробувань за аналогією до підходу, застосованого для крохмального тіста.

Далі на основі тривимірної CAD-моделі базового та модернізованого змішувача формується обчислювальна область, у якій за допомогою CFD-методів відтворюється течія в'язкопластичного тіста при обертанні співобертних шнеків. Це дає змогу оцінити розподіл швидкостей і напружень зсуву, виявити «мертві зони» та порівняти ефективність змішування для стандартної та комбінованої геометрії робочих органів.

Отже, метою адаптованого підходу є не лише підтвердження придатності вибраної реологічної моделі для опису поведінки хлібного тіста, а й побудова CFD-моделі двошнекового змішувача з модернізованими шнеками, яка дозволить досліджувати різні варіанти конструкції та режими роботи без проведення дорогих повномасштабних експериментів. Отримані в результаті моделювання дані можуть бути використані для оптимізації

геометрії зони інтенсивного змішування й вибору таких параметрів процесу, які забезпечують підвищення однорідності тіста та зменшення питомих енерговитрат при збереженні необхідної продуктивності лінії.

3.3. Методика проведення досліджень

Методика досліджень побудована за аналогією до підходу, описаного Tagliavini, Solari, Montanari для крохмального тіста, але адаптована до завдання моделювання руху пшеничного хлібного тіста у двошнековому змішувачі.

Умовно виділяються три етапи: отримання реологічних даних, вибір та ідентифікація реологічних моделей і подальше використання одержаних коефіцієнтів у CFD-моделі змішувача.

Лабораторне визначення в'язкості тіста

Перший етап полягав у лабораторному вимірюванні в'язкості тіста при різних значеннях швидкості зсуву. За основу прийнято схему випробувань, аналогічну до тієї, що використана в роботі Tagliavini та співавторів, де досліджувалося крохмальне тісто. Для нашої задачі розглядається пшеничне тісто, але принципова процедура вимірювань і тип обладнання зберігаються.

В якості вимірювального комплексу використовується ротаційний реометр Brookfield Engineering RST-CC (Controlled Stress Rheometer, модель з коаксіальним циліндром) у комплекті зі шпинделем типу ССТ-25. Основні технічні характеристики, наведені в таблицях, приймаються такими ж, як у прототипному дослідженні – це дозволяє безпосередньо застосувати параметри в CFD-пакеті, який використовує аналогічні реологічні моделі.

Таблиця 1 – Технічні характеристики реометра RST-CC

Показник	Значення
Діапазон вимірюваної в'язкості	0,00005...5,41·10 ⁶ Па·с
Діапазон швидкостей обертання шпинделя	0,01...1300 об/хв
Максимальний крутний момент	100 мН·м
Дискретність вимірювання крутного моменту	0,15 мкН·м

Таблиця 2 – Технічні характеристики шпинделя ССТ-25

Показник	Значення
Діапазон в'язкості	0,002...1,77·10 ⁵ Па·с
Діапазон швидкостей зсуву	0,013...1670 с ⁻¹
Максимальна напруга зсуву	2,28·10 ³ Па
Об'єм зразка	16,8 мл

Для кожного зразка тіста задається певна швидкість зсуву, після стабілізації режиму фіксується значення в'язкості. У результаті формується набір експериментальних пар «швидкість зсуву – в'язкість», подібний до того, що наведений у вихідній статті. Як орієнтовний приклад вихідних лабораторних даних можна навести таку таблицю (значення відповідають реологічно подібній системі – крохмальному тісту, і в роботі використовуються як демонстраційний набір для ілюстрації процедури обробки):

Таблиця 3 – Приклад експериментальних даних «швидкість зсуву – в'язкість»

№ п/п	Швидкість зсуву, с ⁻¹	В'язкість, Па·с
1	4,50	0,171
2	7,47	0,167
3	12,51	0,158
4	20,88	0,137
5	40,77	0,115
6	58,05	0,104

У подальшому методика ідентична: для хлібного тіста збирається власний набір експериментальних точок, далі на цих даних апроксимуються реологічні моделі.

Вибір і опис реологічних моделей

Наступний крок – реологічна ідентифікація тіста. Як і в прототипному дослідженні, тісто розглядається як неньютонівська рідина, в'язкість якої залежить від швидкості зсуву. Для опису такого середовища використовують

узагальнені моделі, що пов'язують тензор напруг зсуву з тензором швидкостей деформації.

Для ньютонівської рідини напруга зсуву τ пов'язана з тензором швидкостей деформації D співвідношенням

$$\tau = \mu \times D \quad (1)$$

де μ – динамічна в'язкість, яка не залежить від швидкості зсуву.

Компоненти тензора D у декартовій системі координат задаються як

$$D_{ij} = 0,5 \times (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) \quad (2)$$

де u_i – компоненти вектора швидкості, x_j – відповідні координати.

Для неньютонівської рідини в'язкість замінюється на ефективну (неньютонівську) в'язкість η , яка є функцією тензора D :

$$T = \eta(D) \times D \quad (3)$$

У задачах типу нашої, де вводиться узагальнена реологічна модель, зручно виражати залежність η не від усього тензора, а від скалярної швидкості зсуву γ , що визначається як корінь із другого інваріанта тензора D . У формулюванні, прийнятому в ANSYS Fluent, це записують у вигляді:

$$G = \sqrt{2 \times D : D} \quad (4)$$

де $D : D$ – подвійний скалярний добуток тензора D на самого себе.

У подальшому в'язкість η розглядається як функція γ : $\eta = \eta(\gamma)$. Вплив температури на в'язкість для спрощення на цьому етапі не враховують (температурні члени в рівняннях опускаються, що відповідає підходу вихідної статті на першому наближенні).

На основі огляду літератури виділено три найпоширеніші моделі для опису подібних систем: степеневий (Power Law) закон, модель Carreau та модель Cross. Вони формулюються так, як це прийнято в ANSYS Fluent Theory Guide.

Степеневий закон (Power Law)

Для неньютонівської рідини за степеневим законом ефективна в'язкість визначається виразом

$$\eta = K \times (\dot{\gamma})^{(n - 1)} \quad (5)$$

де

K – консистенційний коефіцієнт;

n – показник степеневого закону.

Показник n характеризує середній рівень в'язкості та відхилення поведінки рідини від ньютонівської. При цьому:

$n = 1$ відповідає ньютонівській рідині;

$n > 1$ відповідає потовщуванню (dilatant fluid);

$n < 1$ відповідає псевдопластичній (shear-thinning) поведінці.

Модель Carreau для псевдопластиків

Модель Carreau дозволяє описати широкий клас рідин, для яких при малих швидкостях зсуву в'язкість прямує до деякого нульового значення η_0 , а при великих – до граничного значення η_∞ . У цій моделі в'язкість записується як

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \times [1 + (\lambda \times \dot{\gamma})^2]^{-(n - 1) / 2} \quad (6)$$

де

η_0 – в'язкість при нульовій швидкості зсуву (zero-shear viscosity);

η_∞ – в'язкість при нескінченній швидкості зсуву (infinite-shear viscosity);

λ – характерна (релаксаційна) часова константа;

n – показник степеневого закону в області високих швидкостей зсуву.

Таким чином, при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ в'язкість прямує до η_0 , а при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ – до η_∞ . Параметр λ пов'язаний з “природним часом” системи, тобто величиною, обернено пропорційною швидкості зсуву, при якій поведінка переходить від ньютонівської до степеневі.

Модель Cross

Для моделі Cross ефективну в'язкість задають у вигляді

$$\eta(\gamma) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / [1 + (\lambda \times \gamma)^{(1 - n)}] \quad (7)$$

де

η_0 – в'язкість при нульовій швидкості зсуву;

η_{∞} – в'язкість при великих швидкостях зсуву;

λ – часова константа;

n – параметр, що характеризує ступінь псевдопластичності.

У вихідній статті наведено дещо спрощену форму Cross-моделі з урахуванням того, що для досліджуваного тіста η_{∞} є невеликою величиною, порівняно з η_0 . В нашій роботі може бути використане як повне, так і спрощене формулювання, залежно від якості експериментальних даних.

Обробка експериментальних даних і підбір параметрів моделей

Обробка даних здійснюється в табличному процесорі (аналогічно до використання Microsoft Excel у роботі Tagliavini та співавторів). Для кожної експериментальної точки ($\dot{\gamma}_i$, $\eta_{exp,i}$) обчислюють модельні значення в'язкості $\eta_{mod,i}$ за трьома моделями – степеневою, Carreau та Cross – з певним набором початкових параметрів.

Для кожної моделі мінімізується середньоквадратична похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями в'язкості. Цільова функція може бути записана у вигляді

$$E = (1 / N) \times \sum [\eta_{exp,i} - \eta_{mod,i}]^2, \quad (8)$$

де N – кількість експериментальних точок.

Після знаходження набору параметрів, які мінімізують E для кожної моделі, обчислюється коефіцієнт детермінації R^2 , що характеризує якість апроксимації: чим ближче R^2 до 1, тим краще модель описує експериментальні дані. У вихідній статті наводяться приклади таких результатів (табл. 4 і 5), які відображають близькість модельних значень до лабораторних:

Таблиця 4 – Приклад порівняння експериментальних та модельних значень в'язкості

№ п/п	Експериментальна в'язкість, Па·с	В'язкість за моделлю Power Law, Па·с	В'язкість за моделлю Carreau, Па·с	В'язкість за моделлю Cross, Па·с
1	0,171	0,179	0,172	0,173
2	0,167	0,163	0,166	0,165
3	0,158	0,148	0,155	0,154
4	0,137	0,134	0,139	0,140
5	0,115	0,118	0,115	0,116
6	0,104	0,110	0,103	0,102

Таблиця 5 – Параметри реологічних моделей і значення R^2

Параметр	Модель Power Law	Модель Carreau	Модель Cross
K	0,239	–	–
n	0,809	0,635	0,129
λ	–	0,083	0,014
η_0	–	0,176	0,189
η_∞	–	–	0,011
R^2	0,936	0,997	0,991

Показано, що для досліджуваного тіста модель Carreau дає найвище значення R^2 (0,997), тобто найкраще відтворює залежність в'язкості від швидкості зсуву, тоді як степеневий закон має найгіршу точність.

На рисунку 2 (за Tagliavini та ін.) наведено порівняння експериментальних точок з кривими, отриманими за трьома реологічними моделями, де добре видно, що крива Carreau практично збігається з експериментальними даними в усьому досліджуваному діапазоні $\dot{\gamma}$. У даній магістерській роботі передбачається аналогічно отримати графік “ $\eta(\dot{\gamma})$ ” для хлібного тіста та, на основі такого порівняння, обрати модель Carreau як основну для подальших CFD-розрахунків у робочому об'ємі двошнекового змішувача з модернізованими шнеками.

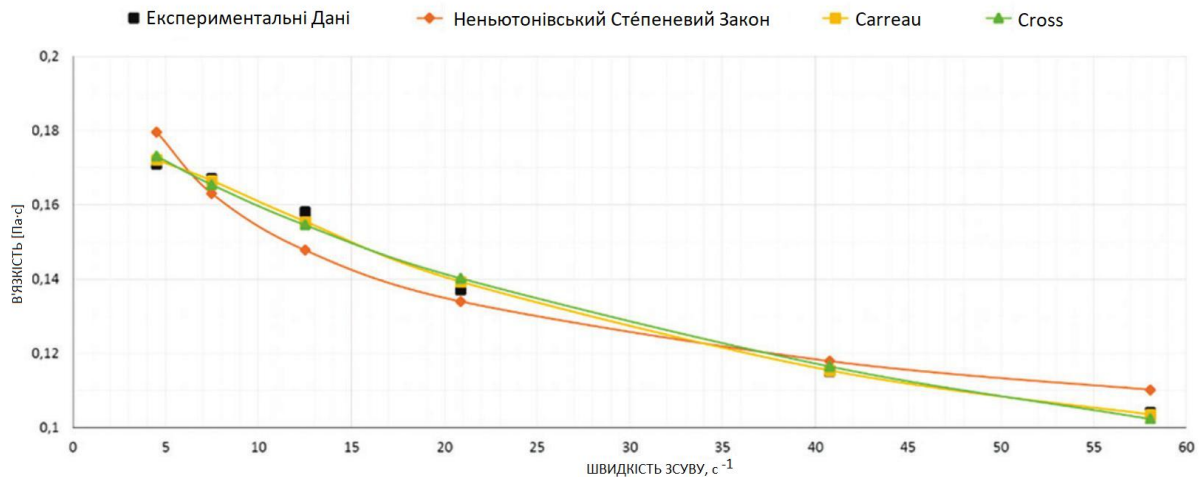


Рис. 2. Порівняння різних теоретичних реологічних моделей з експериментальними даними. Графік був створений на основі розрахунків та візуалізації, виконаних у програмі Microsoft Excel.

CFD-верифікація реологічних моделей у простій 2D-задачі

Після підбору параметрів реологічних моделей за експериментальними даними було виконано додаткову верифікацію шляхом чисельного моделювання течії в простій двовимірній області. Такий підхід повністю відповідає методиці Tagliavini, Solari, Montanari, де для оцінки адекватності моделей використовували течію в каналі між двома нерухомими паралельними пластинами.



Рис. 3. 2D розрахункова область зі вхідною швидкістю.

У даній роботі аналогічну тестову задачу застосовано для хлібного тіста. Перед переходом до повної тривимірної моделі двошнекового змішувача реологічні моделі, отримані на основі лабораторних вимірювань, перевіряються в стандартній 2D-геометрії. Це дозволяє порівняти розподіли швидкості та в'язкості для різних моделей при однакових граничних умовах і

вибрати найбільш придатну для подальших CFD-розрахунків у реальній геометрії змішувача.

Як у вихідній статті, у програмному середовищі ANSYS Fluent формується двовимірний прямокутний канал, у якому розглядається стаціонарна течія в'язкопластичної рідини між двома нерухомими паралельними стінками. Схематичне зображення обчислювальної області з підведенням швидкості на вході наведено у вихідній роботі як рисунок 3 («2D computational domain with inlet velocity»). У нашому випадку аналогічна схема використовується як еталонна задача для хлібного тіста.

Розміри області запозичено зі статті-прототипу. Довжину каналу збільшено до 5 м, щоб забезпечити повністю розвинений профіль течії у центральній частині, де проводиться аналіз. Висота каналу позначається D , довжина – L . Геометричні параметри подано в таблиці 6.

Таблиця 6 – Геометричні розміри розрахункової області

Параметр	Розмір, м
Висота каналу D	0,10
Довжина каналу L	5,00

Область дискретизується за допомогою ANSYS Meshing відповідно до методу скінченних елементів. Для сітки використовуються чотирикутні елементи (quadrilaterals), з локальним згущенням поблизу стінок, де градієнти швидкості та в'язкості є найбільшими. Основні характеристики сітки наведено в таблиці 7.

Таблиця 7 – Специфікація сітки розрахункової області

Параметр	Значення
Тип елементів	Чотирикутники
Кількість елементів	5240
Кількість вузлів	5523
Мінімальний розмір елемента	0,0025 м
Максимальний розмір елемента	0,498 м
Максимальний розмір грані	0,249 м

Параметр	Значення
Поділ по стінках (wall edge)	250 поділок
Поділ по входу/виходу (edge)	20 поділок

Граничні умови також збережено за аналогією до оригінальної роботи. На вході каналу задається сталий профіль швидкості зі значенням

$$v_{in} = 2,5 \text{ м/с,}$$

на виході – атмосферний тиск. Рух середовища розглядається як ламінарний, що відповідає реальній ситуації для високов'язких мас типу хлібного тіста. У якості густини робочого середовища в оригінальній роботі було прийнято значення $588,94 \text{ кг/м}^3$; у нашій роботі це значення може бути скориговане відповідно до фактичної густини хлібного тіста, але для демонстрації методики його залишено як референтне.

У Fluent послідовно запускаються три розрахунки – по одному для кожної з раніше ідентифікованих реологічних моделей: степеневий закон, Carreau та Cross. Для кожного варіанта в модулі властивостей рідини задаються відповідні коефіцієнти (K , n , λ , η_0 , η_∞), а також густина. Розрахунок виконується в стаціонарній постановці до досягнення збіжності за швидкістю та в'язкістю в усьому об'ємі каналу.

Подальший аналіз результатів проводиться в постпроцесорі CFD-Post. Спочатку візуально аналізують карти розподілу в'язкості в перерізі каналу. У статті Tagliavini та співавторів такі результати наведені як рисунок 4 («Dynamic viscosity contour comparison between rheological models»). Аналогічно й у нашому дослідженні можна побудувати порівняльні контурні діаграми динамічної в'язкості для трьох моделей, що дозволяє оцінити відмінності у відтворенні граничних шарів і центральної частини потоку.

Далі будується порівняльний графік розподілу швидкості та в'язкості за висотою каналу в усталеній зоні течії. У вихідній статті це представлено як рисунок 5 («Comparative graph with velocity and viscosity values for different rheological model, depending upon duct height»). У нашій роботі така побудова

дозволяє оцінити, наскільки добре кожна модель відтворює очікуваний параболічний профіль швидкості та характер зміни в'язкості від стінки до центру.

У результаті порівняння з експериментальними кривими “ $\eta(\dot{\gamma})$ ” та аналізу CFD-профілів робиться висновок щодо придатності моделей. Як показано в оригінальній роботі, саме модель Carreau дає найкращу відповідність як за значеннями в'язкості, так і за формою профілю в'язкості й швидкості в каналі, тоді як степеневий закон помітно спрощує поведінку середовища. Аналогічний висновок очікується і для хлібного тіста, оскільки воно також проявляє виражену псевдопластичну поведінку з плато в низьких і високих швидкостях зсуву.

Таким чином, етап CFD-верифікації в простій 2D-геометрії доповнює лабораторну реометрію і дозволяє більш обґрунтовано обрати реологічну модель (у нашому випадку – модель Carreau) для подальшого застосування в тривимірній CFD-моделі двошнекового змішувача з модернізованими шнеками.

Аналіз результатів

Після підбору параметрів реологічних моделей за лабораторними даними було виконано етап аналізу результатів, метою якого було визначити, яка саме модель найкраще описує поведінку хлібного тіста в діапазоні швидкостей зсуву, характерних для роботи двошнекового змішувача.

Спочатку порівнювали карти розподілу в'язкості, отримані в ході CFD-розрахунків для тестової 2D-задачі течії в каналі. Для кожної моделі (Power Law, Carreau, Cross) у CFD-Post будувалися контурні діаграми динамічної в'язкості. Відповідно до рис. 4 в одному масштабі показані поля в'язкості для трьох моделей. Візуально видно, що для ступеневої моделі профіль в'язкості надто спрощений, тоді як моделі Carreau та Cross краще відтворюють перехід від високої в'язкості біля стінок до знижених значень у центральній частині потоку.

Другим кроком, за рис. 5, будувався графік розподілу швидкості та в'язкості за висотою каналу в усталеній зоні течії. На одному полі відклали профілі швидкості для трьох моделей і відповідні профілі ефективної в'язкості. Для степеневі моделі спостерігалось відчутне відхилення в'язкості від очікуваної поведінки при дуже малих та дуже великих швидкостях зсуву. Натомість моделі Carreau і Cross краще відтворювали плавний перехід від “плато” при малих $\dot{\gamma}$ до області вираженого зсувного розрідження.

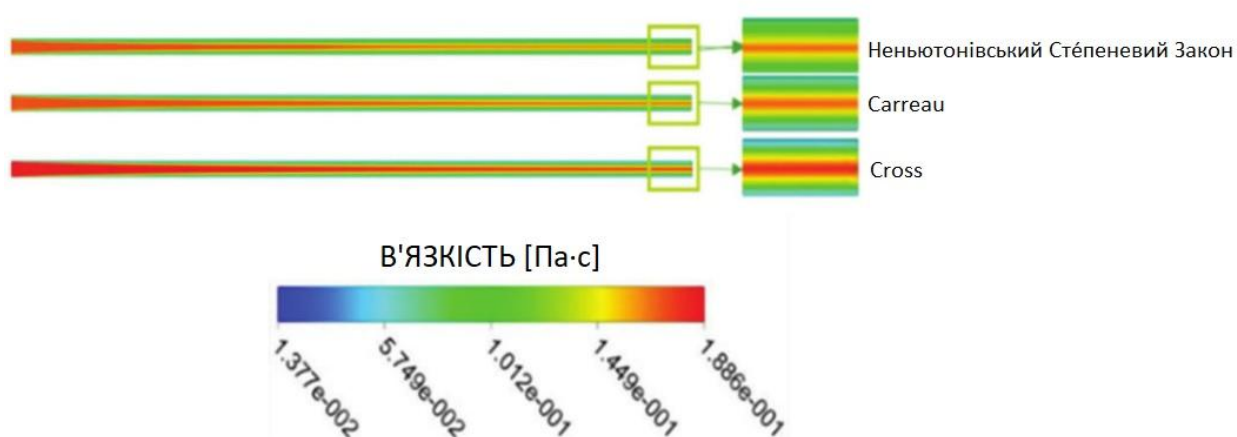


Рис. 4. Порівняння контурів динамічної в'язкості між реологічними моделями.

Крім візуального аналізу, проводилася кількісна оцінка відповідності моделі експериментальним даним за середньоквадратичною похибкою та коефіцієнтом детермінації R^2 .

Як видно з таблиці, найвище значення R^2 має модель Carreau (0,997), що свідчить про її практично повний збіг з експериментальною кривою “в'язкість – швидкість зсуву” у всьому дослідженому діапазоні $\dot{\gamma}$. Модель Cross також дає дуже добру апроксимацію ($R^2 \approx 0,991$), проте у крайніх діапазонах швидкостей зсуву спостерігаються дещо більші відхилення. Степеневий закон (Power Law) має найменше значення R^2 (близько 0,936), що підтверджує його обмежену придатність для точного опису поведінки тіста, особливо поблизу нульової та дуже високих швидкостей зсуву.

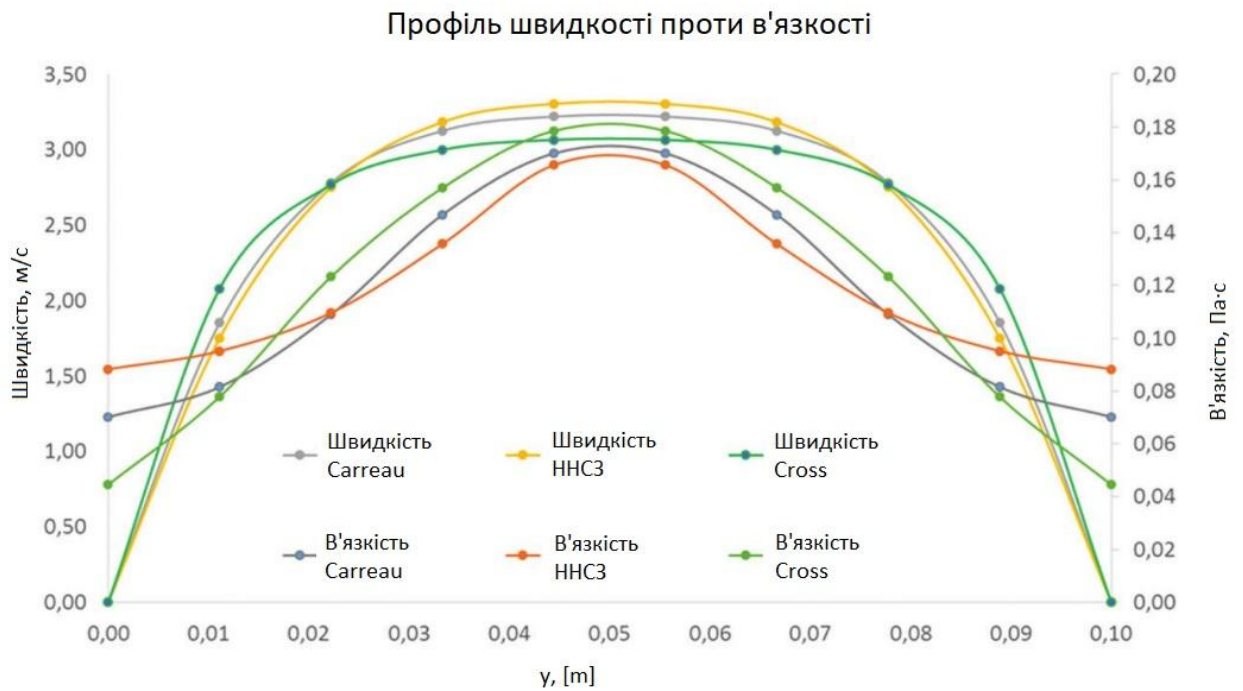


Рис. 5. Порівняльний графік значень швидкості та в'язкості для різних реологічних моделей, залежно від висоти каналу.

Аналіз контурних діаграм в'язкості (рис. 4), порівняльних профілів швидкості та в'язкості (рис. 5), а також числових значень R^2 дозволив зробити висновок, що для опису хлібного тіста в умовах роботи двошнекового змішувача доцільно обрати саме модель Carreau. Вона одночасно:

- добре узгоджується з лабораторними реометричними даними;
- коректно відтворює форму профілю в'язкості в каналі;
- забезпечує фізично обґрунтований перехід від області майже сталої в'язкості до зони інтенсивного зсувного розрідження.

У подальших CFD-розрахунках тривимірної моделі двошнекового змішувача з модернізованими шнеками реологічні властивості хлібного тіста задаються саме у формі моделі Carreau з параметрами, отриманими за результатами обробки експериментальних даних. Це гарантує узгодженість між лабораторною реометрією, тестовою 2D-верифікацією та основними тривимірними розрахунками в реальній геометрії змішувача.

Після аналізу контурів в'язкості та профілів швидкості було виконано ще один етап порівняння, аналогічний до того, що наведений у вихідній статті як рисунок 6. Для кожної реологічної моделі зі стаціонарного розрахунку в 2D-каналі було взято профіль осьової швидкості $v(y)$ у характерному перерізі, після чого локальну швидкість зсуву визначали як похідну швидкості за координатою по висоті каналу:

$$\dot{\gamma} = dv / dy.$$

На практиці у CFD-Post це реалізується через обчислення похідної компоненти швидкості вздовж поперечного напрямку y в точках сітки та подальшу побудову масиву пар « $\dot{\gamma} - \eta$ ». Для кожної моделі (Power Law, Carreau, Cross) за розрахованими значеннями $\dot{\gamma}$ визначали ефективну в'язкість $\eta(\dot{\gamma})$ і наносили її на один графік разом з експериментальними реометричними даними для хлібного тіста.

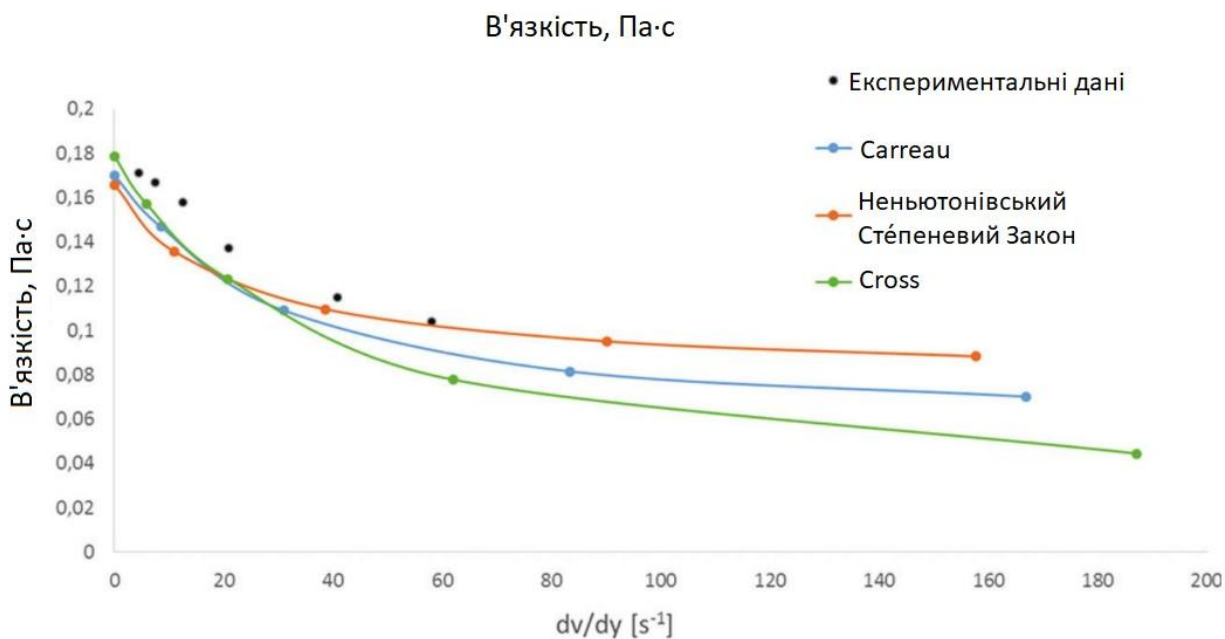


Рис. 6. Порівняння моделювання в'язкості та експериментальних даних, як функції швидкості зсуву.

Таким чином було побудовано узагальнюючу залежність:

$$\eta = f(\dot{\gamma}),$$

де на одному полі подані:

– експериментальні точки «лабораторія – реометр»;

- крива, отримана за результатами CFD для моделі Power Law;
- крива моделі Carreau;
- крива моделі Cross.

Це порівняння наведено у вигляді рисунка 6 – «Порівняння результатів моделювання в'язкості та експериментальних даних як функції швидкості зсуву». Візуальний аналіз рисунка 6 підтверджує числові значення R^2 з таблиці 5: крива, побудована для моделі Carreau, практично збігається з експериментальною залежністю в усьому діапазоні швидкостей зсуву, тоді як степенева модель і модель Cross демонструють помітніші розбіжності на краях діапазону. Це ще раз підтверджує доцільність використання моделі Carreau як базової для подальшого тривимірного CFD-моделювання процесу замішування тіста у двошнековому змішувачі.

CFD-моделювання модернізованого двошнекового змішувача

Другий етап досліджень полягав у тривимірному комп'ютерному моделюванні зони завантаження та інтенсивного перемішування модернізованого двошнекового тістомісильного змішувача. Геометрична модель відтворювала реальну конструкцію першої секції робочої камери машини, на основі робочих креслень (див. розділ 2), де розміщені два співобертові шнеки зі змінним кроком витків та збільшеною висотою лопатей у центральній частині.

Сформована у CAD-системі просторова модель включала ділянку завантаження з бункером, основну робочу частину циліндричного кожуха та зону виходу тіста у наступну операцію технологічної лінії. На рисунку 7 схематично показано основні геометричні розміри обраної ділянки змішувача, а на рисунку 8 – побудовану 3D-модель робочого об'єму, імпортовану в модуль ANSYS Meshing для подальшої дискретизації.

При побудові розрахункової сітки основну увагу приділено областям з вузькими зазорами між шнеками, а також між витками шнеків і внутрішньою поверхнею кожуха. У цих зонах реалізується основна частина зсувних деформацій і можливі витоки тіста, тому потрібна підвищена деталізація сітки. Для приконтатних шарів біля стінок шнеків і корпусу сформовано спеціальний приповерхневий шар з поступовим згущенням елементів. Загальні характеристики сітки наведено у таблиці 8, а характерний вигляд структури сітки з виділенням приповерхневих і «витікних» областей – на рисунку 9.

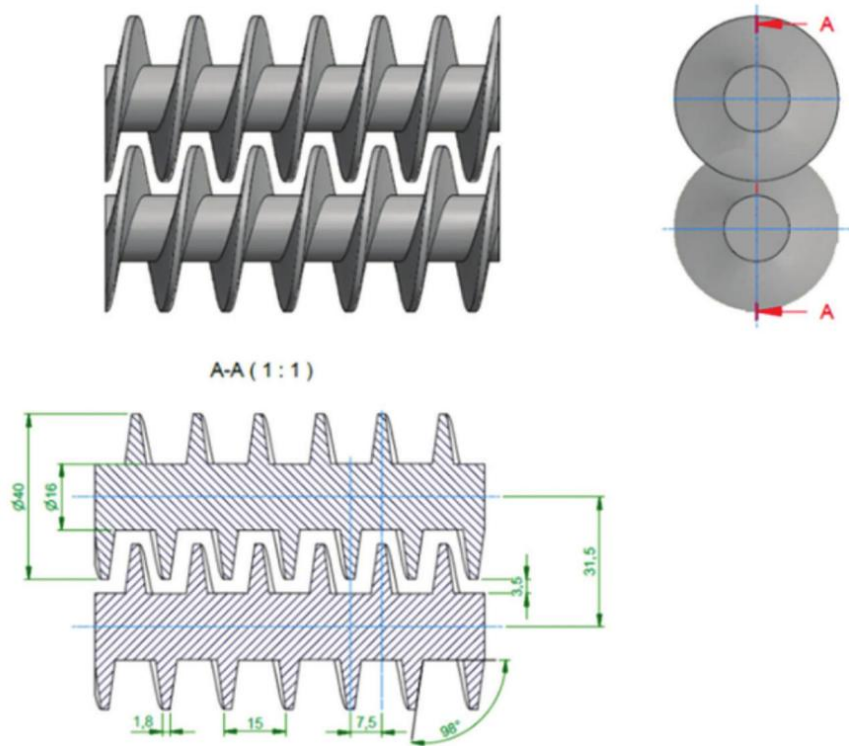


Рис. 7. Ділянки змішувача

Таблиця 8 – Основні характеристики розрахункової сітки змішувача

Параметр	Значення
Тип об'ємних елементів	Тетраедри
Тип поверхневих елементів	Чотирикутники
Кількість об'ємних елементів	2 721 599
Кількість вузлів	9 259 878
Мінімальний лінійний розмір елемента	$8 \cdot 10^{-5}$ м
Максимальний лінійний розмір елемента	$1 \cdot 10^{-3}$ м
Максимальний розмір грані	$1 \cdot 10^{-3}$ м
Приповерхневий шар (boundary layer)	Загальна товщина $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ м
Кількість шарів у boundary layer	4
Густота сітки в зоні витків шнеків	Крок елемента $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ м
Густота сітки в тілі шнеків	Крок елемента $\approx 6 \cdot 10^{-4}$ м
Густота сітки біля стінки кожуха	Крок елемента $\approx 8 \cdot 10^{-4}$ м
Густота сітки на ребрах та крайках	Крок елемента $\approx 4 \cdot 10^{-4}$ м



Рис. 8. 3D-модель робочого об'єму, імпортована в модуль ANSYS Meshing для подальшої дискретизації

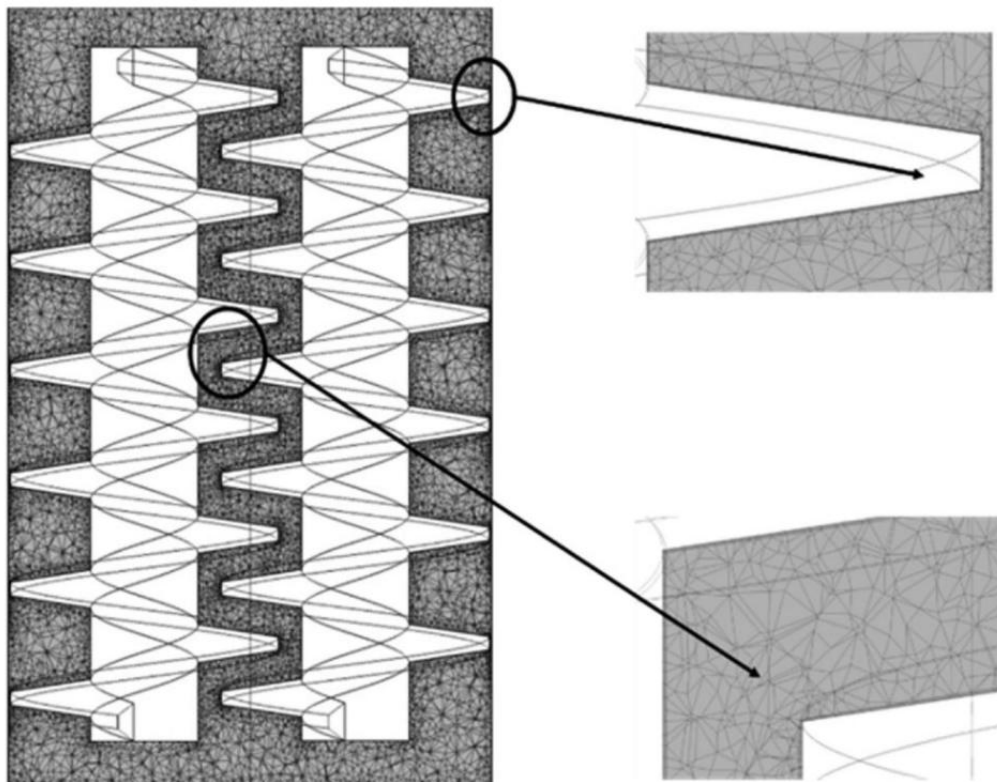


Рис. 9. Характерний вигляд структури сітки з виділенням приповерхневих і «витікних» областей

CFD-розрахунок виконувався у нестационарній постановці, щоб врахувати вплив обертання шнеків на картину течії тіста. Для опису реології використано модель Карро (Carreau), параметри якої були одержані у попередньому розділі на основі лабораторного вимірювання в'язкості хлібного тіста при різних швидкостях зсуву. Потік припускався ламінарним, що відповідає високій ефективній в'язкості тіста та типовим режимам роботи змішувача.

На вході моделі (зона завантаження) задавали атмосферний тиск, а подача матеріалу в розрахунку здійснювалася лише за рахунок обертання шнеків. На виході використано гідравлічне звуження перерізу, яке імітує опір наступних зон технологічної лінії та забезпечує необхідний перепад тиску. Кутова швидкість шнеків дорівнювала, наприклад, 370 об/хв; для задання обертання створено користувацьку функцію (UDF) мовою C та підключено її в ANSYS Fluent.

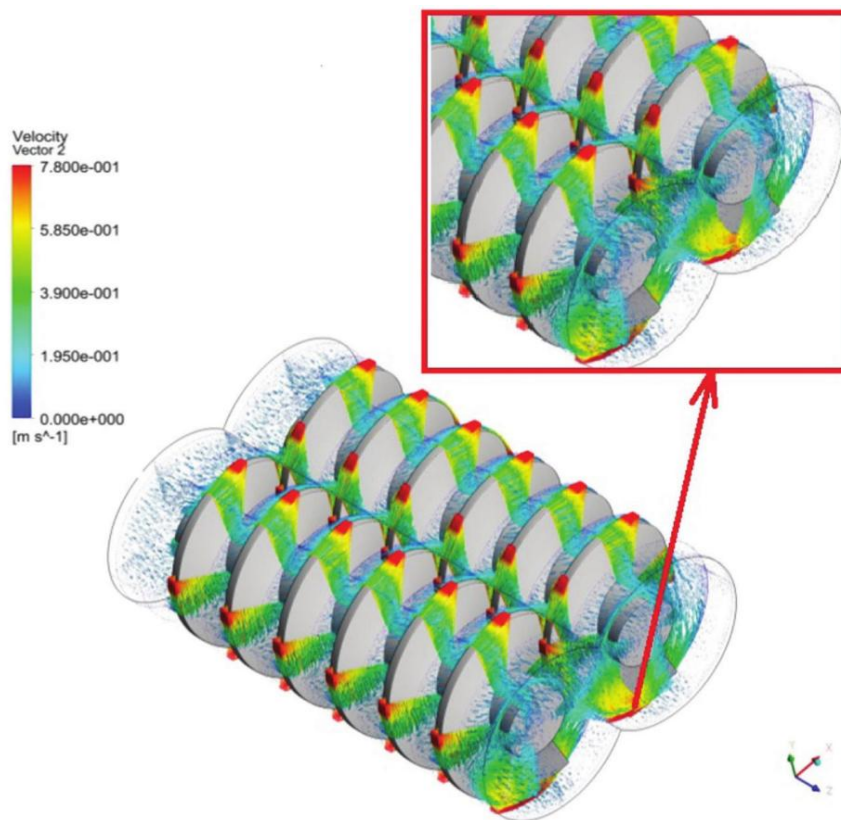


Рис. 10. Векторне поле швидкостей

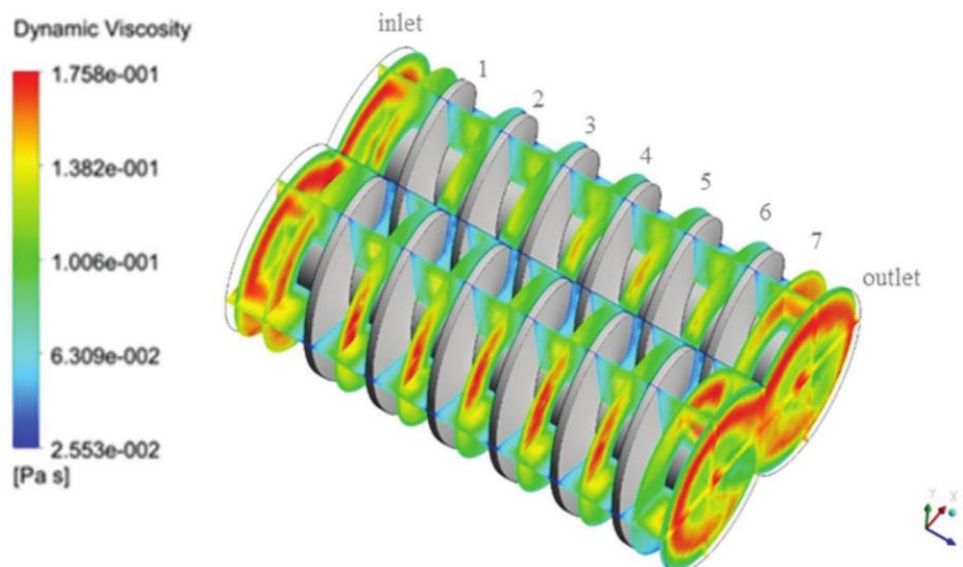


Рис. 11. Карта розподілу динамічної в'язкості

Для моделювання обертання шнеків застосовано опцію динамічної сітки. Об'єм розрахункової області було розділено на окремі зони: області, що рухаються як «тверде тіло» разом із шнеками, області з перебудовою сітки (remeshing) та нерухомі ділянки. Це дозволило відслідковувати поворот шнеків у часі й одночасно обмежити перебудову сітки лише тетраедральними елементами у проміжних об'ємах. Схему розподілу зон динамічної сітки наведено в таблиці 9.

Таблиця 9 – Зони динамічної сітки в моделі змішувача

Зона розрахункової області	Тип зони динамічної сітки
Тіла шнеків	Rigid body (рухоме тіло)
Приповерхневий шар біля шнеків	Rigid body
Стінка кожуха	Stationary (нерухома)
Приповерхневий шар біля стінки кожуха	Stationary
Вхідний переріз	Stationary
Приповерхневий шар біля входу	Stationary
Вихідний переріз	Stationary
Приповерхневий шар біля виходу	Stationary
Внутрішній об'єм змішувача між шнеками та стінками	Deforming (деформована)

Завдяки такій постановці динамічна сітка «слідуює» за обертанням шнеків разом із приповерхневими шарами, а перерахунок елементів обмежується

центральною об'ємом, де простіше керувати якістю тетраедральних елементів. Тривалість моделювання за фізичним часом обирали близькою до реального часу перебування порції тіста в розглянутій секції змішувача, щоб отримати усталений режим течії.

Після завершення розрахунку аналізували просторові розподіли швидкості та в'язкості. Векторне поле швидкостей (рисунок 10) показало, що переміщення і транспортування тіста вздовж осі змішувача відбувається виключно завдяки обертанню шнеків, що узгоджується з фізичною моделлю процесу. Карта розподілу динамічної в'язкості (рисунок 11) демонструє зони інтенсивного зсуву в зазорах між витками та біля стінок, а також підтверджує узгодженість числових значень з результатами лабораторних вимірювань (див. таблицю 4). Для низки поперечних перерізів робочої камери були визначені середні значення в'язкості, які узагальнено у вигляді графіка залежності «в'язкість – номер перерізу» (рисунок 12). Таке представлення дозволяє оцінити, як змінюється структура тіста вздовж довжини змішувача та в якій зоні модернізована конфігурація шнеків забезпечує максимальний ефект перемішування.

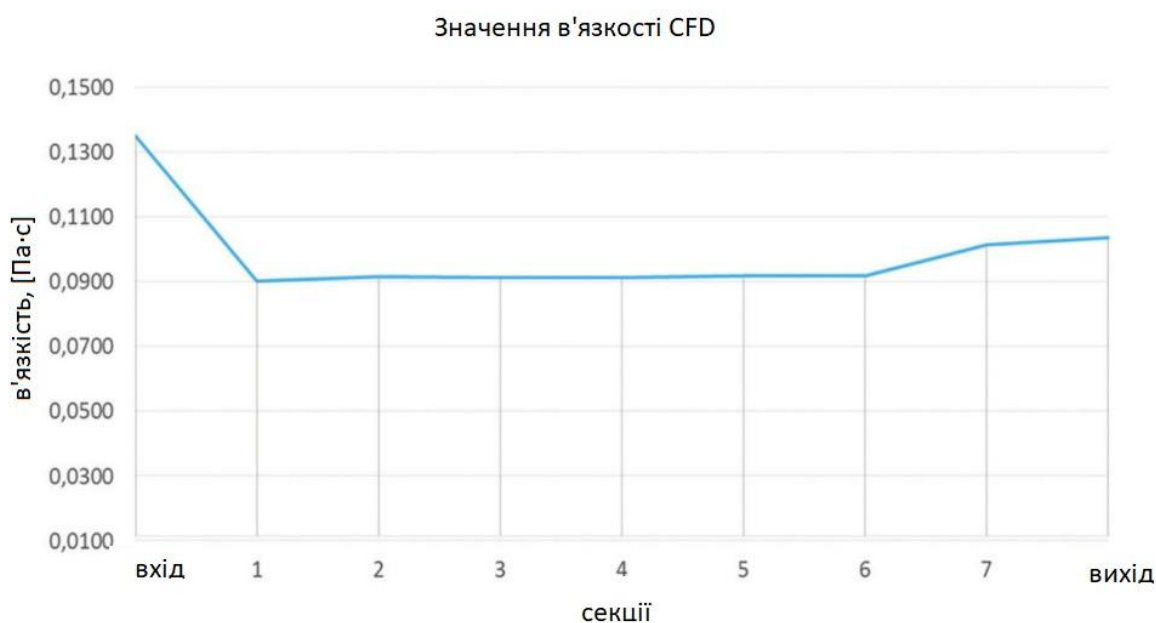


Рис. 12. Залежності «в'язкість – номер перерізу»

3.4. Висновки

У дослідній частині магістерської роботи було поєднано два завдання:

- підібрати реологічну модель для опису пшеничного хлібного тіста;
- створити тривимірну CFD-модель модернізованого двошнекового змішувача, яка відтворює реальні умови його роботи.

Спочатку в лабораторних умовах одержано набір значень в'язкості при заданих швидкостях зсуву. На основі цих даних було проведено порівняння з теоретичними кривими, розрахованими за трьома неньютонівськими моделями: степеневим законом (Power Law), моделлю Carreau та моделлю Cross. Ці рівняння широко застосовують для опису поведінки неньютонівських рідин і в'язкопластичних мас, подібних до хлібного тіста.

Для вибору найпридатнішої моделі використано додаткову 2D-CFD-задачу течії між двома паралельними пластинами. Було виконано три розрахунки – окремо для кожної з реологічних моделей – з подальшим порівнянням одержаних кривих «в'язкість – швидкість зсуву» з експериментальними значеннями. Показано, що саме модель Carreau найкраще відтворює тенденцію зміни в'язкості у всьому досліджуваному діапазоні швидкостей зсуву і забезпечує найвище значення коефіцієнта детермінації R^2 .

На наступному етапі робочі умови двошнекового змішувача були змодельовані у тривимірній CFD-постановці з використанням моделі Carreau для опису течії хлібного тіста в робочій камері з модернізованими шнеками. Для низки поперечних перерізів змішувача отримано значення динамічної в'язкості та побудовано графік її зміни залежно від положення перерізу по довжині апарата. Це дозволило оцінити, в яких зонах шнеків формуються максимальні зсувні деформації та найбільш інтенсивне перемішування, а також підтвердити узгодженість CFD-результатів з лабораторними даними.

Подальший розвиток роботи логічно пов'язаний із експериментальною верифікацією CFD-моделі на дослідній або промисловій установці.

Планується провести серію вимірювань ефективної в'язкості та показників якості тіста в тих самих характерних перерізах змішувача, які були проаналізовані під час чисельного моделювання. Після підтвердження адекватності CFD-моделі її можна буде використати як інженерний інструмент для порівняння різних геометрій шнеків і варіантів модернізації, вибору оптимальних режимів роботи та прогнозування впливу цих змін на однорідність тіста й енергоємність процесу.

Таким чином, у рамках магістерського дослідження сформовано узгоджений підхід: від реологічної ідентифікації хлібного тіста до тривимірного CFD-моделювання процесу змішування у модернізованому двошнековому змішувачі. Це створює науково обґрунтовану базу для подальшої оптимізації конструкції робочих органів та підвищення ефективності роботи обладнання.

4. Розрахункова частина

4.1. Розрахунок продуктивності модернізованого обладнання

Об'єкт розрахунку – двошнековий змішувач для замішування пшеничного тіста, загальна продуктивність якого становить 5 т/год. Розрахунок ведеться для одного шнека, вважаючи, що навантаження розподіляється між двома шнеками приблизно порівну.

Загальна продуктивність змішувача:

$$P_{\text{заг}} = 5000 \text{ кг/год} \quad (1)$$

Розрахункова продуктивність одного шнека:

$$P = 0,5 \times P_{\text{заг}} \quad (2)$$

Підставимо чисельно:

$$P = 0,5 \times 5000 = 2500 \text{ кг/год}$$

Масова витрата через один шнек у кілограмах за секунду:

$$G = P / 3600 \quad (3)$$

$$G = 2500 / 3600 \approx 0,694 \text{ кг/с}$$

Густина тіста (орієнтовно):

$$\rho = 950 \text{ кг/м}^3 \quad (4)$$

Об'ємна витрата тіста:

$$Q_V = G / \rho \quad (5)$$

$$Q_V = 0,694 / 950 \approx 7,30 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

Максимальний робочий тиск у робочій камері:

$$P_{\text{max}} = 250 \text{ кПа} \quad (6)$$

Коефіцієнт внутрішнього тертя продукту:

$$f = 0,65 \quad (7)$$

Кількість робочих витків шнека:

$$z_{\text{витк}} = 6 \quad (8)$$

Зовнішній діаметр шнека:

$$D = 0,42 \text{ м} \quad (9)$$

Відношення діаметрів шнека і вала:

$$a = D / d \quad (10)$$

Технологічний розрахунок шнека

Ступінь заповнення і крок шнека

Орієнтовний ступінь заповнення міжвиткового простору для в'язкопластичного тіста приймаємо:

$$\psi = 0,7 \quad (11)$$

Площа міжвиткового перерізу визначається за формулою:

$$F_{\text{міжв}} = (\pi / 4) \times (D^2 - d^2) \quad (12)$$

Спочатку задаємо відношення діаметрів:

$$a = D / d \text{ (повтор формули)} \quad (10)$$

Звідси діаметр вала:

$$d = D / a \quad (13)$$

Підставимо $D = 0,42$ м, $a = 3$:

$$d = 0,42 / 3 = 0,14 \text{ м}$$

Тоді площа міжвиткового перерізу:

$$F_{\text{міжв}} = (3,1416 / 4) \times (0,42^2 - 0,14^2)$$

$$0,42^2 = 0,1764; 0,14^2 = 0,0196; \text{різниця } 0,1764 - 0,0196 = 0,1568.$$

Отже:

$$F_{\text{міжв}} \approx (3,1416 / 4) \times 0,1568 \approx 0,123 \text{ м}^2$$

Частота обертання шнека для безперервного замішування приймається:

$$N_{\text{шн}} = 2,5 \text{ об/с} = 150 \text{ об/хв} \quad (14)$$

Осьова швидкість переміщення тіста в шнеку:

$$v_{\text{ос}} = Q_V / (\psi \times F_{\text{міжв}}) \quad (15)$$

Підставимо числові значення:

$$v_{\text{ос}} = 7,30 \times 10^{-4} / (0,7 \times 0,123) \approx 7,30 \times 10^{-4} / 0,0861 \approx 8,48 \times 10^{-3} \text{ м/с}$$

Крок гвинтової лінії пов'язаний з осьовою швидкістю та частотою обертання:

$$V_{\text{ос}} = n_{\text{шн}} \times H \quad (16)$$

Звідси крок:

$$H = v_{\text{ос}} / n_{\text{шн}} \quad (17)$$

$$H = 8,48 \times 10^{-3} / 2,5 \approx 3,39 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Отриманий крок надто малий для технологічного змішувача (типовий для високонапірних екструдерів). Тому крок шнека задаємо конструктивно, виходячи з довжини робочої частини шнека:

$$H = L_{\text{роб}} / z_{\text{витк}} \quad (18)$$

де $L_{\text{роб}}$ – довжина робочої частини шнека.

Якщо за конструкцією $L_{\text{роб}} = 2,0 \text{ м}$, $z_{\text{витк}} = 6$:

$$H = 2,0 / 6 \approx 0,333 \text{ м}$$

Це значення кроку є технологічно прийнятним для змішувача замісу тіста.

Діаметр вала шнека

Мінімальний діаметр вала за умовою геометрії уже визначено (формула (13)):

$$d = 0,14 \text{ м}$$

За класичними підходами до розрахунку шнеків діаметр також пов'язують з кутом внутрішнього тертя матеріалу, але для нашої задачі важливо, що фактичний обраний діаметр не менший за розрахунковий. У нашому випадку діаметр 0,14 м забезпечує необхідний запас міцності.

Кут підйому гвинтової лінії

Кут підйому гвинтової лінії на зовнішній поверхні шнека визначають за допомогою тангенса:

$$\text{tg}(\beta) = H / (\pi \times D) \quad (19)$$

Звідси:

$$\beta = \text{arctg}(H / (\pi \times D)) \quad (20)$$

Підставимо $H = 0,333 \text{ м}$, $D = 0,42 \text{ м}$. Спершу обчислюємо знаменник:

$$\pi \times D = 3,1416 \times 0,42 \approx 1,319$$

Далі:

$$H / (\pi \times D) = 0,333 / 1,319 \approx 0,2525$$

$$\beta = \arctg(0,2525) \approx 14,2^\circ$$

Отриманий кут підйому β знаходиться в типовому діапазоні для транспортуючо-змішувальних шнеків (10...25°).

Перевірка міцності шнека

Оцінка осьової сили і крутного моменту

Орієнтовна осьова сила від тиску тіста на шнек:

$$F_{ос} = p_{max} \times F_{міжв} \quad (21)$$

Підставимо:

$$F_{ос} = 250000 \text{ Па} \times 0,123 \text{ м}^2 \approx 30750 \text{ Н}$$

Середній радіус дії сили (близько до середнього між витком і валом):

$$r_{cp} = (D + d) / 4 \quad (22)$$

$$r_{cp} = (0,42 + 0,14) / 4 = 0,56 / 4 = 0,14 \text{ м}$$

Крутний момент на шнеку:

$$M_{шн} = F_{ос} \times r_{cp} \quad (23)$$

$$M_{шн} = 30750 \times 0,14 \approx 4305 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Кутова швидкість обертання шнека:

$$\Omega = 2 \times \pi \times n_{шн} \quad (24)$$

$$\omega = 2 \times 3,1416 \times 2,5 \approx 15,71 \text{ рад/с}$$

Механічна потужність на валу шнека (кВт):

$$N_{шн} = M_{шн} \times \omega / 1000 \quad (25)$$

$$N_{шн} = 4305 \times 15,71 / 1000 \approx 67,7 \text{ кВт}$$

Це максимальна розрахункова потужність при умовному $p_{max} = 250$ кПа, тобто розрахунок ведеться з запасом.

Перевірка вала шнека на кручення

Розрахункове напруження кручення у валу:

$$\tau = M_{шн} \times 16 / (\pi \times d^3) \quad (26)$$

Підставимо $d = 0,14$ м:

$$d^3 \approx 0,14^3 \approx 0,002744 \text{ м}^3$$

$$\pi \times d^3 \approx 3,1416 \times 0,002744 \approx 0,00862$$

$$\tau = 4305 \times 16 / 0,00862 \approx 68880 / 0,00862 \approx 7,99 \times 10^6 \text{ Па} = 7,99 \text{ МПа}$$

Допустиме напруження при кручення для конструкційної сталі (близько 60...80 МПа) значно вище, отже умова міцності виконується з великим запасом.

Розрахунок приводу змішувача

Загальний ККД приводу

Привід змішувача включає:

- пружну муфту між двигуном і редуктором;
- мотор-редуктор;
- пару підшипників качення на валу;
- ланцюгову передачу від редуктора до шнека.
- Сумарний ККД приводу без урахування ланцюга:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{м}} \times \eta_{\text{п.к}} \times \eta_{\text{м.р}} \quad (27)$$

де

$\eta_{\text{м}}$ – ККД муфти;

$\eta_{\text{п.к}}$ – ККД пари підшипників качення;

$\eta_{\text{м.р}}$ – ККД мотор-редуктора.

Прийmemo:

$$\eta_{\text{м}} = 0,98;$$

$$\eta_{\text{п.к}} = 0,99;$$

$$\eta_{\text{м.р}} = 0,97.$$

Тоді:

$$\eta_{\text{заг}} \approx 0,98 \times 0,99 \times 0,97 \approx 0,941$$

З урахуванням ланцюгової передачі з ККД

$$\eta_{\text{ц}} \approx 0,96,$$

загальний ККД приводу:

$$\eta_{\text{приводу}} = \eta_{\text{заг}} \times \eta_{\text{ц}} \quad (28)$$

$$\eta_{\text{приводу}} \approx 0,941 \times 0,96 \approx 0,904$$

Вибір потужності електродвигуна

Необхідна потужність на валу двигуна:

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{шн}} / \eta_{\text{приводу}} \quad (29)$$

$$N_{\text{дв}} = 67,7 / 0,904 \approx 74,9 \text{ кВт}$$

Для двох шнеків сумарна встановлена потужність:

$$N_{\text{дв.заг}} = 2 \times N_{\text{дв}} \quad (30)$$

$$N_{\text{дв.заг}} \approx 2 \times 74,9 \approx 150 \text{ кВт}$$

З урахуванням того, що тиск $p_{\text{тах}}$ покладено з запасом і в реальній роботі фактичний тиск менший, у проєкті доцільно обґрунтувати застосування двигуна меншої номінальної потужності (наприклад, один двигун 110 кВт на обидва шнеки або два двигуни по 55 кВт), що буде показано в техніко-економічній частині.

Ланцюгова передача

Передаточне відношення

Ланцюгова передача служить для передавання крутного моменту від вихідного вала редуктора до вала шнека.

Якщо на ведучій та веденій зірочках встановлено відповідно $Z1$ і $Z2$ зубців, то передаточне відношення ланцюгової передачі:

$$i_{\text{ц}} = Z2 / Z1 \quad (31)$$

У випадку, коли радіуси відповідних зірочок $r1$ і $r2$ відомі, можна також записати:

$$I_{\text{ц}} = r2 / r1 \quad (32)$$

Якщо $r2 = r1$ (однакові зірочки), то $i_{\text{ц}} \approx 1$.

Загальне передаточне відношення

Загальне передаточне число приводу змішувача:

$$I_{\text{заг}} = n_{\text{дв}} / n_{\text{шн}} \quad (33)$$

де

$n_{\text{дв}}$ – частота обертання електродвигуна;

$n_{\text{шн}}$ – частота обертання шнека.

Наприклад, при $n_{\text{дв}} = 960$ об/хв і $n_{\text{шн}} = 150$ об/хв:

$$i_{\text{заг}} = 960 / 150 = 6,4$$

Загальне передаточне відношення розкладається на добуток передаточних відношень редуктора та ланцюгової передачі:

$$I_{\text{заг}} = i_{\text{ред}} \times i_{\text{ц}} \quad (34)$$

Якщо $i_{\text{ц}} \approx 1$, то $i_{\text{ред}} \approx i_{\text{заг}} \approx 6,4$ – що відповідає типовому двоступінчастому циліндричному редуктору.

4.2. Підбір конструкційних матеріалів

Конструкційні матеріали для двошнекового змішувача для виробництва хліба повинні забезпечувати:

- безпечний контакт з харчовими продуктами;
- корозійну стійкість у вологому середовищі, що містить сіль, органічні кислоти, цукор, жири;
- достатню міцність і жорсткість при роботі під навантаженням;
- зносостійкість робочих поверхонь, які контактують з абразивними частинками борошна;
- хорошу зварюваність та оброблюваність різанням;
- стійкість до багаторазових циклів миття й санітарної обробки (лужні та мийні розчини, гаряча вода, пара).

З урахуванням цих вимог для деталей, що контактують із тістом, доцільно застосовувати корозійностійкі сталі харчового призначення, а для несівних та допоміжних елементів – вуглецеві або низьколеговані сталі зі захисними покриттями.

Матеріал робочої камери та шнеків

Робоча камера змішувача та шнеки безпосередньо контактують з тістом, тому до них висувають найжорсткіші гігієнічні та експлуатаційні вимоги.

Робоча камера (корпус, кришка, внутрішні поверхні):

Рекомендується застосовувати нержавіючу сталь аустенітного класу, наприклад:

08X18H10 (аналог AISI 304);

12X18H10T (аналог AISI 321);

для більш агресивних умов – 10X17H13M2T (аналог AISI 316Ti).

Ці сталі мають:

- високу корозійну стійкість у слабокислому та слаболужному середовищі;

- добру зварюваність;
- можливість отримання гладкої полірованої поверхні, яка зменшує налипання тіста та полегшує миття.

Товщину стінок корпусу вибирають з урахуванням внутрішніх навантажень, жорсткості та можливих ударних впливів при завантаженні сировини. Зазвичай для змішувачів такої продуктивності застосовують листовий прокат товщиною 3...6 мм.

Шнеки

Для шнеків доцільно застосувати ту ж марку нержавіючої сталі, що й для корпусу (наприклад, 12X18H10T). Це спрощує постачання матеріалу і зменшує ризик гальванічної корозії при контакті різнорідних металів.

До шнеків висувають додаткові вимоги щодо:

- достатньої міцності на кручення та згин;
- стійкості до абразивного зношування від частинок борошна;
- геометричної стабільності витків при тривалій експлуатації.

Шнеки виконують у вигляді зварних конструкцій (стрижень–вал + навиті витки) або як цілісні деталі, оброблені різанням. Для зварних конструкцій важливо забезпечити якісні шви без раковин і гострих кутів, де може накопичуватися тісто.

Матеріали валів, рами та опор

Вали шнеків

Вали працюють під крутильними й згинальними навантаженнями, але не контактують безпосередньо з харчовим середовищем (у зонах контакту, як правило, закриті шнеками та ущільненнями).

Для них доцільно застосувати конструкційну вуглецеву або леговану сталь: 45, 40X або аналогічні.

Вибір обґрунтовується:

- високою міцністю та жорсткістю;
- доброю оброблюваністю;

- можливістю термічної обробки (гартування, поліпшення) для підвищення довговічності шийок підшипників і шпонкових з'єднань.

У місцях, де вал наближається до зони контакту з продуктом, може бути доцільним виконання перехідних втулок або накладок із нержавіючої сталі.

Рама та несівні елементи

Рама сприймає вагу змішувача, динамічні навантаження від обертання шнеків та вібрації.

Для рами найчастіше застосовують низьковуглецеві сталі (типу Ст3) у вигляді прокатних профілів (швелери, двотаври, квадратні труби).

Поверхні рами покривають антикорозійним покриттям:

грунтування та фарбування;

за можливості – порошкове полімерне покриття.

Опорні вузли та підшипники:

Підшипники вибирають стандартні, закритого типу, з підбором за навантаженням і швидкістю обертання.

Корпуси підшипників можуть виготовлятися з чавуну або сталі з лакофарбовим покриттям.

У зонах, наближених до робочої камери, необхідно передбачити додаткові ущільнення для захисту підшипників від вологи та залишків тіста.

Матеріали ущільнень, прокладок та допоміжних елементів

Ущільнювальні елементи запобігають витіканню тіста й проникненню вологи та мийних розчинів у підшипникові вузли та інші механізми.

Ущільнення валів:

Можуть застосовуватись манжетні гумові ущільнення або спеціальні харчові сальники.

Матеріал гуми повинен бути стійким до:

- жиру, органічних кислот;
- мийних і дезінфікуючих розчинів;

- робочої температури (зазвичай до 80–100 °С).

Поширені варіанти – харчовий EPDM, NBR або FKM (для підвищених температур і агресивніших середовищ).

Прокладки та ізоляційні елементи:

Для герметизації фланцевих з'єднань робочої камери можливе використання:

- листових матеріалів на основі PTFE (фторопласт);
- харчового силікону;
- спеціальних ущільнювальних пластиків.

Кріпильні деталі:

Болти, гайки, шайби, які розташовані в зоні можливого контакту з продуктом або мийними розчинами, доцільно виконувати з нержавіючої сталі тієї ж групи, що й корпус (AISI 304 або AISI 316). Це підвищує корозійну стійкість вузлів і покращує гігієнічність конструкції.

Висновки щодо вибору матеріалів

Запропонована номенклатура конструкційних матеріалів для двошнекового змішувача забезпечує:

- безпечний контакт деталей з харчовим продуктом завдяки використанню корозійностійких сталей для робочих поверхонь;
- необхідну міцність та довговічність валів, рами і опорних вузлів за рахунок застосування конструкційних вуглецевих та легованих сталей;
- захист від корозії та забруднення шляхом використання захисних покриттів і нержавіючого кріплення;
- надійну герметизацію та захист внутрішніх механізмів через підбір стійких до харчових середовищ і мийних розчинів ущільнювальних матеріалів.

Такий підхід до підбору конструкційних матеріалів створює передумови для ефективної, надійної та довговічної роботи двошнекового змішувача при

продуктивності 5 т/год, а також відповідає вимогам санітарії, гігієни та техніки безпеки в хлібопекарському виробництві.

4.3. Розрахунки на міцність елементів конструкції модернізованого обладнання.

Розрахунок шпонки на зминання та зріз

Шпонка встановлюється між валом шнека та маточиною зірочки (або зубчастого колеса редуктора) й передає крутний момент від вала до робочого органа. Для розрахунку приймаємо:

діаметр вала шнека:

$$d = 0,14 \text{ м} = 140 \text{ мм}$$

крутний момент на валу шнека (див. попередній розділ):

$$M_{\text{шн}} \approx 4305 \text{ Н}\cdot\text{м} = 4,305 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

тип шпонки – призматична (прямокутна), стандартна для вала діаметром 140 мм:

ширина $b = 36$ мм,

висота $h = 20$ мм (умовно),

розрахункова робоча довжина шпонки $l = 110$ мм.

Тангенціальна сила, що передається через шпонку, визначається з умови рівності крутного моменту:

$$F_t = 2 \times M_{\text{шн}} / d \quad (35)$$

Підстановка чисел:

$$F_t = 2 \times 4,305 \times 10^6 / 140 \approx 61\,500 \text{ Н}$$

Напруження зрізу у шпонці:

$$\tau = F_t / (b \times l) \quad (36)$$

Підстановка:

$$\tau = 61\,500 / (36 \times 110) = 61\,500 / 3960 \approx 15,5 \text{ МПа}$$

Напруження зминання в стінці маточини (або вала) по площі бічної поверхні шпонки приймаємо:

$$\sigma_{\text{см}} = F_t / (h \times l) \quad (37)$$

Підстановка:

$$\sigma_{\text{см}} = 61\,500 / (20 \times 110) = 61\,500 / 2200 \approx 28,0 \text{ МПа}$$

Допустимі значення для вуглецевої конструкційної сталі для шпонок і маточин:

допустиме напруження зрізу $\tau_{\text{доп}} \approx 40 \dots 50 \text{ МПа}$;

допустиме напруження зминання $\sigma_{\text{см.доп}} \approx 80 \dots 100 \text{ МПа}$.

Отримані значення $\tau \approx 15,5 \text{ МПа}$ і $\sigma_{\text{см}} \approx 28,0 \text{ МПа}$ значно менші за допустимі, отже шпонкове з'єднання працює зі значним запасом міцності.

Таблиця 6 – Основні параметри шпонкового з'єднання

Параметр	Позначення	Значення
Діаметр вала	d	140 мм
Крутний момент на валу	$M_{\text{шн}}$	$4,305 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}$
Ширина шпонки	b	36 мм
Висота шпонки	h	20 мм
Робоча довжина шпонки	l	110 мм
Тангенціальна сила	F_t	61 500 Н
Напруження зрізу	τ	15,5 МПа
Напруження зминання	$\sigma_{\text{см}}$	28,0 МПа

Розрахунок підшипників (динамічна вантажопідйомність)

Вал шнека спирається на два підшипники кочення. Для спрощеної оцінки припускаємо, що радіальне навантаження від дії сили на шнек і привідні елементи рівномірно розподіляється між двома підшипниками.

Орієнтовна тангенціальна сила на шнеку вже знайдена:

$$F_t \approx 61\,500 \text{ Н} \quad (35)$$

Радіальна складова сили на вал (для розрахунку підшипника) приймаємо на рівні:

$$F_r \approx F_t = 61\,500 \text{ Н} \quad (38)$$

Тоді на один підшипник припадає половина:

$$F_{r.\text{підш}} = F_r / 2 \quad (39)$$

$$F_{r.\text{підш}} = 61\,500 / 2 \approx 30\,750 \text{ Н} \approx 30,8 \text{ кН}$$

Вважаємо, що осьове навантаження незначне, тому еквівалентне динамічне навантаження для одного радіального (кулькового) підшипника:

$$P = F_{r.підш} \quad (40)$$

$$P \approx 30,8 \text{ кН}$$

Приймаємо вимогу до ресурсу підшипника:

нормальна безвідмовна робота протягом $t_{\text{служби}} = 20\,000$ год при частоті обертання:

$$n_{\text{шн}} = 150 \text{ об/хв (повтор формули (14))}$$

Загальна кількість обертів вала за цей час:

$$N_{\text{об}} = 60 \times n_{\text{шн}} \times t_{\text{служби}} \quad (41)$$

$$N_{\text{об}} = 60 \times 150 \times 20\,000 = 180\,000\,000 \text{ обертів}$$

Нормований ресурс L_{10} у мільйонах обертів:

$$L_{10} = N_{\text{об}} / 10^6 \quad (42)$$

$$L_{10} = 180\,000\,000 / 1\,000\,000 = 180 \text{ млн обертів}$$

Для радіальних кулькових підшипників показник степеня в залежності між ресурсом і динамічною вантажопідйомністю:

$$L_{10} = (C / P)^3 \quad (43)$$

де

C – базова динамічна вантажопідйомність, кН;

P – еквівалентне динамічне навантаження, кН;

L_{10} – ресурс у мільйонах обертів.

Звідси шукаємо необхідну вантажопідйомність C :

$$C = P \times (L_{10})^{(1/3)} \quad (44)$$

Підставимо $P = 30,8$ кН, $L_{10} = 180$:

$$(L_{10})^{(1/3)} \approx 180^{(1/3)} \approx 5,65$$

Отже:

$$C \approx 30,8 \times 5,65 \approx 174 \text{ кН}$$

Для забезпечення необхідного ресурсу один підшипник повинен мати базову динамічну вантажопідйомність не менше $C \approx 175$ кН. При виборі конкретного підшипника з каталогу (радіальний кульковий або сферичний роликовий) слід обрати типорозмір із $C \geq 175$ кН з урахуванням діаметра посадки ($d = 140$ мм) та конструкції корпусу змішувача.

Таблиця 7 – Розрахунок динамічної вантажопідйомності підшипника

Параметр	Позначення	Значення
Радіальна сила на валу	F_r	61 500 Н
Радіальна сила на один підшипник	$F_{r, \text{підш}}$	30 750 Н \approx 30,8 кН
Частота обертання вала	$n_{\text{шн}}$	150 об/хв
Час служби	$t_{\text{служби}}$	20 000 год
Загальна кількість обертів	$N_{\text{об}}$	$1,8 \times 10^8$ обертів
Нормований ресурс	L_{10}	180 млн обертів
Еквівалентне навантаження	P	30,8 кН
Розрахункова динамічна вантажопідйомність	C	≈ 175 кН

Таким чином, обрані (або рекомендовані до вибору) підшипники повинні забезпечувати динамічну вантажопідйомність не менше 175 кН, що гарантує необхідний ресурс роботи вала шнека за умов нормальної експлуатації змішувача.

4.4. Технологія машинобудування

Розробка технології складання підшипникового вузла вала двошнекового змішувача

Сучасне хлібопечення є високотехнологічним виробництвом, у якому до надійності обладнання висуваються підвищені вимоги. Одним із ключових агрегатів такої лінії є двошнековий змішувач для замішування пшеничного тіста продуктивністю 5000 кг/год. Робочі органи змішувача – шнеки – установлені на привідному валу, який передає крутний момент від електропривода та працює в умовах значних радіальних і осьових навантажень з боку маси тіста. Забезпечення стійкої та безвідмовної роботи вала можливе лише за умови правильно спроектованого й якісно зібраного підшипникового вузла.

Підшипниковий вузол вала змішувача призначений для сприйняття радіальних навантажень від ваги шнеків і продукту, осьових сил від гвинтового транспортування тіста, а також для забезпечення плавного обертання вала з мінімальними втратами на тертя. Від його конструкції та технології складання залежить не тільки ресурс роботи привода, а й загальна надійність змішувача, стабільність технологічних режимів і якість готового тіста.

Існуючі на підприємствах схеми монтажу опорних вузлів часто мають низку недоліків:

- підвищена трудомісткість і велика кількість ручних операцій під час складання;
- невисока точність установлення підшипників, що призводить до перекосів вала та нерівномірного зносу;
- складність забезпечення необхідної герметизації при роботі в умовах забруднення борошняним пилом і тістом;
- недостатня ремонтпридатність вузла при регламентних роботах.

У межах магістерського проєкту ставиться задача розробити технологію складання підшипникового вузла вала двошнекового змішувача, яка б дозволила:

- підвищити точність монтажу опор, забезпечити співвісність вала та корпусу;
- збільшити надійність і довговічність підшипникового з'єднання;
- зменшити трудомісткість складання й спростити регламентні операції обслуговування;
- забезпечити необхідний рівень захисту підшипників від проникнення тіста та мийних розчинів.

Актуальність розробки обумовлена тим, що вихід з ладу підшипникового вузла призводить до простою всієї хлібопекарної лінії, значних втрат сировини та енергії. Тому оптимізація конструкції та технології складання даного вузла безпосередньо впливає на ефективність роботи підприємства.

У цьому підрозділі розглядаються конструктивні особливості вибраного підшипникового вузла вала двошнекового змішувача, принципові схеми підбору й розстановки підшипників, типи ущільнень, способи регулювання осьового зазору та фіксації вала. Буде сформовано вимоги до чистоти й точності оброблення посадочних поверхонь, послідовність технологічних операцій складання, а також заходи з контролю якості та забезпечення ремонтпридатності вузла. Окремо аналізуються фактори, що впливають на надійність роботи підшипникового вузла (температура, забруднення, режим змащування, вібрації) та шляхи мінімізації їх негативного впливу.

Проаналізуємо детальніше вибраний вузол, схема якого наведена на рис. 4.4.1.

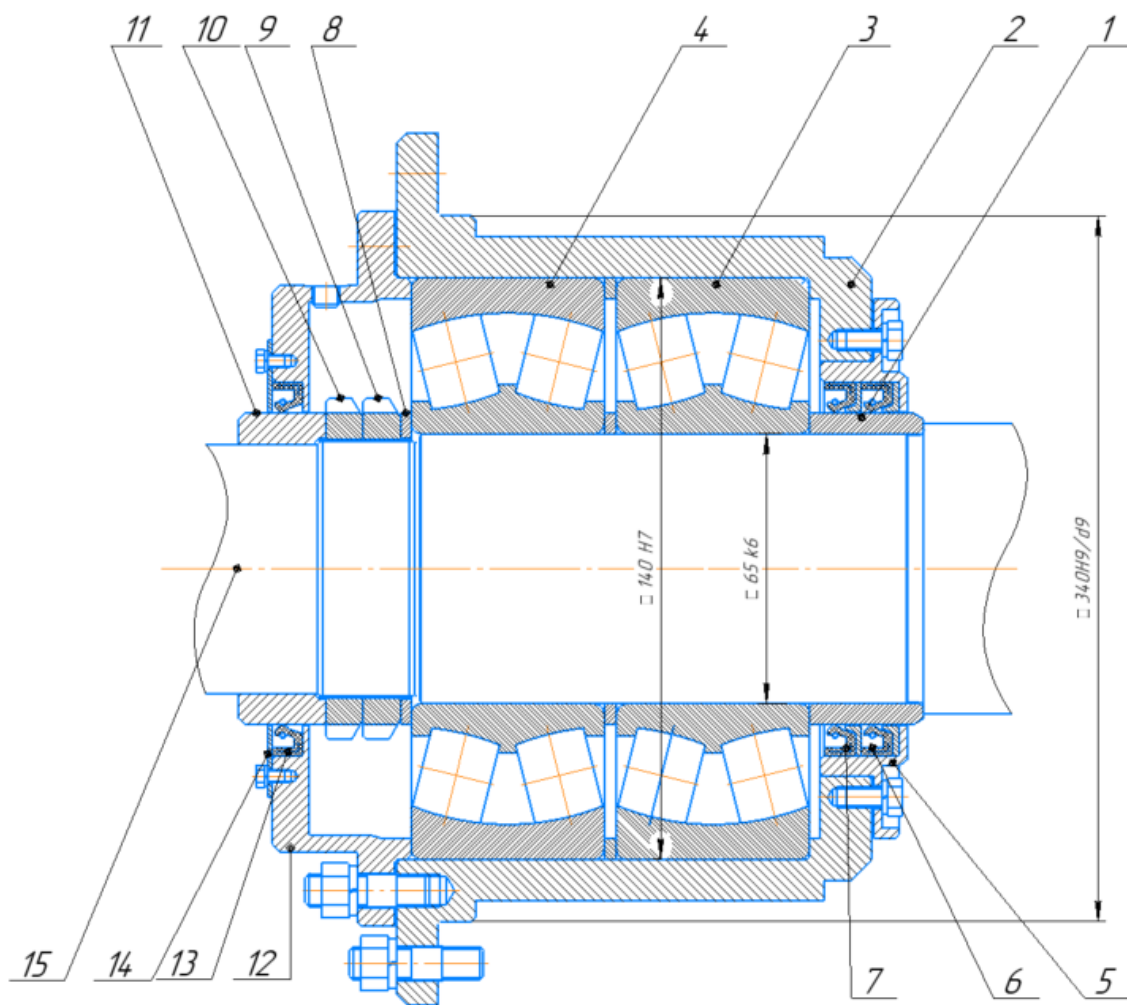


Рис. 4.4.1 – Підшипниковий вузол вала двошнекового тістомісильного змішувача

Комплектацію у вигляді подетального складу вузла подано у табл. 4.4.1.

Таблиця 4.4.1

<i>Поз.</i>	<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кількість</i>	<i>Примітка</i>
1		<i>Кільце</i>	1	
2		<i>Стакан</i>	1	
3		<i>Підшипник</i>	1	
4		<i>Підшипник</i>	1	
5		<i>Кришка</i>	1	
6		<i>Манжета</i>	1	
7		<i>Манжета</i>	1	
8		<i>Втулка</i>	1	
9		<i>Гайка</i>	1	
10		<i>Контр-гайка</i>	1	
11		<i>Втулка</i>	1	
12		<i>Кришка</i>	1	
13		<i>Манжета</i>	1	
14		<i>Кришка</i>	1	
15		<i>Вал</i>	1	

Схема складання вузла представлена діаграмою-схемою на рис. 4.4.2

Схема складання вузла

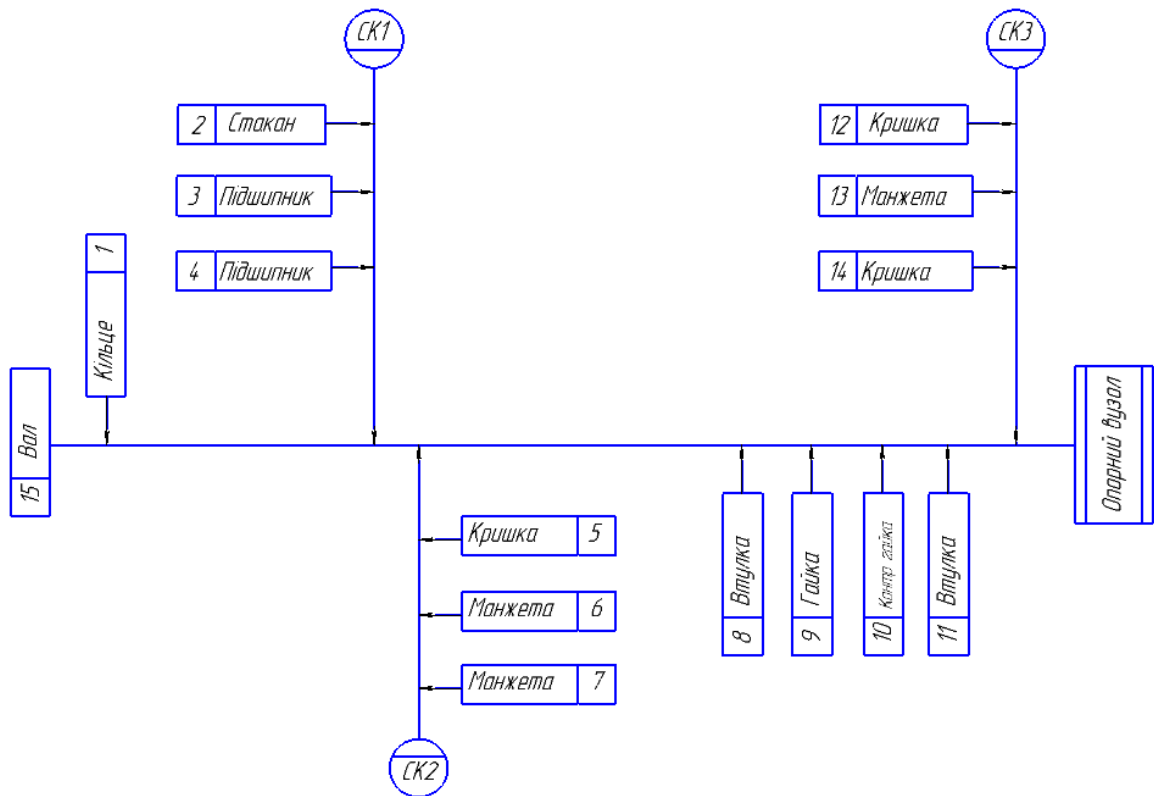


Рис. 4.3.2. Технологічна діаграма-схема складання вузла

Технологічний маршрут складання вузла (таблиця 4.4.2).

Таблиця 4.4.2. Технологічний маршрут складання вузла

<i>№ операції</i>	<i>№ переходу, зміст переходу</i>
<i>10. Початок збирання</i>	<i>10.1. Одягнути на вал 15 кільце 1</i>
<i>20. Складання вузла СК1</i>	<i>20.1. Встановити в стакан 2 підшипники 3 і 4 20.2. Одягнути вузол СК1 на вал 15 до кільця 1</i>
<i>30. Складання вузла СК2</i>	<i>30.1. Встановити манжети 6 і 7 в кришку 5 30.2 Одягнути СК2 на вал 15 30.3 Встановити СК2 до стакана 2</i>
<i>40. Проміжне збирання</i>	<i>40.1. Одягнути на вал 15 втулку 8 40.2 Одягнути на вал 15 гайку 9 та контр-гайку 10 40.3 Одягнути на вал 15 втулку 11</i>
<i>50. Складання вузла СК3</i>	<i>50.1. Встановити кришку 12 до стакана 2 50.2 Встановити манжету 13 в кришку 12 50.3 Встановити кришку 14 до кришки 12</i>

Сертифікація підшипникового вузла

Також у цьому розділі розглянуто питання сертифікації підшипникового вузла відповідно до вимог стандартів якості та безпеки. Сертифікація є важливим етапом у процесі виробництва, оскільки підтверджує відповідність продукції встановленим нормативам і вимогам. У цьому контексті буде проаналізовано процедури отримання сертифікатів відповідності для підшипникового вузла, необхідні документи та вимоги до якості продукції. Особлива увага буде приділена вимогам стандартів безпеки та надійності, оскільки ці аспекти мають прямий вплив на безперебійну роботу обладнання

та безпеку виробничого процесу. Такий підхід дозволяє забезпечити високу якість продукції та довіру споживачів до виробника.

Сертифікація підшипникового вузла – це процедура, яка підтверджує відповідність вузла певним стандартам або технічним умовам. Сертифікація може бути добровільною або обов'язковою, залежно від вимог законодавства або замовника.

Переваги сертифікації підшипникового вузла:

- Підвищення довіри споживачів до якості продукції.
- Збільшення конкурентоспроможності продукції на ринку.
- Можливість виходу на нові ринки збуту.
- Підвищення іміджу компанії-виробника.

Процес сертифікації підшипникового вузла:

1. Подача заявки на сертифікацію в орган сертифікації.
2. Аналіз документації на підшипниковий вузол.
3. Випробування підшипникового вузла в акредитованій лабораторії.
4. Прийняття рішення про сертифікацію.
5. Видача сертифіката відповідності.

Органи сертифікації підшипникових вузлів:

- УкрСЕПРО
- Держстандарт України
- Bureau Veritas
- TÜV Rheinland
- SGS

Стандарти та технічні умови для сертифікації підшипникових вузлів:

- ГОСТ 27895-89 «Підшипники кочення. Радіальні та упорно-радіальні підшипники. Загальні технічні умови»
- ДСТУ 2290-93 «Підшипники ковзання. Загальні технічні умови»
- ISO 15183:2017 «Rolling bearings — Radial bearings — Tolerances for running accuracy and radial load capacity»

- ISO 309:2018 «Rolling bearings — Radial bearings — Radial internal clearance»

Сертифікація підшипникового вузла – це важливий фактор, який може допомогти компанії-виробнику підвищити конкурентоспроможність продукції на ринку, а також вийти на нові ринки збуту.

4.5. Правила монтажу, та технічного сервісу модернізованого обладнання.

Монтаж двошнекового змішувача для виробництва хліба необхідно виконувати відповідно до технічної документації заводу-виробника, інструкції з експлуатації та чинних вимог з охорони праці і електробезпеки. До виконання монтажних робіт допускають підготовлений персонал, який має відповідну кваліфікацію та допуск до робіт з обладнанням, що приводиться в рух електроприводом.

Змішувач встановлюють на рівну, міцну та стійку основу (бетонну підлогу, металеву раму тощо). Поверхня не повинна мати перекосів і локальних пошкоджень. За потреби під опорні ніжки машини підкладають гумові або полімерні прокладки, які зменшують рівень вібрацій та шуму, компенсують незначні нерівності підлоги та запобігають її руйнуванню.

Місце встановлення повинно забезпечувати:

вільний доступ до всіх оглядових, змащувальних та з'єднувальних вузлів;

можливість безпечного підходу для обслуговування, очищення та ремонту;

достатній простір для демонтажу окремих вузлів (шнеків, валів, приводу) без повного розбирання машини.

Перед остаточною фіксацією змішувача перевіряють горизонтальність установки корпусу за допомогою рівня. Перекіс може призвести до нерівномірного навантаження на підшипники, прискореного зносу шнеків та появи підвищених вібрацій.

Підключення до електромережі та допоміжних систем

Живлення електроприводів змішувача здійснюється від трифазної мережі напругою 380 В (або іншої, передбаченої технічною документацією). Підключення виконується кваліфікованим електротехнічним персоналом згідно з вимогами електробезпеки.

Основні вимоги:

наявність окремого автоматичного вимикача та пристрою захисного вимкнення (якщо передбачено проектом);

правильне під'єднання до контуру заземлення;

використання кабелів відповідного перерізу, захищених від механічних пошкоджень;

розташування пускової апаратури в зоні вільного доступу для оператора.

У разі використання систем автоматизованого керування необхідно виконати правильне під'єднання датчиків (температури, крутного моменту, кінцевих вимикачів, блокувань люків та решіток) та перевірити їхню працездатність у режимі пробного пуску.

Вимоги до персоналу та організації технічного обслуговування

До експлуатації змішувача допускають не менше однієї підготовленої особи, яка:

ознайомена з конструкцією та принципом роботи машини;

знає правила технологічної експлуатації;

пройшла інструктаж з охорони праці та пожежної безпеки;

вміє користуватися засобами індивідуального захисту.

Технічне обслуговування повинно бути плановим і регулярним.

Персонал зобов'язаний виконувати:

щозмінний огляд стану машини (наявність сторонніх шумів, вібрацій, течі, пошкоджень захисних елементів);

періодичне очищення робочої камери, шнеків, захисних решіток та корпусу від залишків тіста;

перевірку, підтягування та, за потреби, заміну кріпильних елементів;

контроль рівня мастила в редукторах та стану підшипників;

перевірку справності блокувальних пристроїв, кнопок аварійної зупинки, кінцевих вимикачів.

Ремонт змішувача виконує власник або уповноважена організація в логічній послідовності, відповідно до виявлених несправностей. Під час капітального чи середнього ремонту необхідно дотримуватися рекомендацій заводу-виробника щодо допусків, посадок, типів мастил та методів відновлення поверхонь.

Вимоги безпеки при монтажі та експлуатації

Усі обертові частини, що становлять небезпеку для персоналу, повинні мати надійні захисні огороження:

приводи шнеків та редуктори закриті кожухами;

на люках для завантаження та вивантаження продукту встановлені решітки, які унеможливають потрапляння рук у зону обертання шнеків.

Перед пуском змішувача оператор повинен переконатися, що:

у робочій зоні відсутні сторонні предмети та працівники;

всі люки, кришки та решітки щільно закриті та зафіксовані;

немає видимих пошкоджень кабелів, корпусу чи огорожень.

Мешалки та змішувачі з опрокидним коритом повинні мати пристрої, які надійно фіксують корито в будь-якому положенні. Це запобігає раптовому перекиданню та травмуванню персоналу. У змішувачах з торцевим вивантаженням продукту на люках для вивантаження передбачають решітки, заблоковані з пусковими пристроями, що унеможливує запуск шнеків при відкритій решітці.

Кришки люків необхідно забезпечити ущільнювальними гумовими прокладками. Їх притискають до стінки за допомогою спеціальних ручок або затискних механізмів, щоб запобігти витіканню продукту та проникненню мийних розчинів у небажані зони.

Вивантаження продукту з корита змішувача слід виконувати тільки при вертикальному положенні корита, із закритою решітчастою кришкою і заздалегідь установленим зазором між решіткою та коритом для вільного проходження продукту.

Категорично забороняється:

відкривати кришку корита під час наявності напруги на машині, у тому числі при проведенні санітарної обробки;

відкривати захисну решітку і просовувати через неї руки або інструменти до повної зупинки шнеків;

розвантажувати продукт вручну під час обертання робочих органів;

завантажувати чи додавати сировину при обертанні шнеків;

змінювати напрямок обертання шнеків до повної їх зупинки.

Усі ці вимоги спрямовані на попередження травм та аварійних ситуацій.

Санітарне обслуговування та організація робочого місця

Робоче місце оператора змішувача має бути чистим та впорядкованим.

Не допускається накопичення відходів, залишків тіста, пакувальних матеріалів і сторонніх предметів біля машини. Це знижує ризик випадкового травмування, забруднення продукту та полегшує прибирання.

Під час санітарної обробки необхідно:

повністю відключити змішувач від електромережі;

дочекатися повної зупинки всіх обертових елементів;

розібрати і промити доступні для очищення частини робочої камери, шнеки, кришки та ущільнювальні елементи;

використовувати мийні та дезінфікувальні засоби, дозволені для харчової промисловості.

Категорично заборонено проводити миття та очищення при ввімкненому живленні чи можливості випадкового пуску машини.

Висновки до розділу

Дотримання вимог щодо монтажу, наладки та технічного сервісу двошнекового змішувача є необхідною умовою його надійної, безпечної та довговічної роботи. Правильна установка, якісне підключення до мережі, наявність справних огорожень і блокувань, а також систематичне технічне обслуговування дозволяють:

знизити ризик аварій і нещасних випадків;
мінімізувати позапланові простої;
забезпечити стабільну якість хлібного тіста та готової продукції.

Отже, вимоги цього розділу повинні бути враховані при впровадженні модернізованого двошнекового змішувача у виробничий процес і покладені в основу інструкцій з експлуатації для персоналу.

5. Принципи автоматизованого управління об'єктом проектування

Система керування двошнековим змішувачем для виробництва хліба продуктивністю 5 т/год побудована як автоматизований електропривод із програмованим логічним контролером, частотними перетворювачами та комплектом вимірювальних і захисних пристроїв. Її завдання – підтримувати задані режими замісу, контролювати навантаження обладнання, стежити за станом огорожень і забезпечувати безпечну роботу обслуговчого персоналу.

Основою є програмований логічний контролер, наприклад ПЛК типу ОВЕН ПЛК-100 або Siemens LOGO!/S7-1200 (конкретна модель визначається проектом). До нього підключені усі ключові сигнали: команда на пуск і зупинку електродвигунів шнеків, сигнали від датчиків температури, навантаження, рівня продукту, а також кінцеві вимикачі кришок і люків. Контролер розміщують в електрошкафі разом із силовою апаратурою: магнітними пускачами, автоматичними вимикачами, пускачем аварійної зупинки, клемми заземлення та клемниками для під'єднання зовнішніх ліній.

Привід шнеків виконується на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, який працює через частотний перетворювач. Частотний перетворювач (наприклад, типу «Altivar», «VFD-M» або аналог) дозволяє плавно змінювати частоту обертання шнеків у діапазоні, необхідному для різних режимів роботи: інтенсивний заміс, м'яке перемішування, режим самоочищення. Команда на зміну частоти надходить з ПЛК по аналоговому сигналу 0–10 В або 4–20 мА. Для контролю навантаження використовується датчик крутного моменту на валу шнека або, у простішому варіанті, вимірюється споживаний струм електродвигуна за допомогою трансформатора струму типу ТА-1. Сигнал навантаження надходить на контролер, де порівнюється з допустимими значеннями. У випадку перевищення уставки система формує попереджувальний сигнал, а при критичному перевантаженні – команду на аварійну зупинку.

Температуру тіста або температури корпусу змішувальної камери контролюють датчиком температури типу Pt100 у захисній гільзі з нержавіючої сталі. Датчик під'єднаний до ПЛК через перетворювач опір–струм, що формує стандартний сигнал 4–20 мА. За показами цього датчика контролер стежить за тим, щоб температура не перевищувала допустимого значення; при його перевищенні оператор отримує на панелі повідомлення «Перегрів тіста» або «Перегрів корпусу», а за потреби змішувач автоматично зупиняється.

Зона завантаження борошна та інших компонентів може бути обладнана ємнісним датчиком рівня типу ДЕ-1 або ваговим тензодатчиком, встановленим під завантажувальним бункером. Це дає можливість контролювати мінімальний рівень продукту й формувати сигнал «Немає сировини», що захищає шнеки від роботи «всуху» та зменшує знос. Стан кришок, оглядових люків, решіток на викидних отворах контролюється кінцевими вимикачами, наприклад типу ВП-19 або мікроперемикачами герметичного виконання. Кожен кінцевий вимикач включений у ланцюг блокування: при відкритій кришці контакт розмикається, ПЛК одержує сигнал «Кришка відкрита» і блокує можливість пуску шнеків, а у разі відкриття під час роботи негайно формує команду на зупинку приводу.

Оператор взаємодіє із системою через панель керування або панель оператора НМІ. На ній розміщені кнопки «Пуск», «Стоп», «Аварійна зупинка», перемикач «Ручний/Автоматичний», а також світлові індикатори «Живлення», «Робота», «Аварія». У варіанті з графічною панеллю типу ОВЕН СПК або Siemens КТР на екрані відображаються значення швидкості обертання шнеків, температура, навантаження приводу, стан кришок та основні повідомлення про помилки. Через меню оператор може задавати уставки: номінальну частоту обертання шнеків, час основного замісу, тривалість попереднього перемішування та параметри режиму очищення.

Алгоритм роботи системи в автоматичному режимі можна описати послідовно. Перед пуском контролер перевіряє наявність живлення, справність запобіжних автоматів, стан аварійної кнопки та кінцевих вимикачів усіх кришок і решіток. Лише якщо всі контакти закриті, дозволяється запуск шнеків. Частотний перетворювач розганяє двигун із плавним приростом частоти до встановленого значення. Після виходу на робочу швидкість подається сигнал на вмикання дозувальних механізмів. У процесі роботи ПЛК постійно аналізує сигнали: якщо струм електродвигуна (або крутний момент) перевищує максимальну межу, система знижує частоту обертання шнеків, а при подальшому зростанні навантаження – зупиняє змішувач і видає повідомлення «Перевантаження приводу». Аналогічно контролюється температура: у разі перевищення попереджувальної уставки на панелі з'являється попередження, а при досягненні аварійного рівня машина зупиняється.

Ручний режим використовується для налагодження, промивки та ремонту. У цьому режимі оператор має змогу окремо вмикати і вимикати електродвигун шнеків, короткочасно змінювати напрям обертання (лише після повної зупинки, що додатково контролюється часом або датчиком швидкості), перевіряти роботу дозаторів, промивати робочу камеру. При цьому блокування за станом кришок та аварійна кнопка залишаються активними: якщо кінцевий вимикач кришки розмикається, ПЛК негайно зупиняє привід незалежно від обраного режиму.

Для підвищення надійності система керування передбачає декілька ступенів захисту. Окрім програмних обмежень у ПЛК, застосовуються теплові реле захисту електродвигуна від перевантаження, автоматичні вимикачі для захисту від коротких замикань, а також механічна аварійна кнопка «Грибок», яка розмикає силовий ланцюг при натисканні. На випадок зникнення або асиметрії фаз може використовуватися реле контролю

напруги. Всі ці пристрої під'єднані таким чином, щоб при будь-якій аварійній ситуації привід шнеків зупинявся швидко і в безпечному режимі.

За потреби система управління змішувачем може бути інтегрована в загальноцехову систему диспетчеризації. Для цього ПЛК обладнують інтерфейсом Modbus RTU або Modbus TCP, що дозволяє передавати на верхній рівень інформацію про стан змішувача, аварійні події, споживану потужність і напрацьований час. Це дає змогу планувати профілактичні огляди, оцінювати енергоефективність роботи та вчасно виявляти відхилення в режимах замісу.

Таким чином, система управління двошнековим змішувачем включає конкретний набір засобів: датчик температури типу Pt100 у робочій камері, датчик крутного моменту або трансформатор струму в ланцюзі двигуна, ємнісний або тензодатчик рівня сировини, кінцеві вимикачі на кришках і люках, частотний перетворювач приводу шнеків та програмований логічний контролер з панеллю оператора. Чітка взаємодія цих елементів забезпечує стабільну якість тіста, захист обладнання від перевантажень і створює безпечні умови роботи для персоналу.

Розділ 6. Заходи з охорони праці та охорони довкілля

Нормативно-правові засади

Організація безпечної експлуатації двошнекового змішувача на хлібопекарському підприємстві здійснюється відповідно до законодавства України про охорону праці та охорону навколишнього природного середовища. Основними документами є Закон України «Про охорону праці»

Кодекс законів про працю України, підзаконні нормативно-правові акти з питань навчання та інструктажу з охорони праці, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, а також Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»

Законодавство встановлює обов'язки роботодавця щодо створення безпечних і здорових умов праці, а також відповідальність працівників за дотримання вимог інструкцій з охорони праці та правил внутрішнього трудового розпорядку.

Вимоги до персоналу та організації безпечної роботи

До самостійної роботи на двошнековому змішувачі допускаються особи віком від 18 років, які пройшли попередній медичний огляд та не мають протипоказань за станом здоров'я для роботи у харчовому виробництві. Працівник повинен пройти вступний інструктаж з охорони праці, первинний інструктаж безпосередньо на робочому місці, навчання безпечним прийомам роботи та стажування під наглядом досвідченого працівника. Після стажування проводиться перевірка знань вимог охорони праці, правил пожежної безпеки та інструкцій з експлуатації змішувача з оформленням відповідних документів. Надалі працівник періодично проходить повторні інструктажі, планові медичні огляди та чергову перевірку знань згідно з діючими нормативами підприємства та законодавства України.

Оператор змішувача зобов'язаний знати будову та принцип роботи обладнання, порядок його пуску, нормальної зупинки й аварійного відключення, а також правила щоденного догляду та очищення. У процесі

роботи працівник має дотримуватися інструкції з охорони праці, правил поведінки на території підприємства, підтримувати порядок на робочому місці, слідкувати за справністю огорожень, блокувань і засобів сигналізації. Забороняється передоручати свою роботу стороннім особам, допускати до змішувача працівників, які не пройшли навчання і відповідні інструктажі.

Кожен працівник зобов'язаний негайно повідомляти безпосереднього керівника про будь-яку ситуацію, яка створює загрозу життю чи здоров'ю людей, про нещасний випадок, погіршення самопочуття, появу ознак професійного захворювання, а також про виявлені несправності обладнання, засобів захисту, систем вентиляції чи освітлення. Порушення вимог інструкції з охорони праці та трудової дисципліни розглядається як підстава для притягнення до дисциплінарної та, за необхідності, іншої відповідальності згідно із законодавством України.

Категорично забороняється допускати до роботи працівників у стані алкогольного, наркотичного чи токсичного сп'яніння. Прийом їжі, відпочинок та паління (якщо воно дозволене) здійснюються лише у спеціально відведених приміщеннях.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори та їх усунення

Під час експлуатації двошнекового змішувача на персонал можуть діяти механічні, фізичні та санітарно-гігієнічні чинники. До основних небезпек належать можливість травмування рук при попаданні у зону обертання шнеків, вплив електричного струму у разі пошкодження ізоляції, підвищений рівень шуму і вібрації, запиленість повітря борошном, наявність гострих кромek і заусениць на елементах обладнання, фізичне перевантаження при ручному переміщенні сировини та тари, а також недостатня освітленість робочої зони.

Для усунення або зменшення впливу цих факторів змішувач конструктивно оснащують захисними кожухами на усіх обертових деталях приводу, решітками на завантажувальних і розвантажувальних люках, які

зблоковані з електроприводом. Відкриття кришки або захисної решітки під час роботи призводить до автоматичної зупинки приводу, а пуск можливий лише за умови повного закриття огороження. Електрообладнання змішувача має бути заземлене; застосовуються пристрої захисного відключення, автоматичні вимикачі та інші засоби електрозахисту.

Рівень шуму і вібрації знижують за рахунок правильного монтажу машини на рівну основу з використанням гумових прокладок, своєчасного обслуговування підшипників, балансування обертових частин. Для боротьби із запиленістю організовують місцеву витяжну вентиляцію в зоні завантаження борошна, використовують закриті транспортери або шнекові живильники. Освітлення робочої зони повинно відповідати встановленим нормам, світильники розміщують так, щоб уникати засліплення та тіней у небезпечних місцях.

Оператору забороняється відкривати огороження і просовувати руки або інструменти до шнеків до повної їх зупинки, очищати або мити робочу камеру при поданій напрузі на електрообладнання, завантажувати сировину під час обертання шнеків, а також змінювати напрямок їх обертання без попередньої зупинки. Перед початком санітарної обробки машина повинна бути повністю знеструмлена.

Засоби індивідуального захисту та вимоги особистої гігієни

Працівники, які обслуговують змішувач, забезпечуються спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до чинних норм безоплатної видачі ЗІЗ, що розроблені на підставі Закону України «Про охорону праці» та відповідних міжгалузевих і галузевих нормативів.

Спецодяг і засоби захисту мають відповідати характеру та умовам роботи, мати сертифікат відповідності й бути придатними до використання за терміном служби.

Оператор змішувача повинен використовувати чистий халат або костюм із бавовняної або змішаної тканини, ковпак або інший головний убір, що закриває волосся, нековзне спеціальне взуття, за необхідності – захисні рукавиці, окуляри або щиток при інтенсивній запиленості, респіратор для захисту органів дихання при роботі з борошном. Забороняється застосовувати засоби захисту не за призначенням або використовувати зношені, пошкоджені ЗІЗ.

Персонал повинен дотримуватися правил особистої гігієни: тримати в чистоті руки й робочий одяг, не приймати їжу та не пити в робочій зоні, користуватися лише питною водою з дозволених джерел, проходити обов’язкові медичні огляди. Виконання цих вимог важливе не тільки для безпеки працівника, а й для дотримання санітарних норм у виробництві харчових продуктів.

Заходи з охорони довкілля

Експлуатація двошнекового змішувача пов’язана з утворенням харчових відходів, стічних вод від миття обладнання, викидів борошняного пилу та споживанням електроенергії. Згідно із Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» підприємство зобов’язане запобігати забрудненню повітря, води і ґрунтів, раціонально використовувати ресурси та мінімізувати негативний вплив виробництва на довкілля.

Для зменшення запиленості повітря робочу зону завантаження борошна обладнують герметизованими приймальними бункерами та місцевою витяжною вентиляцією з фільтрами тонкого очищення. Відпрацьовані фільтруючі матеріали та зібраний пил утилізують відповідно до затверджених на підприємстві інструкцій. Відходи тіста та непридатну продукцію сортують окремо; за можливості їх передають на корм тваринам або для інших видів переробки, що зменшує навантаження на полігони твердих побутових відходів.

Стічні води, які утворюються при митті змішувача, повинні надходити в систему каналізації через локальні очисні споруди або ж попереднє механічне очищення від великих фракцій. Не допускається скид у каналізацію великої кількості залишків тіста, жирів і мийних засобів, що можуть порушувати роботу очисних споруд. При виборі мийних та дезінфікуючих засобів слід надавати перевагу тим, що мають менший негативний вплив на довкілля та дозволені до використання у харчовій промисловості.

Підвищення енергоефективності змішувача завдяки модернізації конструкції шнеків та оптимізації режимів роботи сприяє зменшенню споживання електроенергії, а отже, опосередковано знижує обсяг викидів парникових газів, пов'язаних із виробництвом електроенергії. Це відповідає сучасним вимогам до енергоощадних технологій і сталого розвитку харчової промисловості.

Узагальнення

Реалізація комплексу заходів з охорони праці та охорони довкілля при експлуатації двошнекового змішувача забезпечує безпечні умови роботи для персоналу, стабільну якість хлібного тіста та мінімізацію негативного впливу виробництва на навколишнє середовище. Дотримання вимог законодавства України, використання сучасних засобів захисту, правильна організація навчання й інструктажів, а також раціональна система поводження з відходами є невід'ємною частиною впровадження та експлуатації модернізованого обладнання на хлібопекарському підприємстві.

7. Маркетингове обґрунтування проєкту

Загальна характеристика ринку

Ринок хлібобулочних виробів в Україні залишається одним із базових сегментів продовольчого ринку, незважаючи на військові ризики, зміну логістики та скорочення населення. За оцінками галузевих експертів, у грошовому вимірі обсяг ринку хліба та хлібобулочних виробів у 2024 році перевищив показники 2021 року і становив близько 34,5 млрд грн, при цьому загальний ринок за цей період скоротився приблизно на 20 % за рахунок зменшення споживання та міграції населення.

Прогноз на 2025 рік свідчить про подальшу стабілізацію: очікуваний обсяг ринку хлібобулочної продукції оцінюється на рівні 33–34 млрд грн, що на 10–15 % вище довоєнного рівня 2021 року у грошовому вимірі. Це пояснюється зростанням собівартості, переходом частини продукції у більш маржинальні сегменти (тостовий, фасований хліб, вироби тривалішого зберігання) і частковим розширенням експорту.

Паралельно розвивається глобальний ринок обладнання для змішування харчових мас. Світовий ринок обладнання для замішування тіста оцінюється приблизно у 2,1 млрд дол. США у 2024 році з прогнозом зростання до 3,6 млрд дол. до 2033 року (середньорічні темпи зростання близько 5,8 %). Це обумовлено зростанням попиту на хлібобулочні та борошняні вироби, автоматизацією виробництва та переходом до енергоефективних, безпечних і керованих систем замішування.

Опис та характеристика товару

Об'єктом маркетингового обґрунтування є модернізований двошнековий змішувач для виробництва хліба продуктивністю 5 т/год. Машина призначена для безперервного інтенсивного замішування пшеничного тіста з використанням двох співобертових шнеків у горизонтальному корпусі.

Ключові особливості запропонованого технічного рішення:

комбінована геометрія шнеків (зона транспортування, зона інтенсивного змішування, зона вирівнювання потоку), що базується на результатах CFD-моделювання та реологічних досліджень тіста;

підвищена рівномірність розподілу компонентів по об'єму, формування однорідної структури тіста;

можливість роботи у складі безперервних або напівбезперервних ліній;

потенційне зниження питомих енерговитрат у порівнянні з традиційними періодичними тістомісильними машинами за рахунок оптимізації режимів змішування.

З маркетингової точки зору модернізований змішувач є високотехнологічним інвестиційним товаром промислового призначення, орієнтованим на середні та великі хлібозаводи, а також на сучасні промислові пекарні, які переходять до безперервних технологій та автоматизованих ліній.

Характеристика ринку та його специфіка

Український ринок хлібобулочних виробів характеризується поєднанням кількох тенденцій:

зниження фізичного споживання традиційного хліба на душу населення та одночасне зростання частки продукції з підвищеною доданою вартістю (тостовий хліб, фасований хліб, вироби тривалого зберігання, крафтові вироби);

посилення конкуренції з боку малих пекарень та craft-пекарень, які працюють ближче до споживача;

концентрація виробництва у руках кількох великих виробників, що формують основний попит на промислове обладнання;

зростання вимог до стабільності якості, безпечності, відстежуваності технологічних параметрів.

Для таких умов підприємства змушені модернізувати обладнання, щоб забезпечити стабільну якість тіста, скоротити втрати сировини, зменшити енергоємність та підвищити гнучкість асортименту. Саме ці потреби і формують попит на сучасні змішувачі – зокрема двошнекові, які здатні забезпечити інтенсивний та повторюваний процес замішування.

Аналіз структури ринку обладнання для замішування тіста

Сегмент обладнання для замішування тіста в Україні структурно залежить від імпортного постачання. Вітчизняні виробники представлені обмежено і здебільшого спеціалізуються на спіральних, планетарних та горизонтальних тістомісах невеликої та середньої потужності. Значна частина високопродуктивних машин, зокрема безперервних ліній та двошнекових змішувачів, постачається з ЄС, США та Китаю.

У міжнародному масштабі на ринку присутні потужні виробники промислових змішувачів і систем безперервного замішування: Reading Bakery Systems, Exact Mixing, Peerless, Werner & Pfleiderer та інші, які пропонують лінійки двошнекових та комбінованих змішувачів для хлібної і снекової промисловості.

Для українських підприємств це означає залежність від імпортних поставок, коливань валютного курсу, сервісної підтримки з-за кордону та тривалих строків поставки. Водночас це створює нішеві можливості для локальних рішень: модернізації наявних машин, розробки власних змішувачів з адаптацією до місцевих умов експлуатації, сировини та сервісної інфраструктури.

Огляд розвитку ринку та ключові тенденції

За останні роки у світовій хлібопекарній промисловості фіксується стійке зростання попиту на автоматизовані системи замішування, у тому числі на обладнання для безперервного замішування тіста. Глобальний ринок обладнання для замішування тіста демонструє темпи росту близько 5–6 % на

рік, що пов'язано із розширенням мереж супермаркетів, розвитку HoReCa, а також ростом сегменту заморожених напівфабрикатів.

В Україні зростання ринку хлібобулочних виробів у грошовому вимірі поєднується зі зниженням тоннажу, що стимулює виробників:

переходити до більш ефективних технологій, які зменшують питомі витрати енергії та сировини;

підвищувати стабільність якості – зокрема завдяки точному контролю параметрів замісу;

впроваджувати обладнання з розширеними можливостями автоматизації і дистанційного контролю.

У цьому контексті модернізація двошнекового змішувача, запропонована в проєкті, відповідає загальносвітовим та національним тенденціям – переходу до високоефективних, ресурсозберігаючих і більш керованих технологічних рішень.

Аналіз зовнішнього маркетингового середовища

На попит на хлібопекарське обладнання впливають такі групи факторів: економічні: інфляція, вартість енергоносіїв, ціни на борошно та іншу сировину, доступність кредитування інвестиційних проєктів;

політичні та правові: воєнний стан, ризики пошкодження інфраструктури, вимоги законодавства щодо безпечності харчових продуктів та енергоефективності обладнання;

технологічні: розвиток CFD-моделювання, цифрових систем керування, сенсорики та моніторингу стану машин;

соціальні: зміна харчових звичок, попит на більш якісний та стабільний за властивостями хліб, зростання популярності фасованої продукції.

Для модернізованого двошнекового змішувача ці чинники створюють як певні ризики (коливання попиту, обмеженість інвестиційних ресурсів), так і значні можливості – за рахунок орієнтації на енергоефективність, зниження втрат сировини та покращення якості кінцевого продукту.

Аналіз основних конкурентів

На українському ринку основними конкурентами для проєктованого змішувача будуть:

імпортні промислові спіральні та горизонтальні тістоміси великої ємності;

спеціалізовані безперервні змішувачі зарубіжного виробництва;

вітчизняні виробники обладнання, які пропонують модернізацію існуючих ліній.

Сильні сторони імпортних машин: висока автоматизація, добре напрацьована репутація брендів, сервісна підтримка в глобальному масштабі. Слабкі сторони – висока ціна, залежність від курсу валют, складність з оперативним сервісом у воєнних умовах.

Перевага модернізованого змішувача, що розробляється у проєкті, полягає у поєднанні:

адаптації до українських умов експлуатації (типові сорти борошна, реальні режими роботи, можливість роботи з наявною інфраструктурою);

використання сучасної наукової бази (CFD-моделювання, реологічні моделі тіста) для оптимізації форми шнеків;

потенційно нижчої вартості модернізації порівняно з повною заміною обладнання.

Аналіз постачальників та посередників

Для впровадження модернізованого змішувача підприємство-замовник взаємодіє з такими групами постачальників:

постачальники металопрокату та комплектуючих (редуктори, підшипники, електродвигуни, частотні перетворювачі);

виробники електроніки та систем керування (контролери, датчики температури, тиску, моменту, частоти обертання тощо);

сервісні організації, які можуть надавати послуги монтажу, пусконаладжувальних робіт та технічного обслуговування.

Посередники на ринку обладнання – це здебільшого дилерські компанії, що представляють інтереси зарубіжних брендів. У випадку впровадження власної модернізованої конструкції можна мінімізувати залежність від імпортерських посередників, спираючись на прямих постачальників комплектуючих та на власні сервісні служби підприємства.

Аналіз споживачів

Основними потенційними споживачами модернізованого двошнекового змішувача є:

великі та середні хлібозаводи, які прагнуть підвищити ефективність існуючих ліній і зменшити витрати на енергоносії;

промислові пекарні мереж супермаркетів, що орієнтовані на стабільну якість фасованого хліба та булочок;

підприємства, що планують запуск нових ліній з безперервним або напівбезперервним замісом тіста.

Для таких споживачів ключовими критеріями вибору обладнання є:

стабільність якості тіста (структура, газоутримувальна здатність, реологія);

енергоефективність та низька питомі витрати електроенергії на одиницю продукції;

надійність, простота обслуговування та доступність сервісу;

можливість інтеграції в існуючу систему керування підприємства.

Модернізований змішувач орієнтований саме на ці вимоги, оскільки його конструкція розроблялася з урахуванням реальних технічних та експлуатаційних обмежень і може бути масштабована під різну продуктивність.

Висновки до маркетингового обґрунтування

Проведений аналіз ринку хлібобулочних виробів та ринку обладнання для замішування тіста показує, що:

галузь в Україні проходить етап структурної перебудови, але зберігає стабільний попит у грошовому вимірі, що підтримує інвестиційну привабливість модернізації виробництва;

на світовому рівні сегмент обладнання для змішування харчових продуктів, зокрема тіста, демонструє сталий ріст, що підтверджує актуальність інвестицій у сучасні змішувальні системи;

українські виробники істотно залежать від імпортних машин, що створює можливості для впровадження локальних технічних рішень, зокрема модернізації наявних змішувачів;

запропоноване в магістерському проєкті технічне рішення – модернізований двошнековий змішувач продуктивністю 5 т/год – відповідає поточним потребам виробників: підвищення однорідності тіста, зменшення енерговитрат, адаптація до безперервних та автоматизованих ліній.

Отже, з маркетингової точки зору впровадження модернізованого двошнекового змішувача є доцільним і здатне:

підвищити конкурентоспроможність хлібопекарського підприємства;

забезпечити відповідність сучасним вимогам до якості та стабільності продукції;

зменшити залежність від дорогого імпортного обладнання та сервісу.

Це підтверджує актуальність і економічну доцільність реалізації проєкту, запропонованого в даній магістерській роботі.

Висновки

У ході реалізації магістерського проєкту на тему «Підвищення ефективності роботи двошнекового змішувача для виробництва хліба продуктивністю 5000 кг/годин» узагальнено результати проведених теоретичних, розрахункових та дослідних досліджень і підтверджено доцільність запропонованого технічного рішення.

На основі аналізу літературних джерел та промислових аналогів встановлено, що традиційні періодичні тістомісильні машини не повною мірою відповідають сучасним вимогам до стабільності якості тіста, енергоефективності та інтеграції у безперервні автоматизовані лінії. Обґрунтовано актуальність застосування двошнекових змішувачів для замішування пшеничного тіста та вибрано напрямок модернізації – удосконалення геометрії шнеків у зоні інтенсивного змішування з урахуванням реологічних властивостей тіста.

Розроблено нове технічне рішення двошнекового змішувача продуктивністю 5000 кг/годин, у якому виділено зони живлення, попереднього транспортування, інтенсивного змішування та вирівнювання потоку. Запропонована комбінована конфігурація шнеків у зоні інтенсивного змішування забезпечує підвищені зсувні деформації, покращує однорідність розподілу компонентів і сприяє формуванню більш стабільної структури хлібного тіста.

У дослідній частині побудовано реологічну модель пшеничного тіста. На основі обробки експериментальних реометричних даних показано, що модель типу Carreau найкраще описує залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву в робочому діапазоні швидкостей змішувача. З використанням цієї моделі виконано тривимірне CFD-моделювання течії тіста у робочому об'ємі базової та модернізованої конструкцій. Отримані поля швидкості та в'язкості дозволили виявити «мертві зони», оцінити

інтенсивність перемішування в характерних перерізах та підтвердили підвищення ефективності роботи змішувача після модернізації шнеків.

У розрахунковій частині перевірено продуктивність модернізованого обладнання, виконано підбір конструкційних матеріалів для основних деталей, проведено розрахунки на міцність вала шнека, шпонкових з'єднань, підшипникових опор та елементів приводу. Показано, що напружений стан основних елементів не перевищує допустимих значень, а прийняті розміри забезпечують необхідний запас міцності й надійності при роботі на розрахункових режимах. Розглянуто технологічні особливості виготовлення деталей, вимоги до монтажу та технічного обслуговування, а також запропоновано принципи автоматизованого керування змішувачем у складі хлібопекарної лінії.

Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з експлуатацією двошнекового змішувача, та розроблено комплекс заходів з охорони праці й охорони довкілля, спрямованих на підвищення безпеки персоналу та зменшення техногенного впливу. У маркетинговому обґрунтуванні показано, що модернізований двошнековий змішувач відповідає тенденціям розвитку вітчизняного й світового ринку хлібопекарного обладнання, підвищує конкурентоспроможність підприємства, зменшує залежність від імпортних рішень та створює передумови для подальшої локалізації виробництва.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що поставлена в магістерському проєкті мета – підвищення ефективності роботи двошнекового змішувача для виробництва хліба продуктивністю 5000 кг/годин – досягнута. Розроблене технічне рішення є науково й технічно обґрунтованим, забезпечує покращення параметрів процесу замішування тіста, підвищення надійності та економічної ефективності роботи обладнання. Подальший розвиток роботи може бути пов'язаний із розширенням експериментальної бази, оптимізацією режимів роботи

змішувача для різних рецептур, масштабуванням конструкції під інші продуктивності та глибшою інтеграцією в цифрові системи керування виробництвом.

Список використаних джерел

1. Tagliavini G., Solari F., Montanari R. CFD Simulation of a Co-rotating Twin-screw Extruder: Validation of a Rheological Model for a Starch-Based Dough for Snack Food // International Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 14(2). – P. 1–16.
2. Della Valle G., Berzin F., Vergnes B. Modeling of Twin Screw Extrusion Process for Food Products Design and Process Optimization // Advances in Food Extrusion Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – P. 325–356.
3. Connelly R.K., Kokini J.L. Examination of the mixing ability of single- and twin-screw mixers using 2D numerical simulations and flow visualization // Journal of Food Engineering. – 2007. – Vol. 79(3). – P. 956–969.
4. Lue S., Hsieh F., Huff H.E. Modeling of twin-screw extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber mixtures // Journal of Food Engineering. – 1994. – Vol. 21(1). – P. 33–58.
5. Vergnes B., Della Valle G., Berzin F. Modeling of Twin-Screw Extrusion of Starchy and Non-Newtonian Food Materials // Food Extrusion Science and Technology. – Springer, 2014. – P. 353–388.
6. Szpicer A. Application of Computational Fluid Dynamics Simulations in Food Industry Processes. – PhD Thesis. – 2023. – 210 p.
7. Lewandowski A. Modeling of Twin Screw Extrusion of Polymeric Materials // Polymers. – 2022. – Vol. 14(2). – Article 274.
8. Marquez J.A.D., et al. Predicting the Processability of Polymers in a Twin-Screw Extruder Using CFD // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2024. – Vol. 63(XX). – P. XX–XX.
9. Szpicer A., et al. Advances in Computational Fluid Dynamics of Mechanical Food Processing // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15(15). – Article 8752.
10. Nicolle P., et al. Mixing and Residence Time Distribution in Twin-Screw Mixers for Food Doughs // Journal of Food Engineering. – 2010. – Vol. 98(3). – P. 390–398.

- 11.Maskan M., Altan A. (Eds.) *Advances in Food Extrusion Technology*. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 412 p.
- 12.Rao M.A., Rizvi S.S.H., Datta A.K., Ahmed J. *Engineering Properties of Foods*. – 4th ed. – CRC Press, 2014. – Розд. «Rheology of Dough and Bakery Products».
- 13.Писарець О. Дослідження реологічних властивостей спельтового борошна та тіста // *Продовольчі ресурси*. – 2020. – № 14. – С. 86–92.
- 14.Криворучко М., та ін. Реологічні властивості пшеничного тіста з кокосовою клітковиною // *Товари і ринки*. – 2016. – № 1. – С. 121–128.
- 15.Господаренко Г.М., та ін. Реологічні властивості тіста та кулінарна якість хліба з додаванням борошна гарбузового // *Вісник Уманського НУС*. – 2022. – Вип. 101(1). – С. XX–XX.
- 16.Усова З.В. Реологічні властивості тіста та хлібопекарські показники якості борошна пшеничних генотипів // *Plant Breeding and Seed Production*. – 2010. – № 98. – С. 142–149.
- 17.Войтюк В., та ін. Особливості дослідження реологічних характеристик тіста // *Матеріали конф. «Проблеми механіки та надійності конструкцій»*. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – С. 32–33.
- 18.Орлянський Р.С. Обґрунтування технології та дослідження властивостей тіста із сумішей пшеничного та гречаного борошна: магістерська робота. – Дніпро: ДДАЕУ, 2022. – 90 с.