

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

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра обладнання харчових технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення конструкції емульсора марки А2-ШУИ

Виконав: здобувач вищої освіти 6 курсу, групи МОм-61
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Бурак А.В.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Вітенько Т.М.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Ворощук В.Я.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<u>Ворощук В.Я.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u></u> (підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

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

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра обладнання харчових технологій

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри ОХ

Ворощук В.Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 12 » серпня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

здобувачу вищої освіти

Бурак Андрій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення конструкції емульсора марки А2-ШУИ

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

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

Затверджені наказом ректора від « 11 » серпня 2025 року № 4/7-747.

2. Термін подання завершеної роботи 20 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Технічний паспорт та інструкції з експлуатації, монтажу та технічного обслуговування і ремонту емульсора марки А2-ШУИ.

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

1. Аналіз сучасного стану об'єкту дослідження, вибір і обґрунтування основних напрямків дослідження. 2. Вибір методів та методик досліджень. 3. Розроблення нових проектно-технологічних і технічних вирішень вдосконалення об'єкта дослідження.. 4. Дослідження емульсора марки А2-ШУИ в SolidWorks Flow Simulation. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 5.1. Заходи з охорони праці і техніки безпеки на лінії виробництва пряників. 5.2. Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

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

Емульсор марки А2-ШУИ. Вигляд загальний (1 л. А1)

Результати дослідження параметра "Pressure" (Абсолютний тиск)(1 л.ф.А1);

Результати дослідження параметра "Temperature" (Температура)(1 л.ф.А1);

Результати дослідження параметра "Velocity" (Абсолютна швидкість)(1 л.ф.А1);

Результати дослідження параметра "Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку)(1 л.ф.А1);

Результати дослідження параметра "Vorticity" (Вихровість)(1 л.ф.А1);

Результати дослідження параметра "Relative Pressure" (Відносний тиск)(1 л.ф.А1);

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Кравець О.І. – к.т.н., доц. Стручок В.С. – ст.викл.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Ворожук В.Я. – к.т.н., доц.</i>		

7. Дата видачі завдання 12 серпня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Анотація		
2	Вступ		
3	1. Аналіз сучасного стану об'єкту дослідження, вибір і обґрунтування основних напрямків дослідження		
4	2. Вибір методів та методик досліджень		
5	3. Розроблення нових проектно-технологічних і технічних вирішень вдосконалення об'єкта дослідження.		
6	4. Дослідження емульсора марки А2-ШУИ в SolidWorks Flow Simulation		
7	5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
8	5.1. Заходи з охорони праці і техніки безпеки на лінії виробництва пряників		
9	5.2. Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях		
10	Висновки		
11	Графічна частина		
12	Емульсор марки А2-ШУИ. Вигляд загальний (1 л.А1)		
13	Результати дослідження параметра "Pressure" (Абсолютний тиск)(1 л.ф.А1);		
14	Результати дослідження параметра "Temperature" (Температура)(1 л.ф.А1);		
15	Результати дослідження параметра "Velocity" (Абсолютна швидкість)(1 л.ф.А1);		
16	Результати дослідження параметра "Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку)(1 л.ф.А1);		
17	Результати дослідження параметра "Vorticity" (Вихровість)(1 л.ф.А1);		
18	Результати дослідження параметра "Relative Pressure" (Відносний тиск)(1 л.ф.А1);		
19	Результати дослідження параметра "Acoustic Power Level" (Рівень акустичної потужності)(1 л.ф.А1);		

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Бурак А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Вітенько Т.М.

(прізвище та ініціали)

Анотація

Автор кваліфікаційної роботи – Бурак Андрій Васильович.

Тема роботи: Удосконалення конструкції емульсора марки А2-ШУИ.

Кваліфікаційну роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя в 2025 році

Кваліфікаційна робота включає пояснювальну записку на 101 сторінці (з 42 рисунками) та графічну частину з 8 креслень формату А1.

В кваліфікаційній роботі пропонуються заходи удосконалення конструкції емульсора марки А2-ШУИ, зокрема зміни конструкції ротора на базі досліджень.

Основними задачами, які вирішуються в даній кваліфікаційній роботі, є:

вивчення актуального стану предмета дослідження, визначення і обґрунтування пріоритетних напрямів наукової роботи;

формування комплексу методів та методик для дослідницької роботи;

здійснення технологічних і конструктивних обчислень для емульсора;

побудова просторової моделі емульсора;

формування розрахункової моделі для числових досліджень;

визначення параметрів моделювання та проведення відповідних розрахунків;

аналіз отриманих результатів моделювання та узагальнення висновків;

розробка комплексу заходів з охорони праці й техніки безпеки;

створення системи заходів безпеки в умовах надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: емульсор, удосконалення, ротор, модель.

Abstract

Burak Andriy. Improvement of the design of the A2-ShUI emulsifier. 133 “Industrial Machinery Engineering” – Ternopil Ivan Puluj National Technical University.-Ternopil, 2025.

The qualification work includes an explanatory note of 101 pages (with 42 figures) and a graphic part with 8 drawings in A1 format.

The qualification work proposes measures to improve the design of the A2-SHUI emulsifier, in particular changes to the rotor design based on research.

The main tasks addressed in this qualification work are:

studying the current state of the subject of research, identifying and justifying priority areas of scientific work;

developing a set of methods and techniques for research work;

performing technological and design calculations for the emulsifier;

building a spatial model of the emulsifier;

developing a computational model for numerical studies;

determining the modelling parameters and performing the corresponding calculations;

analysing the modelling results and summarising the conclusions;

developing a set of occupational health and safety measures;

creating a system of safety measures in emergency situations.

Keywords: emulsifier, improvement, rotor, model.

Зміст

Анотація	4
Abstract	5
Зміст	6
Вступ.....	8
1. Аналіз сучасного стану об'єкту дослідження, вибір і обґрунтування основних напрямків дослідження.....	10
1.1. Основні способи отримання емульсій	10
1.2. Аналіз обладнання для приготування емульсій.....	17
1.3. Аналіз та короткий опис об'єкту дослідження	37
1.4. Мета та задачі кваліфікаційної роботи.	39
2. Вибір методів та методик досліджень	40
2.1. Обґрунтування вибору методу дослідження.....	40
2.2. Програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation	40
2.3. Методика створення геометричної моделі	41
2.4. Досліджувані параметри.....	42
2.5. Методика проведення розрахунків.....	43
2.6. Методика обробки та аналізу результатів	43
3. Розроблення нових проектно-технологічних і технічних вирішень вдосконалення об'єкта дослідження.	45
3.1. Заходи з модернізації емульсора	45
3.2. Вибір та розрахунок основних параметрів ротора	45
3.3 Розрахунок глибини воронки.....	47
3.4. Розрахунок турбінного перемішуючого пристрою	48
3.5. Вибір муфти.....	50
3.6. Вибір та прийняття роз'ємного з'єднання на кінці валу.....	51

3.7. Заходи з експлуатації емульсора А2-ШУИ	53
4. Дослідження емульсора марки А2-ШУИ в SolidWorks Flow Simulation.....	56
4.1. Постановка задачі.....	56
4.2. Результат дослідження.....	59
4.3. Висновки по розділу	79
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	81
5.1. Заходи з охорони праці і техніки безпеки на лінії виробництва пряників.....	81
5.2. Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.	85
Висновки	94
Перелік посилань.....	96
Додатки.....	99

Вступ

Актуальність теми. Процес приготування емульсій є одним з визначальних технологічних етапів у виробництві борошняних кондитерських виробів, оскільки від якості емульгування залежать структура, смакові властивості та термін зберігання готової продукції. Установка А2-ШУИ, яка призначена для приготування емульсій при виробництві борошняних кондитерських виробів, експлуатується на багатьох вітчизняних кондитерських підприємствах. Аналіз роботи існуючих конструкцій виявляє недоліки, пов'язані з нерівномірністю дисперсії часток емульсії, підвищенням енергоспоживання та швидким зношуванням робочих органів.

Удосконалення конструкції установки А2-ШУИ спрямоване на усунення виявлених недоліків шляхом оптимізації геометричних параметрів робочих органів, покращення гідродинамічних характеристик та підвищення надійності вузлів обладнання. Впровадження модернізованої конструкції забезпечить отримання емульсій вищої якості з стабільною однорідною структурою, що безпосередньо вплине на якість борошняних кондитерських виробів, а також дозволить знизити питомі енергетичні витрати та збільшити міжремонтний період експлуатації. Це підтверджує актуальність обраної теми дослідження для розвитку технологічного обладнання кондитерської промисловості і передбачає розв'язання наступних інженерно-технічних задач: вивчення актуального стану предмета дослідження, визначення і обґрунтування пріоритетних напрямів наукової роботи; формування комплексу методів та методик для дослідницької роботи; здійснення технологічних і конструктивних обчислень для емульсора; побудова просторової моделі емульсора; формування розрахункової моделі для числових досліджень; визначення параметрів моделювання та проведення відповідних розрахунків; аналіз отриманих результатів моделювання та узагальнення висновків; розробка комплексу заходів з охорони праці й техніки безпеки; створення системи заходів безпеки в умовах надзвичайних ситуацій.

Об'єкт дослідження. Процес емульгування в установці А2-ШУИ для виробництва борошняних кондитерських виробів..

Предмет дослідження. Конструктивні параметри ротора емульсора та їх вплив на гідродинамічні та акустичні характеристики процесу емульгування.

Методи досліджень. Комп'ютерне 3D-моделювання гідродинамічних процесів, числове моделювання методом скінченних елементів, технологічні та конструктивні розрахунки, регресійний аналіз отриманих результатів, порівняльний аналіз конструктивних варіантів.

Наукова новизна. Встановлено кількісні залежності між конструктивними параметрами ротора (відкритий та закритий тип крильчатки) та гідродинамічними характеристиками емульсора А2-ШУИ в діапазоні швидкостей обертання 2500-3500 об/хв. Отримано регресійні моделі, що дозволяють прогнозувати розподіл тисків, швидкостей потоку та акустичних параметрів залежно від режимів роботи та типу крильчатки, що створює науково обґрунтовану основу для вибору оптимальної конструкції ротора емульсора..

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості науково обґрунтованого вибору типу крильчатки ротора емульсора А2-ШУИ залежно від конкретних технологічних вимог виробництва. Розроблені регресійні моделі дозволяють прогнозувати режими роботи обладнання без проведення costly експериментальних досліджень. Запропоновані конструктивні рішення забезпечують підвищення енергоефективності процесу емульгування, зниження рівня шуму та зменшення ризику кавітації, що сприяє збільшенню міжремонтного періоду експлуатації установки. Результати роботи можуть бути використані підприємствами кондитерської промисловості при модернізації існуючого обладнання або проектуванні нових виробничих ліній.

Апробація результатів магістерської роботи [1] здійснена на VIII Міжнародній студентській науково-технічній конференції "Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання", 24-25 квітня 2025 р.

Робота складається з п'яти розділів, додатків та графічної документації на 8 аркушах формату А1.

1. Аналіз сучасного стану об'єкту дослідження, вибір і обґрунтування основних напрямків дослідження.

1.1. Основні способи отримання емульсій

Емульсія являє собою дисперсну систему, що складається з двох взаємно нерозчинних рідин, одна з яких розподілена в іншій у вигляді найдрібніших крапель. У харчовій промисловості найпоширенішими є емульсії типу "олія у воді" та "вода в олії", які знаходять широке застосування при виробництві молочних продуктів, майонезів, соусів, маргаринів, кондитерських виробів та багатьох інших харчових продуктів.

Термодинамічна нестабільність емульсій обумовлена наявністю великої міжфазної поверхні між дисперсною фазою та дисперсійним середовищем. Для створення стабільної емульсії необхідно долати значні енергетичні бар'єри, пов'язані з поверхневим натягом на межі розділу фаз. Саме тому процес емульгування вимагає підведення механічної енергії та обов'язкового використання емульгаторів - речовин, здатних знижувати міжфазний поверхневий натяг та стабілізувати утворені краплі дисперсної фази.

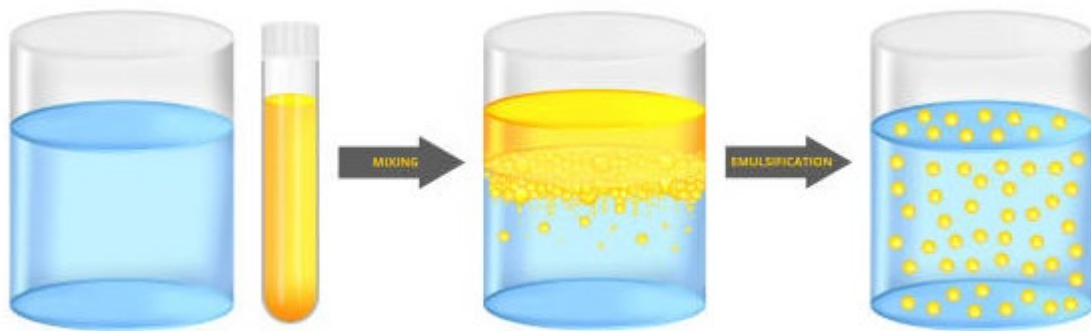


Рис. 1.1. Схема утворення емульсії

Механізм утворення емульсії включає декілька послідовних стадій. На першому етапі відбувається деформація міжфазної поверхні під дією механічних напружень, що виникають у потоці рідини. Коли ці напруження перевищують сили поверхневого натягу, відбувається розрив міжфазної поверхні та утворення нових крапель дисперсної фази. Розмір утворених крапель залежить від

співвідношення між інтенсивністю механічного впливу та стабілізуючими силами поверхневого натягу.

Стабільність готової емульсії визначається кількома факторами. Молекули емульгатора, адсорбуючись на поверхні крапель дисперсної фази, створюють захисний шар, який перешкоджає злиттю крапель при їх зіткненні. Крім механічного бар'єру, емульгатори можуть створювати електростатичне відштовхування між краплями або стеричні перешкоди за рахунок довгих гідрофільних ланцюгів, що виступають у дисперсійне середовище. У харчових емульсіях як емульгатори використовуються білки, фосфоліпіди, моно- та діацилгліцероли, ефіри жирних кислот та інші поверхнево-активні речовини природного або синтетичного походження.

Реологічні властивості емульсій мають критичне значення для їх технологічних характеристик. В'язкість емульсії залежить від концентрації дисперсної фази, розміру крапель, природи емульгатора та температури. При збільшенні концентрації дисперсної фази в'язкість зростає за експоненційним законом, а при досягненні певної критичної концентрації емульсія може набувати властивостей пластичного або псевдопластичного тіла. Ці реологічні характеристики визначають консистенцію готового продукту та його поведінку при транспортуванні, фасуванні та споживанні.

Методи отримання харчових емульсій можна класифікувати за різними критеріями, проте найбільш практично значимою є класифікація за характером механічного впливу на емульговану систему. Кожен метод характеризується специфічним механізмом диспергування та має свої технологічні особливості, переваги та обмеження.

Механічне перемішування належить до найпростіших та найдавніших методів емульгування. Принцип роботи заснований на створенні турбулентних потоків у рідині за допомогою обертових мішалок різної конструкції. Лопатеві, рамні, якірні та пропелерні мішалки створюють макровихори, які розтягують краплі дисперсної фази та сприяють їх подрібненню. Ефективність цього методу визначається геометрією мішалки, швидкістю обертання, співвідношенням

розмірів мішалки та апарату, а також фізико-хімічними властивостями емульгованих рідин. Недоліком механічного перемішування є відносно великий розмір крапель у готовій емульсії та широкий розподіл крапель за розмірами, що може негативно впливати на стабільність продукту.



Рис. 1.2. Промисловий механічний емульсор Netzsch

Гомогенізація під високим тиском представляє собою більш інтенсивний метод диспергування, який широко застосовується в молочній промисловості. Попередньо підготовлена груба емульсія подається під високим тиском через вузьку щілину гомогенізуючого клапана, де відбувається різке зростання швидкості потоку та виникнення складного комплексу гідродинамічних явищ. Механізм подрібнення крапель включає турбулентні пульсації, кавітацію, ударні хвилі та інтенсивні зсувні деформації. Тиск гомогенізації може досягати двадцяти п'яти мегапаскалів, що забезпечує отримання емульсій з розміром крапель менше

одного мікрометра. Такі високодисперсні емульсії характеризуються високою стабільністю та відмінними органолептичними властивостями.



Рис. 1.3. Гомогенізатор високого тиску Bertoli



Рис. 1.4. Ультразвуковий гомогенізатор Scientz

Ультразвукова гомогенізація базується на використанні механічних коливань високої частоти для диспергування рідин. При проходженні ультразвукової хвилі через емульговану систему виникають області підвищеного та зниженого тиску, що призводить до кавітації - утворення та схлопування мікроскопічних бульбашок газу. Під час схлопування кавітаційних бульбашок виникають локальні зони з екстремально високими температурами та тисками, а також утворюються мікропотоки рідини з величезними швидкостями. Ці явища забезпечують ефективне подрібнення крапель дисперсної фази. Ультразвукова гомогенізація дозволяє отримувати емульсії з дуже малим розміром крапель та вузьким розподілом за розмірами, проте має обмеження щодо продуктивності та енергоефективності.



Рис. 1.4. Мембранний емульсор SPG компанії Mtech

Мембранна емульгація є відносно новим методом, який заснований на продавлюванні дисперсної фази через мікропористу мембрану у дисперсійне середовище. Розмір крапель у цьому випадку визначається розміром пор мембрани, тиском продавлювання та швидкістю потоку дисперсійного середовища біля поверхні мембрани. Перевагою мембранної емульгації є

можливість отримання емульсій з вузьким розподілом крапель за розмірами та низькі енергетичні витрати. Однак метод характеризується невисокою продуктивністю та вимагає використання спеціальних мембран з контрольованою структурою пор.



Рис. 1.5. Колоїдний млин гомогенізатор JMF-80

Колоїдні млини та роторно-статорні диспергатори займають проміжне положення між простим механічним перемішуванням та високонапірною гомогенізацією. У цих апаратах емульгована система піддається інтенсивним зсувним деформаціям у вузькому зазорі між обертовим ротором та нерухомим статором. Висока швидкість обертання ротора створює сильні градієнти швидкості, які забезпечують ефективне подрібнення крапель. Додатковий ефект диспергування виникає завдяки турбулентності потоку та кавітації. Ці апарати поєднують високу продуктивність з можливістю отримання достатньо тонких емульсій.



Рис. 1.6. Колоїдний багатозубчастий насос-диспергатор типу РС-5м

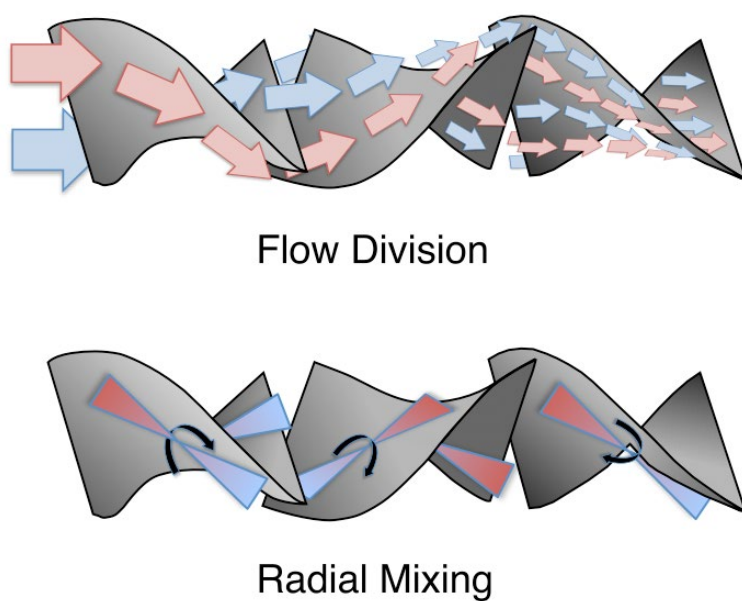


Рис. 1.7. Схема роботи статичного змішувача

Статичні змішувачі використовують складну геометрію внутрішніх елементів для створення контрольованих потоків та інтенсивного перемішування

без використання рухомих частин. Емульгована система проходить через серію спеціально спрофільованих пластин або елементів, які багаторазово ділять, обертають та рекомбінують потік. Хоча статичні змішувачі не забезпечують такого ступеня диспергування як високонапірні гомогенізатори, вони знаходять застосування для приготування грубих емульсій, попередньої підготовки продукту або в якості додаткового ступеня обробки.

Двостадійна гомогенізація часто застосовується для покращення стабільності емульсій. Після першого ступеня гомогенізації при високому тиску продукт піддається повторній обробці при нижчому тиску, що сприяє кращій адсорбції емульгатора на поверхні крапель та руйнуванню агломератів. Такий підхід особливо ефективний для емульсій з високим вмістом білка, де другий ступінь допомагає оптимізувати структуру білкової оболонки навколо жирових кульок.

1.2. Аналіз обладнання для приготування емульсій

Промислове обладнання для емульгування [3-10] відрізняється великою різноманітністю конструктивних рішень, кожне з яких оптимізоване для конкретних технологічних задач та типів продуктів. Вибір обладнання визначається необхідним ступенем диспергування, продуктивністю виробництва, фізико-хімічними властивостями сировини, реологічними характеристиками готового продукту та економічними факторами. Сучасна харчова промисловість використовує широкий спектр емульгуючого обладнання - від простих механічних мішалок до складних високотехнологічних систем з комп'ютерним керуванням та автоматичним контролем якості.

Високонапірні гомогенізатори представляють собою найбільш ефективний тип обладнання для отримання тонкодисперсних стабільних емульсій та є основою виробництва молока, вершків, морозива, майонезів та багатьох інших харчових продуктів. Принцип їх роботи заснований на продавлюванні попередньо підготовленої емульсії через вузьку щілину гомогенізуючого клапана під високим

тиском, що призводить до різкого зростання швидкості потоку та виникнення комплексу інтенсивних гідродинамічних явищ.



Рис. 1.8. Високонапірний гомогенізатор GEA

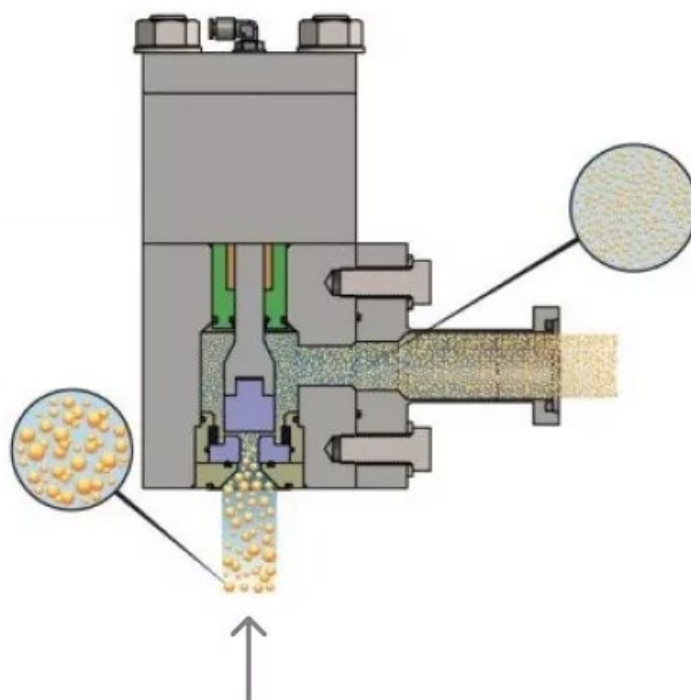


Рис. 1.9. Гомогенізуюча головка

Конструктивно високонапірний гомогенізатор складається з декількох основних вузлів. Високонапірний плунжерний насос забезпечує створення необхідного тиску та безперервну подачу продукту до гомогенізуючої головки. Найчастіше використовуються триплунжерні або п'ятиплунжерні насоси, які забезпечують більш рівномірну подачу продукту порівняно з однопоршневими конструкціями. Плунжери виготовляються з високоміцної нержавіючої сталі або кераміки та працюють у прецизійно оброблених циліндрах з мінімальними зазорами. Ущільнення плунжерів здійснюється за допомогою спеціальних манжет з вискоеластичних полімерних матеріалів, стійких до дії харчових продуктів та миючих розчинів.

Привод насоса здійснюється від електродвигуна через редуктор або клинопасову передачу. Потужність двигунів може коливатися від декількох кіловат для лабораторних моделей до понад ста кіловат для великопромислових установок. Сучасні гомогенізатори часто обладнуються частотними перетворювачами, які дозволяють плавно регулювати продуктивність та оптимізувати режими роботи залежно від властивостей продукту. Це також забезпечує м'який пуск та зупинку обладнання, що знижує механічні навантаження на вузли та продовжує термін їх служби.

Гомогенізуюча головка є серцем апарату та визначає ефективність процесу диспергування. Класична конструкція включає конічний клапан, що притискається до відповідного сидла пружиною або гідравлічним тиском. Величина зазору між клапаном та сидлом регулюється за допомогою гвинтового механізму, що дозволяє змінювати тиск гомогенізації в широких межах. Матеріали клапана та сидла підбираються з урахуванням абразивної дії продукту - використовуються загартована нержавіюча сталь, кераміка на основі оксиду алюмінію або карбїду вольфраму. Для продуктів з високою абразивністю застосовуються клапани з алмазним покриттям, яке забезпечує виняткову стійкість до зносу.

Існують різні модифікації гомогенізуючих головок, оптимізовані для конкретних застосувань. Двоступенева головка містить два послідовно

розташованих клапани, що працюють при різних тисках. Перший ступінь здійснює основне диспергування при високому тиску від десяти до двадцяти п'яти мегапаскалів, а другий ступінь працює при нижчому тиску від двох до п'яти мегапаскалів та виконує функцію додаткового подрібнення агломератів і покращення розподілу емульгатора на поверхні крапель. Для деяких застосувань використовуються тристадійні системи або спеціальні конструкції клапанів з кількома концентричними щілинами.

Асептичні гомогенізатори являють собою особливий клас обладнання, призначений для обробки продуктів, які вимагають дотримання стерильних умов. Вони обладнуються спеціальними ущільненнями, паровими бар'єрами та системами стерилізації, що дозволяє працювати в умовах асептичного виробництва без ризику мікробіологічного забруднення продукту. Такі гомогенізатори широко використовуються в молочній промисловості для виробництва стерилізованого молока та вершків з тривалим терміном зберігання.

Продуктивність високонапірних гомогенізаторів варіюється в дуже широких межах залежно від призначення. Лабораторні моделі мають продуктивність від п'яти до п'ятдесяти літрів на годину та використовуються для досліджень і розробки рецептур. Пілотні установки забезпечують продуктивність від п'ятдесяти до п'ятисот літрів на годину і застосовуються для масштабування процесів та дрібносерійного виробництва. Промислові гомогенізатори можуть переробляти від однієї до двадцяти тисяч літрів продукту на годину, а в молочній промисловості використовуються надпотужні установки з продуктивністю до п'ятдесяти тисяч літрів на годину.

Робочий тиск гомогенізації підбирається індивідуально для кожного типу продукту. Для питного молока зазвичай використовується тиск від дванадцяти до вісімнадцяти мегапаскалів, для вершків від п'ятнадцяти до двадцяти мегапаскалів, для морозивних сумішей від дванадцяти до шістнадцяти мегапаскалів. Майонези та соуси можуть гомогенізуватися при тиску від десяти до п'ятнадцяти мегапаскалів залежно від рецептури. Занадто високий тиск може призвести до

надмірного нагрівання продукту та денатурації білків, тоді як недостатній тиск не забезпечить необхідного ступеня диспергування.

Важливою особливістю роботи високонапірних гомогенізаторів є виділення значної кількості тепла при проходженні продукту через гомогенізуючий клапан. Температура продукту може підвищуватися на десять-п'ятнадцять градусів Цельсія після кожного проходу через гомогенізатор. Тому більшість промислових установок обладнуються теплообмінниками для охолодження продукту після гомогенізації або працюють у складі технологічних ліній з інтегрованими системами температурного контролю. Для деяких процесів підвищення температури може бути навіть корисним, наприклад при гарячій гомогенізації молока, яка поєднується з пастеризацією.

Системи контролю та автоматизації сучасних гомогенізаторів включають датчики тиску на вході та виході з насоса, манометри на кожному ступені гомогенізації, датчики температури, витратоміри та датчики вібрації. Програмовані логічні контролери збирають інформацію з усіх датчиків та керують роботою обладнання згідно з заданою програмою. Передбачаються автоматичні системи аварійного зупинення при відхиленні параметрів від допустимих меж, системи сигналізації про необхідність технічного обслуговування та заміни зношених деталей.

Обслуговування високонапірних гомогенізаторів вимагає кваліфікованого персоналу та дотримання регламентованих процедур. Регулярна заміна ущільнень плунжерів, перевірка та регулювання клапанів, контроль стану підшипників та інших вузлів забезпечують надійну та ефективну роботу обладнання. Сучасні моделі обладнуються системами діагностики, які моніторять стан критичних вузлів та прогнозують необхідність технічного обслуговування на основі аналізу тенденцій зміни робочих параметрів.

Ультразвукові гомогенізатори представляють собою альтернативний підхід до емульгування, заснований на використанні високочастотних механічних коливань для диспергування рідин. Хоча їх продуктивність поступається високонапірним гомогенізаторам, ультразвукові системи знаходять застосування

там, де необхідна максимальна ступінь диспергування або де традиційні методи виявляються неефективними через специфічні властивості оброблюваних матеріалів.



Рис. 1.10. Ультразвуковий апарат Hielscher UIP6000HDT для потокової обробки рідин і рідинних середовищ у промислових масштабах.

Принцип роботи ультразвукових гомогенізаторів базується на явищі акустичної кавітації. При проходженні ультразвукової хвилі через рідину виникають області стиснення та розрідження, що слідує з високою частотою.

В областях розрідження, де тиск падає нижче тиску насиченої пари рідини, утворюються мікроскопічні кавітаційні бульбашки. Ці бульбашки зростають протягом декількох циклів коливань, а потім різко схлопуються при проходженні фази стиснення. Під час схлопування в мікрооб'ємі бульбашки виникають екстремальні умови - температура може досягати декількох тисяч градусів Цельсія, а тиск декількох тисяч атмосфер.

Схлопування кавітаційних бульбашок супроводжується генерацією ударних хвиль та утворенням мікропотоків рідини зі швидкостями, що можуть перевищувати сто метрів за секунду. Якщо краплі дисперсної фази знаходяться поблизу місця схлопування кавітаційної бульбашки, вони піддаються екстремальним механічним напруженням, що призводить до їх деформації та розриву на дрібніші частинки. Крім того, інтенсивні мікропотoki забезпечують ефективне перемішування та сприяють контакту між краплями дисперсної фази та молекулами емульгатора.

Основними елементами ультразвукового гомогенізатора є генератор ультразвукових коливань, п'єзоелектричний або магнітострикційний перетворювач та випромінювальний елемент - сонотрод. Генератор перетворює мережеву напругу в високочастотний змінний струм, частота якого відповідає резонансній частоті перетворювача. Найпоширенішими є частоти від вісімнадцяти до сорока кілогерц, хоча для спеціальних застосувань можуть використовуватися як нижчі частоти близько десяти кілогерц, так і вищі до декількох сотень кілогерц.



Рис. 1.11. Сонотроди

П'єзоелектричні перетворювачі виготовляються з керамічних матеріалів, які змінюють свої розміри під дією електричного поля. Кілька п'єзокерамічних пластин, з'єднаних в пакет, забезпечують необхідну амплітуду коливань. Магнітострикційні перетворювачі використовують спеціальні сплави, які змінюють довжину в магнітному полі. Хоча п'єзоелектричні перетворювачі більш компактні та ефективні, магнітострикційні можуть працювати в більш жорстких умовах та витримують вищі навантаження.

Сонотрод являє собою металевий стержень, зазвичай виготовлений з титанового сплаву або нержавіючої сталі, який резонує на робочій частоті та передає ультразвукові коливання в оброблювану рідину. Конструкція сонотрода критично важлива для ефективності процесу - його геометрія розраховується таким чином, щоб забезпечити максимальну амплітуду коливань на робочій поверхні. Залежно від застосування використовуються сонотроди різної форми - циліндричні, конічні, з плоскою або профільованою робочою поверхнею, пластинчасті для обробки великих обсягів.

Для лабораторних досліджень та малих виробництв використовуються занурювані ультразвукові системи, де сонотрод безпосередньо контактує з оброблюваною рідиною. Такі системи забезпечують максимальну інтенсивність впливу, але мають обмежений обсяг ефективної обробки, зазвичай від декількох мілілітрів до декількох літрів. Для збільшення продуктивності розроблені

проточні ультразвукові реактори, в яких продукт проходить через камеру, де розташований один або декілька сонотродів. Час обробки регулюється швидкістю потоку через реактор.

Альтернативний підхід реалізований в ультразвукових системах непрямого впливу, де сонотрод або ультразвукові випромінювачі розташовані зовні технологічного апарату і передають коливання через його стінку. Це дозволяє обробляти продукти без прямого контакту з металевими поверхнями сонотрода та спрощує очищення обладнання, але знижує ефективність передачі ультразвукової енергії в оброблювану систему.

Потужність промислових ультразвукових гомогенізаторів може досягати від декількох сотень ват до п'ятнадцяти кіловат на один перетворювач. Для обробки великих обсягів продукту використовуються багатоперетворювачі системи, де декілька ультразвукових модулів працюють одночасно в одному реакторі або послідовно в каскаді реакторів. Продуктивність проточних систем може досягати декількох сотень літрів на годину, що є достатнім для деяких спеціалізованих виробництв, але значно менше, ніж у високонапірних гомогенізаторів.

Критичною проблемою при роботі ультразвукових гомогенізаторів є виділення великої кількості тепла. Коефіцієнт перетворення електричної енергії в акустичну зазвичай не перевищує п'ятдесят-шістдесят відсотків, а решта енергії розсіюється у вигляді тепла. Крім того, поглинання ультразвукової енергії в рідині також призводить до її нагрівання. Підвищення температури може досягати декількох градусів за хвилину обробки, що для термолабільних продуктів є неприйнятним. Тому практично всі промислові ультразвукові системи обладнуються ефективними системами охолодження.

Охолодження може здійснюватися декількома способами. Найпростішим є водяне охолодження п'єзоперетворювача та реакторної камери за допомогою рубашки або змійовика. Для інтенсивної обробки використовуються системи примусової циркуляції охолоджуючої води з теплообмінниками або чилерами. В деяких випадках застосовується повітряне охолодження за допомогою

вентиляторів. Ефективна система охолодження дозволяє проводити тривалу безперервну обробку продукту без перегрівання.

Переваги ультразвукової гомогенізації включають можливість отримання емульсій з дуже малим розміром крапель, часто в нанометровому діапазоні, та вузьким розподілом за розмірами. Це особливо важливо для створення прозорих або опалесцентних емульсій, наноемульсій для систем доставки біологічно активних речовин, емульсій для косметичних застосувань. Ультразвук також ефективний при роботі з високов'язкими системами, де традиційні методи зустрічають труднощі.

Недоліками ультразвукової гомогенізації є обмежена продуктивність, високі питомі енергетичні витрати, необхідність інтенсивного охолодження та знос робочих поверхонь сонотродів через кавітаційну ерозію. Крім того, інтенсивна ультразвукова обробка може призводити до небажаних хімічних реакцій, окислення ліпідів або денатурації білків через утворення вільних радикалів при кавітації. Тому параметри обробки повинні ретельно оптимізуватися для кожного конкретного продукту.

Сучасні ультразвукові гомогенізатори обладнуються мікропроцесорними системами керування, які дозволяють програмувати режими роботи, контролювати амплітуду коливань, потужність, температуру та тривалість обробки. Деякі моделі мають функцію імпульсного режиму, коли ультразвук подається короткими імпульсами з паузами, що дозволяє знизити нагрівання продукту та зменшити знос обладнання при збереженні ефективності диспергування.



Рис. 1.12. Колоїдний млин Trinit HR-100L

Колоїдні млини та роторно-статорні диспергатори займають проміжне положення між простими механічними мішалками та високонапірними гомогенізаторами за ефективністю диспергування, але мають свої унікальні переваги, які роблять їх незамінними для певних застосувань. Ці апарати поєднують високу продуктивність, універсальність, можливість роботи з продуктами широкого діапазону в'язкостей та відносну простоту конструкції і обслуговування.

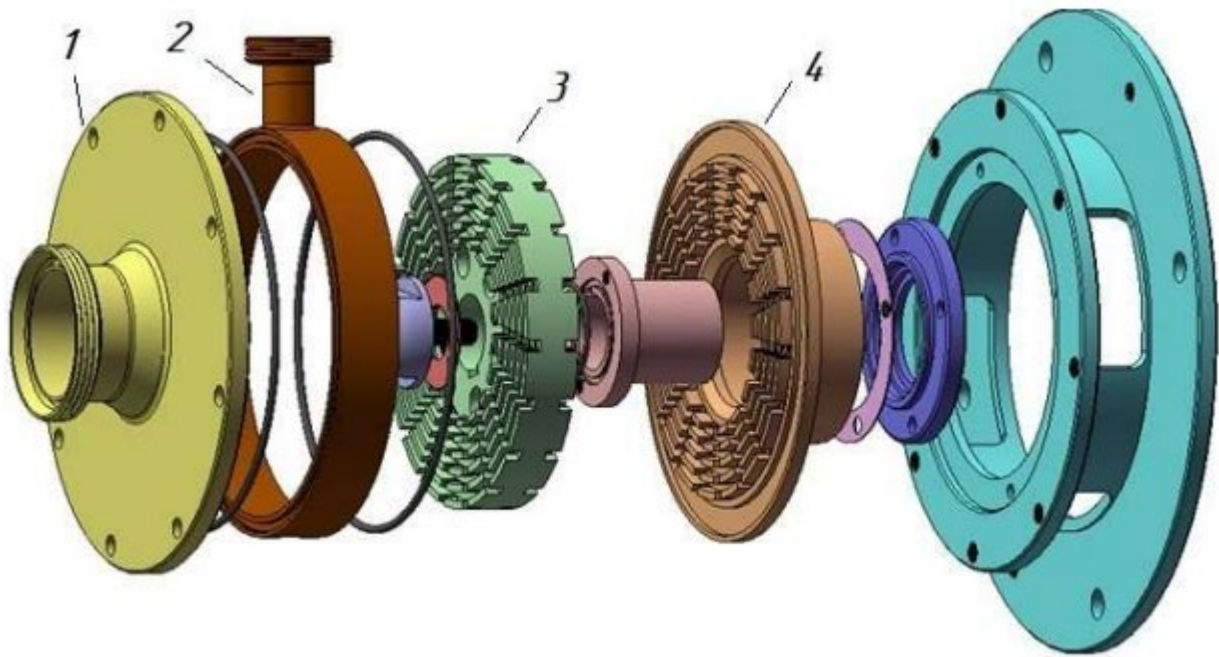


Рис. 1.13. Схема роторно-статорного диспергатора:
вхідний статор; 2) вихідний патрубок; 3) імпелер; 4) вихідний статор.

Принцип роботи цих апаратів заснований на створенні інтенсивних зсувних деформацій в оброблюваній рідині при її проходженні через вузький зазор між обертовим ротором та нерухомим статором. Продукт подається в центральну частину робочої камери та під дією відцентрових сил, що виникають при обертанні ротора, рухається радіально назовні через робочий зазор. При цьому виникають величезні градієнти швидкості, які створюють зсувні напруження, що призводять до деформації та розриву крапель дисперсної фази. Додатковий ефект диспергування досягається завдяки турбулентності потоку, ударним взаємодіям частинок з елементами ротора та статора, а також кавітації, що виникає в зонах локального зниження тиску.

Класичний колоїдний млин має конічну конструкцію, де ротор та статор виконані у вигляді конусів, встановлених з малим зазором один відносно одного. Ротор кріпиться на валу, що обертається з високою швидкістю, зазвичай від трьох до десяти тисяч обертів за хвилину. Статор жорстко закріплений в корпусі апарату. Зазор між робочими поверхнями може регулюватися в широких межах,

зазвичай від десятих часток міліметра до декількох міліметрів, що дозволяє адаптувати апарат для роботи з різними продуктами.

Робочі поверхні ротора та статора можуть бути гладкими або мати різноманітне профілювання. Гладкі поверхні використовуються для емульсій та суспензій, де необхідно м'яке диспергування без надмірного механічного руйнування частинок. Профільовані поверхні з кільцевими канавками, радіальними або спіральними нарізками забезпечують більш інтенсивне подрібнення та краще підходять для грубодисперсних систем або продуктів з включенням твердих частинок. Глибина та форма профілю підбираються залежно від характеристик оброблюваного продукту.

Роторно-статорні диспергатори мають більш різноманітні конструктивні варіанти. Найпростіший тип представляє собою дисковий ротор з радіальними або тангенціальними отворами, що обертається всередині статора з відповідними отворами. При проходженні продукту через отвори виникають інтенсивні зсувні деформації та турбулентні пульсації. Більш складні конструкції включають кілька концентричних рядів отворів або щілин, що забезпечує багатоступеневу обробку продукту при одному проході через апарат.

Зубчасті роторно-статорні диспергатори мають робочі елементи у вигляді зубчастих вінців. Ротор та статор обладнані співвісними рядами зубців, між якими утворюються вузькі проміжки. При обертанні ротора продукт багаторазово проходить через ці проміжки, піддаючись інтенсивним зсувним та ударним навантаженням. Кількість рядів зубців може досягати п'яти-семи, що забезпечує дуже ефективне диспергування. Конструкція зубців може бути різною - від простих радіальних штирів до складних профільованих елементів.

Продуктивність колоїдних млинів та роторно-статорних диспергаторів визначається їх розміром, швидкістю обертання ротора, конструкцією робочих елементів та властивостями оброблюваного продукту. Лабораторні моделі мають продуктивність від декількох літрів до ста літрів на годину та використовуються для розробки рецептур та дослідницьких робіт. Промислові апарати забезпечують

продуктивність від декількох сотень літрів до двадцяти тисяч літрів на годину для рідких продуктів та від однієї до п'яти тонн на годину для більш в'язких систем.

Швидкість обертання ротора є критичним параметром, що визначає інтенсивність обробки. Для більшості застосувань використовуються швидкості від трьох до десяти тисяч обертів за хвилину. Вища швидкість забезпечує більш тонке диспергування, але призводить до підвищеного нагрівання продукту та зносу робочих елементів. Багато сучасних моделей обладнуються частотними перетворювачами, які дозволяють плавно регулювати швидкість обертання в широких межах та оптимізувати режим роботи для конкретного продукту.

Нагрівання продукту при роботі колоїдних млинів та диспергаторів є неминучим наслідком перетворення механічної енергії на тепло. Інтенсивність нагрівання залежить від потужності апарату, в'язкості продукту та продуктивності. Підвищення температури може становити від п'яти до п'ятнадцяти градусів Цельсія за один прохід через апарат. Для термочутливих продуктів передбачається охолодження, яке може здійснюватися декількома способами.

Планетарні мішалки представляють собою обладнання, яке широко використовується в кондитерській та хлібопекарській промисловості, а також при виробництві соусів, паст та інших харчових продуктів, де необхідне інтенсивне перемішування в'язких мас з можливістю аерації. Назва "планетарні" походить від характеру руху робочих органів, який нагадує рух планет навколо Сонця - мішалка обертається навколо своєї осі і одночасно рухається по коловій або складнішій траєкторії всередині апарату.

Конструктивно планетарна мішалка складається з стаціонарної чаші, в якій знаходиться продукт, та однієї або декількох мішалок, закріплених на спеціальному кронштейні. Привідний механізм забезпечує обертання кронштейна навколо центральної осі чаші, при цьому через систему зубчастих передач або пасів забезпечується одночасне обертання кожної мішалки навколо власної осі. Співвідношення швидкостей обертання кронштейна та мішалок

підбирається таким чином, щоб забезпечити максимальне захоплення всього об'єму продукту без утворення застійних зон.

Траєкторія руху робочого органу в планетарній мішалці спроектована так, що за декілька обертів кронштейна мішалка проходить практично через весь об'єм чаші, забезпечуючи рівномірне перемішування. Це особливо важливо при роботі з в'язкими продуктами, де звичайні мішалки з простим обертальним рухом залишають непромішані зони біля стінок та дна апарату. Зазор між робочими елементами мішалки та стінками чаші підтримується мінімальним, зазвичай від декількох міліметрів до одного-двох сантиметрів, що забезпечує ефективне знімання продукту зі стінок.



Рис. 1.14. Система для змішування-гомогенізації HTJS-120MG

Планетарні мішалки можуть обладнуватися різними типами робочих органів, які підбираються залежно від технологічної операції. Віночні мішалки використовуються для збивання вершків, яєчних білків, приготування бісквітного тіста та інших операцій, де необхідна інтенсивна аерація продукту. Конструкція віночка забезпечує захоплення повітря та його диспергування в продукті у вигляді дрібних бульбашок. Матеріалом для виготовлення віночків зазвичай служить

нержавіюча сталь у вигляді тонких дротів, з'єднаних в характерну спіралеподібну структуру.



Рис. 1.15. Планетарна мішалка-диспергатор

Лопатеві мішалки з плоскими або злегка вигнутими лопатями застосовуються для перемішування в'язких мас - густого тіста, паст, соусів. Форма лопатей може бути різноманітною - від простих прямокутних пластин до складних профільованих елементів. Деякі конструкції обладнуються скребками з еластичних матеріалів, які ковзають по стінках чаші, запобігаючи налипанню продукту та забезпечуючи його повне залучення в процес перемішування.



Рис. 1.16. Лопатева мішалка

Гакоподібні мішалки призначені для замішування густого дріжджового тіста та інших продуктів, що мають пластичну або еластичну консистенцію. Форма гака забезпечує розтягування та складання тіста, що необхідно для розвитку клейковини. Міцна конструкція дозволяє витримувати значні навантаження при роботі з густими масами.

Потужність планетарних мішалок коливається в широких межах залежно від об'єму чаші та призначення. Настільні моделі для кафе та ресторанів мають потужність від п'ятисот ват до полутора кіловат і об'єм чаші від п'яти до двадцяти літрів. Підлогові промислові мішалки можуть мати потужність від трьох до

п'ятнадцяти кіловат і об'єм чаші від сорока до трьохсот літрів. Для великих хлібо заводів та кондитерських фабрик випускаються потужні агрегати з об'ємом чаші до п'ятисот літрів та потужністю понад двадцять кіловат.

Швидкість обертання мішалок зазвичай регулюється ступінчасто або плавно. Типовий діапазон швидкостей становить від тридцяти до триста обертів за хвилину для планетарного кронштейна. Для різних технологічних операцій використовуються різні швидкості - повільні для замішування густого тіста, середні для приготування кремів та емульсій, швидкі для збивання та аерації. Сучасні моделі обладнуються електронними системами керування, які дозволяють програмувати складні цикли з автоматичною зміною швидкості та напрямку обертання.

Чаші планетарних мішалок виготовляються з харчової нержавіючої сталі і можуть мати різну конструкцію. Найпростіші моделі мають знімні чаші, які встановлюються на платформу і фіксуються механічним затискачем. Більш зручні конструкції використовують систему швидкого підйому чаші - за допомогою важеля або електропривода чаша піднімається до робочого положення і автоматично фіксується. Для роботи з продуктами, що вимагають температурного контролю, застосовуються чаші з подвійними стінками, через які може циркулювати гаряча вода або пара для нагрівання, або холодна вода для охолодження.

Системи безпеки планетарних мішалок включають захисні кожухи, які закривають робочу зону під час роботи апарату. Електричні блокування запобігають включенню двигуна при піднятому кожусі. Кнопки аварійної зупинки дозволяють негайно зупинити обладнання в разі необхідності. Системи захисту двигуна від перевантаження автоматично вимикають привід при перевищенні допустимого моменту, що запобігає пошкодженню обладнання при роботі з занадто густими продуктами.

Лопатеві мішалки простої конструкції також знаходять широке застосування для приготування емульсій, хоча їх ефективність поступається спеціалізованому обладнанню. Вони використовуються переважно для

попереднього змішування компонентів перед подачею в гомогенізатор або диспергатор, а також для підтримання емульсії в гомогенному стані під час зберігання в технологічних ємностях.

Рамні мішалки мають робочий орган у вигляді рами прямокутної або іншої форми, яка при обертанні захоплює значний об'єм рідини. Вони ефективні для перемішування рідких та середньов'язких продуктів у великих ємностях. Якірні мішалки повторюють за формою контур дна та стінок апарату, підтримуючи малий зазор з поверхнями. Такі мішалки запобігають осіданню частинок та налипанню продукту на стінки, що особливо важливо при роботі з емульсіями, схильними до розшарування.

Пропелерні та турбінні мішалки створюють інтенсивні осьові або радіальні потоки в рідині, забезпечуючи добре перемішування великих об'ємів. Хоча самі по собі вони не створюють достатніх зсувних напружень для ефективного емульгування, в комбінації з додаванням емульгаторів та при тривалому перемішуванні можуть використовуватися для приготування грубих емульсій. Швидкохідні дисперсійні мішалки з зубчастим диском створюють більш інтенсивні зсувні деформації і здатні готувати емульсії середньої дисперсності.



Рис. 1.17. Статичні змішувачі Statiflo

Статичні змішувачі представляють собою унікальний клас обладнання, де перемішування досягається без використання рухомих частин виключно за

рахунок спеціальної геометрії внутрішніх елементів. Хоча статичні змішувачі не забезпечують такого ступеня диспергування як високонапірні гомогенізатори або роторно-статорні диспергатори, вони знаходять важливі застосування в харчовій промисловості завдяки своїй простоті, надійності та економічності.

Принцип роботи статичного змішувача заснований на поділенні потоку на декілька дрібніших потоків, їх обертанні, зміщенні та рекомбінації. Цей процес повторюється багаторазово при проходженні продукту через послідовність внутрішніх елементів. Кожен елемент розділяє потік на дві або більше частин, закручує їх в різних напрямках і знову об'єднує. Після проходження через достатню кількість елементів досягається високий ступінь гомогенності суміші.

Найпоширенішою конструкцією є змішувачі з геліцидальними елементами. Кожен елемент являє собою пластину, скручену по гвинтовій лінії на сто вісімдесят градусів. Послідовні елементи встановлені перпендикулярно один до одного, що забезпечує складну траєкторію руху потоку. Кількість елементів підбирається залежно від необхідного ступеня змішування та може становити від десяти до сорока і більше. Матеріалом для виготовлення елементів служить харчова нержавіюча сталь або термостійкі полімери для застосувань з невисокими температурами.

Альтернативна конструкція використовує елементи у вигляді перфорованих пластин, встановлених під кутом до напрямку потоку. При проходженні через отвори в пластинах потік розділяється на множину струменів, які потім перемішуються в об'ємі між пластинами. Така конструкція створює більш інтенсивну турбулізацію потоку, але характеризується вищим гідравлічним опором.

Статичні змішувачі з Х-подібними або трубчастими елементами мають внутрішні перегородки складної форми, які створюють вихрові потоки та забезпечують радіальне перемішування. Різноманітні геометричні конфігурації елементів дозволяють оптимізувати змішувач для конкретних умов - в'язкості продукту, співвідношення змішуваних компонентів, допустимого перепаду тиску.

Переваги статичних змішувачів включають відсутність рухомих частин, що виключає необхідність в ущільненнях, підшипниках та складних приводах. Це забезпечує високу надійність, мінімальні вимоги до технічного обслуговування та тривалий термін служби. Відсутність застійних зон та простота очищення роблять статичні змішувачі привабливими з точки зору гігієни. Компактні розміри та можливість інтеграції безпосередньо в трубопроводи спрощують компонування технологічних ліній.

Недоліками є відносно великий гідравлічний опір, що вимагає наявності насосу достатньої потужності для прокачування продукту, та обмежена ефективність диспергування. Статичні змішувачі не здатні створювати достатні зсувні напруження для тонкого емульгування, тому їх застосовують переважно для попереднього змішування компонентів перед подачею в гомогенізатор, для рекомбінації потоків після багатоструминного дозування, для підтримання стабільності емульсії під час транспортування або як допоміжний елемент в комбінованих системах.

В харчовій промисловості статичні змішувачі використовуються при виробництві напоїв для змішування концентратів з водою, при виробництві молочних продуктів для гомогенізації після додавання стабілізаторів, в лініях розливу для змішування продукту з інгредієнтами перед фасуванням. Вони також застосовуються в системах безперервного виробництва морозива, де забезпечують рівномірний розподіл повітря в суміші перед заморожуванням.

1.3. Аналіз та короткий опис об'єкту дослідження

Установка А2-ШУИ призначена для приготування емульсій при виробництві борошняних кондитерських виробів.

Застосовується самостійно або в складі ліній на кондитерських фабриках і в цехах з виробництва борошняних кондитерських виробів.

Складається з ємності, встановленої на рамі, диспергатора, пульта управління з вбудованим реле часу.

Основний робочий елемент – диспергатор включає в себе корпус з робочою камерою, в якій по колу розташовані рециркуляційні патрубки зі спеціальними насадками. У корпусі на вертикальному валу закріплений шнек, він приводиться в рух електродвигуном. Для підтримки температури ємність має водяну сорочку. У пульті управління розташована комутаційна, пускова і захисна апаратура.

Перед включенням установки компоненти завантажуються в наступній послідовності: вода, молоко, сироп, сода, меланж. Після обробки суміші протягом 1-2 хвилин завантажуються цукровий пісок, через 5-8 хвилин після нього жир і перемішування триває 8-10 хвилин. Отримана емульсія має дрібнодисперсну структуру, стабільні технологічні параметри, тривалий час не розшаровується.



Рис. 1.18. Емульсор А2-ШУИ

Технічна характеристика

Продуктивність, кг/год	600
Частота обертання робочого органу, 1/с	45,0-50,0
Встановлена потужність, кВт	5,5
Габаритні розміри, мм:	

Довжина	985
Ширина	960
Висота	1800
Маса, кг	400
Обслуговуючий персонал, осіб.	1
Час приготування емульсії залежно від складу рецептури та вологості, хв.	15-20
Вологість емульсії, що готується, залежно від наявності цукру, що входить до складу рецептури емульсії, %	19-22
Місткість бака, м куб.	0,35

1.4. Мета та задачі кваліфікаційної роботи.

Завданням на дипломну роботу передбачається удосконалення конструкції емульсора марки А2-ШУИ за результатами комп'ютерного 3d моделювання.

При цьому виконуються наступні інженерно-технічні задачі:

- вивчення актуального стану предмета дослідження, визначення і обґрунтування пріоритетних напрямів наукової роботи;
- формування комплексу методів та методик для дослідницької роботи;
- здійснення технологічних і конструктивних обчислень для емульсора;
- побудова просторової моделі емульсора;
- формування розрахункової моделі для числових досліджень;
- визначення параметрів моделювання та проведення відповідних розрахунків;
- аналіз отриманих результатів моделювання та узагальнення висновків;
- розробка комплексу заходів з охорони праці й техніки безпеки;
- створення системи заходів безпеки в умовах надзвичайних ситуацій.

2. Вибір методів та методик досліджень

2.1. Обґрунтування вибору методу дослідження

Сучасне проектування та оптимізація процесів перемішування у хімічному обладнанні вимагає застосування точних та ефективних методів дослідження гідродинамічних процесів. Традиційні експериментальні методи, хоча і забезпечують високу достовірність результатів, характеризуються значними фінансовими витратами, тривалістю виконання та складністю реалізації, особливо при дослідженні широкого діапазону режимних параметрів. Крім того, експериментальні дослідження обмежені у можливостях детального вивчення локальних характеристик потоку у важкодоступних зонах апарату.

У зв'язку з цим для дослідження емульсора марки А2-ШУИ було обрано метод комп'ютерного моделювання на основі обчислювальної гідродинаміки. Цей підхід дозволяє отримати детальну картину розподілу швидкостей, тисків, температур та інших параметрів у всьому об'ємі робочої зони мішалки без необхідності проведення дорогих і трудомістких експериментальних досліджень. Метод забезпечує можливість швидкого варіювання геометричних параметрів конструкції та режимних характеристик роботи обладнання, що є критично важливим для порівняльного аналізу різних конструктивних рішень.

2.2. Програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation

Для реалізації досліджень [11-16] було обрано програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation, який є повністю інтегрованим інструментом обчислювальної гідродинаміки у середовищі тривимірного проектування SolidWorks. Цей програмний продукт дозволяє розв'язувати систему рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини з урахуванням турбулентності, теплообміну та інших супутніх фізичних явищ.

Основними перевагами обраного програмного комплексу є повна інтеграція з системою тривимірного моделювання, що забезпечує зручність роботи з

геометрією та можливість швидкого внесення конструктивних змін, автоматизоване генерування обчислювальної сітки з адаптивним згущенням у зонах високих градієнтів параметрів, наявність розвинених моделей турбулентності для коректного опису складних течій, можливість моделювання обертових елементів з урахуванням їх взаємодії з рідиною, а також зручні інструменти візуалізації та аналізу результатів.

Програмний комплекс базується на методі скінченних об'ємів, який забезпечує консервативність розв'язку та добре підходить для задач з обертовими елементами. Для моделювання турбулентності використовується модель, що адекватно описує як пристінні явища, так і вільну турбулентну течію. Особливістю програми є можливість задання обертових систем відліку, що критично важливо для коректного моделювання роботи мішалок.

2.3. Методика створення геометричної моделі

Геометричне моделювання емульсора виконувалось у середовищі SolidWorks з дотриманням реальних конструктивних розмірів обладнання. Модель включала корпус апарату з плоским дном, центральний вал з робочим органом та систему кріплення. Особлива увага приділялась точному відтворенню геометрії лопатей, оскільки від їх форми та розташування критично залежать характеристики потоку.

Для моделі з відкритою крильчаткою створювалась конструкція, де лопаті жорстко закріплені на втулці валу та виступають у рідину без додаткових обмежувальних елементів. Профіль лопатей формувався з урахуванням необхідності забезпечення ефективного захоплення та відкидання рідини. Для моделі із закритою крильчаткою додатково моделювались верхній та нижній диски, що охоплюють лопаті та формують міжлопатеві канали замкнутого типу.

При формуванні симуляції умовно задавалось тіло обертання, яке включало вал та робочий орган. Цей елемент є складовою збірки, і саме для нього

вказувалась частота обертання у відповідних налаштуваннях симуляції. Така організація моделі дозволяла програмному комплексу коректно враховувати обертання крильчатки та її взаємодію з навколишнім рідким середовищем.

2.4. Досліджувані параметри

Для комплексної оцінки гідродинамічних та термоакустичних характеристик емульсора було визначено вісім ключових параметрів, що підлягають аналізу. Абсолютний тиск характеризує розподіл статичного та динамічного тиску у системі, дозволяє виявити зони потенційної кавітації та оцінити силові навантаження на конструктивні елементи. Температура відображає процеси дисипації механічної енергії та теплообміну, що важливо для оцінки енергетичної ефективності та термічної стабільності продукту.

Абсолютна швидкість показує розподіл кінетичної енергії потоку, характеризує інтенсивність перемішування та дозволяє оцінити ефективність передачі енергії від обертового органу до рідини. Швидкість у обертовій системі відліку виявляє відносний рух рідини щодо лопатей, що дозволяє оцінити ефективність захоплення рідини крильчаткою та ступінь проковзування.

Вихровість характеризує інтенсивність локального обертання елементів рідини та є показником турбулентності потоку, що безпосередньо впливає на ефективність емульгування. Відносний тиск дозволяє виключити гідростатичну складову та виявити динамічні ефекти, пов'язані з обертанням. Рівень акустичної потужності характеризує шумове випромінювання системи, що важливо як з точки зору гігієни праці, так і для діагностики режимів роботи обладнання.

Для кожного з цих параметрів визначались мінімальні та максимальні значення у розрахунковій області, що дозволяло оцінити діапазон зміни параметрів та виявити екстремальні зони. Додатково аналізувався просторовий розподіл параметрів за допомогою засобів візуалізації, що давало можливість зрозуміти фізичну картину процесів.

2.5. Методика проведення розрахунків

Розрахунки виконувались послідовно для кожної з двох геометричних моделей при п'яти значеннях частоти обертання. Для кожного режиму задавались відповідні параметри обертання робочого органу, після чого запускався обчислювальний процес. Критерієм завершення розрахунку було досягнення заданого рівня збіжності за всіма контрольованими параметрами або досягнення стаціонарного режиму, при якому інтегральні характеристики потоку переставали змінюватись у часі.

У процесі розрахунку програма автоматично контролювала дотримання законів збереження маси, імпульсу та енергії, що забезпечувало фізичну коректність результатів. Після завершення розрахунку проводилась постобробка результатів, що включала побудову полів розподілу параметрів у різних перерізах, визначення інтегральних характеристик потоку та екстремальних значень параметрів, побудову графіків залежностей параметрів від координат, а також створення тривимірних візуалізацій течії для якісного аналізу структури потоку.

Усі отримані дані систематизувались у табличній формі для подальшого статистичного аналізу та побудови емпіричних залежностей. Це дозволило не лише порівняти дві конструктивні схеми між собою, але й виявити закономірності зміни параметрів при варіюванні частоти обертання.

2.6. Методика обробки та аналізу результатів

Отримані чисельні дані підлягали комплексному аналізу з використанням методів математичної статистики та регресійного аналізу. Для кожного досліджуваного параметра будувались графічні залежності від частоти обертання, що дозволяло візуально оцінити характер зміни параметрів та виявити можливі нелінійності.

Для встановлення кількісних залежностей застосовувався метод найменших квадратів, що дозволив апроксимувати експериментальні точки поліноміальними функціями другого порядку. Вибір квадратичної залежності обґрунтований фізичними законами гідродинаміки, згідно з якими динамічний тиск пропорційний квадрату швидкості, а швидкість лінійно залежить від частоти обертання. Якість апроксимації оцінювалась за коефіцієнтом детермінації, високі значення якого підтверджували адекватність обраної форми залежності.

Порівняльний аналіз двох конструктивних схем проводився як за абсолютними значеннями параметрів, так і за характером їх зміни при варіюванні режиму роботи. Особлива увага приділялась виявленню критичних режимів, при яких спостерігається якісна зміна характеру течії, різкі стрибки параметрів або виникнення небезпечних явищ типу кавітації.

Результати аналізу узагальнювались у вигляді висновків про переваги та недоліки кожної конструктивної схеми, рекомендацій щодо оптимальних діапазонів експлуатації та практичних застережень щодо обмежень застосування. Така методика забезпечила комплексне дослідження емульсора та отримання науково обґрунтованих рекомендацій для практичного застосування.

3. Розроблення нових проектно-технологічних і технічних вирішень

вдосконалення об'єкта дослідження.

3.1. Заходи з модернізації емульсора

Для технологічних процесів, що потребують м'якого режиму емульгування при помірних швидкостях обертання, рекомендується застосування відкритої крильчатки. Така конструкція забезпечує роботу в оптимальному діапазоні 2500-2750 об/хв з мінімальним ризиком кавітації, що подовжує термін служби робочих органів. Відкрита крильчатка характеризується нижчими силовими навантаженнями, що дозволяє використовувати менш міцні та дорогі матеріали, а також спрощує процес виготовлення та обслуговування обладнання. При цьому забезпечується практично безшумна робота при низьких швидкостях, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам виробництва.

Проте для процесів, що вимагають високої інтенсивності перемішування та масообміну, доцільним є застосування закритої крильчатки. Така конструкція забезпечує значно вищу гідравлічну ефективність, створюючи більші швидкості потоку та перепади тиску, що підвищує якість емульгування та продуктивність процесу на 25-30%. Закрита крильчатка демонструє стабільнішу поведінку робочих параметрів у широкому діапазоні швидкостей обертання та нижчий рівень шуму при високих частотах.

Додатковими заходами модернізації є оптимізація геометричних параметрів лопатей крильчатки, удосконалення системи підведення та відведення продукту, а також впровадження автоматизованої системи контролю швидкості обертання ротора.

3.2. Вибір та розрахунок основних параметрів ротора

Виконаємо розрахунки для ротора емульгуючої установки [17-19]. Згідно до обраного типу перемішуючого пристрою, необхідно визначити його геометричні параметри та потужність, що буде споживатись в усталеному режимі.

Обираємо турбінну шестилопатеву мішалку

Геометричні розміри мішалки [1 с.525]

$$H/d = 3; D/d_m = 3 \dots 5; h/d_m = 0,33$$

Діаметр мішалки:

$$d_m = D_B / 4 = 0,9 / 4 = 0,225 \text{ м},$$

приймаємо $d_m = 0,2 \text{ м}$.

Ширина мішалки:

$$b = 0,15d_m.$$

$$b = 0,15 \cdot 0,3 = 0,03 \text{ м}.$$

Рекомендоване число обертів мішалки 3000 об/хв.

Число обертів мішалки за секунду:

$$n = \frac{3000}{60} = 50 \frac{\text{об}}{\text{с}}$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho n d_m^2}{\mu},$$

де $\mu = 2,72 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – в'язкість розчину.

$$Re = \frac{1000 \cdot 50 \cdot 0,2^2}{2,72 \cdot 10^{-3}} = 735294,$$

Критерій потужності визначаємо за графіком (рис.31.3) при

$$Re = 735\,294, K \approx 0,12. [2 \text{ с. } 708]$$

Потужність, що споживається мішалкою в сталому режимі:

$$N_m = K \rho n^3 d^5$$

$$N_m = 0,12 \cdot 1000 \cdot 50^3 \cdot 0,2^5 = 4800 \text{ Вт}.$$

Згідно з розрахунками прийемо привод вертикальний з однією проміжною опорою валу.

Номінальна потужність: $N = 5,5 \text{ кВт}$.

3.3 Розрахунок глибини воронки

Мета: Розрахувати глибину воронки та перевірити чи вона не дістає до перемішуючого пристрою.

$$h_b = \frac{kB(\psi_1)n^2d_M^2}{2g},$$

де B – параметр глибини воронки знаходиться з графіка

ψ_1 - параметр розподілення швидкості, що визначається за формулою:

$$\psi_1 = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 + c_4 \cdot x^4,$$

де c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 – коефіцієнти апроксимуючого полінома, що залежить від типу мішалки та симплекса геометричної подібності $\Gamma_D = 3,0$. [5 с.31]

$$x = \ln E;$$

$$E = \frac{\varphi}{\xi_M \cdot z_M \cdot Re_M^{0,25}},$$

де E – параметр гідравлічного опору;

z_M – число мішалок на валу

ξ_M - коефіцієнт гідравлічного опору [5 с.34]

$$E = \frac{0,7}{4,2 \cdot 1,735294^{0,25}} = 5,7 \cdot 10^{-3},$$

$$x = \ln 5,7 \cdot 10^{-3} = -5,17$$

$$\psi_1 = 0,9297 + 0,5466 \cdot (-5,17) + 4,888 \cdot (-5,17)^2 + 1,16 \cdot (-5,17)^3 + 1,595 \cdot (-5,17)^4 = 1,1,$$

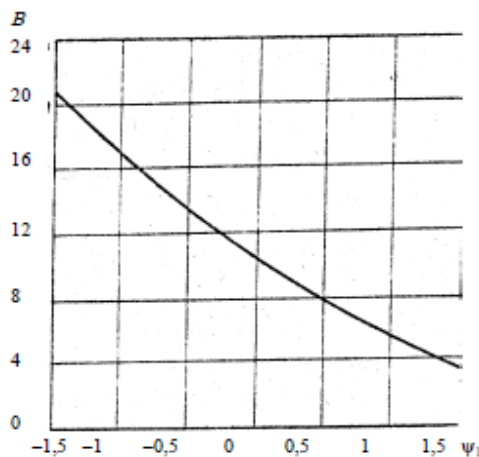


Рис. 3.1. Графік залежності параметра глибини B від параметра колової швидкості ψ_1

Тоді глибина воронки:

$$h_b = \frac{0.01 \cdot 5 \cdot 50^2 \cdot 0.2^2}{2 \cdot 9.81} = 0.25 \text{ м.}$$

$$h_p = h_z - h_b = 0.5 - 0.25 = 0.25 \text{ м,}$$

де h_p – відстань від воронки до мішалки;

$h_z = 0.5 \text{ м}$ – висота середовища в апараті;

Отже воронка не дістає до самого перемішуючого пристрою.

3.4. Розрахунок турбінного перемішуючого пристрою

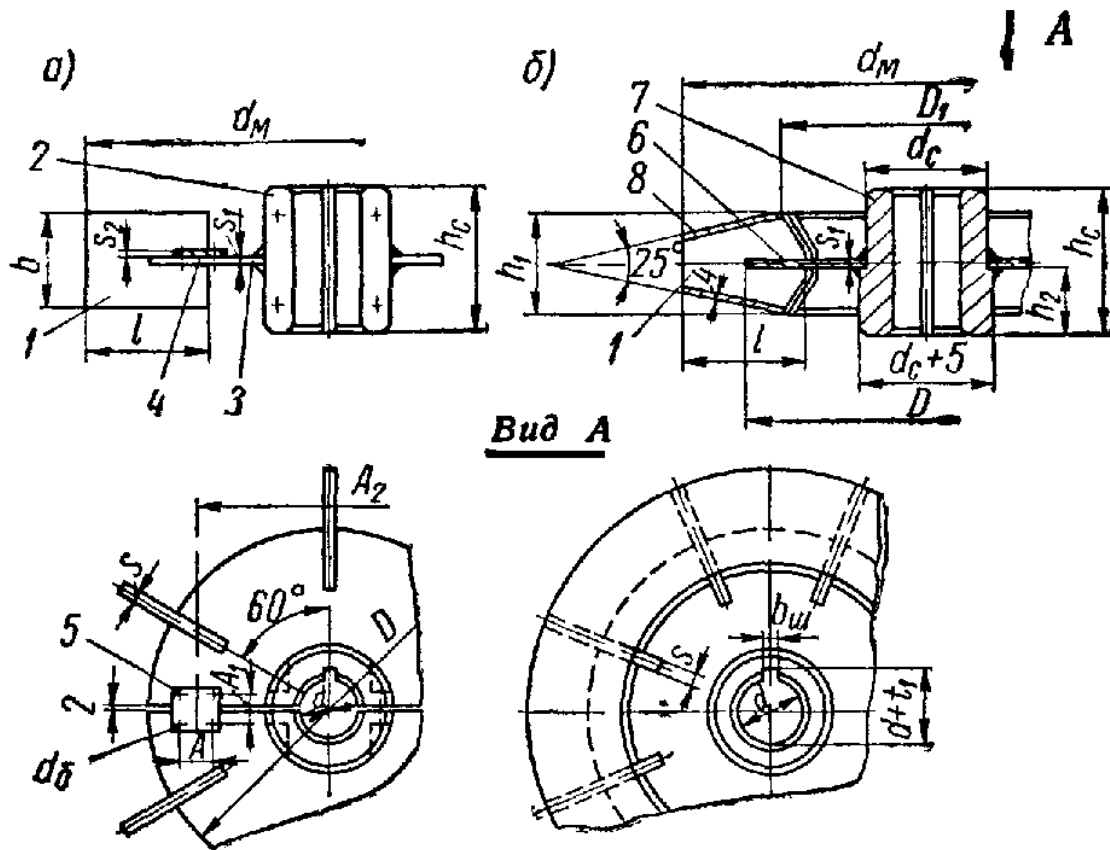


Рис. 3.2. Конструкція сталевих зварних турбінних перемішуючих пристроїв (тип 5 та 6): а тип 5 відкриті; б тип 6 закритті;

1 – лопать; 2 – ступиця з двох частин; 3 – диск з двох половин; 4 – планка; 5 – болт з гайками та шайбами; 6 – диск; 7 – ступиця; 8 – конус

Виконаємо розрахунок геометричних розмірів пластин перемішуючого пристрою.

При обертанні пластини в середовищі на неї діє сила опору середовища, що викликає момент. Який в свою чергу має протилежний напрямок до напрямку обертання вала.

Значення x визначаємо за формулою:

$$x = 0,75 \frac{(0,5d_m)^4 - (0,5d_m - l)^4}{(0,5d_m)^3 - (0,5d_m - l)^3},$$

де $l = 0,25d_m = 0,25 \cdot 0,2 = 0,05$ м.

$$x = 0,75 \cdot \frac{(0,5 \cdot 0,2)^4 - (0,5 \cdot 0,2 - 0,025)^4}{(0,5 \cdot 0,2)^3 - (0,5 \cdot 0,2 - 0,025)^3} = 0,088 \text{ м}$$

Розрахунковий згинаючий момент лопатки в перерізі по діаметру диска визначаємо за формулою:

$$M'_u = \frac{0,027(x - 0,5D)}{x} \cdot \frac{N_m}{n},$$

де $D = 0,75d_m = 0,75 \cdot 0,2 = 0,15$ м.

$$M'_u = \frac{0,027 \cdot (0,088 - 0,5 \cdot 0,15)}{0,088} \cdot \frac{4800}{50} = 0,38 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Розрахунковий момент опору лопатки при вигині в указаному перерізі визначається за формулою:

$$W' = \frac{M'_u}{\sigma_{3\Gamma}},$$

де $\sigma_{3\Gamma} = 150$ для сталі МН/м²

$$W' = \frac{0,38 \cdot 10^{-6}}{150} = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3,$$

Номінальна розрахункова товщина лопатки в тому ж перерізі:

$$s' = \sqrt{\frac{6W'}{b}}$$

де $b = 0,2d_m = 0,2 \cdot 0,2 = 0,04$ м

$$s' = \sqrt{\frac{6 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9}}{0,04}} = 6,1 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

З врахуванням двохсторонньої надбавки на корозію та округлення розмірів приймаємо: $s = 2$ мм .

3.5. Вибір муфти

Згідно з розрахунками та вибраним вище валом приймемо муфту поздовжньо-роз'ємну для вертикальних валів перемішуючих пристроїв.

Діаметр вала: $d = 28$ мм;

$D_{\phi} = 75$; $D_6 = 60$ мм; $D = 50$ мм;

$H = 100$ мм; $H_1 = 40$ мм;

$h = 15$; $d_6 = M8$;

$b_{ш} = 5$ мм; $32 + t_1 = 100,4$ мм;

Маса: 2,5 кг.

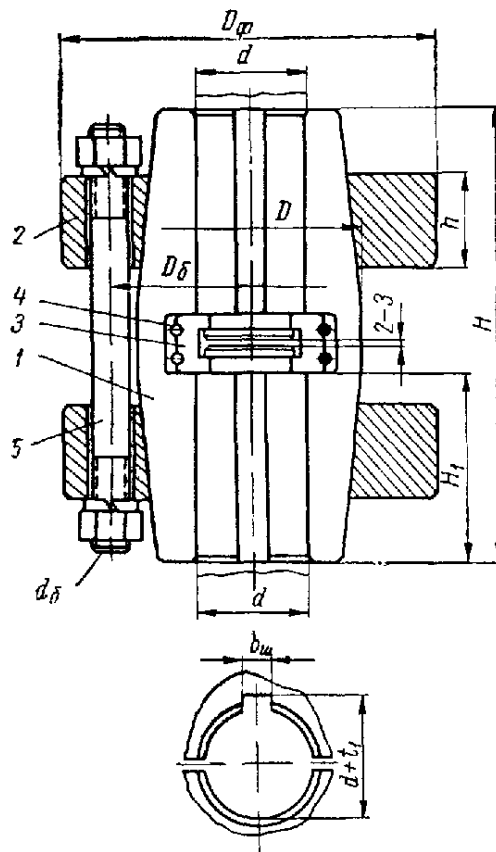


Рис. 3.3 Муфта поздовжньо-роз'ємна для вертикальних валів перемішуючих пристроїв.

1 – корпус (з двох частин); 2 – кільце (фланці); 3 – кільце розрізне; 4 – пружинні кільця; 5 – шпильки з гайками та шайбами.

3.6. Вибір та прийняття роз'ємного з'єднання на кінці валу

Для унеможливлення переміщення перемішуючого пристрою, на кінці валу нарізано різьбу M25 для встановлення шайби з гайкою.

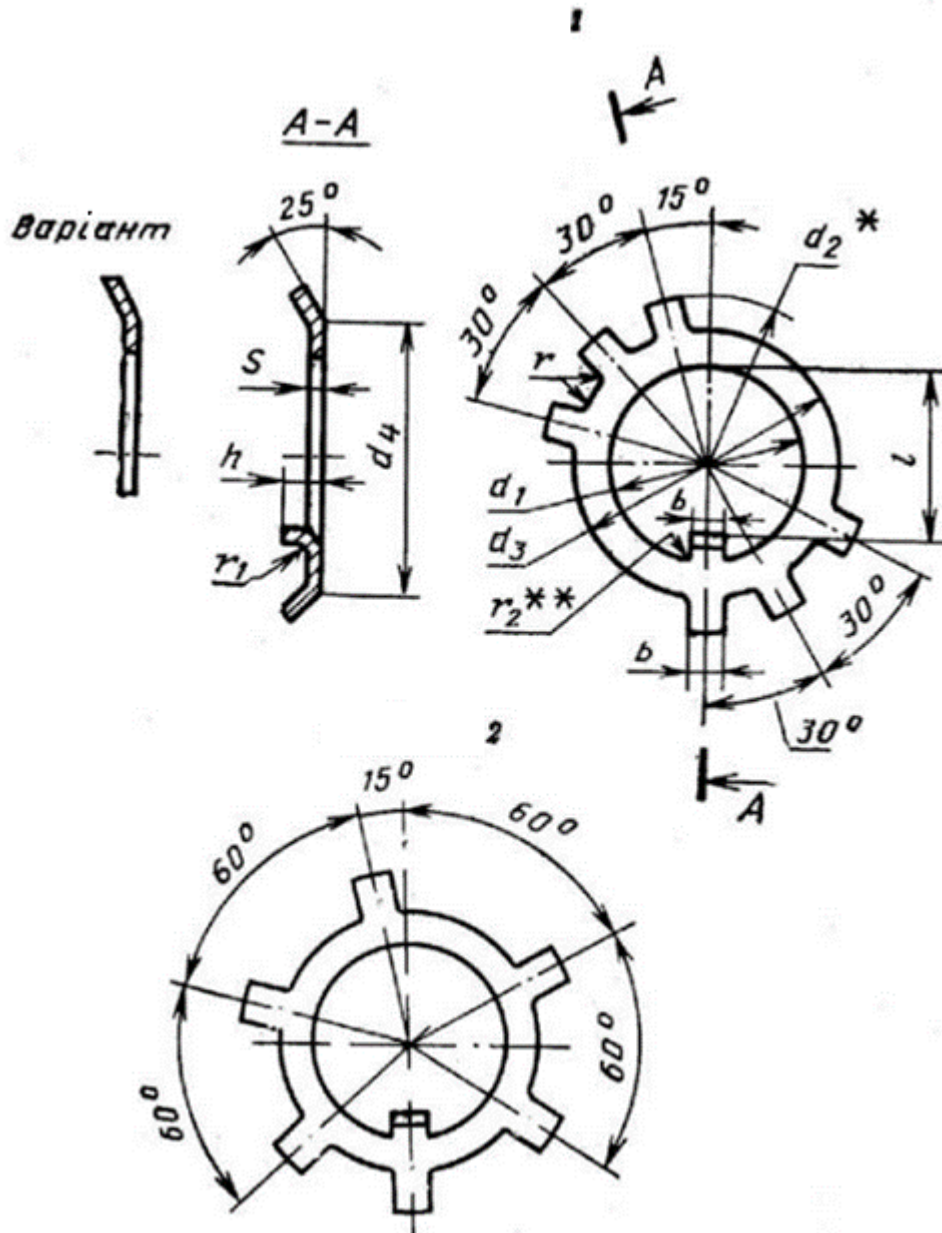


Рис. 3.4. Шайба стопорна багатолапова згідно з ГОСТ 11872-89

Приймаємо шайбу стопорну багатолапову згідно з ГОСТ 11872-89

Згідно з ГОСТ 11872-89, для вала з номінальним діаметром різьби М25 (зазвичай використовується разом із круглою шліцевою гайкою М25 за ГОСТ 11871-88) підбирається шайба з наступними характеристиками:

Шайби випускаються у двох типах: Л (легка) та Н (нормальна). Для М25 найчастіше використовується нормальний тип.

Геометричні параметри шайби

внутрішній діаметр $d_1 = 25,5$ (допуск $+0,52$) мм;

зовнішній діаметр (тіла) $d_2 = 42$ мм;

товщина шайби $S = 1,2$ мм;

ширина лапки $B = 5,0$ мм;

висота внутрішньої лапки $f = 4,0$ мм;

відстань за зовнішніми лапками $d_3 = 51$ мм.

Приймаємо гайку круглу шліцеву згідно з ГОСТ 11871-88

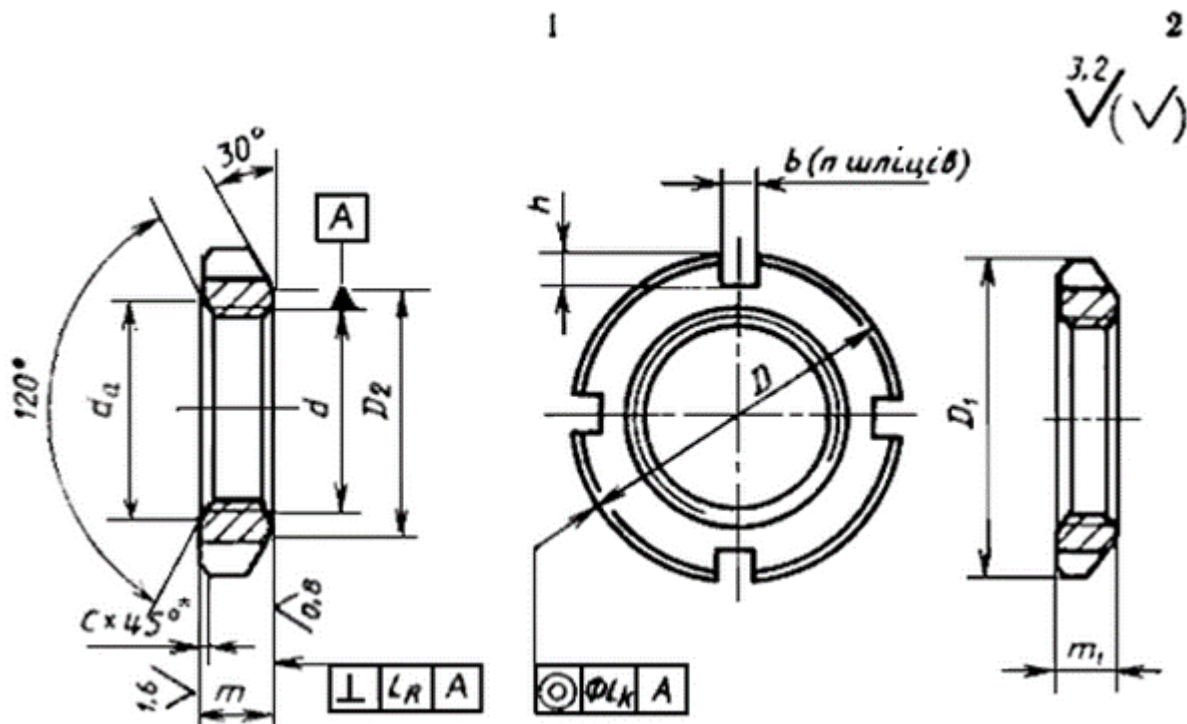


Рис. 3.5 Гайка кругла шліцева згідно з ГОСТ 11871-88

Для стопорної шайби М25 за ГОСТ 11872-89 підбирається кругла шліцьова гайка за ГОСТ 11871-88.

Ці два вироби працюють у парі: внутрішня лапка шайби фіксується у пазу вала, а одна із зовнішніх лапок відгинається у шліць гайки, запобігаючи її самовідгвинчуванню.

Основні параметри гайки М25 × 1,5 (ГОСТ 11871-88)

Конструктивні параметри:

номінальний діаметр різьби $D = M25$;

крок різьби $P\ 1,5$ мм (дрібний крок);

зовнішній діаметр гайки $D = 42$ мм;

висота гайки $M = 10$ мм;

ширина шліца (пазу) $B = 5$ мм;

глибина шліца $H = 2,5$ мм;

кількість шліців $n = 4$ мм.

3.7. Заходи з експлуатації емульсора А2-ШУИ

Емульсор А2-ШУИ призначений для приготування емульсій при виробництві борошняних кондитерських виробів та застосовується самостійно або у складі технологічних ліній на кондитерських фабриках. Обладнання має продуктивність 600 кг/год, встановлену потужність 5,5 кВт та обслуговується одним оператором.

Перед початком роботи [20, 21] обслуговуючий персонал повинен перевірити справність електричного обладнання та цілісність ізоляції проводів, оглянути робочі органи на наявність механічних пошкоджень, переконатися у надійності кріплення всіх з'єднань. Також необхідно перевірити чистоту бака місткістю 0,35 м³ та відсутність сторонніх предметів, провести пробний пуск без завантаження для перевірки обертання робочого органу з частотою 45,0-50,0 об/с.

При приготуванні емульсії необхідно дотримуватися технологічної послідовності. Спочатку завантажують рідкі компоненти, такі як вода, меланж та

молоко згідно з рецептурою. Після цього вмикають емульсор та встановлюють робочу частоту обертання. При працюючому обладнанні поступово додають жирові компоненти, зокрема маргарин або масло, потім малими порціями засипають цукор-пісок для запобігання утворення грудок. За необхідності додають інші сухі інгредієнти. Суміш емульгують протягом 15-20 хвилин залежно від складу рецептури та вологості, контролюючи при цьому вологість готової емульсії, яка повинна становити 19-22% залежно від наявності цукру в рецептурі.

Під час роботи оператор постійно контролює частоту обертання робочого органу, температуру емульсії, рівномірність емульгування, навантаження на електродвигун, а також відсутність сторонніх шумів, вібрацій та протікань. Температура емульсії не повинна перевищувати 40-45°C, а в готовому продукті не допускається наявність розшарування та грудок.

Технічне обслуговування емульсора проводиться регулярно. Щодня після кожного циклу виробництва необхідно очищати бак та робочі органи, мити всі контактуючі з продуктом поверхні гарячою водою з миючими засобами, оглядати стан ущільнень та перевіряти справність системи управління. Щотижня перевіряють кріплення робочого органу до валу, стан підшипникових вузлів, затяжку болтових з'єднань та заземлення електрообладнання. Щомісячне обслуговування включає змащування підшипникових вузлів, перевірку зносу робочих органів, контроль стану ущільнень валу та вимірювання опору ізоляції електродвигуна.

При експлуатації обладнання категорично забороняється працювати без огорожувальних пристроїв, засовувати руки в бак під час роботи, перевищувати номінальну місткість бака, залишати працюючий емульсор без нагляду, проводити ремонт при увімкненому обладнанні та експлуатувати його при несправному заземленні. Обслуговуючий персонал повинен пройти інструктаж з техніки безпеки, бути навченим роботі з даним обладнанням, використовувати засоби індивідуального захисту та знати розташування аварійної кнопки.

Після приготування емульсії обладнання вимикають, дочекаються повної зупинки робочого органу та вивантажують продукцію через розвантажувальний патрубок. Готову емульсію перевіряють на якість, після чого негайно направляють на подальшу переробку або зберігання при температурі 4-8°C. Не допускається зберігання емульсії в баці емульсора більше двох годин.

По закінченні роботи обладнання вимикають від електромережі, спорожнюють бак від залишків продукту, промивають всі контактуючі поверхні гарячою водою температурою 60-70°C з миючими засобами, проводять дезінфекцію та просушують елементи природним шляхом. Обов'язково проводять візуальний огляд на відсутність залишків продукту.

При виникненні несправностей їх усувають згідно з рекомендаціями виробника. Нерівномірне обертання робочого органу усувається перевіркою та затяжкою кріплень або заміною підшипників. При підвищеній вібрації необхідно відбалансувати робочий орган та перевірити всі кріплення. Якщо електродвигун не запускається, перевіряють наявність напруги та стан пускової апаратури. Погана якість емульсії може бути наслідком недостатнього часу емульгування або порушення технології, тому необхідно збільшити час обробки та дотримуватися правильної послідовності завантаження інгредієнтів. При протіканні через ущільнення проводять їх заміну.

Обслуговуючий персонал веде журнал обліку роботи обладнання, в якому фіксує дату та час роботи, кількість приготовленої емульсії, рецептуру, вологість продукції, час приготування кожної партії, виявлені несправності, проведені роботи з технічного обслуговування та ставить підпис відповідальної особи. Такий облік дозволяє контролювати ефективність роботи обладнання та своєчасно планувати профілактичні заходи.

4. Дослідження емульсора марки А2-ШУИ в SolidWorks Flow Simulation

4.1. Постановка задачі

Програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation дозволяє розв'язувати систему рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини з урахуванням турбулентності, теплообміну та інших супутніх фізичних явищ. Це дає можливість отримати детальну картину розподілу швидкостей, тисків, температур та інших параметрів у всьому об'ємі робочої зони мішалки без необхідності проведення дорогих і трудомістких експериментальних досліджень [22-27].

Об'єктом дослідження виступають дві конструктивні схеми турбіни емульсора марки А2-ШУИ. Перша модель представляє собою відкриту крильчатку, у якій лопаті безпосередньо контактують із робочим середовищем без додаткових обмежувальних елементів. Така конструкція забезпечує активне радіальне відкидання рідини від центру до периферії, створюючи інтенсивні циркуляційні контури у всьому об'ємі апарату. Друга модель оснащена закритою крильчаткою, де лопаті розміщені між двома дисками, що формують міжлопатеві канали з чітко визначеними межами. Така конструкція дозволяє більш ефективно передавати імпульс рідині, мінімізувати перетікання через торці лопатей та створювати більш спрямовані потоки.

Дослідження охоплює діапазон частот обертання від 2500 до 3500 об/хв з кроком 250 об/хв, що відповідає типовим робочим режимам середньошвидкісних турбінних мішалок промислового призначення. Цей діапазон є критичним з точки зору балансу між інтенсивністю перемішування та енергетичними витратами. При занадто низьких швидкостях обертання процес може бути недостатньо ефективним, а при надмірно високих виникають негативні явища: інтенсивна кавітація, надмірне піноутворення, високі енергетичні витрати та підвищений знос механічних вузлів.

Схема емульсора марки А2-ШУИ для CFD симуляції представлена на рис.4.1.

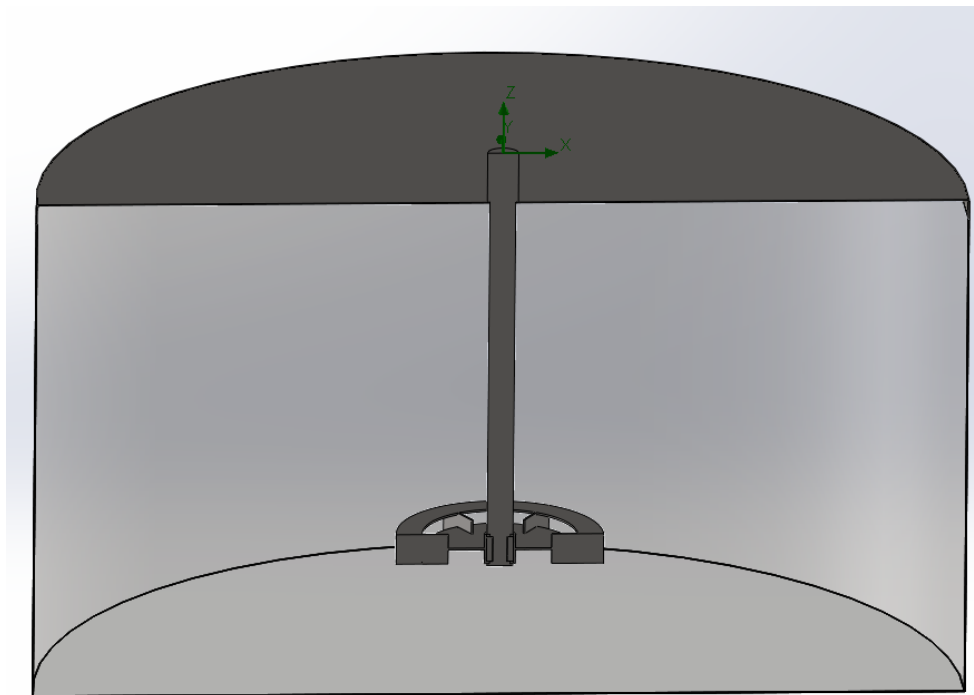


Рис. 4.1. Схема емульсора марки А2-ШУИ для CFD симуляції

Конструктивно досліджувані варіанти емульсора відрізняються формою робочого органу (турбінки) (рис.4.2 (модель 1), 4.3. (модель 2). Конструкції відрізняються наявністю двох дисків (верхнього і нижнього).

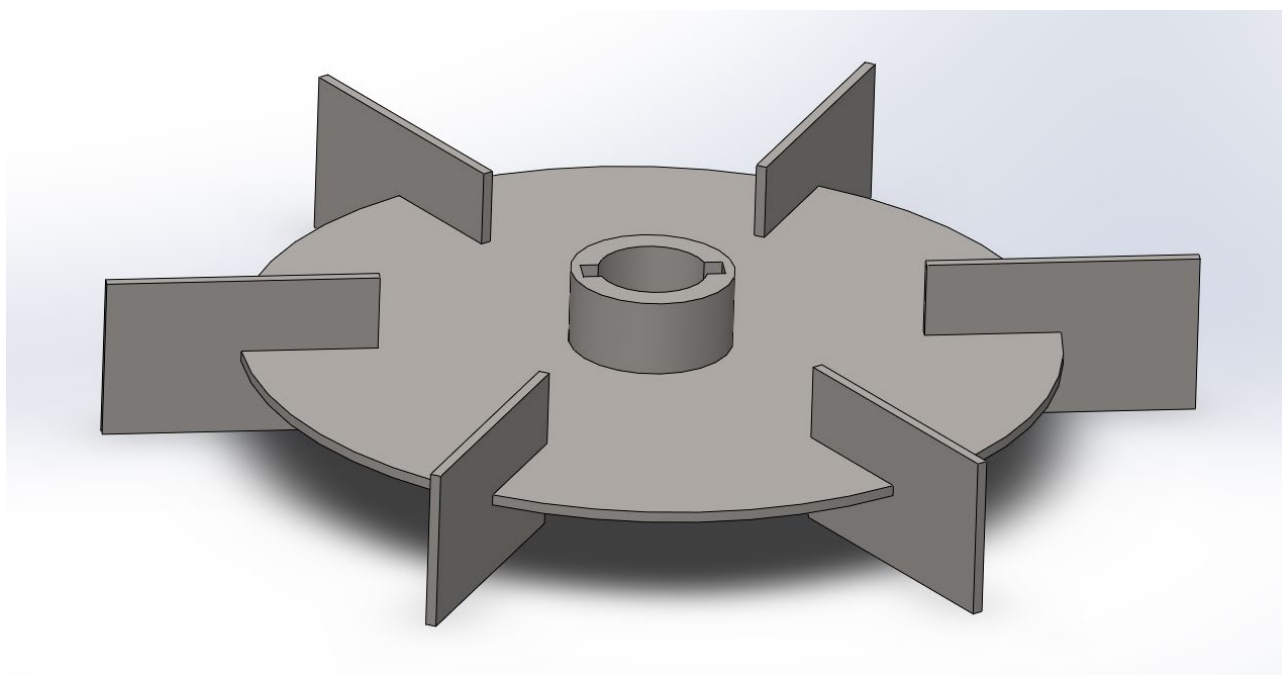


Рис. 4.2. Варіант робочого органу (турбінки) без дисків (модель 1)

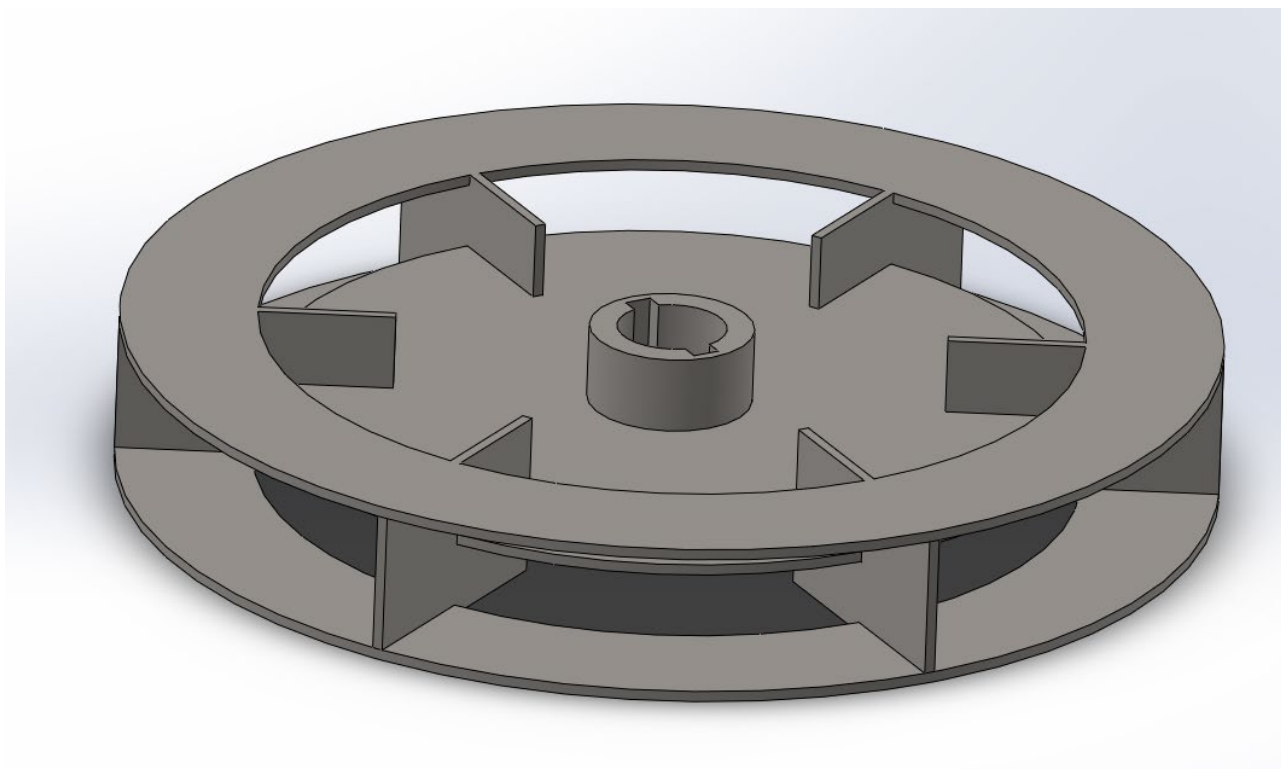


Рис. 4.3. Варіант робочого органу (турбінки) з дисками (модель 2)

При формуванні симуляції умовно задається тіло обертання (рис. 4.4.). Цей елемент є складової збірки і саме для нього вказується частота обертання.

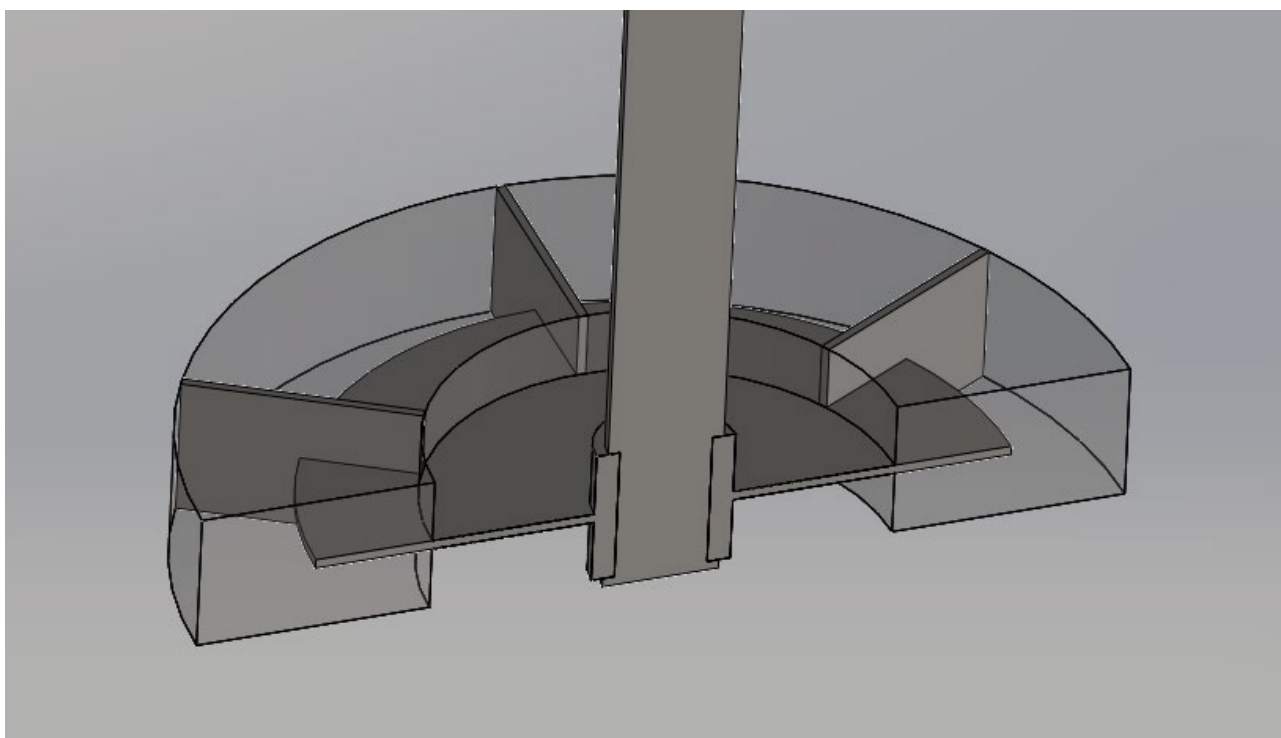


Рис. 4.4. Варіант робочого органу (турбінки) з дисками (модель 2)

Після задання основних параметрів симуляції формуємо обчислювальну сітку (рис. 4.5.)

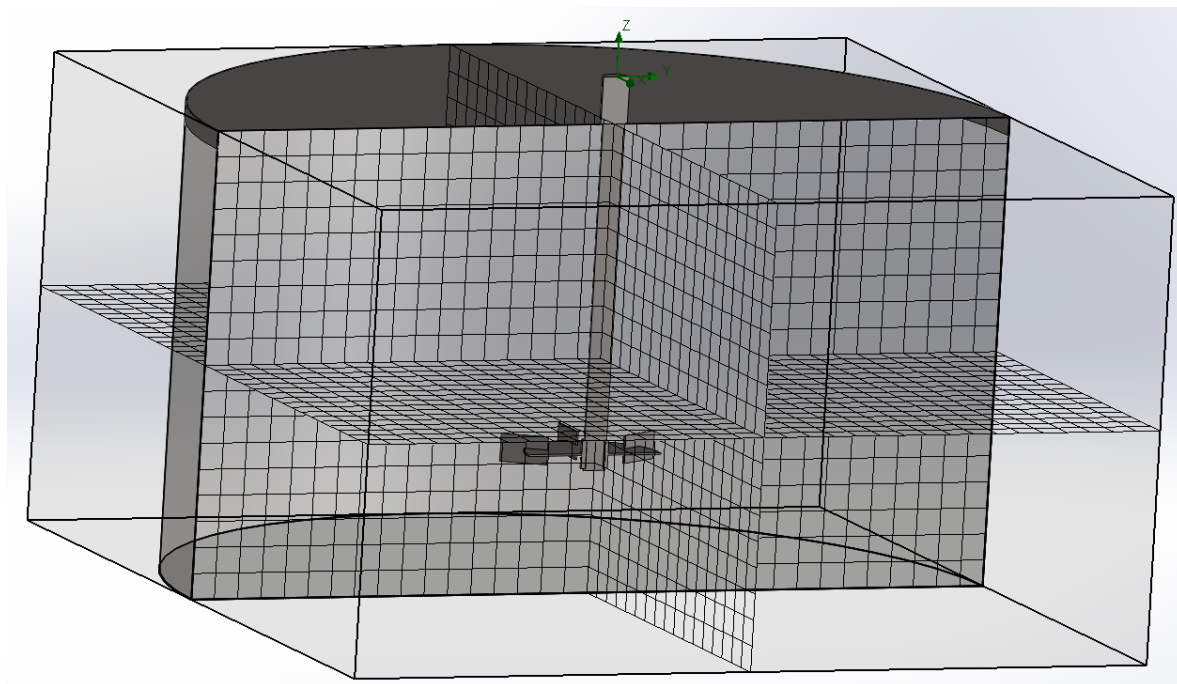


Рис. 4.5. Обчислювальна сітка

4.2. Результат дослідження

Дослідження виконали для параметрів:

"Pressure" (Абсолютний тиск).

Абсолютний тиск є однією з базових характеристик течії в зоні дії турбінної крильчатки. Він формується під впливом гідростатичного напору, динамічних ефектів, пов'язаних зі швидкісним рухом рідини, а також відцентрових сил, що виникають при обертанні робочого органу. Розподіл абсолютного тиску дає змогу виявити зони підвищеного та зниженого тиску на лопатях і в міжлопатевих каналах, оцінити силові навантаження на конструктивні елементи та визначити умови виникнення кавітації. Для процесів емульгування це особливо важливо, оскільки кавітаційні явища можуть як інтенсифікувати диспергування фаз, так і призводити до прискореного зношування обладнання.

"Temperature" (Температура).

Температура в робочому об'ємі емульгатора відображає рівень дисипації механічної енергії, що підводиться від приводу мішалки. У процесі інтенсивного перемішування частина цієї енергії перетворюється на теплоту внаслідок в'язкого тертя та розвитку турбулентності, особливо у зонах високих градієнтів швидкості поблизу лопатей. Контроль температурного поля дозволяє оцінити енергетичну ефективність процесу, а також врахувати вплив нагрівання на в'язкість рідини і стабільність емульсії, оскільки температурні зміни можуть суттєво впливати на коалесценцію дисперсної фази.

"Velocity" (Абсолютна швидкість).

Абсолютна швидкість потоку є ключовим параметром, що характеризує інтенсивність руху рідини в нерухомій системі координат. У турбінних емульгуючих установках саме швидкісне поле визначає характер циркуляції, формування радіальних та осьових потоків і рівень зсувних деформацій. Високі локальні швидкості сприяють ефективному дробленню крапель і підвищенню ступеня диспергування, водночас вони пов'язані зі зростанням енергетичних витрат. Аналіз розподілу швидкостей дозволяє оцінити ефективність роботи турбіни та визначити зони найбільш активного емульгування.

"Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку).

Швидкість у обертовій системі відліку (Velocity RRF) доповнює аналіз абсолютної швидкості та дає уявлення про відносний рух рідини щодо лопатей турбіни. Цей параметр дозволяє виключити вплив загального обертання і зосередитися на проковзуванні рідини відносно робочого органу. Саме відносна швидкість визначає інтенсивність передачі імпульсу від лопатей до рідини та величину локальних зсувних напружень, що безпосередньо впливають на ефективність емульгування.

"Vorticity" (Вихровість).

Вихровість характеризує локальну інтенсивність обертання елементарних об'ємів рідини та відображає наявність вихрових структур у потоці. У турбінних емульгаторах високі значення вихровості формуються в зонах зсуву, відриву потоку та турбулентних пульсацій. Саме ці зони є найбільш сприятливими для

інтенсивного перемішування та руйнування крапель дисперсної фази. Аналіз вихровості дозволяє оцінити ступінь розвитку турбулентності та ефективність використання підведеної енергії.

"Relative Pressure" (Відносний тиск)

Відносний тиск, на відміну від абсолютного, показує відхилення локального тиску від заданого референсного рівня і дозволяє усунути вплив гідростатичної складової. Його використання дає змогу більш чітко ідентифікувати динамічні перепади тиску, зони розрідження та підвищеного тиску, що виникають унаслідок обертання турбіни. Аналіз відносного тиску є зручним інструментом для порівняння різних конструктивних варіантів робочого органу.

"Acoustic Power Level" (Рівень акустичної потужності).

Рівень акустичної потужності є інтегральною характеристикою, що відображає інтенсивність шуму, який генерується турбулентними пульсаціями тиску, вихровими структурами та можливими кавітаційними процесами. Зростання акустичної потужності, як правило, корелює з підвищенням інтенсивності турбулентності та переходом до більш напружених режимів роботи. Тому цей параметр може використовуватися як непрямий індикатор режиму емульгування, а також має практичне значення з точки зору промислової безпеки та комфорту експлуатації обладнання.

Аналіз параметра "Pressure" (Абсолютний тиск). Розподіл тиску у системі з обертовою крильчаткою визначається декількома фізичними механізмами. По-перше, це статичний тиск, зумовлений гідростатичним напором стовпа рідини. По-друге, динамічний тиск, пов'язаний з рухом рідини згідно з рівнянням Бернуллі: при зростанні швидкості потоку статичний тиск знижується. По-третє, відцентрові ефекти, що створюють градієнт тиску від осі обертання до периферії. По-четверте, в'язкісні втрати тиску на тертя у пограничних шарах біля твердих поверхонь.

Мінімальні значення тиску спостерігаються у зонах максимальної швидкості потоку: на тильній стороні лопатей, де відбувається локальне прискорення рідини; у вихрових зонах за лопатями з областями відривної течії;

на периферії крильчатки з найбільшою лінійною швидкістю. Критично низькі значення тиску, що наближаються до тиску насиченої пари, створюють умови для виникнення кавітації – процесу утворення та схлопування парогазових бульбашок, що супроводжується ударними хвилями, які поступово руйнують матеріал лопатей.

Максимальні значення тиску концентруються на лобовій поверхні лопатей, де потік рідини гальмується при зіткненні з твердою поверхнею, перетворюючи кінетичну енергію руху у потенціальну енергію тиску.

Результати досліджень параметра "Pressure" (Абсолютний тиск) при частотах обертання турбіни 2500...3500 об/хв на рис. 4.6. і рис. 4.7.

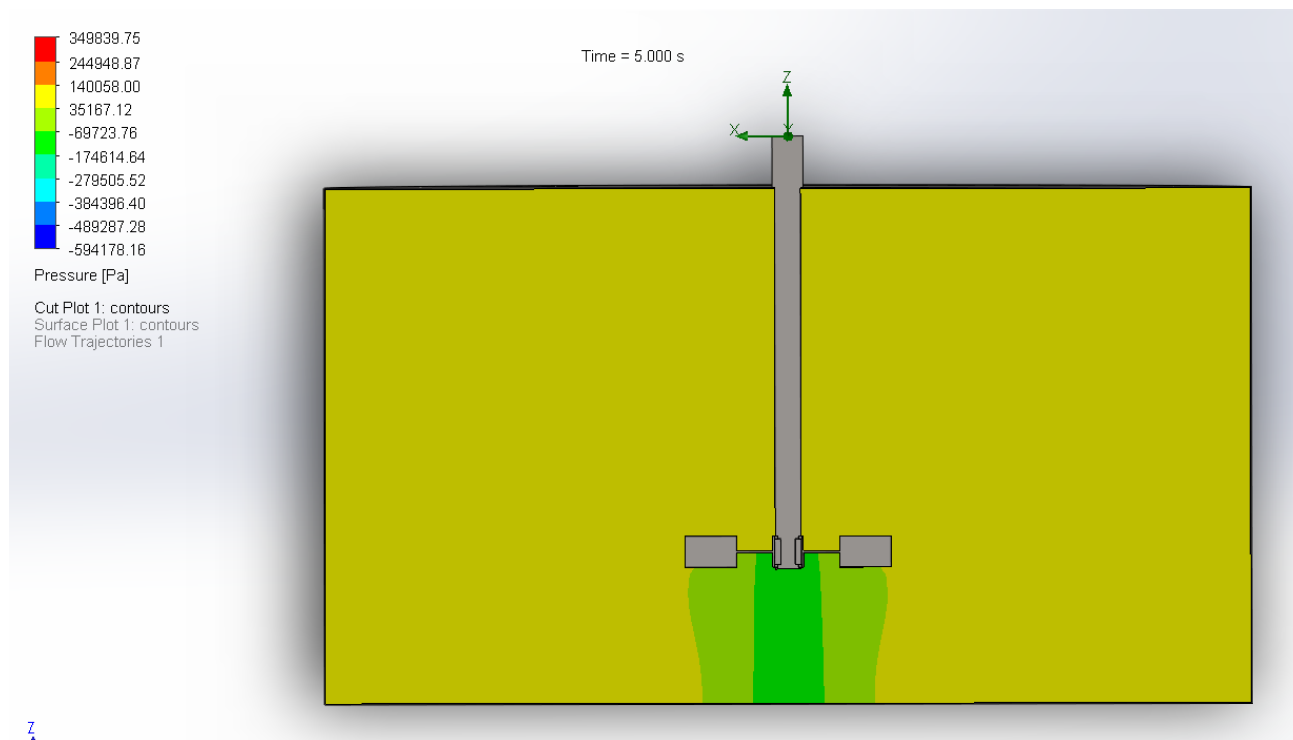


Рис. 4.6. Розподіл параметра "Pressure" (Абсолютний тиск) при частоті обертання турбіни 3000 об/хв (модель 1).

Модель 1 (Відкрита крильчатка). Мінімальний тиск демонструє прогресивне зниження від -60466 Па при 2500 об/хв до -983946 Па при 3500 об/хв. При 2500 об/хв мінімальний тиск відповідає зниженню приблизно на 0,6

атмосфери відносно атмосферного. При збільшенні частоти до 2750 об/хв спостерігається різке падіння до -494634 Па (близько 4,9 атмосфер розрідження), що свідчить про нелінійний характер залежності та можливий перехід до якісно іншого режиму течії. Подальше зростання частоти призводить до поступового поглиблення розрідження до майже 10 атмосфер при максимальній швидкості.

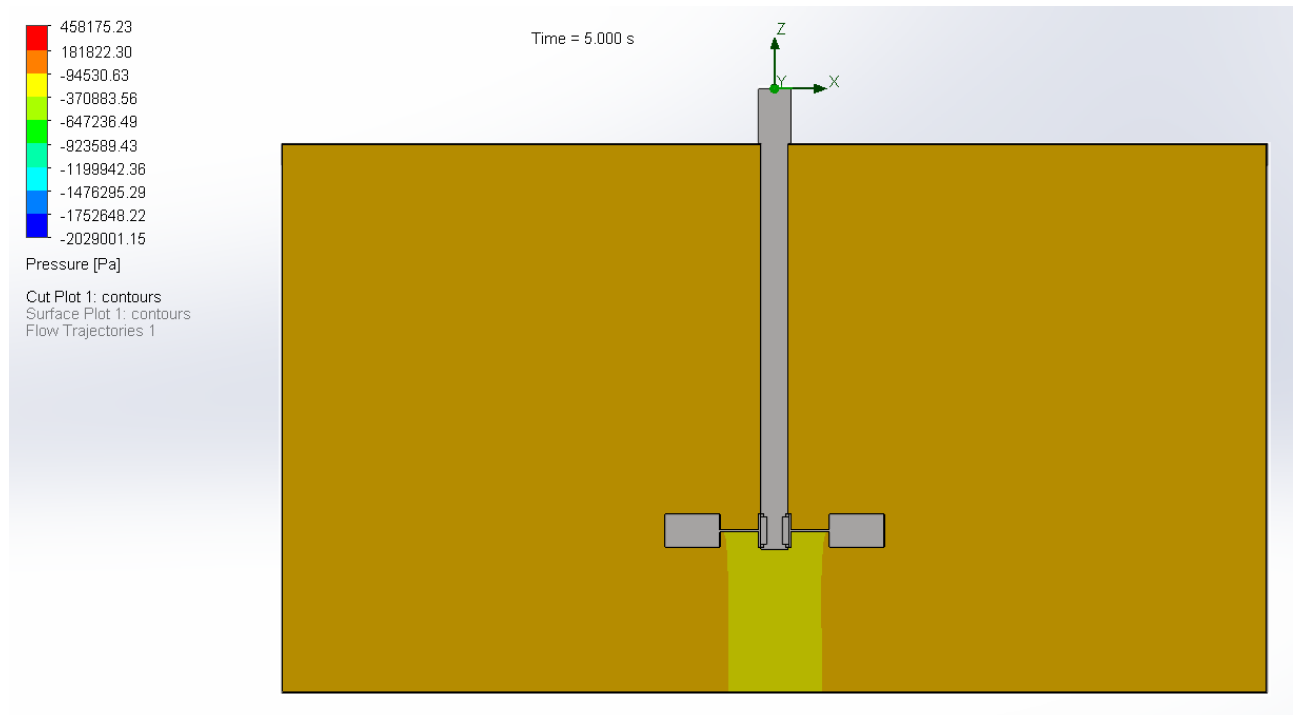


Рис. 4.7. Розподіл параметра "Pressure" (Абсолютний тиск) при частоті обертання турбіни 3000 об/хв (модель 2).

Така динаміка пояснюється квадратичною залежністю динамічного тиску від швидкості потоку. Згідно з рівнянням Бернуллі, динамічний напір пропорційний $\rho v^2/2$, де ρ – густина рідини, v – швидкість потоку. Оскільки швидкість потоку лінійно залежить від частоти обертання, тиск має квадратичну залежність.

Максимальні значення тиску демонструють більш помірне зростання: від 170112 Па при 2500 об/хв до 412251 Па при 3500 об/хв. Це зростання відображає збільшення динамічного напору на лобовій поверхні лопатей. Відносно невелика амплітуда зміни максимального тиску порівняно з мінімальним пов'язана з тим,

що високі тиски локалізовані на обмеженій площі, тоді як зони розрідження можуть охоплювати значні об'єми.

Модель 2 (Закрита крильчатка). Закрита конструкція демонструє значно більш екстремальні значення. Мінімальний тиск при 2500 об/хв становить - 1181042 Па, що майже вдвічі нижче, ніж у відкритій крильчатці.

У закритій конструкції рідина перебуває у просторі, обмеженому лопатями та дисками. При обертанні рідина у міжлопатевих каналах отримує обертання разом з лопатями, але внаслідок відцентрових сил намагається рухатися від центру до периферії. Це створює складну картину течії з інтенсивними градієнтами швидкості та тиску. На увігнутій стороні лопаті формується зона інтенсивного прискорення потоку, де тиск значно знижується. Додатково, обмеженість простору призводить до утворення локальних вихрових структур, у ядрах яких тиск падає до критично низьких значень.

Максимальні значення тиску також є істотно вищими: від 336585 Па при 2500 об/хв до 615830 Па при 3500 об/хв – майже удвічі перевищує максимальний тиск у відкритій крильчатці. Підвищений максимальний тиск у закритій конструкції зумовлений ефективнішою передачею обертального руху рідині. Диски запобігають перетіканню рідини через торці лопатей, що характерно для відкритих крильчаток і призводить до втрат імпульсу.

Практичне значення. Значні перепади тиску мають кілька важливих практичних наслідків. По-перше, це вимоги до міцності конструкції – лопаті мають витримувати значні силові навантаження від різниці тисків. Для закритої крильчатки ці навантаження є істотно більшими, що вимагає використання більш міцних матеріалів.

По-друге, небезпека кавітації. Для відкритої крильчатки при частотах вище 2750 об/хв та для закритої крильчатки при всіх досліджуваних частотах існує реальна загроза розвитку кавітаційних явищ. Це вимагає застосування спеціальних матеріалів з підвищеною кавітаційною стійкістю або обмеження робочих швидкостей.

Математичні залежності параметра "Pressure" (Абсолютний тиск) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв.

Модель 1 (Відкрита крильчатка):

Мінімальний тиск:

$$P_{1min} = 677186,4 - 494,2 \cdot n + 0,0628 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,998$$

Максимальний тиск:

$$P_{1max} = -454284 + 243,8 \cdot n - 0,0158 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,996$$

Модель 2 (Закрита крильчатка):

Мінімальний тиск:

$$P_{2min} = 2547058 - 1824 \cdot n + 0,2106 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,999$$

Максимальний тиск:

$$P_{2max} = -1029175 + 558,4 \cdot n - 0,0422 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,998$$

Високі коефіцієнти детермінації ($R^2 > 0,99$) свідчать про відмінну відповідність квадратичних моделей експериментальним даним.

Аналіз параметра "Temperature" (Температура). Температура у системі визначається балансом між дисипацією механічної енергії та теплообміном. Основним джерелом тепла є дисипація механічної енергії, що підводиться приводом мішалки. Ця енергія витрачається на подолання в'язкісного тертя у рідині, особливо у зонах високих градієнтів швидкості – у пограничних шарах біля лопатей, у зсувних шарах між потоками різної швидкості, у вихрових структурах.

В'язкість рідини відіграє ключову роль у процесах дисипації. Для ньютонівських рідин швидкість дисипації енергії пропорційна динамічній в'язкості та квадрату градієнта швидкості. У турбулентних течіях додатково проявляється турбулентна в'язкість, яка значно перевищує молекулярну в'язкість і призводить до інтенсивної дисипації енергії.

Результати досліджень параметра "Temperature" (Температура) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв представлено на рис. 4.8. і рис. 4.9.

Модель 1 (Відкрита крильчатка). Мінімальна температура зростає від 20,07°C при 2500 об/хв до 20,18°C при 3500 об/хв (зростання 0,11°C).

Максимальна температура демонструє більш помітне зростання: від 20,09°C до 20,44°C (зростання 0,35°C). Зони максимальної температури локалізовані у пограничних шарах на поверхні лопатей та у ядрах інтенсивних вихорів. Загальний температурний діапазон є дуже вузьким: від 0,02°C при мінімальній частоті до 0,26°C при максимальній, що свідчить про відносно рівномірний розподіл тепла у системі.

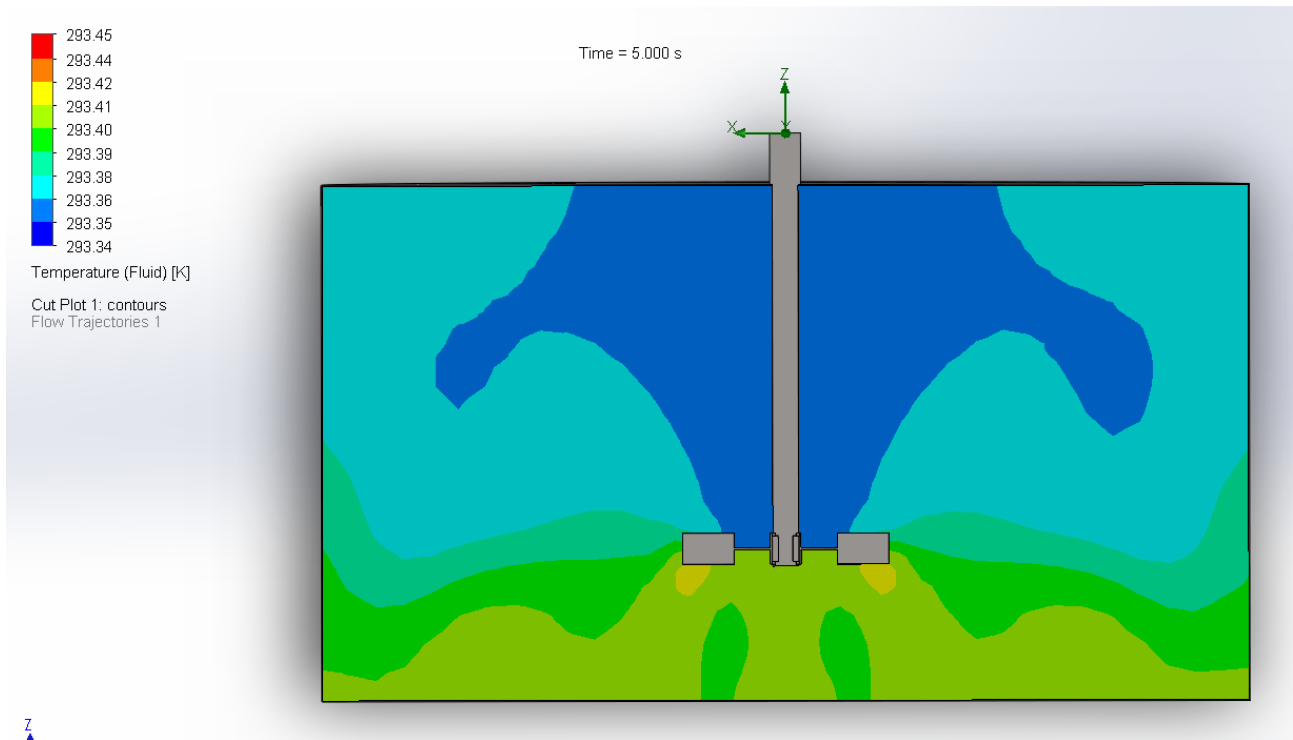


Рис. 4.8. Розподіл параметра "Temperature" (Температура) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 1).

Модель 2 (Закрита крильчатка). Закрита крильчатка демонструє дещо вищі температури. Мінімальна температура зростає від 20,14°C до 20,29°C (зміна на 0,15°C), що перевищує відповідну зміну для відкритої крильчатки. Максимальна температура змінюється від 20,23°C до 20,49°C (зміна на 0,26°C). Абсолютні значення температур при всіх частотах є вищими приблизно на 0,05-0,07°C, що пояснюється більш інтенсивною дисипацією енергії внаслідок вищих градієнтів швидкості у обмежених міжлопатевих каналах.

Підвищення температури дозволяє оцінити потужність дисипації. Для води з питомою теплоємністю 4186 Дж/(кг·К) та середнім підвищенням температури 0,1-0,2°C, дисипована енергія у 1 м³ води за 10 хвилин становить близько 628 кДж, що відповідає середній потужності близько 1 кВт. У промислових апаратах великого об'єму дисипована потужність може досягати десятків та сотень кіловат.

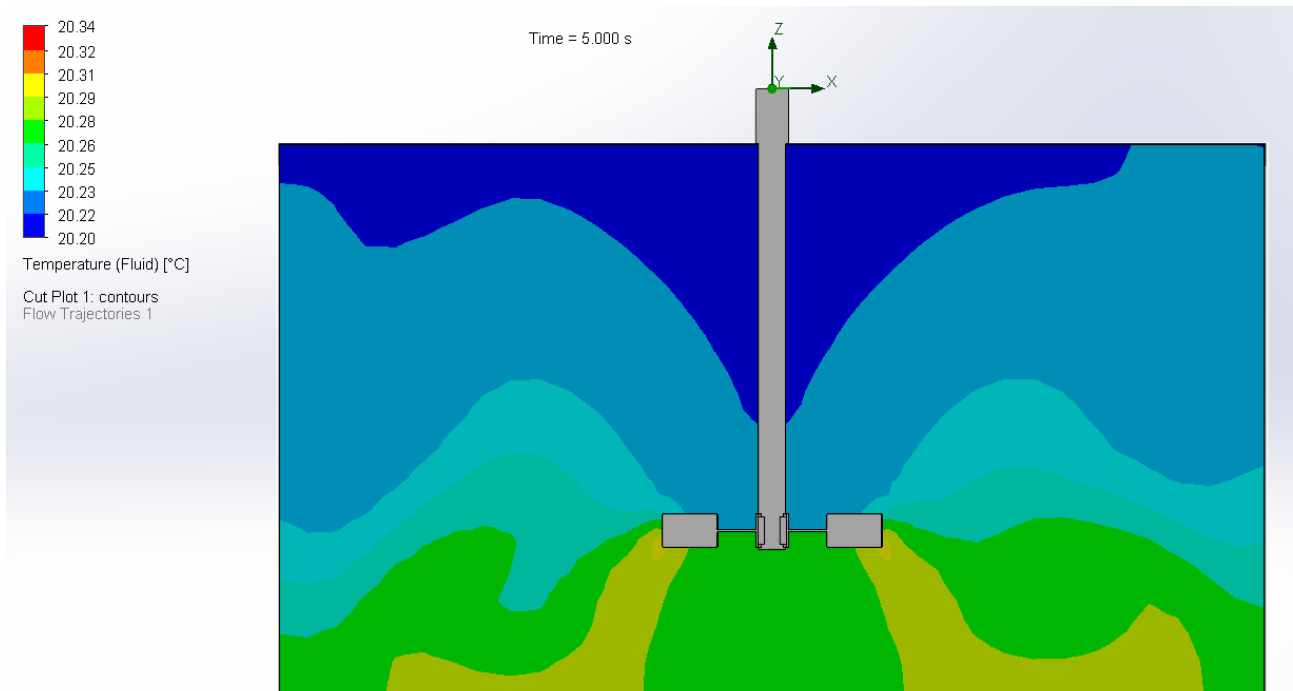


Рис. 4.9. Розподіл параметра "Temperature" (Температура) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 2).

Математичні залежності параметра "Temperature" (Температура) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв.

Модель 1:

Мінімальна температура:

$$T_{lmin} = 17,89 + 0,00088 \cdot n - 8 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 \text{ (}^\circ\text{C)}, R^2 \approx 0,985$$

Максимальна температура:

$$T_{lmax} = 14,71 + 0,00228 \cdot n - 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 \text{ (}^\circ\text{C)}, R^2 \approx 0,997$$

Модель 2:

Мінімальна температура:

$$T_{2min} = 15,62 + 0,00182 \cdot n - 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 \text{ (}^\circ\text{C)}, R^2 \approx 0,998$$

Максимальна температура:

$$T_{2max} = 15,11 + 0,00216 \cdot n - 1,4 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 \text{ (}^\circ\text{C)}, R^2 \approx 0,999$$

Аналіз параметра "Velocity" (Абсолютна швидкість). Швидкість потоку є одним з найважливіших параметрів ефективності перемішування. Розподіл швидкостей у апараті має складну тривимірну структуру. Лопаті крильчатки безпосередньо контактують з рідиною і передають їй обертальний рух. На периферії крильчатки лінійна швидкість досягає найбільших значень згідно з формулою $v = \omega \cdot r$, де ω – кутова швидкість, r – радіус.

Проте рідина не обертається як тверде тіло разом з крильчаткою. Внаслідок в'язкості відбувається передача імпульсу від лопатей до прилеглих шарів через пограничний шар. Турбінні мішалки створюють переважно радіальні потоки: рідина відкидається від центру до стінок апарату, де потік розділяється на висхідний та низхідний, формуючи замкнені циркуляційні контури.

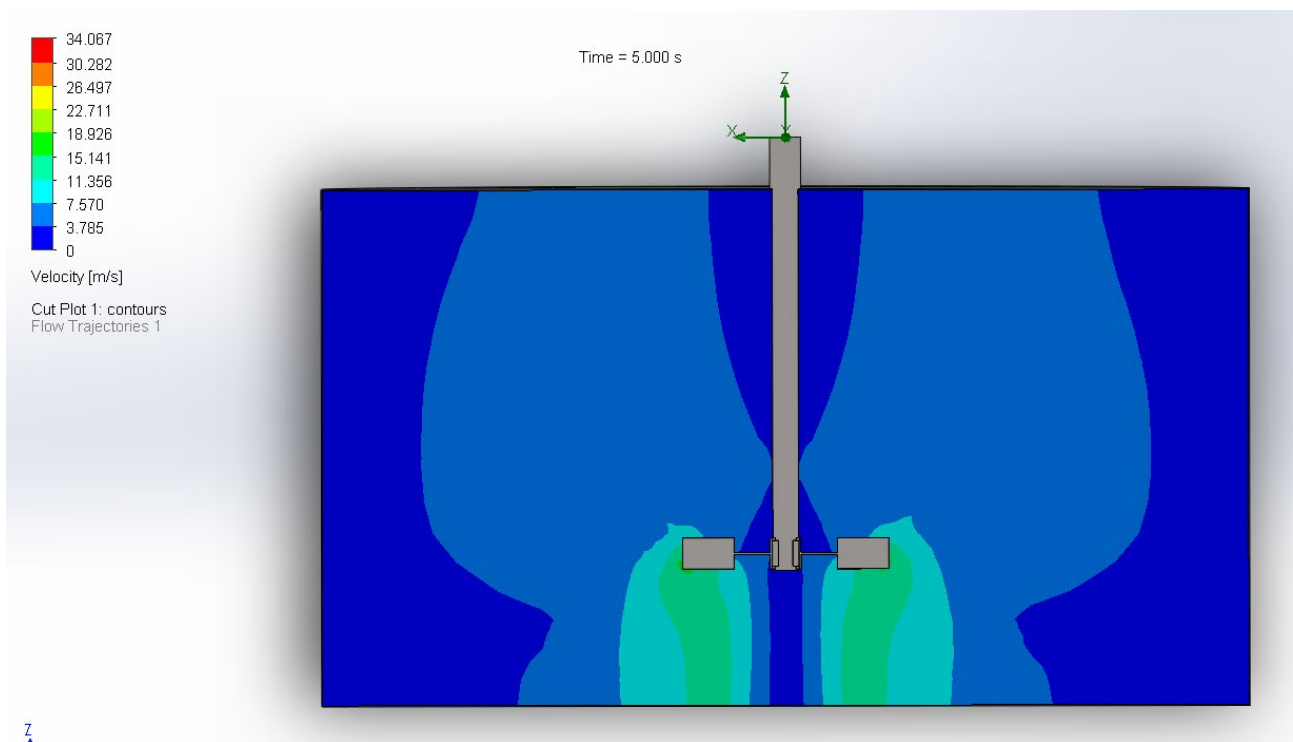


Рис. 4.10. Розподіл параметра "Velocity" (Абсолютна швидкість) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 1).

Результати досліджень параметра "Velocity" (Абсолютна швидкість) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв представлено на рис. 4.10. і рис.

4.11. Оскільки мінімальне значення рівне 0, то аналізували лише значення максимальних величин.

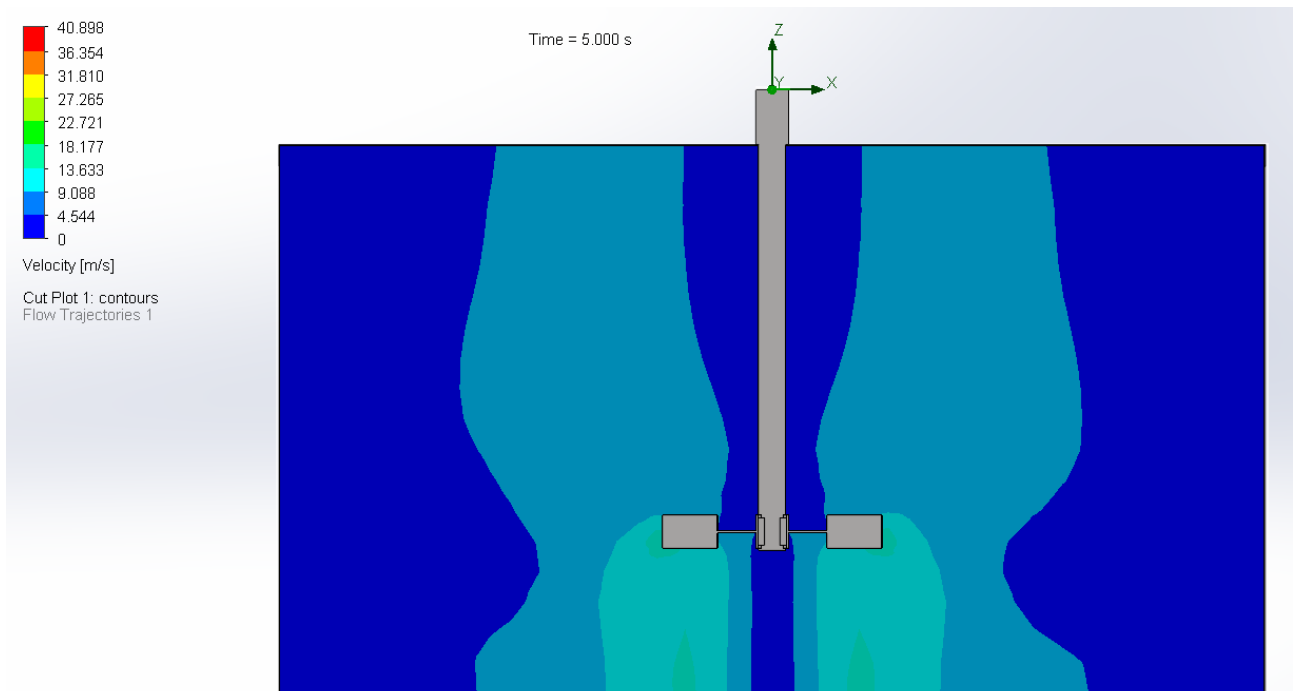


Рис. 4.11. Розподіл параметра "Velocity" (Абсолютна швидкість) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 2).

Модель 1 (Відкрита крильчатка). При 2500 об/хв максимальна швидкість становить 16,979 м/с. При збільшенні до 2750 об/хв швидкість зростає до 21,341 м/с. Проте при подальшому збільшенні до 3000 об/хв спостерігається різке зростання до 34,067 м/с – аномальне зростання на 59,6% при збільшенні частоти лише на 9,1%. Це свідчить про якісну зміну режиму течії – перехід від перехідного до розвиненого турбулентного режиму при досягненні критичного числа Рейнольдса.

При 3250 об/хв максимальна швидкість становить 36,893 м/с, а при 3500 об/хв – 39,729 м/с. Темп зростання знову стає більш помірним, що вказує на досягнення усталеного турбулентного режиму.

Модель 2 (Закрита крильчатка). Закрита крильчатка демонструє істотно вищі максимальні швидкості. При 2500 об/хв максимальна швидкість становить

33,718 м/с, що майже вдвічі перевищує відповідне значення для відкритої крильчатки. У закритій крильчатці рідина обмежена дисками з обох боків, що запобігає перетіканню через торці. Міжлопатеві канали працюють як сопла, де відбувається перетворення тиску у кінетичну енергію потоку.

При збільшенні частоти максимальна швидкість зростає плавно: 37,419 м/с при 2750 об/хв, 40,898 м/с при 3000 об/хв, 43,116 м/с при 3250 об/хв та 47,575 м/с при 3500 об/хв. Відсутність різкого стрибка вказує на те, що закрыта конструкція працює у турбулентному режимі навіть при найнижчих досліджуваних частотах.

Практичне значення. Високі локальні швидкості мають кілька практичних аспектів: ерозійне зношування при швидкостях понад 30-40 м/с, ефективність диспергування (високі швидкості сприяють руйнуванню крапель та бульбашок), прискорення масообмінних процесів, та значне зростання енергоспоживання (потужність пропорційна кубу швидкості).

Математичні залежності параметра "Velocity" (Абсолютна швидкість) при частотах обертання турбіни 2500...3500 об/хв.

Модель 1:

$$V_{1max} = -125,8 + 0,0598 \cdot n - 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ (м/с)}, R^2 \approx 0,910$$

Модель 2:

$$V_{2max} = -41,24 + 0,0318 \cdot n - 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ (м/с)}, R^2 \approx 0,985$$

Аналіз параметра "Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку). Параметр Velocity RRF представляє швидкість рідини у системі координат, що обертається разом з крильчаткою. Це дозволяє виявити відносний рух рідини щодо лопатей, який у нерухомій системі маскується загальним обертанням. Високі значення швидкості у обертовій системі вказують на інтенсивне проковзування рідини відносно лопатей – важливий показник ефективності передачі енергії.

Результати досліджень параметра "Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку) при частотах обертання турбіни 2500...3500 об/хв представлено на рис. 4.12. і рис. 4.13. Аналогічно до попереднього параметра, мінімальне

значення Velocity RRF теж рівне 0, то також аналізуватимемо лише значення максимальних величин.

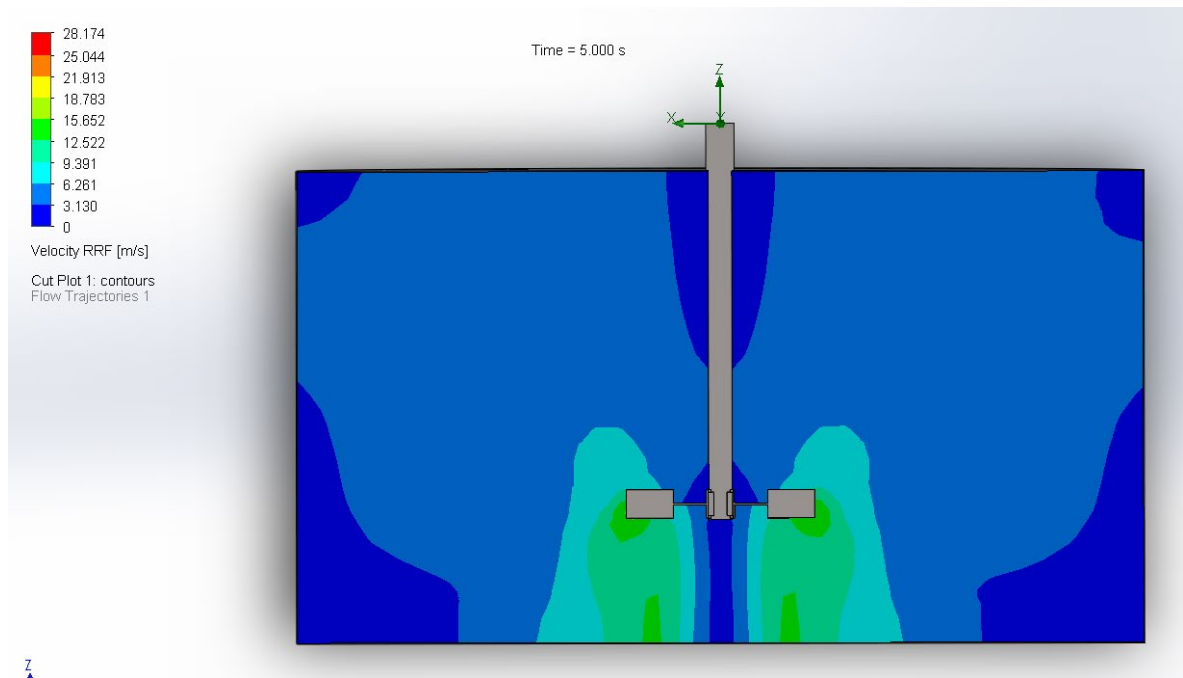


Рис. 4.12. Розподіл параметра "Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку) при частоті обертання турбіни 3000 об/хв (модель 1).

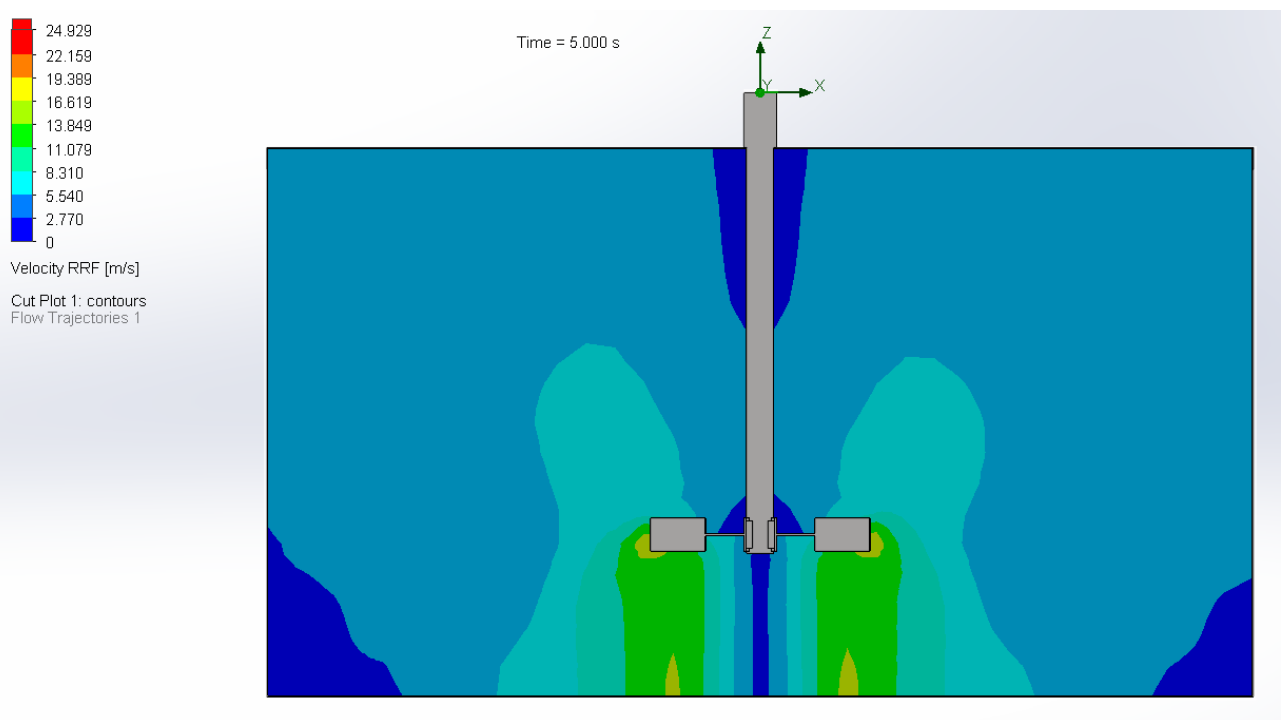


Рис. 4.13. Розподіл параметра "Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку) при частоті обертання турбіни 3000 об/хв (модель 2).

Модель 1 (Відкрита крильчатка). Максимальна швидкість RRF зростає від 14,368 м/с при 2500 об/хв до 31,815 м/с при 3500 об/хв. Ці значення є нижчими за відповідні абсолютні швидкості, що є логічним – частина абсолютного руху зумовлена обертанням разом з крильчаткою. Особливо помітним є стрибок від 21,341 м/с при 2750 об/хв до 28,174 м/с при 3000 об/хв (зростання на 32%), що корелює з аномальним зростанням абсолютної швидкості.

Високі значення відносної швидкості пояснюються тим, що відсутність обмежувальних дисків дозволяє рідині легше обтікати лопаті, не захоплюючись повністю обертальним рухом.

Модель 2 (Закрита крильчатка). Закрита конструкція демонструє дещо вищі відносні швидкості: від 19,745 м/с при 2500 об/хв до 33,706 м/с при 3500 об/хв. При низьких частотах відносна швидкість вища, ніж у відкритій (19,745 проти 14,368 м/с), але при високих частотах стає порівнянною (33,706 проти 31,815 м/с). Це свідчить про те, що при високих швидкостях рідина краще захоплюється обертанням у закритій конструкції.

Математичні залежності параметра "Velocity RRF" (Швидкість у обертовій системі відліку) при частотах обертання турбіни 2500...3500 об/хв.

Модель 1:

$$V_{1RRFmax} = -69,18 + 0,0362 \cdot n - 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ (м/с)}, R^2 \approx 0,974$$

Модель 2:

$$V_{2RRFmax} = -47,85 + 0,0284 \cdot n - 2,0 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ (м/с)}, R^2 \approx 0,962$$

Аналіз параметра "Vorticity" (Вихровість). Вихровість є векторною характеристикою потоку, що визначається як ротор поля швидкостей: $\omega = \nabla \times v$. Фізично вихровість характеризує локальну інтенсивність обертання елемента рідини навколо власної осі. У турбінних мішалках вихровість генерується зсувними шарами на межі потоків з різними швидкостями, відривом потоку на гострих кромках лопатей, пристінними ефектами у пограничному шарі та нестійкістю турбулентного потоку.

Вихровість тісно пов'язана з дисипацією енергії: у в'язкій рідині швидкість дисипації пропорційна квадрату вихровості. Високі значення вихровості сприяють інтенсивному перемішуванню, але також призводять до додаткових енергетичних втрат.

Результати досліджень параметра «Vorticity» (Вихровість) "Vorticity" (Вихровість) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв представлено на рис. 4.14. і рис. 4.15.

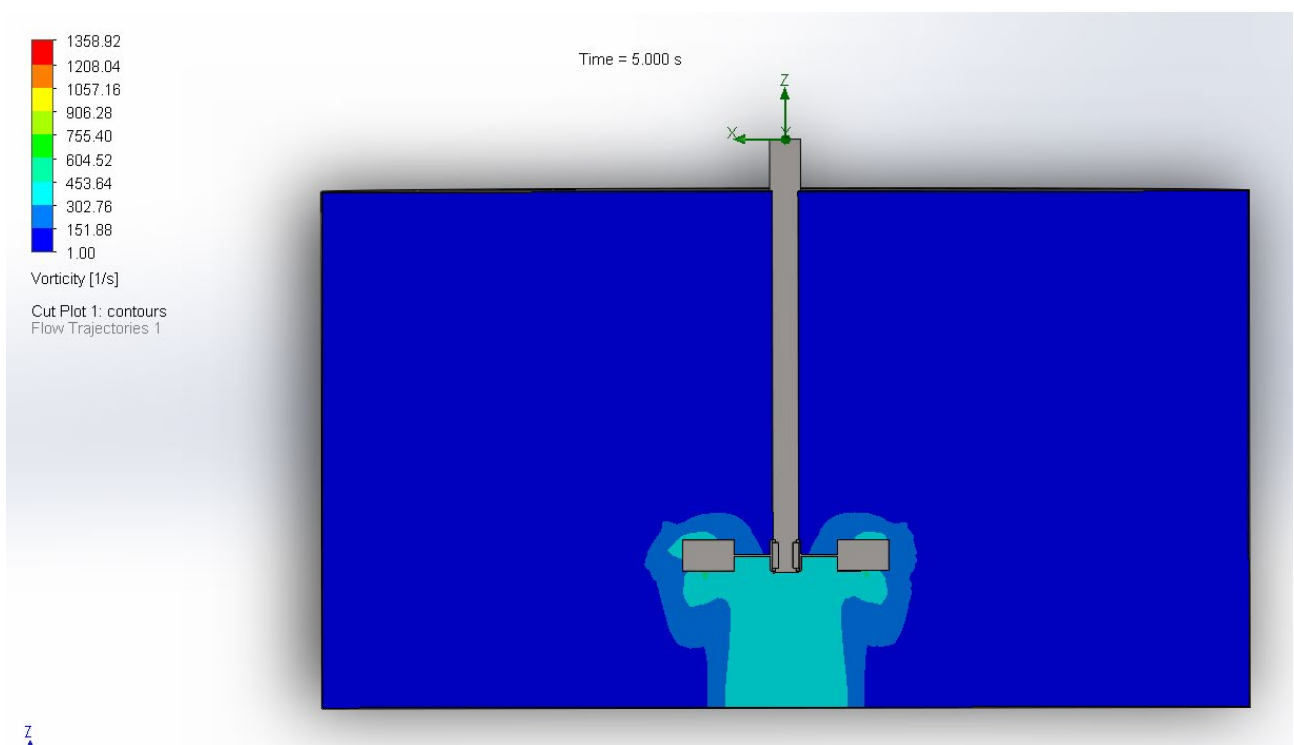


Рис. 4.14. Розподіл параметра «Vorticity» (Вихровість) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 1).

Модель 1 (Відкрита крильчатка). Максимальна вихровість зростає від 716 с^{-1} до 1576 с^{-1} . Мінімальні значення також зростають від 0,5 до 2,33 с^{-1} . Співвідношення між максимальною та мінімальною вихровістю є дуже великим (понад 1000:1), що свідчить про надзвичайно неоднорідний характер течії.

При переході від 2500 до 2750 об/хв вихровість зростає на 68,4%, що вказує на перехід до турбулентного режиму. При подальшому зростанні частоти темп

зростання вихровості уповільнюється, що характерно для розвиненого турбулентного режиму.

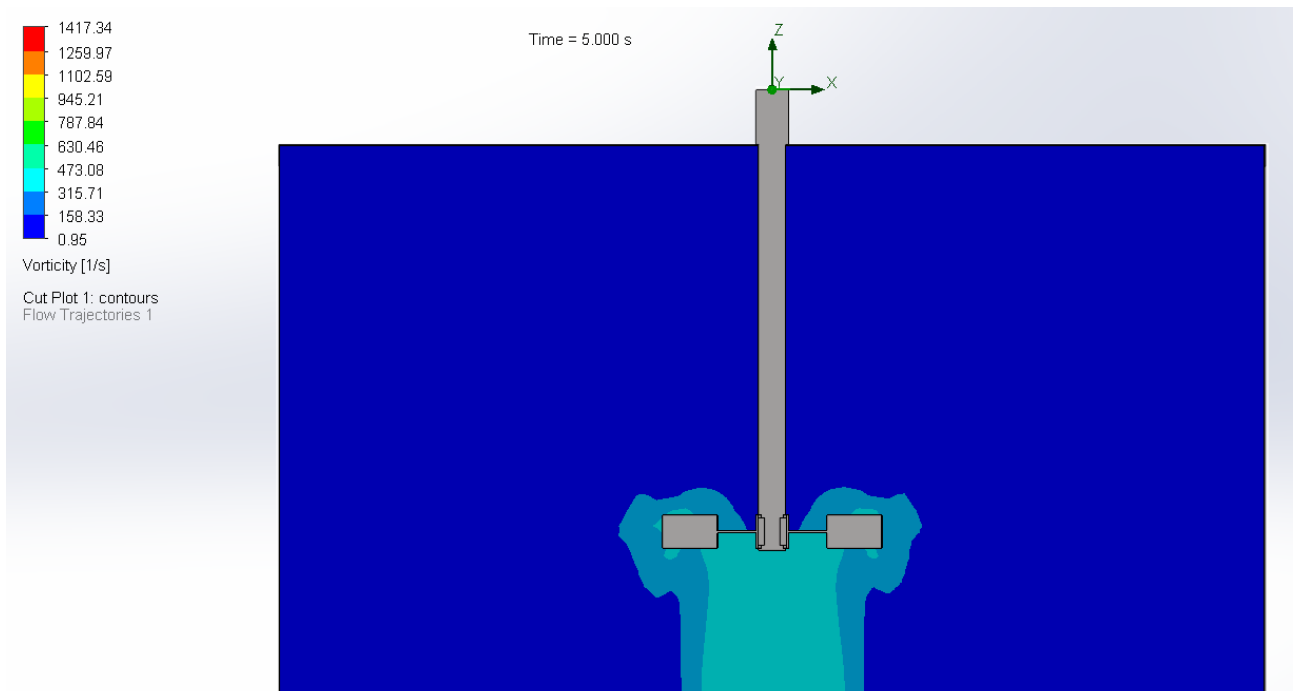


Рис. 4.15. Розподіл параметра «Vorticity» (Вихровість) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 2).

Модель 2 (Закрита крильчатка). Максимальна вихровість вища: від 1184 с^{-1} до 1663 с^{-1} . Зростання є більш рівномірним, що підтверджує стабільність течії у міжлопатевих каналах. Мінімальна вихровість демонструє нестабільну поведінку: $0,27 \text{ с}^{-1}$ при 2500 об/хв, падіння до $0,20 \text{ с}^{-1}$ при 2750 об/хв, потім зростання до $2,91 \text{ с}^{-1}$ при 3500 об/хв. Це може бути пов'язано з реорганізацією структури течії у міжлопатевих каналах.

Вищі значення максимальної вихровості пояснюються більш інтенсивними зсувними напруженнями у міжлопатевих каналах. Стінки каналу створюють додаткові градієнти швидкості, що посилює генерацію вихровості.

Математичні залежності параметра «Vorticity» (Вихровість) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв.

Модель 1:

Мінімальна вихровість:

$$\omega_{1min} = -12,87 + 0,0057 \cdot n - 4 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 \text{ (с}^{-1}\text{)}, R^2 \approx 0,945$$

Максимальна вихровість:

$$\omega_{1max} = -2346 + 1,74 \cdot n - 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 \text{ (с}^{-1}\text{)}, R^2 \approx 0,972$$

Модель 2:

Максимальна вихровість:

$$\omega_{2max} = -1249 + 1,02 \cdot n - 8,4 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 \text{ (с}^{-1}\text{)}, R^2 \approx 0,985$$

Аналіз параметра "Relative Pressure" (Відносний тиск). Відносний тиск визначається як різниця між абсолютним тиском у точці та референсним тиском (зазвичай середнім тиском у системі). Використання відносного тиску дозволяє усунути гідростатичну складову, виявити зони ризику кавітації та оцінити силові навантаження на лопаті незалежно від абсолютного рівня тиску.

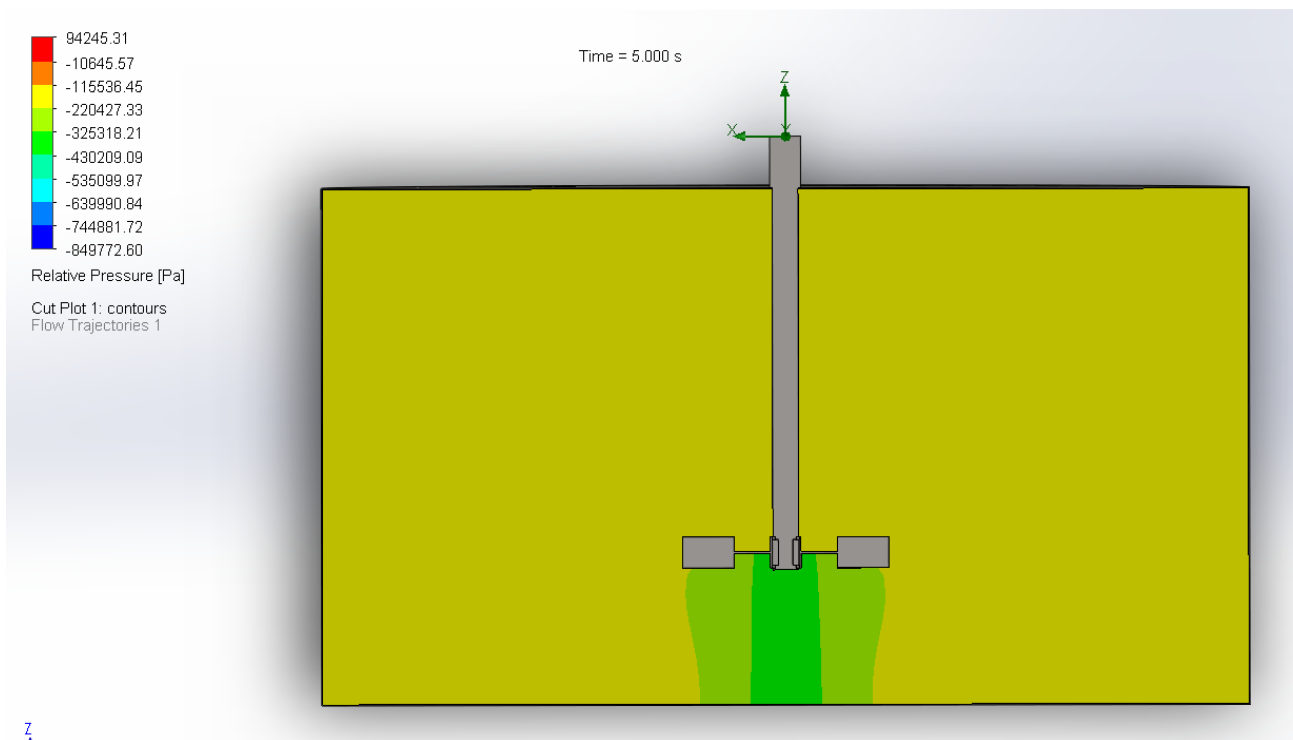


Рис. 4.16. Розподіл параметра «Relative Pressure» (Відносний тиск) при частоті обертання турбіни 3000 об/хв (модель 1).

Відносний тиск формується внаслідок дії закону Бернуллі та відцентрових ефектів. У обертовій рідині існує радіальний градієнт тиску $dP/dr = \rho\omega^2r$, необхідний для забезпечення відцентрового прискорення. Різниця тисків між

периферією та центром пропорційна квадрату кутової швидкості та квадрату радіусу.

Результати досліджень параметра "Relative Pressure" (Відносний тиск) при частотах обертання турбіни 2500...3500 об/хв представлено на рис. 4.16. і рис. 4.17.

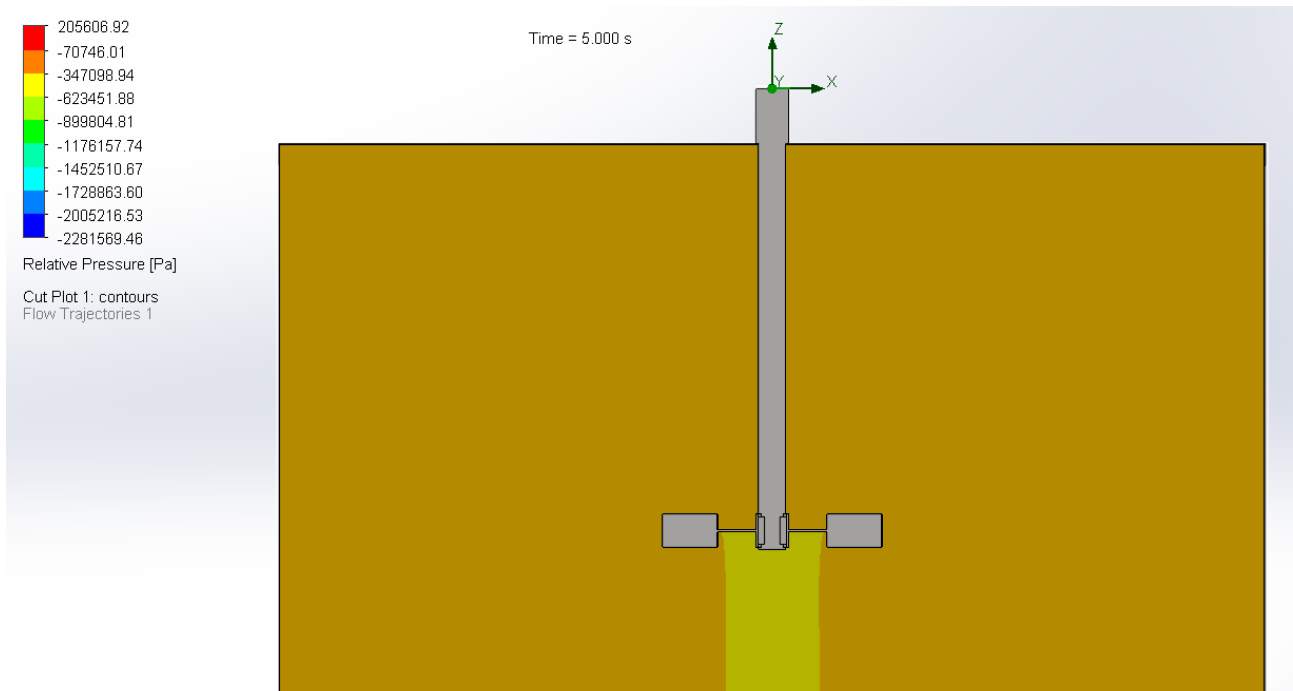


Рис. 4.17. Розподіл параметра «Relative Pressure» (Відносний тиск) при частоті обертання турбіни 3000 об/хв (модель 2).

Модель 1 (Відкрита крильчатка). Максимальний відносний тиск зростає від 30220 Па до 100949 Па. Загальний діапазон відносного тиску зростає від 230,6 кПа до 1396,2 кПа – збільшення у 6 разів.

Модель 2 (Закрита крильчатка). Максимальний відносний тиск зростає від 140230 Па до 308746 Па. Загальний діапазон: від 1527,6 кПа до 3647,5 кПа – у 2,6 рази більше, ніж для відкритої крильчатки.

Практичні рекомендації. Для відкритої крильчатки робота при частотах вище 3000 об/хв пов'язана з високим ризиком кавітації. Для закритої крильчатки кавітаційна небезпека присутня при всіх досліджуваних частотах. Необхідно

забезпечити достатнє заглиблення крильчатки або застосувати надлишковий тиск у апараті.

Математичні залежності параметра «Relative Pressure» (Відносний тиск) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв.

Модель 1.

Мінімальний:

$$P_{1rel.min} = 1151942 - 838,6 \cdot n + 0,1066 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,998$$

Максимальний:

$$P_{1rel.max} = -307084 + 143,2 \cdot n - 0,0104 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,988$$

Модель 2.

Мінімальний:

$$P_{2rel.min} = 3199674 - 2306 \cdot n + 0,2648 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,999$$

Максимальний:

$$P_{2rel.max} = -817850 + 443,2 \cdot n - 0,0334 \cdot n^2 \text{ (Па)}, R^2 \approx 0,998$$

Аналіз параметра "Acoustic Power Level" (Рівень акустичної потужності). Акустичне випромінювання формується внаслідок турбулентних пульсацій тиску (інтенсивність пропорційна восьмій степені швидкості), вихрового випромінювання (періодичні вихрові доріжки за лопатями), кавітаційного шуму (схлопування бульбашок генерує ударні хвилі) та вібраційного випромінювання (передача динамічних сил через вал на корпус). Оскільки мінімальне значення рівне 0, то аналізували лише значення максимальних величин.

Результати досліджень параметра «Acoustic Power Level» (Рівень акустичної потужності) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв представлено на рис. 4.18. і рис. 4.19.

Модель 1 (Відкрита крильчатка). Максимальний рівень зростає від 35,22 дБ до 63,16 дБ – зростання майже на 28 дБ відповідає збільшенню акустичної потужності приблизно у 630 разів. При 2500 об/хв рівень 35 дБ є дуже низьким (рівень шепоту), система працює практично безшумно. При 2750 об/хв різке зростання до 45,71 дБ корелює з переходом до турбулентного режиму. Різкі стрибки на рівні 60+ дБ, ймовірно, пов'язані з розвитком кавітації.

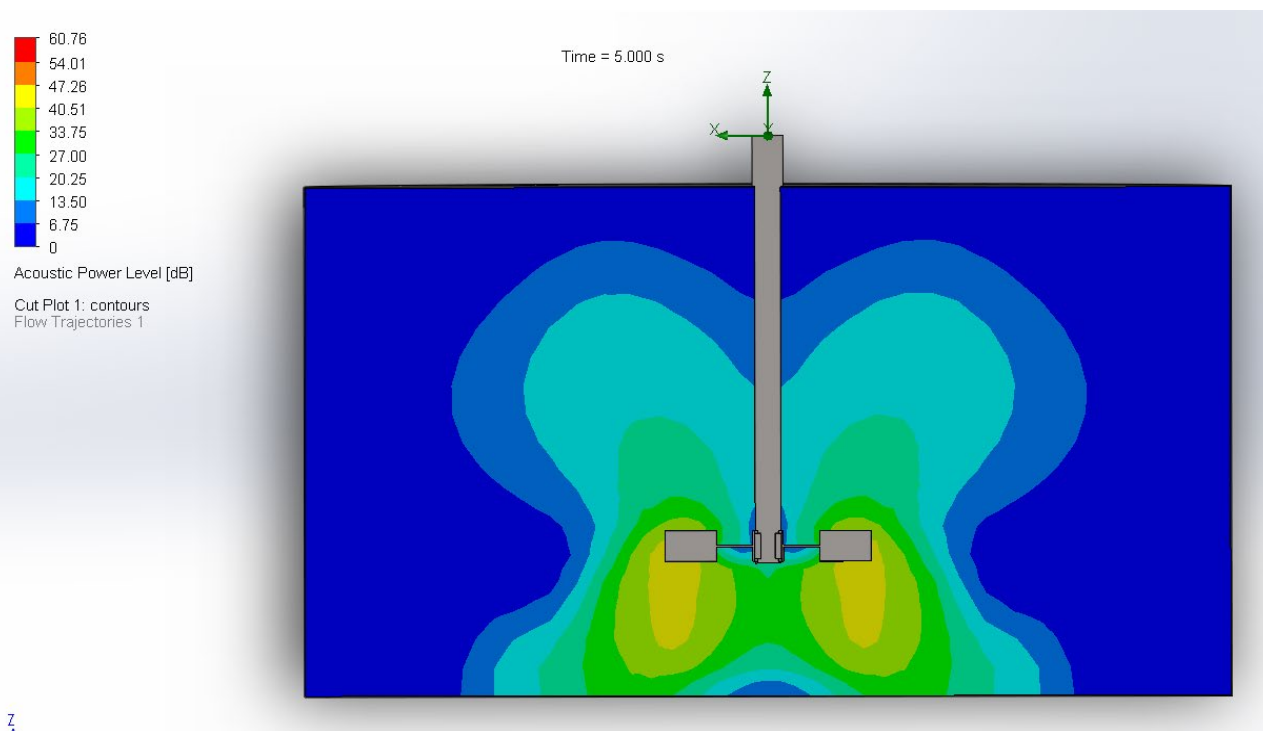


Рис. 4.18. Розподіл параметра «Acoustic Power Level» (Рівень акустичної потужності) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 1).

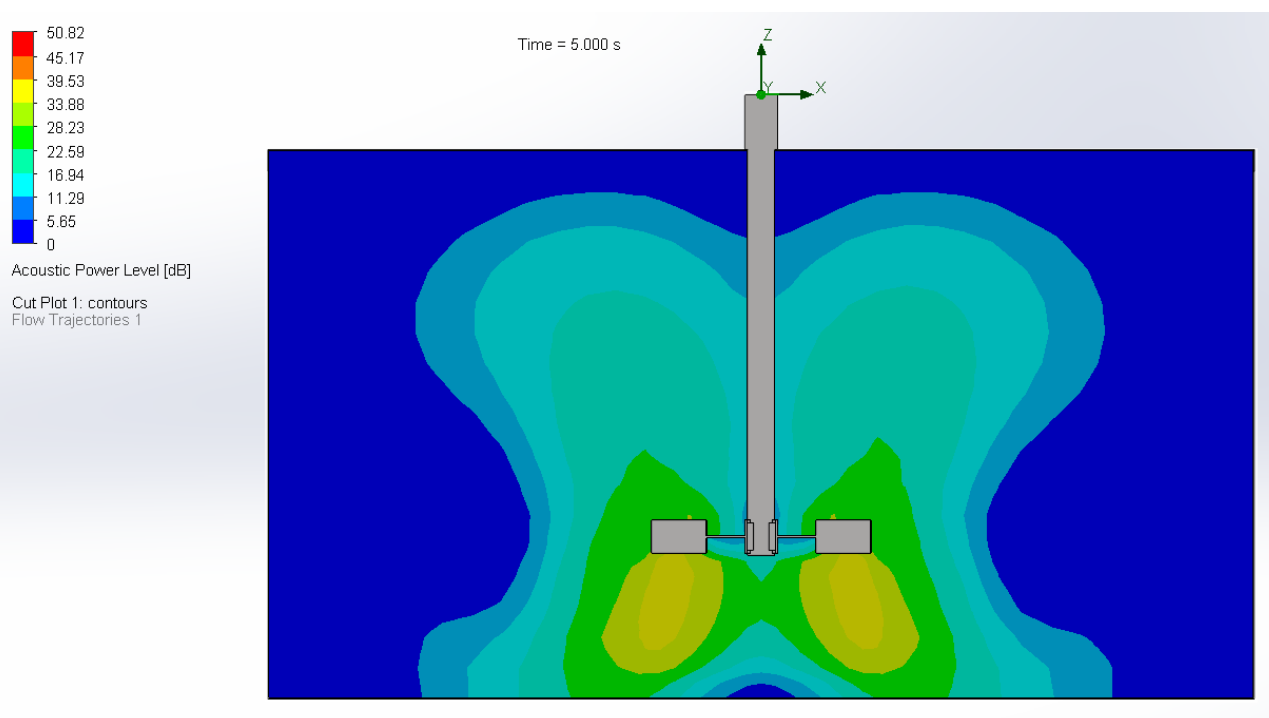


Рис. 4.19. Розподіл параметра «Acoustic Power Level» (Рівень акустичної потужності) при частоті обертання турбінки 3000 об/хв (модель 2).

Модель 2 (Закрита крильчатка). Рівні нижчі при високих частотах: від 43,12 дБ до 55,18 дБ. При низькій частоті закрита крильчатка шумніша (43,12 проти 35,22 дБ), але при високих частотах генерує на 8 дБ менше шуму (55,18 проти 63,16 дБ) – зменшення акустичної потужності приблизно у 6,3 рази. Нижчий шум пояснюється екрануванням джерел дисками, стабілізацією потоку та обмеженням об'єму кавітаційних зон.

Практичне значення. Рівень шуму є важливим фактором гігієни праці (норма до 85 дБ), діагностики несправностей (різке зростання вказує на кавітацію або дисбаланс) та може корелювати з вібраціями, що призводять до втомного руйнування конструкції.

Математичні залежності параметра «Acoustic Power Level» (Рівень акустичної потужності) при частотах обертання турбінки 2500...3500 об/хв.

Модель 1:

$$L_{1max} = -199,8 + 0,0966 \cdot n - 8,6 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ (дБ)}, R^2 \approx 0,952$$

Модель 2:

$$L_{2max} = -46,72 + 0,0360 \cdot n - 3,4 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ (дБ)}, R^2 \approx 0,992$$

4.3. Висновки по розділу

Після узагальнення та систематизації особливостей конструкцій турбінок можна зробити такі висновки. Відкрита крильчатка (модель 1) характеризується меншими екстремальними значеннями тиску, що знижує ризик кавітації при помірних швидкостях обертання 2500-2750 об/хв. Така конструкція створює нижчі силові навантаження, що дозволяє використовувати менш міцні матеріали. Вона простіша у виготовленні та обслуговуванні, практично безшумна при низьких швидкостях. Водночас відкрита крильчатка має нижчу гідравлічну ефективність через перетікання рідини та створює менші швидкості потоку при тій самій частоті обертання. При високих швидкостях спостерігається різке

зростання шуму, а поведінка системи стає менш передбачуваною через перехідні процеси.

Закрита крильчатка (модель 2) забезпечує значно вищу гідравлічну ефективність, створюючи більші швидкості та перепади тиску. Вона демонструє стабільнішу та передбачуванішу поведінку параметрів, нижчий рівень шуму при високих швидкостях, а також вищу інтенсивність перемішування та масообміну. Проте закрита конструкція має екстремально високі локальні розрідження, що створює підвищений ризик кавітації при всіх частотах обертання. Вона характеризується значно вищими силовими навантаженнями, що вимагає використання високоміцних матеріалів. Конструкція є складнішою та дорожчою, а також генерує дещо вищі температури через інтенсивнішу дисипацію енергії.

Аналіз виявляє фундаментальні нелінійності: квадратична залежність динамічних тисків (підтверджується $R^2 > 0,99$), кубічна залежність потужності (збільшення швидкості на 40% призводить до зростання потужності у 2,7 рази), критичні переходи для відкритої крильчатки у діапазоні 2750-3000 об/хв (перехід до розвиненого турбулентного режиму).

Проведене комп'ютерне моделювання надало детальну картину гідродинамічних та акустичних процесів у робочому діапазоні 2500-3500 об/хв. Отримані кількісні дані та Регресійні залежності дозволяють прогнозувати поведінку параметрів при проміжних режимах та служать основою для науково обґрунтованого вибору типу мішалки для конкретних технологічних застосувань.

Закрита крильчатка забезпечує вищу ефективність, але вимагає особливої уваги до кавітації; відкрита крильчатка безпечніша при помірних швидкостях, але менш ефективна; існують критичні режими переходу між типами течії; акустичне випромінювання може служити індикатором режиму роботи; всі параметри демонструють квадратичні залежності від частоти обертання, що узгоджується з фундаментальними законами гідродинаміки.

5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5.1. Заходи з охорони праці і техніки безпеки на лінії виробництва пряників

Виробництво пряників є складним технологічним процесом, який передбачає використання різноманітного обладнання, високих температур, електричної енергії та механічних пристроїв, що створює потенційні ризики для здоров'я та безпеки працівників. Тому організація ефективної системи охорони праці на лінії виробництва пряників є невід'ємною складовою забезпечення безпечних умов праці [28,29] та попередження виробничого травматизму і професійних захворювань.

Відповідно до вимог Кодексу законів про працю України та Закону України "Про охорону праці", роботодавець зобов'язаний створити на робочих місцях умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити дотримання прав працівників у галузі охорони праці. На підприємстві має бути розроблена та впроваджена система управління охороною праці, яка включає організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи.

Перед допуском до роботи на лінії виробництва пряників усі працівники повинні пройти обов'язкові попередні медичні огляди для визначення придатності до виконання робіт за професією. Періодичні медичні огляди проводяться відповідно до встановленої періодичності для працівників, зайнятих на роботах зі шкідливими умовами праці. Особлива увага приділяється стану здоров'я працівників, які контактують з борошняним пилом, високими температурами та виконують роботи, пов'язані з фізичним навантаженням.

Важливим елементом системи охорони праці є навчання та інструктажі з питань безпеки праці. Усі працівники проходять вступний інструктаж при прийомі на роботу, первинний інструктаж на робочому місці перед початком роботи, повторний інструктаж не рідше одного разу на шість місяців, а також позаплановий та цільовий інструктажі за необхідності. Інструктажі проводяться з обов'язковою реєстрацією в журналі реєстрації інструктажів. Працівники, які обслуговують технологічне обладнання, додатково проходять спеціальне

навчання та перевірку знань з питань охорони праці в обсязі вимог, передбачених посадовими інструкціями.

На ділянці підготовки сировини основними небезпечними факторами є підвищений рівень пилу при роботі з борошном та іншими сипучими інгредієнтами, а також небезпека травмування при роботі з просіювальним та дозуючим обладнанням. Для запобігання запиленості повітря робочої зони обладнання для просіювання борошна обладнується аспіраційними системами з місцевими відсмоктувачами. Усі місця можливого виділення пилу повинні бути герметизовані або обладнані укриттями з ефективною вентиляцією. Працівники забезпечуються засобами індивідуального захисту органів дихання, зокрема протипиловими респіраторами класу захисту не нижче FFP2.

У тістоприготувальному відділенні працівники стикаються з ризиками травмування обертовими частинами тістомісильних машин, замішувачів та іншого обладнання. Усе обладнання повинно бути обладнане захисними огороженнями, блокувальними пристроями, що унеможливають пуск машини при відкритій кришці або знятому захисті. Забороняється під час роботи обладнання проводити будь-які маніпуляції всередині робочої камери, додавати інгредієнти або перевіряти стан тіста. Перед початком чищення або обслуговування обладнання воно повинно бути відключене від електромережі з використанням процедури локаут-тагаут, що передбачає блокування джерел енергії та розміщення попереджувальних бирок.

Формувальна ділянка характеризується наявністю механічного обладнання з рухомими частинами, штампами та різальними механізмами. Формувальні машини та тістозакаточні агрегати повинні бути обладнані захисними кожухами та огороженнями, які запобігають доступу рук працівників до небезпечних зон. Робочі органи машин для різання та штампування тіста представляють особливу небезпеку, тому вони обладнуються дворучним керуванням або світловими завісами безпеки, що автоматично зупиняють обладнання при перетині захисної зони. Працівники повинні бути

проінструктовані про небезпеку носіння вільного одягу, розпущеного волосся та прикрас, які можуть бути захоплені рухомими частинами обладнання.

Пекарська піч є найбільш небезпечним об'єктом на лінії виробництва пряників через високі температури, що досягають 200-240 градусів Цельсія. Працівники пекарського відділення піддаються впливу інфрачервоного випромінювання та конвективного тепла, що може призвести до перегрівання організму, теплових ударів та опіків. Для захисту від теплового випромінювання застосовуються теплоізолюючі екрани, теплові завіси та ефективна приточно-витяжна вентиляція з механічним спонуканням. Температура повітря на робочих місцях у пекарському відділенні не повинна перевищувати допустимих значень, встановлених санітарними нормами для робіт категорії II-b. При неможливості забезпечення нормативних параметрів мікроклімату працівникам надаються додаткові перерви для відпочинку в кімнатах з нормальними температурними умовами.

Працівники пекарського відділення забезпечуються спеціальним термостійким одягом, фартухами, рукавицями або рукавичками з теплозахисними властивостями. Для запобігання опікам при завантаженні та вивантаженні виробів з печі використовуються довгі термостійкі рукавиці, що захищають передпліччя. Категорично забороняється торкатися нагрітих поверхонь обладнання незахищеними руками. Біля печі повинні бути розміщені аптечки першої допомоги з засобами для надання допомоги при опіках.

Електробезпека на лінії виробництва пряників забезпечується шляхом виконання вимог Правил улаштування електроустановок та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Усе електрообладнання повинно бути занулене або заземлене відповідно до проекту. Застосовуються автоматичні вимикачі диференційного струму для захисту від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції. Електричні шафи та розподільні пристрої повинні бути закриті на замок, доступ до них мають лише електротехнічний персонал з відповідною групою допуску. Працівники виробництва повинні бути навчені правилам електробезпеки в обсязі I групи з питань електробезпеки.

Санітарно-гігієнічні умови праці на лінії виробництва пряників регламентуються вимогами санітарних норм для підприємств харчової промисловості. Виробничі приміщення повинні бути обладнані системами природної та штучної вентиляції, що забезпечують достатній повітрообмін та підтримання нормативних параметрів мікроклімату. У приміщеннях має бути передбачене достатнє природне та штучне освітлення відповідно до характеру виконуваних робіт. Підлоги у виробничих приміщеннях повинні бути рівними, неслизькими, стійкими до миття та дезінфекції.

Для працівників лінії виробництва передбачаються санітарно-побутові приміщення, що включають гардеробні для зберігання особистого та робочого одягу, душові кабінки, туалети, кімнати для приймання їжі та кімнати для відпочинку. Співвідношення площі санітарно-побутових приміщень до кількості працюючих повинно відповідати санітарним нормам. Працівникам надається можливість зміни спецодягу після кожної зміни, прання спецодягу здійснюється централізовано за рахунок підприємства.

Усі працівники лінії виробництва забезпечуються спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до Норм безплатної видачі засобів індивідуального захисту працівникам харчової промисловості. Спецодяг повинен повністю закривати особистий одяг працівника, волосся має бути захищене під ковпак або косинку. У пекарському відділенні додатково видається термостійкий спецодяг та засоби захисту рук від високих температур. Працівникам дільниць з підвищеним виділенням пилу видаються протипилові респіратори або маски.

Важливим аспектом охорони праці є організація безпечного зберігання та використання хімічних речовин, що застосовуються для миття та дезінфекції обладнання. Мийні та дезінфікуючі засоби повинні зберігатися в окремих приміщеннях або шафах з відповідним маркуванням, у заводській упаковці з етикетками. Працівники, що працюють з хімічними засобами, повинні бути проінструктовані про їх властивості, небезпеки та заходи безпеки, забезпечені гумовими рукавичками, захисними окулярами та фартухами.

Для локалізації та ліквідації можливих надзвичайних ситуацій на підприємстві розробляються плани евакуації, які розміщуються на видних місцях у виробничих приміщеннях. Евакуаційні виходи повинні бути вільними, незаставленими, двері на шляхах евакуації повинні відчинятися в бік виходу з приміщення. Виробничі приміщення обладнуються первинними засобами пожежогасіння: вогнегасниками порошковими та вуглекислотними відповідно до норм оснащення. Працівники проходять інструктажі з питань пожежної безпеки та практичні тренування з евакуації не рідше двох разів на рік.

На підприємстві проводиться постійний контроль за станом охорони праці шляхом проведення планових та позапланових перевірок структурними підрозділами служби охорони праці. Результати перевірок оформлюються актами з визначенням термінів усунення виявлених недоліків та призначенням відповідальних осіб. Ведеться облік та розслідування нещасних випадків відповідно до Порядку розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві. Аналіз причин виробничого травматизму та професійної захворюваності використовується для розробки профілактичних заходів та вдосконалення системи управління охороною праці.

Таким чином, комплексне впровадження організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів на лінії виробництва пряників забезпечує створення безпечних і нешкідливих умов праці, попередження виробничого травматизму та професійних захворювань, збереження життя і здоров'я працівників у процесі їх трудової діяльності.

5.2. Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Кондитерська фабрика є об'єктом підвищеної пожежної небезпеки через наявність значних запасів горючої сировини, використання високотемпературного обладнання, складного електрогосподарства та великої кількості працюючих, що зумовлює необхідність розробки та впровадження комплексної системи запобігання надзвичайним ситуаціям [30, 31] та мінімізації

їх наслідків. Надзвичайна ситуація на підприємстві харчової промисловості може виникнути внаслідок пожежі, вибуху борошняного пилу, аварії на інженерних мережах, стихійного лиха або техногенної катастрофи, тому завчасна підготовка персоналу та технічне оснащення фабрики засобами захисту та попередження є критично важливими для забезпечення безпеки людей та збереження матеріальних цінностей.

Відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та Правил пожежної безпеки в Україні на кондитерській фабриці має бути створена система запобігання виникненню та поширенню пожеж, що включає організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні заходи. Керівник підприємства несе персональну відповідальність за забезпечення пожежної безпеки та створення умов для ефективного реагування на надзвичайні ситуації. На фабриці призначається відповідальна особа за пожежну безпеку, затверджуються інструкції про заходи пожежної безпеки для всіх структурних підрозділів та видів робіт, створюється добровільна пожежна команда з числа працівників підприємства.

Основною причиною виникнення пожеж на кондитерських підприємствах є порушення правил пожежної безпеки при експлуатації електрообладнання, теплового устаткування, недотримання вимог технологічних регламентів, а також необережне поводження з вогнем. Особливу небезпеку становить можливість вибуху борошняного пилу, який у зваженому стані утворює вибухонебезпечну суміш з повітрям при концентрації від тридцяти до ста грамів на кубічний метр. Для запобігання утворенню вибухонебезпечних концентрацій пилу в приміщеннях підготовки та зберігання борошна обладнуються потужні системи аспірації та вентиляції з регулярним контролем їх працездатності. Усі поверхні, конструкції та обладнання в борошняних складах систематично очищуються від осілого пилу вологим способом або за допомогою промислових пиłosосів з антистатичними шлангами.

Виробничі приміщення кондитерської фабрики відносяться до різних категорій за вибухопожежною та пожежною небезпекою відповідно до НАПБ

Б.03.002-2007. Склади борошна, цукру та інших сипучих матеріалів відносяться до категорії Б, пекарське та варильне відділення до категорії В, склади готової продукції до категорії Г. Залежно від категорії приміщення встановлюються відповідні вимоги щодо конструктивних рішень, систем протипожежного захисту та експлуатаційних режимів. Будівельні конструкції повинні мати відповідну межу вогнестійкості, евакуаційні шляхи та виходи повинні забезпечувати безпечну евакуацію всіх людей за розрахунковий час.

Технологічне обладнання кондитерської фабрики встановлюється з урахуванням вимог пожежної безпеки з дотриманням протипожежних розривів між окремими одиницями обладнання та від стін приміщень. Печі для випікання пряників та іншої продукції обладнуються системами автоматичного відключення подачі газу або електроенергії при порушенні нормального режиму роботи, перегріві або виявленні витoku газу. Димові та вентиляційні канали від пекарських печей виконуються з негорючих матеріалів, оснащуються іскроуловлювачами та вогнезатримувальними клапанами. Забороняється експлуатація обладнання з несправними системами безпеки, пошкодженою теплоізоляцією або з видимими ознаками перегріву конструкцій.

Електрообладнання та електропроводка повинні відповідати вимогам Правил улаштування електроустановок з урахуванням класу зони за правилами улаштування електроустановок у вибухонебезпечних приміщеннях. В приміщеннях з можливістю утворення вибухонебезпечних сумішей борошняного пилу застосовується електрообладнання у пилозахищеному виконанні. Електромережі обладнуються автоматичними вимикачами з уставками, що відповідають розрахунковим струмам навантаження, а також пристроями захисного відключення. Регулярно проводяться перевірки стану ізоляції електромереж, вимірювання опору контурів заземлення та випробування автоматики безпеки з оформленням відповідних протоколів.

На кондитерській фабриці створюється система протипожежного водопостачання, що включає зовнішні та внутрішні мережі протипожежного водопроводу з достатнім запасом води для гасіння пожежі протягом

нормативного часу. Внутрішній протипожежний водопровід обладнується пожежними кранами, розміщеними в коридорах, на сходових клітинах та у виробничих приміщеннях на відстані, що забезпечує подачу компактних струменів води в будь-яку точку приміщення. Пожежні крани комплектуються рукавами з ручними стволами, які зберігаються в опломбованих шафах з написом "Пожежний кран" та схемою розташування найближчих евакуаційних виходів. Не рідше одного разу на шість місяців проводиться перевірка працездатності пожежних кранів з перемотуванням рукавів.

Всі виробничі, складські та допоміжні приміщення кондитерської фабрики забезпечуються первинними засобами пожежогасіння відповідно до норм оснащення, встановлених Правилами пожежної безпеки. Застосовуються переносні та пересувні вогнегасники порошкові загального призначення, вуглекислотні для електроустановок, повітряно-пінні для гасіння твердих горючих матеріалів. Вогнегасники розміщуються на видних місцях поблизу виходів з приміщень на висоті не більше півтора метра до запірно-пускового пристрою. Кожен вогнегасник забезпечується паспортом та етикеткою з зазначенням дати останньої перевірки та строку придатності. Перезарядка та перевірка вогнегасників проводиться спеціалізованими організаціями з оформленням відповідних документів.

Для приміщень значної площі передбачається обладнання автоматичних систем пожежогасіння та пожежної сигналізації. Склади готової продукції, борошняні склади та виробничі цехи обладнуються автоматичною пожежною сигналізацією з димовими, тепловими або комбінованими пожежними сповіщувачами, підключеними до приймально-контрольних приборів. При спрацюванні сповіщувачів сигнал надходить на центральний пульта охорони, автоматично включається система оповіщення та управління евакуацією людей, відбувається відключення систем вентиляції та запуск систем протидимного захисту. В окремих приміщеннях з високою пожежною небезпекою встановлюються автоматичні установки пожежогасіння водяні спринклерні або

дренчерні, порошкові або газові залежно від специфіки технологічного процесу та характеристик обладнання.

Система оповіщення та управління евакуацією людей при пожежі проектується відповідно до вимог ДБН В.2.5-56:2014 та забезпечує своєчасне доведення до людей інформації про виникнення пожежі та необхідність евакуації. Залежно від площі приміщень та кількості працюючих застосовуються системи оповіщення різних типів від найпростіших звукових сповіщувачів до складних систем з мовним оповіщенням та світловими покажчиками напрямку евакуації. Звукові сповіщувачі повинні забезпечувати рівень звукового тиску не менше семидесяти п'яти децибел на відстані трьох метрів, що перевищує рівень виробничого шуму не менше ніж на п'ятнадцять децибел. Система оповіщення повинна регулярно перевірятися на працездатність з веденням журналу технічного обслуговування.

Для забезпечення безпечної евакуації людей з будівлі кондитерської фабрики при виникненні надзвичайної ситуації розробляються плани евакуації, які затверджуються керівником підприємства та погоджуються з органами державного пожежного нагляду. План евакуації складається окремо для кожного поверху будівлі та включає графічну частину з позначенням евакуаційних виходів, шляхів евакуації, місць розташування засобів пожежогасіння, пожежних кранів, кнопок ручних пожежних сповіщувачів, а також текстову частину з інструкцією про порядок дій людей при виникненні пожежі. Плани евакуації виготовляються на фотолюмінесцентній основі, розміщуються на видних місцях на шляхах евакуації та у приміщеннях з масовим перебуванням людей.

Евакуаційні шляхи та виходи повинні завжди утримуватися вільними, незаставленими матеріалами, обладнанням або тарою. Ширина евакуаційних шляхів повинна забезпечувати безперешкодний рух людського потоку відповідно до розрахункової кількості людей, але не менше одного метра для коридорів та не менше одного метра двадцяти сантиметрів для сходових маршів. Двері на шляхах евакуації повинні відчинятися назовні по ходу евакуації, обладнуватися засувами, які легко відчиняються зсередини без ключа. Забороняється замикати евакуаційні

виходи на замки, забивати двері цвяхами або загороджувати їх будь-яким способом під час перебування людей в приміщеннях.

Евакуаційні виходи та шляхи евакуації обладнуються системою евакуаційного освітлення та світловими покажчиками напрямку руху до виходів. Світлові покажчики "Вихід" виконуються на фотолюмінесцентній або електричній основі з автономним джерелом живлення та встановлюються над дверима евакуаційних виходів, на поворотах коридорів, біля сходів. Евакуаційне освітлення забезпечує мінімальну освітленість на підлозі по осі евакуаційних шляхів не менше половини люкса та працює від окремої групи з автоматичним включенням при зникненні основного освітлення або спрацюванні пожежної сигналізації.

Розрахунок часу евакуації з будівлі кондитерської фабрики проводиться відповідно до методики, викладеної в ДСТУ 8828:2019, з урахуванням характеристик евакуаційних шляхів, дверних прорізів, сходів, а також фізичних можливостей людей різних вікових груп. Розрахунковий час евакуації не повинен перевищувати необхідного часу евакуації, який визначається часом від початку пожежі до настання критичних значень небезпечних факторів пожежі на шляхах евакуації. При неможливості забезпечення безпечної евакуації за розрахунками проводяться заходи щодо збільшення ширини евакуаційних виходів, влаштування додаткових виходів або встановлення систем протидимного захисту.

Для запобігання задимленню евакуаційних шляхів при пожежі в багатоповерхових будівлях кондитерських фабрик обладнуються системи протидимного захисту, що включають системи видалення диму з коридорів та приміщень, а також системи підпору повітря в сходові клітини, які перешкоджають проникненню диму на шляхи евакуації. Системи протидимного захисту автоматично включаються при спрацюванні пожежної сигналізації одночасно з відключенням систем загальнообмінної вентиляції. Регулярно, не рідше двох разів на рік, проводяться випробування систем протидимного захисту

з перевіркою необхідних параметрів швидкості руху повітря та підтримання надлишкового тиску.

На підприємстві затверджується наказом керівника інструкція про дії персоналу при виявленні пожежі або іншої надзвичайної ситуації. Кожен працівник повинен знати порядок виклику пожежної охорони за телефоном сто один або єдиним номером виклику екстрених служб сто дванадцять, місця розташування найближчих засобів пожежогасіння та евакуаційних виходів, способи безпечної евакуації з робочого місця. При виявленні ознак пожежі працівник зобов'язаний негайно повідомити про це диспетчера, начальника зміни або адміністрацію підприємства, вжити заходів щодо евакуації людей та гасіння пожежі первинними засобами без ризику для власного життя.

Для координації дій при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на підприємстві створюється штаб цивільного захисту під керівництвом директора фабрики або його заступника. До складу штабу входять керівники структурних підрозділів, начальник служби охорони праці, головний інженер, головний енергетик, начальник служби безпеки. Розробляється план реагування на надзвичайні ситуації, в якому визначаються можливі сценарії розвитку подій, розподіл обов'язків між членами штабу, порядок оповіщення та евакуації людей, взаємодія з оперативними службами, заходи щодо локалізації та ліквідації надзвичайної ситуації.

З метою підвищення готовності персоналу до дій в умовах надзвичайних ситуацій проводяться навчання та тренування з відпрацювання планів евакуації. Практичні тренування з евакуації проводяться не рідше одного разу на шість місяців окремо для кожної зміни з максимальним наближенням до реальних умов. Під час тренувань перевіряється спрацювання систем оповіщення та сигналізації, визначається фактичний час евакуації людей, виявляються недоліки в організації евакуації та плануванні. За результатами тренувань складається акт з висновками та рекомендаціями щодо вдосконалення системи забезпечення безпеки при надзвичайних ситуаціях.

Усі працівники підприємства при прийомі на роботу та періодично під час роботи проходять навчання з питань цивільного захисту та пожежної безпеки. Програма навчання включає вивчення основних вимог нормативних документів з пожежної безпеки, характеристик пожежної небезпеки виробництва, дій при виявленні пожежі, способів евакуації та використання первинних засобів пожежогасіння, надання першої допомоги потерпілим. Особлива увага приділяється практичній підготовці з використання вогнегасників різних типів та пожежних кранів. Навчання завершується перевіркою знань з оформленням відповідного протоколу.

Для оперативного реагування на пожежі та інші надзвичайні ситуації до прибуття професійних аварійно-рятувальних служб на підприємстві створюється добровільна пожежна команда з числа працівників різних підрозділів. Члени добровільної пожежної команди проходять спеціальну підготовку з пожежно-технічного мінімуму, навчаються прийомам гасіння пожеж первинними засобами, роботі з пожежними кранами, застосуванню засобів індивідуального захисту органів дихання та зору. Добровільна пожежна команда забезпечується необхідним обладнанням, інвентарем та засобами захисту, проводить регулярні тренування та навчання.

Особлива увага приділяється підготовці підприємства до можливих надзвичайних ситуацій природного характеру, таких як повені, урагани, землетруси, а також до техногенних аварій на суміжних об'єктах або на міських інженерних мережах. Розробляються відповідні розділи плану реагування на надзвичайні ситуації з визначенням заходів щодо захисту людей та матеріальних цінностей. Створюються резервні джерела електропостачання та водопостачання для підтримання роботи критично важливих систем життєзабезпечення. Формуються запаси матеріально-технічних ресурсів, необхідних для ліквідації можливих наслідків надзвичайних ситуацій.

Контроль за дотриманням вимог пожежної безпеки та готовністю до дій при надзвичайних ситуаціях здійснюється шляхом проведення систематичних оглядів, перевірок та випробувань. Відповідальні особи проводять щоденні

огляди виробничих приміщень після закінчення робочої зміни для виявлення можливих порушень вимог пожежної безпеки. Служба охорони праці проводить планові та позапланові перевірки стану пожежної безпеки в структурних підрозділах з оформленням актів та приписів про усунення виявлених недоліків. Керівництво підприємства організовує проведення незалежних аудитів системи забезпечення пожежної безпеки спеціалізованими організаціями.

Важливим елементом системи безпеки є забезпечення інформованості працівників про стан пожежної безпеки та заходи безпеки. На території та в приміщеннях підприємства розміщуються знаки безпеки відповідно до ДСТУ ISO 3864-1, що попереджають про небезпеку, забороняють певні дії, вказують на розташування засобів протипожежного захисту та напрямки евакуації. Проводяться бесіди, інструктажі, демонструються навчальні фільми з питань пожежної безпеки. Організуються виставки та стенди з наочною інформацією про дії при надзвичайних ситуаціях.

Фінансування заходів з пожежної безпеки та цивільного захисту здійснюється за рахунок коштів підприємства і передбачається окремою статтею в річному бюджеті. Кошти спрямовуються на придбання та обслуговування засобів протипожежного захисту, навчання персоналу, проведення тренувань та навчань, модернізацію систем безпеки. Недостатнє фінансування заходів з безпеки є неприпустимим, оскільки це створює загрозу життю та здоров'ю людей і може призвести до значних матеріальних втрат.

Таким чином, комплексна система заходів з безпеки в надзвичайних ситуаціях на кондитерській фабриці, що включає організаційні, технічні, профілактичні та навчальні компоненти, забезпечує високий рівень захищеності персоналу та об'єкта від пожеж та інших надзвичайних ситуацій, дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційні небезпеки, ефективно реагувати на загрози та мінімізувати можливі наслідки для людей, виробництва та навколишнього середовища.

Висновки

В кваліфікаційній магістерській роботі було запропоновано заходи з удосконалення конструкції емульсора марки А2-ШУИ за результатами комп'ютерного 3d моделювання.

При виконанні даної роботи виконано ряд поставлених завдань, зокрема: вивчено актуальний стан предмета дослідження, визначено і обґрунтовано пріоритетні напрями наукової роботи; сформовано комплекс методів та методик для дослідницької роботи; здійснено технологічні і конструктивні обчислення для емульсора; побудовано просторову модель емульсора; сформовано розрахункову модель для числових досліджень; визначено параметри моделювання та проведено відповідні розрахунки; проаналізовано отримані результати моделювання та узагальнено висновки; розроблено комплекс заходів з охорони праці й техніки безпеки; створено систему заходів безпеки в умовах надзвичайних ситуацій. Досліджено два типи ротора - з відкритою і закритою крильчаткою.

Відкрита крильчатка характеризується меншими екстремальними значеннями тиску, що знижує ризик кавітації при помірних швидкостях обертання 2500-2750 об/хв. Така конструкція створює нижчі силові навантаження, що дозволяє використовувати менш міцні матеріали. Вона простіша у виготовленні та обслуговуванні, практично безшумна при низьких швидкостях. Водночас відкрита крильчатка має нижчу гідравлічну ефективність через перетікання рідини між лопатями та створює менші швидкості потоку при тій самій частоті обертання. При високих швидкостях спостерігається різке зростання шуму, а поведінка системи стає менш передбачуваною.

Закрита крильчатка забезпечує значно вищу гідравлічну ефективність, створюючи більші швидкості та перепади тиску. Вона демонструє стабільнішу поведінку параметрів, нижчий рівень шуму при високих швидкостях обертання,

а також вищу інтенсивність перемішування та масообміну. Проте закрита конструкція має екстремально високі локальні розрідження, що створює підвищений ризик кавітації при всіх частотах обертання. Вона характеризується значно вищими силовими навантаженнями, що вимагає використання високоміцних матеріалів, є складнішою та дорожчою у виготовленні.

Проведене комп'ютерне моделювання надало детальну картину гідродинамічних та акустичних процесів у робочому діапазоні 2500-3500 об/хв. Отримані регресійні залежності дозволяють прогнозувати поведінку параметрів при проміжних режимах та служать основою для науково обґрунтованого вибору типу мішалки для конкретних технологічних застосувань.

Запропоновані технічні рішення є актуальними і придатними для виробничого впровадження.

Перелік посилань

1. Бурак А. Сучасні інструменти проектування машин // Матеріали VIII Міжнародної студентської конференції „Природничі та гуманітарні науки“, Тернопіль, 24-25 квітня 2025 року. 2025. С. 358.
2. Крупа, В. В. Кваліфікаційна робота магістра: структура, вимоги до виконання та захист: методичні рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія» для здобувачів всіх форм здобуття освіти / В. В. Крупа та ін. – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 66 с.
3. Закалов О.В. Технологічне обладнання харчових виробництв. / Закалов О.В. Закалов І.О. – Тернопіль, 2001.
4. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. /За ред. І.С.Гулого – Вінниця: Нова книга, 2001р. –576с.
5. Єресько Г.О. Технологічне обладнання молочних виробництв: навч. посібник/ Єресько Г.О.,Шинкарик М.М.,Ворощук В.Я.-К.:ЦНЛ,2007.-337с
6. Самойчук, К. О. Технологічне обладнання хлібопекарської і макаронної галузі / К. О. Самойчук та ін. – Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2021. – 372 с.
7. Лисовенко, О. Т. Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв / О. Т. Лисовенко та ін. – Київ: Наукова думка, 2000. – 283 с.
8. Черевко, О. І. Технологічне обладнання малих харчових та переробних виробництв. Частина 3. Технологічне обладнання малих хлібопекарських і макаронних виробництв: навчальний посібник / О. І. Черевко та ін. – Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі, 2013. – 96 с.
9. Гвоздєв, О. В. Машини та обладнання хлібопекарського виробництва: підручник / О. В. Гвоздєв, Ф. Ю. Ялпачик, В. О. Олексієнко. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2010. – 312 с.

- 10.Петько, В. Ф. Технологічне устаткування хлібопекарського, макаронного і кондитерського виробництв / В. Ф. Петько та ін. – Київ: Центр учбової літератури, 2007. – 432 с.
- 11.Грищенко, І. М. Основи наукових досліджень / І. М. Грищенко, О. М. Григоренко, В. А. Борисейко. – Київ: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2001. – 124 с.
- 12.Білуха, М. Т. Методологія наукових досліджень / М. Т. Білуха. – Київ: АБУ, 2002. – 480 с.
- 13.Weber, M. SolidWorks Simulation 2017 Black Book / M. Weber, G. Verma. – CAD/CAM/CAE Works, 2016. – 362 p.
- 14.Ворощук, В. Я. Інжиніринг та 3D моделювання в середовищі SolidWorks: навч. посіб. / В. Я. Ворощук, Т. М. Вітенько. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – 164 с.
- 15.Systemes, D. Theoretical Manual SolidWorks Simulation / D. Systemes. – Dassault Systemes, 2015. – 114 p.
- 16.Kurowski, P. M. Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2018 / P. M. Kurowski. – USA: SDC Publications, 2018. – 597 p.
- 17.Мирончук, В. Г. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: навчальний посібник / В. Г. Мирончук та ін. – Вінниця: Нова книга, 2004. – 228 с.
- 18.Кіркач, Н. Ф. Розрахунки і проектування деталей машини / Н. Ф. Кіркач, Р. А. Баласанян. – Харків: Основа, 1991. – 275 с.
- 19.Павлище, В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В. Т. Павлище та ін. – Київ: Вища школа, 1993. – 556 с.
- 20.Ялпачик, В. Ф. Монтаж, експлуатація і ремонт машин та обладнання переробних підприємств / В. Ф. Ялпачик та ін. – Мелітополь: Таврійський державний агротехнологічний університет, 2014. – 235 с.
- 21.Рурський, П. В. Монтаж, ремонт, наладка обладнання харчових виробництв / П. В. Рурський та ін. – Харків, 2001. – 230 с.
- 22.Вітенько, Т. М. Сучасні підходи до конструювання і моделювання робочих органів технологічного обладнання харчових виробництв / Т. М. Вітенько, В.

- Я. Ворощук. Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: третя міжнародна науково-практична конференція, 4–6 вересня 2019 р. / під ред. Дейниченко Г. В. – ХДУХТ, 2019. – С. 108–109.
23. Lombard, M. Mastering SolidWorks / M. Lombard. – Sybex, 2019. – 1219 p.
24. Keska, P. SolidWorks 2021: Part Modeling, Assemblies, and Drawings / P. Keska. – CADvantage, 2021. – 1586 p.
25. Petrova, R. V. Introduction to Static Analysis Using SolidWorks Simulation / R. V. Petrova. – CRC Press, 2015. – 348
26. Ворощук В. Я., Вітенько Т. М. Інжиніринг та 3D моделювання в середовищі SolidWorks : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. 164 с.
27. Development of digital twin interface for Industry 4.0 production line / Y. Skorenkyu et al. CEUR Workshop Proceedings. 2024. Vol. 3742. P. 358–369.
28. Грибан, В. Г. Охорона праці: навчальний посібник / В. Г. Грибан, О. В. Негодченко. – Київ: Центр учбової літератури, 2009. – 280 с.
29. Ткачук, К. Н. Основи охорони праці: підручник / К. Н. Ткачук та ін. – 2-ге вид. – Київ: Основа, 2006. – 448 с. (Зверніть увагу на скорочення "вид." замість "ed." та дефіс між "2" та "ге")
30. Стручок, В. С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В. С. Стручок. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
31. Березуцький, В. В. Безпека життєдіяльності: навчальний посібник / за ред. В. В. Березуцького. – Харків: Факт, 2005. – 384 с.

Додатки
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет в Кошице (Словаччина)
Каунаський технологічний університет (Литва)
Львівський національний університет
імені Івана Франка,
Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташиця (Польща)
Луцький національний технічний університет,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет технологій та економіки
імені Хелени Ходковської (Польща)
Донбаська державна машинобудівна академія



*Студентське наукове
товариство*



**VIII МІЖНАРОДНА
студентська науково - технічна конференція
"ПРИРОДНИЧІ ТА ГУМАНІТАРНІ
НАУКИ.**

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ"

24-25 квітня 2025 р.

(збірник тез конференції)

Тернопіль 2025

УДК 621.01

Бурак А. – ст. гр. МОм-51

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

СУЧАСНІ ІНСТРУМЕНТИ ПРОЕКТУВАННЯ МАШИН

Науковий керівник: к.т.н. В. Ворошчук

Burak A.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

MODERN MACHINE DESIGN TOOLS

Supervisor: V. Voroshchuk

Ключові слова: машинобудування, інструмент, дизайн, ефективність.

Keywords: engineering, tools, design, efficiency.

Сучасне машинобудування переживає період фундаментальних змін, зумовлених стрімкою цифровізацією галузі. Традиційні методи проектування поступаються місцем інтегрованим цифровим рішенням, які дозволяють суттєво скоротити час розробки при одночасному підвищенні якості та зниженні собівартості продукції. Еволюція інструментів проектування пройшла шлях від двовимірного креслення до складних систем з елементами штучного інтелекту.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр машинобудування проектування: системи автоматизованого проектування (CAD), системи інженерного аналізу (CAE), системи підготовки виробництва (CAM), системи управління життєвим циклом продукту (PLM). Комплексне використання цих інструментів забезпечує безперервність цифрового потоку даних та мінімізує ризик помилок між етапами розробки. Особливу роль у сучасному проектуванні відіграють системи генеративного дизайну та штучний інтелект, що аналізують тисячі можливих варіантів конструкції та пропонують оптимальні рішення за заданими параметрами. Нейронні мережі активно інтегруються в процеси прогнозування поведінки складних механічних систем та автоматизацію рутинних проектних операцій. Цифрові двійники забезпечують можливість віртуального тестування в різноманітних умовах експлуатації, предиктивного обслуговування та оптимізації робочих параметрів на основі даних реального часу. Цей підхід дозволяє виявляти потенційні проблеми ще на етапі проектування, значно скорочуючи витрати на фізичне прототипування та випробування. Хмарні технології колаборативного проектування забезпечують одночасну роботу географічно розподілених команд та доступ до потужних обчислювальних ресурсів. Перехід від локальних до хмарних систем проектування спрощує взаємодію між учасниками процесу та знижує витрати на IT-інфраструктуру.

Адитивні технології стимулюють розвиток інструментів для створення складних біонічних форм і решітчастих структур з унікальними властивостями. Топологічна оптимізація конструкцій дозволяє зменшити масу виробів при збереженні або покращенні їхніх механічних властивостей, що особливо важливо для аерокосмічної та автомобільної галузей.

Попри значні початкові інвестиції, впровадження передових інструментів проектування демонструє високу економічну ефективність, дозволяючи суттєво скоротити час розробки, зменшити кількість помилок та знизити витрати на матеріали.

Бонар В. ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ НЕКЕРОВНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ DBSCAN ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ НОМАЛІЙ В OBD-II ДАНИХ	345
Глов'як Р. МІКРОСЕРВІС SMART LOGISTICS ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЛАНЦЮГІВ ПОСТАЧАННЯ ТОВАРІВ І ПОСЛУГ	347
Каровська Н. ВПЛИВ ТИПУ ПРИВ'ЯЗАНOSTІ НА ВИНИКНЕННЯ РЕВНОЩІВ У ПАРТНЕРСЬКИХ ВІДНОСИНАХ	349
Шингера М. ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ В SOLIDWORKS	351
Боднар М. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ ВЕБ-ІНТЕРАКТИВНИХ СТРАТЕГІЧНИХ ІГОР	352
Чевелюк О. ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДАХУ НА ВИТРАТИ МАТЕРІАЛІВ	353
Веремчук С. МАТЕРІАЛИ ІНСТРУМЕНТІВ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ	354
Подсаднюк Т. КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СОЦІАЛЬНОМУ ІНЖИНІРИНГУ	356
Бурак А. СУЧАСНІ ІНСТРУМЕНТИ ПРОЕКТУВАННЯ МАШИН	358
Карпюк Т. НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВOSTІ	359
Кірічек В. ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ В КОНСТРУКЦІЯХ НОЖІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РІЗАННЯ М'ЯСА	360
Колісун В. ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЇ МІСИЛЬНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ	361
Мецан М. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДРОБАРОК УДАРНОЇ ДІЇ	362