

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

«На правах рукопису»  
УДК 678.6

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО  
Завідувач кафедри МАХНВ

\_\_\_\_\_ Андрій СТЕПАНЮК  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані  
технології проектування інноваційного галузевого обладнання»  
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
на тему: «Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з  
розробкою реактора та центрифуги»**

**Виконав:**

студент 2 курсу, групи ЛМ-41мп  
Артем БЕЛОКОНЬ \_\_\_\_\_

**Наукова керівниця:**

к.т.н. Олена ГУСАРОВА \_\_\_\_\_

**Консультанти:**

охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях  
ст. викл., к.т.н. Андрій КОВТУН \_\_\_\_\_

розробка стартап-проекту  
доцент, к.е.н. Наталія ЮДІНА \_\_\_\_\_

автоматичний контроль і керування процесом  
професор, д.т.н. Олексій ЖУЧЕНКО \_\_\_\_\_

комп'ютерне моделювання процесів взаємодії  
асистент Микита БИШКО \_\_\_\_\_

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та прізвище)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_ Артем БЕЛОКОНЬ

Київ – 2025 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології**

**Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**Рівень вищої освіти – другий (магістерський)**

**Напрямок підготовки: 13 Механічна інженерія**

**Спеціальність: 133 – Галузеве машинобудування**

**Освітньо-професійна програма: «Інжиніринг та комп’ютерно–інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Андрій СТЕПАНЮК

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Белоконю Артему Ігоровичу

**1. Тема дисертації:** «Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги»

наукова керівниця дисертації: к.т.н. Гусарова Олена Віталіївна.

затверджені наказом по університету від “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р. № \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студентом дисертації:** « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**3. Вихідні дані:** Продуктивність лінії виробництва поліетилену 1,25 кг/с (4500 кг/год). Розробити центрифугу для віджиму суспензії поліетилену НОГШ-1001К-01 та реактор приготування каталізатора Циглера-Натта,  $V_a = 2,5 \text{ м}^3$ ,  $G_{\text{доб}} = 0,6 \text{ кг/с}$ .

**4. Перелік завдань, які потрібно розробити:**

- а) основна частина: обґрунтувати вибір конструкцій центрифуги та реактора виконати розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій, а саме, технологічний, параметричний розрахунки, розрахунки на міцність і надійність елементів конструкцій цих апаратів;
- б) маркетинг стартап–проектів: створити стартап–проект модернізованого апарату;
- в) охорона праці: провести аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів, які пов’язані з експлуатацією апарата з мішалкою та центрифуги, запропонувати заходи щодо обмеження їх дії, виконати відповідні розрахунки, викласти основні правила безпечної експлуатації установки та дій обслуговуючого персоналу у надзвичайних ситуаціях;
- г) частина автоматичного керування: скласти та обґрунтувати схему автоматизованого керування установкою; скласти специфікацію приладів;
- д) комп’ютерне моделювання процесів взаємодії: моделювання процесів взаємодії, симуляційний експеримент, що підтверджує запропоновану модернізацію.

**5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов’язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):** технологічна схема – А1; складальні кресленики: центрифуга – А2×4, реактор – А2×3, ілюстрація технічної ідеї модернізації – 2 А1, схема автоматизації – А2, ротор центрифуги – А2×3, шнек – А2×3.

**6. Перелік публікацій:** три тези доповідей за темою магістерської дисертації.

**7. Консультанти розділів проекту:**

Розділ	Ім'я ПРІЗВИЩЕ консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	2	3	4
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Андрій КОВТУН		

1	2	3	4
Розробка стартап-проекту	Наталія ЮДІНА		
Автоматичний контроль і керування процесом	Олексій ЖУЧЕНКО		
Комп'ютерне моделювання процесів взаємодії	Микита БИШКО		

**8. Дата видачі завдання:** 01 вересня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів проєкту	Примітка
1	2	3	4
1	Переддипломна практика. Узгодження теми, вихідних даних, визначення джерел інформації. Складання звіту з практики	01.09.2025	
2	Патентне дослідження. Формування змісту модернізації. Опис установки. Схема установки.	14.09.2025	
3	Обґрунтування актуальності проєкту. Вибір і опис конструкції центрифуги і реактора. Вибір матеріалів	25.09.2025	
4	Параметричний розрахунок: визначення основних розмірів апаратів. Моделювання запропонованої модернізації	07.10.2025	
5	Розробка складальних креслень апаратів і їх складальних одиниць. Вибір конструктивних параметрів конструктивних елементів апаратів	12.10.2025	
6	Розрахунки на міцність. Розробка алгоритмів та програм розрахунку	19.10.2025	
7	Уточнення графічної частини проєкту та специфікацій. Технічна характеристика установки. Створення стартап проєкту	25.10.2025	

1	2	3	4
8	Консультації відповідно до графіку з питань охорони праці, економіки, технології машинобудування, автоматизації.	05.11.2025	
9	Оформлення пояснювальної записки. Перевірка відповідності проєкту діючим нормам за змістом і оформленням.	18.11.2025	
10	Підготовка до захисту. Складення плану викладення доповіді, окремих питань	25.11.2025	
11	Попередній захист магістерської дисертації	10.12.2025	
12	Корегування проєкту за результатами попереднього захисту. Отримання рецензії, відзиву. Підготовка до захисту	12.12.2025	

**Студент**

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Артем БСЛОКОНЬ**

**Керівниця магістерської дисертації**

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Олена ГУСАРОВА**

## РЕФЕРАТ

УДК 678.6

Магістерська дисертація на тему «Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Керівниця О.В Гусарова. – Київ, 2025. – 241 с.: іл. – Викон. А.І. Белоконь – Бібліогр.: с. 159.

Пояснювальна записка складається зі вступу, восьми розділів, висновків, і списку посилань із 57 найменувань. Обсяг роботи становить 158 сторінок основного тексту, 45 рисунків, 29 таблиць і 6 додатків.

Метою дисертації є проектування центрифуги та реактору для схеми виробництва полімеру високої густини.

Записка містить опис технологічного процесу, вибір типів центрифуги і реактора, зазначення їх місця в технологічній схемі, технічну характеристику апаратів, обґрунтування вибору їх конструкцій і принцип роботи. Виконано порівняння основних показників розроблених конструкцій апаратів з аналогами і патентне дослідження. Проведено параметричний, технологічний, конструкційний, тепловий розрахунки апаратів. Виконано модернізацію перемішуючого пристрою реактора та симуляційний експеримент запропонованої модернізації. Наведено вимоги і заходи до розділу охорони праці і рекомендації щодо монтажу та експлуатації, визначено рівень стандартизації та уніфікації, розроблено автоматичну схему керування та стартап-проект.

Графічна частина проекту включає: кресленики технологічної схеми і схеми автоматизації, кресленики центрифуги, реактору, їх складальних одиниць, та специфікацій до них, два плакати модернізації перемішуючого пристрою реактору.

**РЕАКТОР, ЦЕНТРИФУГА, ПОЛІЕТИЛЕН ВИСОКОЇ ГУСТИНИ,  
МОДЕРНІЗАЦІЯ.**

## ABSTRACT

UDC 678.6

Master's thesis on “Modernization of high-density polyethylene production line with the development of a reactor and centrifuge” / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; Supervisor O.V. Gusarova. – Kyiv, 2025. – 241 p.: ill. – Executed by A.I. Belokon – Bibliography: p. 159.

The explanatory note consists of an introduction, eight chapters, conclusions, and a list of 57 references. The work comprises 158 pages of main text, 45 figures, 29 tables, and 6 appendices.

The purpose of the dissertation is to design a centrifuge and reactor for a high-density polymer production scheme.

The note contains: description of the technological process, selection of centrifuge and reactor types, an indication of their place in the technological scheme, technical characteristics, justification for the choice of their designs, and the principle of operation, comparison of the main parameters of the developed apparatus designs with analogues and a patent study. Parametric, technological, structural, and thermal calculations of the apparatus have been performed. The reactor mixing device has been modernized and a simulation experiment of the proposed modernization has been carried out. Requirements and measures for occupational safety and recommendations for installation and operation are provided, the level of standardization and unification is determined, an automatic control scheme and a startup project are developed.

The graphic part of the project includes: drawings of the technological diagram and automation diagram, drawings of the centrifuge, reactor, their assembly units, and specifications for them, two posters on the modernization of the reactor mixing device.

REACTOR, CENTRIFUGE, HIGH-DENSITY POLYETHYLENE,  
MODERNIZATION.

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності:** 133 Галузеве машинобудування

**освітня програма (спеціалізація):** Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання

**на тему: Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги**

Київ – 2025

## Зміст

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів .....	13
Вступ.....	15
1 Призначення та область використання установки для виробництва поліетилену високої густини.....	17
1.1 Опис технологічного процесу.....	17
1.2 Вибір типів апаратів та їх місце в технологічній схемі .....	20
2 Технічні характеристики основних апаратів установки .....	35
3 Опис та обґрунтування вибраної конструкції апаратів.....	38
3.1 Конструкція і принцип дії апаратів, основних складальних одиниць та деталей .....	38
3.2 Порівняння основних показників розроблених конструкцій апаратів з аналогами .....	43
3.3 Вибір матеріалів елементів конструкцій апаратів .....	46
3.4 Патентний огляд конструкцій основного обладнання установки .....	48
4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій.....	70
4.1 Технологічний розрахунок центрифуги .....	70
4.2 Визначення основних параметрів центрифуги .....	73
4.3 Розрахунок циліндричної частини обичайки ротора центрифуги в безмоментній зоні .....	76

Відповідальна організація Кафедра МАХНВ	Технічне узгодження Новошат О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського	Розробник документа Бєлокань А.	Назва, додаткова назва Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги	ЛМ4.1МП.02.100.000			
	Документ затверджено Гусарова О.		Інд. змін	Дата видання	Мова UA	Аркуш 10

4.4 Розрахунок конічної частини обичайки ротора центрифуги в безмоментній зоні .....	80
4.5 Розрахунок днища і борта ротора центрифуги .....	83
4.6 Технологічний розрахунок реактора.....	89
4.7 Тепловий розрахунок реактора.....	92
4.8 Розрахунок теплообміну в реакторі .....	94
4.9 Розрахунок потужності, що витрачається на перемішування.....	99
4.10 Визначення втрат потужності на подолання сил тертя в сальниковому ущільненні.....	101
4.11 Розрахунок потужності приводу механічного перемішуючого пристрою реактора.....	103
4.12 Розрахунок товщин стінок циліндричної обичайки та еліптичного днища рубашки.....	105
4.13 Розрахунок перемішуючого пристрою реактора.....	108
5 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	111
5.1 Мікроклімат .....	116
5.2 Склад повітря робочої зони.....	117
5.3 Виробниче освітлення .....	118
5.4 Виробничий шум.....	119
5.5 Виробничі вібрації .....	120
5.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	121
5.7 Технічні та організаційні заходи щодо ліквідації та локалізації аварійних ситуацій .....	121

6 Рекомендації, щодо монтажу та експлуатації апаратів установки для виробництва поліетилену високої густини.....	126
7 Рівень стандартизації та уніфікації .....	133
8 Стартап-проект .....	135
8.1 Опис ідеї проекту .....	135
8.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	138
8.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	149
8.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	152
Висновки .....	157
Conclusion.....	158
Перелік посилань.....	159
Додаток А Автоматична схема керування установкою .....	167
Додаток Б Документація до патентного дослідження.....	181
Додаток В Програма розрахунку у Matcad .....	193
Додаток Г Патенти, які використані в патентному дослідженні .....	200
Додаток Д Комп'ютерне моделювання.....	211
Додаток Е Публікації автора.....	222

## Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів

Умовні позначення:

$D, d$  – діаметри, м;

$R, r$  – радіуси, м;

$G$  – масова витрата, кг/с;

$V$  – об'ємна витрата, м<sup>3</sup>;

$w$  – швидкість, м;

$P$  – тиск, Па;

$T$  – температура, К;

$t$  – температура, °С;

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с;

$c$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

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

$n$  – частота обертання, с<sup>-1</sup>;

$\mu$  – в'язкість, Па·с;

$Fr$  – фактор розділення;

$E$  – модуль повздовжньої пружності, МПа;

$S$  – товщина стінки, м;

$\varphi$  – коефіцієнт міцності зварних швів;

$\psi$  – коефіцієнт завантаження;

$\Sigma$  – індекс продуктивності, м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – напруження, МПа;

$Ne$  – коефіцієнт Ньютона;

$C_1$  – прибавка до розрахункової товщини, м;

$\beta$  – коефіцієнт затухання;

$\omega$  – кутова швидкість обертання,  $\text{с}^{-1}$ ;

$x$  – довжина крайової зони, м;

$\tau$  – час процесу, с;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії;

$Q$  – теплота, Дж;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$N$  – потужність, Вт;

$k$  – коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$F$  – площа,  $\text{м}^2$ .

Критерії:

$Pr$  – критерій Прандтля.

$Ar$  – критерій Архімеда;

$Re$  – критерій Рейнольдса;

$Gr$  – критерій Грасгофа.

## Вступ

У сучасному світі полімери займають провідне місце серед конструкційних і функціональних матеріалів, що використовуються як у промисловості, так і в побуті. Особливе місце серед них посідає поліетилен високої густини, який вирізняється високими експлуатаційними характеристиками, універсальністю застосування та економічною доцільністю виробництва. Основною сировиною для його отримання є етилен, який піддається каталітичній полімеризації з використанням каталізаторів Циглера-Натта.

Метою даної магістерської дисертації є модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини шляхом проектування реактора для приготування каталізаторного комплексу та центрифуги для безперервного відділення полімеру від маточного розчину.

Магістерська робота виконувалась в рамках роботи гуртка інженерного спрямування «Технічна майстерня». Під час відвідування гуртка виконувалась ідея модернізації перемішуючого пристрою реактора, симуляційний експеримент та автоматична схема керування реактором.

Робота включає аналіз технологічного процесу з описом та обґрунтуванням обраних конструкцій апаратів та їх місце в технологічній схемі, технічні характеристики основних апаратів установки, опис та обґрунтування обраних конструкцій апаратів та їх місце в технологічній схемі, конструкції і принцип дії апаратів, основних складальних одиниць та деталей, порівняння основних показників обраних конструкцій з аналогами, вибір матеріалів елементів конструкцій апаратів, патентний огляд конструкцій основного обладнання установки, проведення розрахунків, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій апаратів, охорону праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, рекомендації щодо їх монтажу та експлуатації, рівень стандартизації та

уніфікації, визначення очікуваних техніко-економічних показників застосування установки, комп'ютерного моделювання процесів взаємодії у апараті з перемішуючим пристроєм, що підтверджує запропоновану модернізацію та схему автоматичного керування технологічним процесом у реакторі.

Завдання на магістерську дисертацію одержано 1 вересня 2025 року під час проходження переддипломної практики в ІТТФ НАН України.

# **1 Призначення та область використання установки для виробництва поліетилену високої густини**

## **1.1 Опис технологічного процесу**

Синтетичний полімер – це високомолекулярна сполука, яка створюється штучно в результаті синтезу простих низькомолекулярних сполук. Даний полімер складається з великої кількості повторюваних мономерних ланок, з'єднаних хімічними зв'язками. Дані ланки утворюються завдяки хімічним реакціям (полімеризації і поліконденсації) [1].

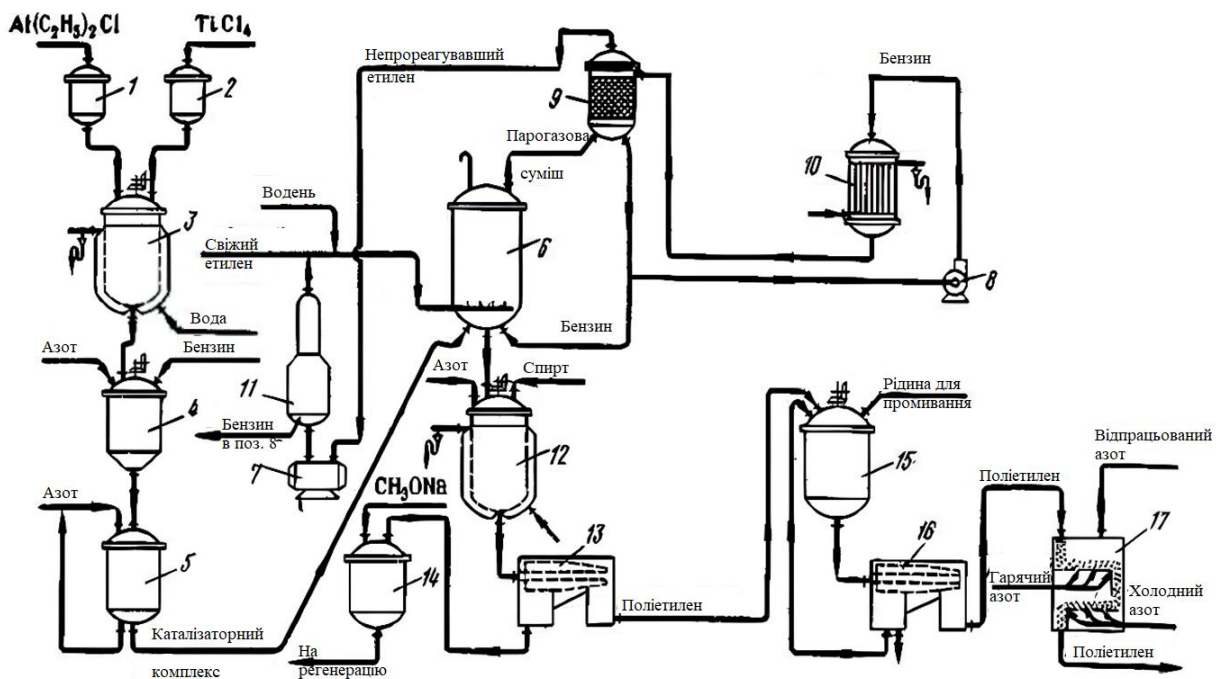
Синтетичний полімер широко використовується в виробничій промисловості, а також побуті. Враховуючи це, можна сказати, що розробка і модернізація установок, які займаються його виробництвом є актуальною задачею на даний час [2].

Технологічний процес виробництва поліетилену високої густини включає наступні етапи: приготування каталітичного комплексу; полімеризація етилену; розклад залишків каталітичного комплексу і промивання поліетилену від продуктів розкладу каталізатора; сушка та усереднення поліетилену; стабілізація, грануляція; регенерація розчинника і промивного розчину [3, 4].

Полімеризацію етилену вважають каталітичним процесом, оскільки для його утворення необхідна наявність каталітичного комплексу. В свою чергу, каталітичний комплекс виникає внаслідок реакції між діетилалюмінійхлоридом і чотиріхлористим титаном. Перед проведенням процесу полімеризації необхідно провести ретельне очищення сировини і каталітичного комплексу від домішок, оскільки їх наявність може негативно вплинути на кінцевий результат. Окрім цього необхідно чітко дотримуватися зазначених пропорцій інгредієнтів і налаштувань для отримання вірного результату під час перемішування.

Для отримання якісного каталітичного комплексу, під час використання чотирехлористого титану і діетилалюмінійхлориду, необхідно підтримувати температуру між 20 °С і 40 °С, і слідкувати за часом перемішування. Важливо зауважити, що для уникнення вибуху та самозаймання, виробництво поліетилену повинно проходити в атмосфері сухого чистого азоту.

Принципова схема установки для виробництва поліетилену високої густини зображена на рисунку 1.1 [3, 4].



- 1 – мірник діетилалюмінійхлориду; 2 – мірник чотирехлористого титану;  
 3 – змішувач каталізаторного комплексу; 4 – апарат для розведення комплексу;  
 5 – проміжна ємність; 6 – полімеризатор; 7 – газодувка; 8 – відцентровий насос;  
 9 – абсорбер; 10 – холодильник кожухотрубний; 11 – газовідділювач;  
 12 – збірник для розкладу залишків каталізаторного комплексу; 13 – віджимна центрифуга; 14 – збірник маточного розчину; 15 – промивник; 16 – центрифуга;  
 17 – сушарка

Рисунок 1.1 – Схема технологічного процесу виробництва поліетилену високої густини

Процес виробництва поліетилену високої густини розпочинається з вагових мірників діетилалюмінійхлориду 1 і чотирехлористого титану 2, реагенти подаються в змішувач 3, потім в апарат для розведення комплексу 4, в який також подається необхідна порція бензину. Розчин бензину і каталітичного комплексу рухається через проміжну ємність 5 вниз до полімеризатора 6.

Для коректного проведення процесу полімеризації тиск в реакторі 6, повинен бути близько (1,5 – 3) МПа, а температура  $(75 \pm 4)$  °С. Під час процесу в реактор постійно подається розчин каталітичного комплексу та етилен, під кінець даного процесу утворюється суспензія поліетилену, яка має вміст твердої фази близько (80 – 120) г/л. Перемішування здійснюється за допомогою барботування етилену, через газорозподільник 11 завдяки використанню газодувки 7.

Завдяки випаровуванню бензину відбувається зменшення теплоти реакції, парова суміш бензину яка утворюється після цього відводиться з реактора, конденсується і повертається в цикл. Оскільки при циркуляції парогазової суміші є ризик потрапляння частинок полімеру і їх подальшого осідання в комунікаційних трубах і інших апаратах, в даній установці застосовується абсорбер 9, в якому проходить розділення бензину і полімеру. Конденсований бензин за допомогою насоса 8 проходить крізь холодильник 10 для орошення абсорбера 9 і далі потрапляє в полімеризатор 6. Етилен, який було охолоджено нагнітають газодувкою 7 в газороздільник 11, де проходить відокремлення залишку розчинника і направляють в реактор 6.

Метилловий або ізопропіловий спирт подають в збірник 12, куди і потрапляє суспензія поліетилену в бензині з реактора. Там проходить процес перемішування в результаті якого утворюються розчинні продукти завдяки розкладанню каталізаторного комплексу, який взаємодіє зі спиртом. Це все робиться заради того щоб уникнути зменшення хімічної стійкості і погіршення його діелектричних властивостей. Варто зауважити, що потрібно уникати потрапляння вологи під час

процесу взаємодії спирту зі сполуками алюмінію і титану, оскільки при цьому утворюються нерозчинні з'єднання гідроокису алюмінію і титану, які вплинуть на його властивості.

Після обробки спиртом, суспензію віджимають на центрифугі 13. Далі для нейтралізації HCl маточний розчин направляють в збірник 14, в який також направляють метилат натрію. Потім віджятий полімер рухається в промивник 15, де він проходить обробку гарячим і холодним промиванням, звідки він транспортується в центрифугу 16. Поліетилен подають в сушарку 17 тільки тоді, коли волога в ньому не перевищує 40%. Для сушіння застосовуються гаряче повітря, температура при цьому не повинна перевищувати 50 °C [3, 4].

## **1.2 Вибір типів апаратів та їх місце в технологічній схемі**

Вибір конкретного типу центрифуги залежить від властивостей суспензії і висунутих до процесу центрифугування вимог. Відповідно до технології температура суспензії близько 20°C, в ній присутня тверда нерозчинна та неабразивна фаза. Суспензія нетоксична, але вогненебезпечна і вибухонебезпечна. Для коректного вибору обладнання проведемо літературний огляд центрифуг і реакторів, які будуть приймати участь у процесі.

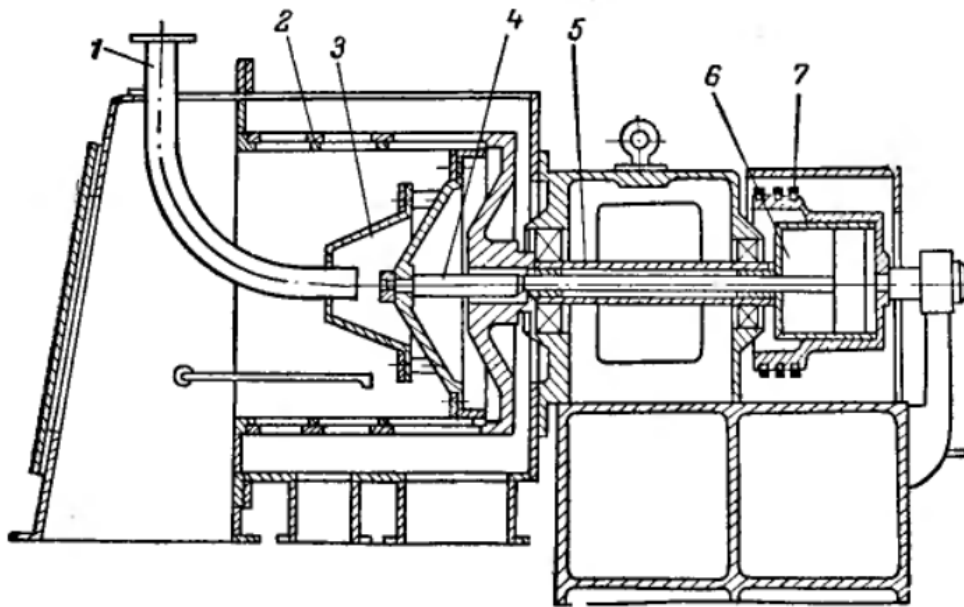
Горизонтальні фільтруючі центрифуги (ФГП) з пульсуючим вивантаженням осаду [5].

Центрифуги типу ФГП є горизонтальними фільтруючими машинами безперервної дії, які використовують пульсуючий механізм для вивантаження осаду. Завдяки своїй конструкції вони перевершують автоматичні центрифуги періодичної дії за техніко-економічними показниками, питомою витратою енергії та металу.

Особливістю центрифуг типу ФГП є горизонтальне розташування ротора з вивантаженням осаду за допомогою пульсуючого поршня. Максимальний хід штоухача зазвичай становить  $1/10$  довжини ротора [5].

Центрифуги типу ФГП використовуються для обробки суспензій з середньоабразивною твердою фазою, яка складається з кристалічних продуктів (наприклад, сульфату амонію, мідного купоросу, кухонної солі, нітрату натрію, карбаміду), коротковолокнистих матеріалів (ацетилцелюлози, нітроцелюлози) та аморфних продуктів. Даний вид центрифуг не підходить для обробки продуктів з пластинчастими кристалами, оскільки в таких випадках неможливо забезпечити осьовий тиск поршня.

Схему апарата представлено на рисунку 1.2 [5].



- 1 – живильна труба; 2 – ротор; 3 – приймальний конус; 4 – штоухач;  
5 – головний вал; 6 – гідроциліндр; 7 – клинопасова передача

Рисунок 1.2 – Схема горизонтальної фільтруючої центрифуги безперервної дії з пульсуючим механізмом для вивантаження осаду

Обертання агрегату забезпечується індивідуальним електродвигуном через клинопасову передачу 7. Ротор 2 жорстко закріплений на головному валу 5, який обертається у підшипникових опорах. Усередині ротора розміщений штовхач 4 – цей елемент синхронно обертається разом із ротором, одночасно виконуючи пульсуючі рухи за рахунок гідроциліндра 6, що керується масляною станцією. Суспензія подається через трубу 1 у приймальний конус 3 ротора.

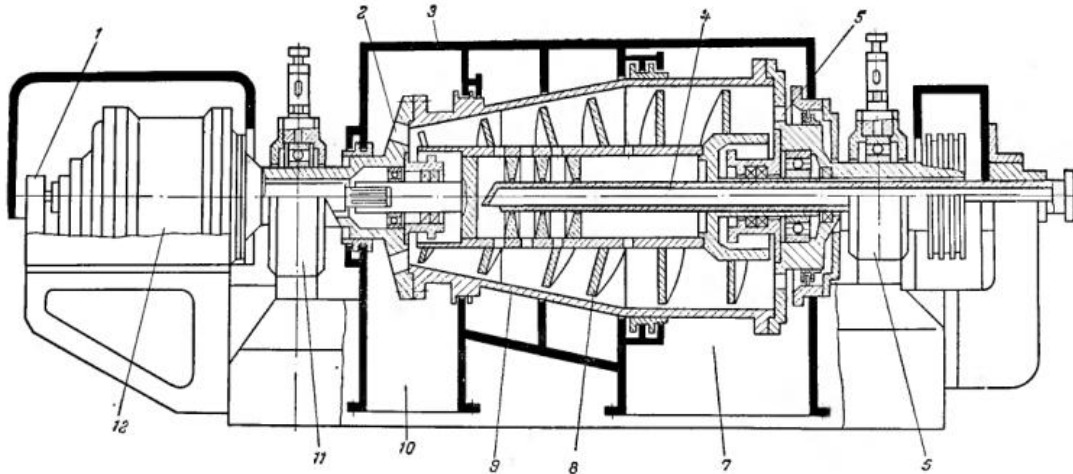
Отримавши швидкість, близьку до швидкості ротора, суспензія викидається на сито, де твориться осад. Фільтрат проходить крізь сито та виводиться з центрифуги. Штовхач 4, рухаючись вперед, переміщує осад на величину свого ходу. Під час зворотного руху на звільнену ділянку сита надходить нова порція суспензії. Осад поступово переміщується до вихідного отвору та вивантажується у приймач [5].

Горизонтальні шнекові відстійні центрифуги безперервної дії [5].

Даний вид центрифуг (ОГШ, НОГШ) складаються з горизонтального шнеку навколо якого розташований циліндричний, або конічний неперфорований ротор. В даного типу центрифуг ротор і шнек обертаються з різною швидкістю в один і той самий бік, за рахунок цього відбувається перенесення осаду вздовж ротора.

Центрифуги типу ОГШ, НОГШ застосовуються для поділу суспензій, що містять 1–40% (за об'ємом) твердої фази. Ефективна обробка забезпечується для частинок крупністю понад 5 мкм, якщо різниця густин між твердим компонентом та рідиною перевищує 0,2 кг/дм<sup>3</sup>. Ще однією функцією є гідравлічна класифікація частинок за розміром. Ця операція можлива, якщо різниця густин матеріалів становить понад 2 кг/дм<sup>3</sup>; у такому випадку граничний розмір класифікації досягає 2 мкм.

Схема даної центрифуги представлена на рисунку 1.3 [5].



1 – захисний пристрій редуктора; 2 – вікна вивантаження осаду; 3 – кожух;  
 4 – живильна труба; 5 – зливні вікна; 6, 11 – опори центрифуги; 7 – патрубок  
 відведення фугату; 8 – шнек; 9 – ротор; 10 – патрубок вивантаження осаду;  
 12 – планетарний редуктор

Рисунок 1.3 – Схема центрифуги типу ОГШ

Робота центрифуги починається з введення суспензії через живильну трубу 4 у внутрішню зону апарату. Суспензія потрапляє в ротор 9 крізь вікна корпусу, де відбувається сепарація за рахунок дії відцентрової сили, внаслідок чого, тверді частинки осідають на стінках. Отримана рідина (фугат) виводиться через зливні вікна 5 та відповідний патрубок 7.

Шнек 8 обертається з іншою швидкістю відносно ротора, і таким чином транспортує осад до вивантажувальних вікон 2, які знаходяться у звуженій частині ротора. Виведення матеріалу здійснюється через патрубок 10. Механізмом підтримки диференційної швидкості обертання є планетарний редуктор 12. Ротор закріплений на опорах 6, 11, а кожух 3 слугує для захисту механізмів. Автоматизований захист редуктора 1 забезпечує безпеку – він деактивує центрифугу при надмірному навантаженні та надсилає сигнал про аварію [5].

Підвісні центрифуги [5].

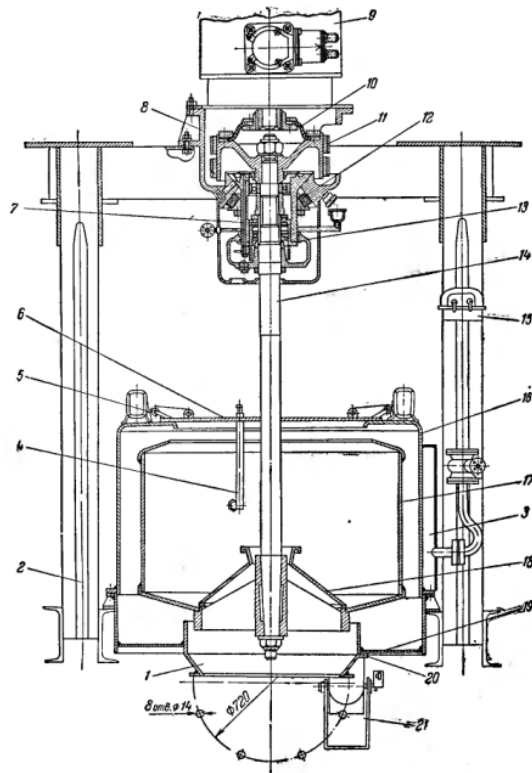
Підвісні центрифуги, які характеризуються верхнім розташуванням приводу та механізмом нижнього вивантаження твердого осаду, є ключовим спеціалізованим обладнанням. Вони широко використовуються у таких секторах, як хімічна, цукрова та низка інших галузей виробництва.

Головна перевага полягає в їхній унікальній конструкції: вертикальний вал, підвішений на шарнірі, надає системі здатність автоматично балансуватися під час обертання. Ця функція забезпечує високий рівень стійкості, навіть якщо завантаження ротора відбувається нерівномірно. Завдяки цій конструктивній особливості, дані центрифуги демонструють високу ефективність при роботі з широким спектром матеріалів – від кристалічних сполук до волокнистих матеріалів.

Робочий цикл таких центрифуг є періодичним і включає кілька етапів. Спочатку ротор завантажується матеріалом, причому ця операція може виконуватися як на повній, так і на зниженій швидкості обертання. Після завантаження швидкість збільшується до максимальної, що забезпечує ефективне відділення рідкої фази. Для фільтруючих роторів характерне отримання осаду з мінімальним вмістом рідини - від 1% для крупнозернистих матеріалів до 40% для дрібнодисперсних. У випадку з відстійними роторами вміст рідини в осаді може сягати 70%.

Процес розпочинається із завантаження суспензії при першій швидкості (330 об/хв). Завантаження відбувається через спеціальний пристрій, при цьому запірний конус 18 забезпечує рівномірний розподіл матеріалу по стінках ротора. Важливий елемент безпеки – блокувальний механізм 5, який запобігає відкриттю кришки 6 під час роботи центрифуги.

Схема апарату зображена на рисунку 1.4 [5].



1 – нижній штуцер кожуха; 2 – металоконструкція; 3 – пристрій для пропарювання; 4 – промивний пристрій; 5 – блокувальний пристрій кришки; 6 – кришка кожуха; 7 – корпус підшипників вала; 8 – корпус приводу; 9 – електродвигун; 10 – гумова муфта; 11 – стрічковий гальмо; 12 – гумовий амортизатор; 13 – привод; 14 – вал; 15 – ключ управління; 16 – кожух; 17 – ротор; 18 – запірний конус; 19 – днище кожуха; 20 – спускний штуцер; 21 – сепаратор

Рисунок 1.4 – Схема підвісної центрифуги з верхнім приводом та нижнім вивантаженням осаду

Після завантаження швидкість збільшується до робочої, і за рахунок відцентрової сили починається розділення суспензії на фази. Рідка фаза проходить крізь фільтруючу сітку ротора і потрапляє в кожух 16, звідки відводиться через

штуцер 20. Для підвищення якості розділення передбачені пристрій 3 для пропарювання внутрішньої порожнини і пристрій 4 для промивки осаду.

Особливістю конструкції є система амортизації: резиновий амортизатор 12 і шарнірне кріплення вала дозволяють системі самовирівнюватися при нерівномірному завантаженні. Це значно зменшує навантаження на підшипники 7 та інші вузли.

Після завершення циклу розділення центрифуга зупиняється за допомогою комбінованої системи гальмування: електричного рекуперативного і механічного стрічкового тормоза 11. Осад вивантажується вручну через нижній штуцер 1 після підняття запірною конуса 18, який фіксується на спеціальному гачку. Основними робочими вузлами є ротор 17 з перфорованими стінками, який підвішений на валу 14, та привод 13 з двошвидкісним електродвигуном 9. Центрифуга комплектується сегрегатором 21 і системою управління з ключем 15, розташованим на зручній для оператора висоті (1,3 – 1,5) м [5].

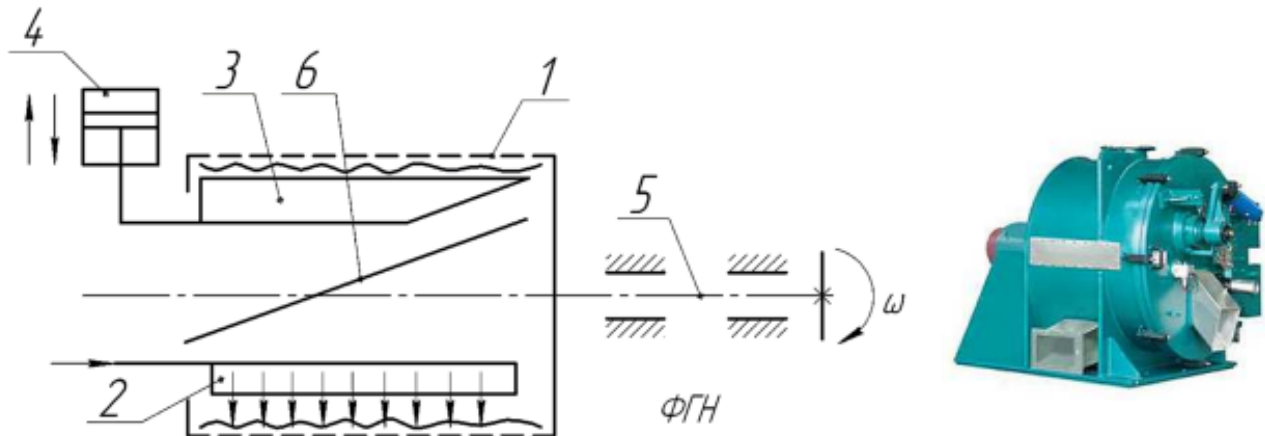
Центрифуги з ножовим вивантаженням осаду [5].

У даного виду центрифуг процес вивантаження осаду відбувається без зниження швидкості обертання ротора, що дозволяє значно економити електроенергію. Суспензія в цю потрапляє у горизонтально розташований ротор, де під дією відцентрової сили розділяється на тверду та рідку складові. Тверда фаза (осад) зрізається спеціальним ножом, який приводиться в дію гідроциліндром. Після зрізання осад потрапляє у похилий жолоб і виводиться з робочої зони.

Цей тип центрифуг особливо ефективний для обробки важкофільтрованих суспензій із середнім розміром частинок. Однак варто враховувати, що при ножовому зніманні осаду існує ризик подрібнення частинок, що може бути суттєвим недоліком для деяких технологічних процесів.

Головною перевагою таких установок є можливість безперервної роботи без необхідності знижувати швидкість для вивантаження, що забезпечує високу продуктивність при мінімальних енерговитратах.

Схема апарата представлена на рисунку 1.5 [5].



1 – перфорований ротор; 2 – труба для подачі суспензії; 3 – ніж для зрізу осаду;  
4 – гідропривід ножа; 5 – вал; 6 – пристрій для вивантаження осаду

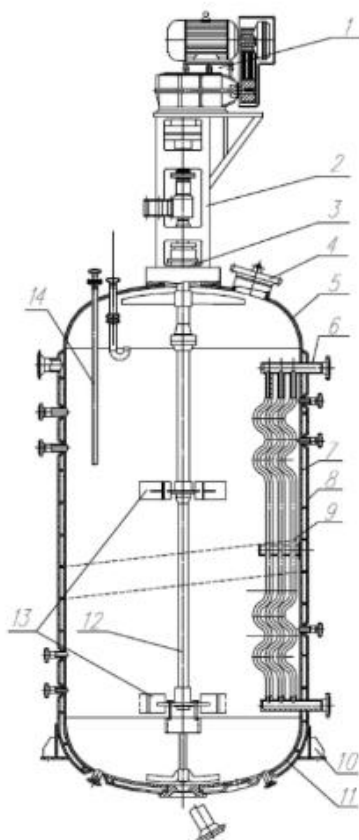
Рисунок 1.5 – Центрифуги з ножовим вивантаженням осаду

Суспензія подається в перфорований ротор 1 через трубу 2. Цей ротор підтримує постійну високу швидкість обертання. Завдяки відцентровій силі рідкий компонент (фільтрат) долає отвори ротора. Водночас тверді компоненти відкладаються на внутрішній поверхні його стінок, утворюючи осад [5].

Реактор

Реакційні котли

На рисунку 1.6 наведено найбільш поширений варіант конструкції реактора з перемішувачем (мішалкою) та рубашкою [6].



1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – муфта; 4 – люк; 5 – еліптична кришка;  
 6 – вхідний патрубок; 7 – корпус; 8 – рубашка; 9 – перегородки; 10 – опора;  
 11 – нижня кришка; 12 – вал; 13 – мішалка; 14 – занурювальна трубка

Рисунок 1.6 – Схема реактору з перемішуючим пристроєм

Реактори з мішалками знаходять широке застосування в процесах, що протікають у рідкій фазі. Здебільшого вони виготовляються у вигляді циліндричних апаратів зі знімними кришками. Іноді реагенти змішують ще до подачі в котел (так зване об'ємне змішування), однак у багатьох випадках сам апарат обладнують перемішувальними пристроями. Для середовищ із високою в'язкістю використовують якірні або скребокві мішалки з невеликою кількістю обертів, тоді як для малов'язких речовин застосовують турбінні мішалки. Підтримання

необхідної температури реакційної маси здійснюється за допомогою рубашки (гладкої, змійовикової або з вм'ятинами) чи внутрішнього змійовика.

Співвідношення висоти до діаметра таких апаратів зазвичай становить 1...1,6. Виконання більш високих ємностей є недоцільним, оскільки це призводить до нерівномірного перемішування по всій висоті. Для роботи з в'язкими сумішами та суспензіями перевагу надають реакторам із конічним дном. Поряд зі зварними конструкціями певне поширення отримали також чавунні емальовані реактори з мішалками [6].

Вибір перемішуючого пристрою є важливим завданням при проектуванні реактора, тому розглянемо та проаналізуємо існуючі перемішуючі пристрої.

Пропелерні мішалки складаються з одного або кількох лопатевих гвинтів, що обертаються з високою швидкістю та створюють інтенсивний потік рідини. Вони відзначаються високою ефективністю при перемішуванні низьков'язких середовищ (вода, розчини солей, органічні розчинники), забезпечуючи швидке й однорідне змішування [7].

Схема мішалки зображена на рисунку 1.7 [7].

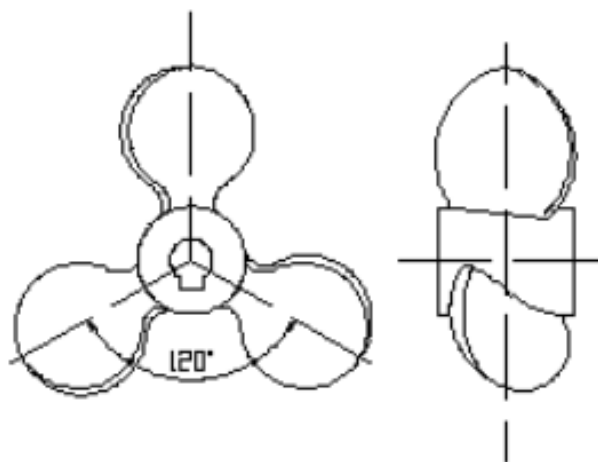


Рисунок 1.7 – Пропелерна мішалка

Завдяки простій конструкції такі мішалки зручні в експлуатації, очищенні та модернізації, тому широко застосовуються у хімічній, фармацевтичній та харчовій промисловості. Основними обмеженнями даного типу мішалок є низька ефективність при роботі з в'язкими або твердими сумішами, ризик кавітації чи піноутворення на високих швидкостях, а також потреба у допоміжних пристроях для роботи у великих резервуарах.

Незважаючи на це, пропелерні мішалки широко використовуються у виробництві розчинів, харчових продуктів, лікарських форм, а також у водоочисних системах та лабораторних дослідженнях, де потрібне швидке й рівномірне перемішування [7].

Турбінні мішалки складаються з ротора з численними лопатками, що при обертанні створюють інтенсивні потоки і забезпечують ефективне перемішування як низько-, так і середньов'язких середовищ.

Схема мішалки зображена на рисунку 1.8 [7].

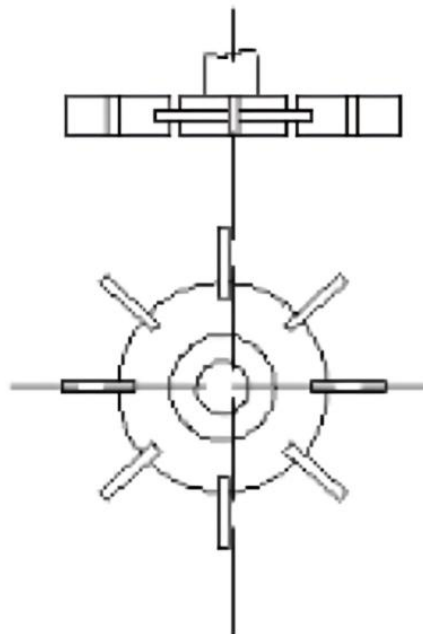


Рисунок 1.8 – Відкрита турбінна мішалка з прямими лопатками

Вони універсальні й підходять для гомогенізації, емульгування, диспергування та розчинення речовин, що робить їх корисними у хімічній, фармацевтичній та харчовій промисловості. Завдяки різним формам лопатей можна налаштувати процес під конкретні технологічні завдання, досягаючи високої інтенсивності перемішування навіть у великих об'ємах.

Недоліком є вищі енерговитрати порівняно з іншими типами мішалок, складність конструкції, що ускладнює очищення, а також ризик кавітації чи перегріву при неправильному режимі роботи.

Попри це, турбінні мішалки широко застосовуються: у хімічній промисловості – для приготування суспензій та каталізаторів, у фармацевтиці – для створення однорідних форм (мазей, кремів, розчинів), у харчовій промисловості – для перемішування соусів, молочних продуктів та емульгованих напоїв, а також у нафтопереробці та водоочищенні [7].

Якірні мішалки призначені для роботи з густими та високов'язкими середовищами – пастами, гелями, полімерними сумішами, емульсіями. Робочий елемент у формі якоря щільно прилягає до стінок ємності, забезпечуючи рівномірне перемішування без «мертвих зон» і одночасно очищаючи стінки від налиплого матеріалу. Це дає змогу досягати однорідності суміші без утворення грудок чи розшарування, що особливо важливо у хімічних і фармацевтичних виробництвах.

Схема мішалки подана на рисунку 1.9 [7].

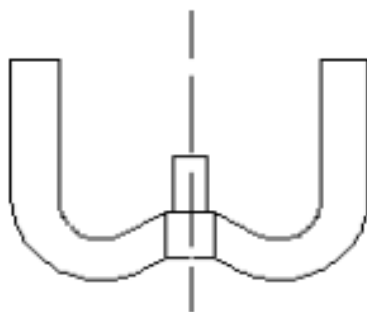


Рисунок 1.9 – Якірна мішалка

До недоліків належить низька ефективність при перемішуванні рідких середовищ, підвищені енерговитрати та відносно невисокі швидкості роботи, що збільшує тривалість процесу. Попри це, якірні мішалки широко застосовуються у виробництві лакофарбових матеріалів, клеїв, полімерних композитів, а також у фармацевтиці для виготовлення мазей, гелів і супозиторіїв.

Дискові мішалки застосовуються для інтенсивного перемішування рідин та суспензій за допомогою обертового диска з лопатями. Вони створюють сильні тангенціальні потоки, що забезпечують швидке й однорідне змішування навіть при підвищеній в'язкості або значному вмісті твердих частинок. Такі мішалки ефективні для диспергування та емульгування, тому використовуються там, де потрібен рівномірний розподіл компонентів або подрібнення частинок.

До їхніх переваг належать компактність, відносно низьке енергоспоживання та можливість регулювання інтенсивності перемішування зміною швидкості обертання. Недоліками є нижча ефективність з дуже в'язкими чи волокнистими матеріалами та ризик кавітації при неправильному режимі роботи. Дискові мішалки широко застосовуються у хімічній, фармацевтичній, харчовій промисловості, а також у водоочисних системах для створення однорідних суспензій та емульсій.

Схема мішалки подана на рисунку 1.10 [7].

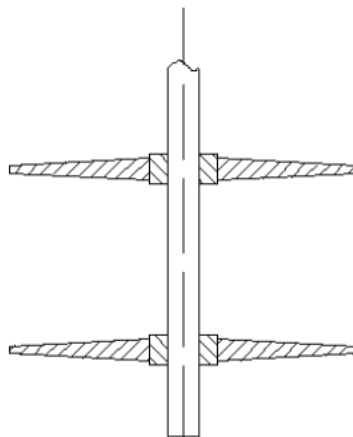
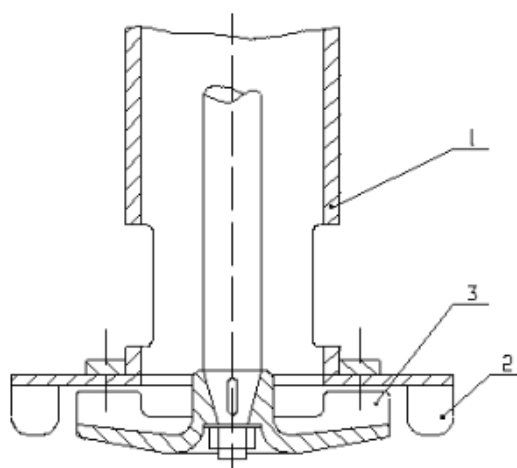


Рисунок 1.10 – Дискова мішалка

Імпелерні мішалки складаються з обертового вала з лопатями спеціальної форми, що створюють потужні потоки рідини у всіх напрямках. Вони універсальні та ефективні для перемішування низько- та середньов'язких середовищ, забезпечуючи однорідність, емульгування та диспергування компонентів. Конструкція з направляючою трубою дозволяє уникати «мертвих зон» і забезпечує рівномірне перемішування по всій висоті ємності, що важливо для виробництва полімерів та стабільності складу суміші.

Схема мішалки подана на рисунку 1.11 [7].



1 – центральна труба; 2 – лопаті статора; 3 – лопаті мішалки (ротора)

Рисунок 1.11 – Імпелерна мішалка

До недоліків належать обмежена ефективність при роботі з дуже в'язкими або волокнистими матеріалами, можливість корозії та необхідність додаткового обладнання (теплообмінні рубашки, скребки). Незважаючи на це, імпелерні мішалки широко застосовуються у виробництві полімерів, хімічних композитів, фармацевтичних суспензій і емульсій, а також у харчовій промисловості для приготування соусів, майонезів та молочних продуктів [7].

Висновок: для процесу виробництва поліетилену високої густини найбільш доцільним є використання осаджувальної горизонтальної центрифуги неперервної

дії (ОГШ). Вона забезпечує ефективне розділення суспензії поліетилену з маточного розчину, дозволяє працювати в герметичному режимі, що підвищує безпеку в умовах вибухонебезпечного середовища, та має конструктивні переваги у вигляді шнекового вивантаження твердої фази, що гарантує безперервність і надійність процесу.

Після проведеного літературного аналізу обираємо реактор з пропелерною мішалкою та U-подібною рубашкою для відведення теплоти. Такий апарат забезпечує необхідні умови гідродинаміки й теплообміну, які є важливими для екзотермічної реакції приготування каталізаторного комплексу Циглера-Натта. Завдяки конструкції він гарантує стабільне перемішування реагентів, рівномірний розподіл температури у всьому об'ємі та безпечну експлуатацію. Таким чином, обраний реактор повністю відповідає технологічним вимогам до процесу та забезпечує отримання продукту із заданими властивостями.

## 2 Технічні характеристики основних апаратів установки

### Центрифуга

Центрифуга призначена для відокремлення рідкої фази з суспензії поліетилену

Внутрішній діаметр ротора, $D_v$ , м	1;
Відношення робочої довжини ротора до внутрішнього максимального діаметра	3,6;
Довжина циліндричної частини ротора центрифуги, $l$ , м	2,316;
Товщина стінки барабану, $S$ , мм	6;
Кутова швидкість ротора, $\omega$ , $c^{-1}$	109,9;
Довжина крайової зони, $x$ , м	0,055;
Індекс продуктивності, $\Sigma$ , $m^2$	$3,813 \cdot 10^3$ ;
Продуктивність центрифуги за суспензією, $V_c$ , $m^3/c$	0,013;
Робоча продуктивність, $G_{тр}$ , кг/с	1,333;
Максимальна загрузка ротора, кг	1950;
Матеріал ротора	сталь 12X18H10T;
Відносна частота обертання шнека, об/хв	3,5; 6; 8,8;
Число заходів шнека	2;
Крок витків шнека, мм	400;
Максимальний момент, що передається редуктором, Н·м	45000;
Передаточне число регулятора	119;
Електродвигун головного приводу:	
тип	4АМС250МАЧЗ;
потужність, кВт	110;
частота обертів (синхронна), об/хв	1500;
Габарити, мм:	

довжина	6600;
ширина	3460;
висота	1850.

### Реактор

Реактор призначений для приготування каталізатора Циглера-Натта (змішування бензинових розчинів діетилалюмініюхлориду та чотирехлористого титану).

Об'єм апарата, $V_a$ , м <sup>3</sup>	2,5;
Добова продуктивність реактора, $G_d$ , кг/с	0,6;
Коефіцієнт заповнення, $\varphi$	0,75;
Робочий об'єм реактора, $V_p$ , м <sup>3</sup>	1,875;
Товщина стінки обичайки, $\delta$ , м	0,012;
Діаметр реактора, $D$ , м	1,4;
Площа поверхні теплообміну рубашки, м <sup>2</sup>	6,5;
Робочий надлишковий тиск, МПа:	
- в корпусі	0,1;
- в рубашці	0,6;
Допустима робоча температура середовища, °С:	
- в корпусі	від -20 до 200;
- в рубашці	від -20 до 200;
Розрахункова температура стінок корпусу, °С	30;
Робоче середовище:	
- в корпусі – неїдке, вибухопожежонебезпечне, шкідливе, 1–4 клас небезпеки за ГСТУ 3-17-191-2000	
- в рубашці – вода	

Густина середовища, кг/м <sup>3</sup> , не більше	900;
Номинальна потужність приводу перемішуючого пристрою, кВт	3;
Частота обертання перемішуючого пристрою, с <sup>-1</sup>	8,33.

### 3 Опис та обґрунтування вибраної конструкції апаратів

#### 3.1 Конструкція і принцип дії апаратів, основних складальних одиниць та деталей

##### Центрифуга

Поліетилен високої густини є термопластичним полімером, який широко використовується завдяки своїм фізико-механічним властивостям, таким як висока міцність, хімічна стійкість та низька проникність для вологи. Виробництво даного виду поліетилену здійснюється шляхом полімеризації етилену за низького тиску в присутності каталізаторів Циглера-Натта [2-3].

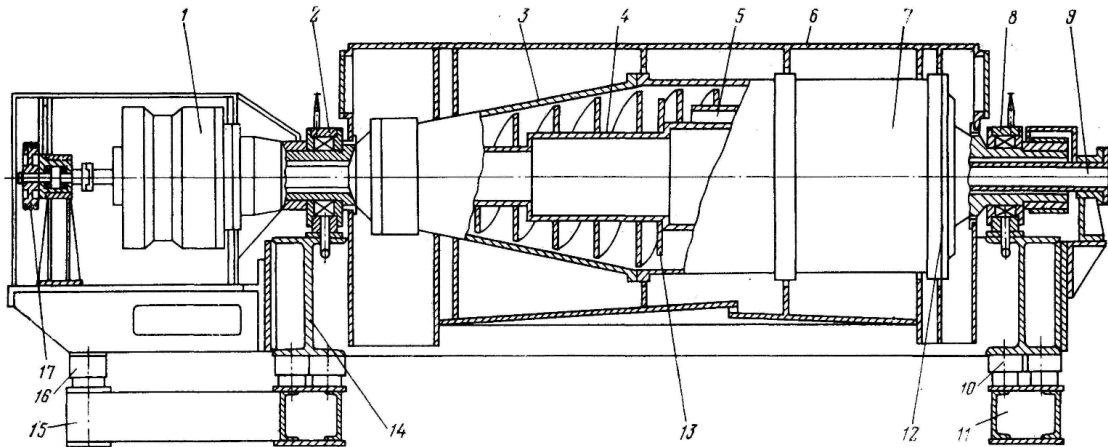
В основі процесу лежить каталітичний комплекс на основі діетилалюмінійхлориду та чотирихлористого титану. Даний вид каталізаторів забезпечує іонно-координаційний механізм полімеризації, що дозволяє отримувати лінійні полімери з високим ступенем кристалічності.

У виробництві поліетилену високої густини для його відділення від маточного розчину, що залишається після обробки суспензії поліетилену метиловим або ізопропіловим спиртом, застосовують центрифуги неперервної дії. Процес центрифугування забезпечує швидке та ефективне розділення компонентів реакційної суміші за рахунок дії відцентрової сили, що прискорює осадження твердих частинок полімеру [5].

Враховуючи вимоги до розділення суспензії і аналіз літературних джерел щодо використання різних центрифуг в аналогічних умовах, було обрано осаджувальну горизонтальну центрифугу (ОГШ) неперервної дії. Конструкція даної центрифуги забезпечує плавне та ефективне відділення нерозчинної, неабразивної твердої фази від рідкої за рахунок шнекового вивантаження. Її

перевагою є можливість герметичного виконання, що сприяє безпечній роботі в умовах вибухонебезпеки [5, 8].

Аналогом центрифуги, яка буде розроблена, є центрифуга ОГШ-1001К-01 зображена на рисунку 3.1 [8].



- 1 – планетарний редуктор; 2, 8 – коренні опори; 3 – ротор; 4 – шнек;  
5 – горизонтальні канали; 6 – кожух; 7 – камера; 9 – труба живлення;  
10, 16 – віброізолятори; 11, 15 – рами; 12 – лабіринтне ущільнювальне кільце;  
13 – суцільне з’ємне кільце; 14 – станина; 17 – додатковий привод

Рисунок 3.1 – Схема центрифуги

Ротор 3 складається з циліндричного корпусу, конуса та двох цапф, які слугують кришками та опорами шнека. В опорах ротора 2, 8 встановлені сферичні роликотішипники. Права цапфа містить зливні вікна для регулювання рівня зливних порогів. Шнек 4 розташований всередині ротора і транспортує осад до вивантажувальних вікон. Його обертання передається через планетарний редуктор 1, що забезпечує різницю швидкостей між шнеком і ротором для переміщення осаду. Живильна труба 9 подає суспензію у внутрішню порожнину шнека, звідки вона надходить у ротор [8].

Тверда фаза осідає на стінках ротора та транспортується шнеком до вивантажувальних вікон. У зоні знеріднення відбувається віджим вологи, після чого тверда фаза падає у приймальний відсік кожуха. Освітлена рідина (фугат) відводиться через горизонтальні канали шнека та зливні вікна. Для запобігання змішування фугату з суспензією встановлені лабіринтне ущільнення та кільце 12. Додатковий привід 17 з тиристорним електроприводом дозволяє змінювати відносну швидкість обертання шнека. Кожух 6 закриває обертові частини центрифуги і забезпечує роздільний відвід фугату та осаду. Труба живлення 9 також має канал для подачі флокулянта у ротор.

### Реактор

Апарат із перемішувачим пристроєм є основним вузлом технологічної установки, в якому відбувається головний процес хімічної технології – утворення нового продукту внаслідок взаємодії вихідних реагентів. Його робота повинна гарантувати необхідну глибину та селективність хімічного перетворення. До реактора висувається низка вимог: він має володіти потрібним робочим об'ємом, забезпечувати задану продуктивність, створювати оптимальний режим перемішування реагентів, а також підтримувати відповідні умови теплообміну в ході реакції.

Конструкція реактора визначається багатьма факторами, серед яких: агрегатний стан реагентів та продуктів, консистенція реакційної маси, інтенсивність перемішування, температура та тиск проведення процесу, тепловий ефект і інтенсивність теплообміну, хімічні властивості вихідних речовин, наявність або відсутність каталізаторів, необхідна продуктивність апарата, періодичність чи безперервність процесу. Крім того, враховуються зручність монтажу й ремонту, простота виготовлення та експлуатаційна надійність обладнання [2].

Каталізатори Циглера-Натта являють собою комплексні металоорганічні сполуки, що складаються з чотирихлористого титану та алюмінієвих алкілів

(триетил- і триізобутилалюміній, диетиалюмінійхлорид). Їх отримують шляхом змішування розчинів компонентів у середовищі аліфатичних, ароматичних або циклоаліфатичних вуглеводнів. Водночас присутність вологи чи кисню повітря призводить до руйнування каталізатора й може викликати його самозаймання.

Отриманий каталізатор є комплексом продуктів взаємодії диетиалюмінійхлориду та чотирехлористого титану в бензині. Він випадає з розчину у вигляді дисперсного (колоїдного) темного порошку з доволі складною структурою. Передбачається, що його активними центрами виступають алкілалюмінійхлориди, зв'язані координаційними зв'язками з титаналкілхлоридом. Такі центри здатні утворювати комплекси з етиленом і залучати його до реакції полімеризації.

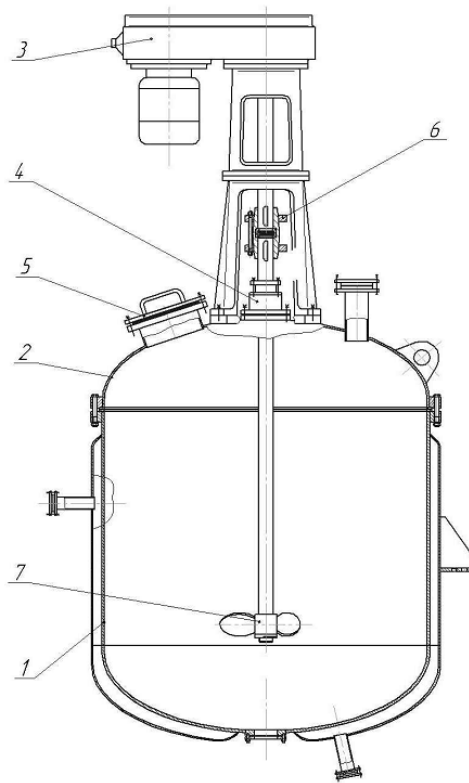
Важливим фактором, що впливає на перебіг процесу та властивості полімеру, є співвідношення вихідних речовин при приготуванні каталізатора. Приготування каталізаторного комплексу здійснюється за температури близько 30 °С. Реакція супроводжується виділенням теплоти, оскільки вона є екзотермічною. Робота реактора в даному випадку відбувається у періодичному режимі [3].

Для виконання зазначеного процесу виготовлення каталізатора оптимальним вибором буде реактор із пропелерною мішалкою, яка забезпечує необхідні гідродинамічні умови перемішування, та U-подібною рубашкою, що ефективно відводить теплоту, яка виділяється під час реакції. Розроблений реактор використовується для отримання каталізаторного комплексу Циглера-Натта та повинен забезпечувати необхідні умови гідродинаміки і теплообміну, що гарантують якісне протікання реакції та безпечну експлуатацію обладнання. У процесі роботи відбувається теплообмін між каталізаторним комплексом та охолоджувальною водою.

У робочому стані він складається з корпусу 1, до якого приварена рубашка, чотирьох опор і штуцерів для підведення охолоджуючої рідини в рубашку; кришки

2 зі штуцерами для введення реагентів та гільзою під термометр; перемішуючого пристрою з пропелерною мішалкою 7; вертикального привода 3 з клинопасовою передачею і стійкою для його кріплення. Розрахунок, вибор приводу і його зображення наведено у п.п. 4.11 рисунок 4.12.

Основні елементи конструкції апарата подані на рисунку 3.2.



1 – корпус; 2 – кришка реактора; 3 – привід; 4 – ущільнення сальникове;  
5 – кришка люка; 6 – муфта; 7 – мішалка

Рисунок 3.2 – Конструктивна схема апарата з перемішуючим пристроєм

Вал мішалки приєднаний через муфту 6 до вала привода та оснащений сальниковим ущільненням 4, яке встановлене у кришці апарата. Додатково в кришці передбачено люк 5, що використовується для візуального спостереження за внутрішнім об'ємом апарата та виконання допоміжних операцій. Тепло, що

виділяється під час синтезу каталізаторного комплексу, відводиться охолоджувальною водою, яка надходить у рубашку реактора [2].

### 3.2 Порівняння основних показників розроблених конструкцій апаратів з аналогами

У роботі розглядається проектування центрифуги і реактора (апарата з мішалкою). Метою порівняння є аналіз показників розроблюваних конструкцій з аналогами в контексті сучасного розвитку промисловості в Україні та світі. Порівняння дозволяє визначити, наскільки відповідними є апарати, що проектуються у відповідності до технічних вимог, які застосовуються до них.

Центрифуга ножова (ФГН-633Т-03) – фільтруюча центрифуга періодичної дії для розділення суспензій із кристалічною або зернистою твердою фазою, ефективна для зневоднення осадів (фактор розділення 2200). Дискава саморозвантажна (Ж5-ЦТА-10) – осадова центрифуга безперервної дії, має високу продуктивність і фактор розділення 7000, застосовується для освітлення рідин та емульсій у харчовій і хімічній промисловості. Трубчаста (GF75) – високошвидкісний сепаратор періодичної дії з малим ротором (75 мм) і фактором 16770, призначений для очищення рідин і розділення емульсій із дрібнодисперсними частинками [9–11].

Порівняльна характеристика центрифуг представлена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика центрифуг

Показник	Види центрифуг			
	ФГН-633Т-03 [9]	Ж5-ЦТА-10 [10]	GF75 [11]	Центрифуга, яка проектується
1	2	3	4	5
Продуктивність, кг/с	0,3 (2)	3,5 (5)	0,14 (1)	1,33 (4)

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5
Внутрішній діаметр ротора, мм	630 (3)	500 (2)	75 (1)	1000 (5)
Довжина, мм	400 (2)	300 (1)	430 (3)	2316 (5)
Оберти, об/хв	2500 (3)	6000 (4)	20000 (5)	1050 (1)
Фактор розділення	2200 (3)	7000 (4)	16770 (5)	524 (1)
Об'єм, м <sup>3</sup>	0,046 (4)	0,03 (3)	0,002 (1)	0,1 (5)
Площа поверхні осадження, м <sup>2</sup>	1 (2)	0,05 (1)	0,05 (1)	7,3 (5)
Σ	19	20	17	26

Реактор з рамною мішалкою (2,5 м<sup>3</sup>) використовується для в'язких середовищ, забезпечує рівномірне перемішування без застоїв і має рубашку для теплообміну. Реактор з якірною мішалкою (2,0 м<sup>3</sup>) також оснащений рубашкою, ефективний для високов'язких рідин завдяки роботі лопатей поблизу стінок. Реактор з турбінною мішалкою (3,0 м<sup>3</sup>) створює інтенсивне турбулентне перемішування для рідин середньої в'язкості, зазвичай без рубашки, що обмежує можливості теплообміну [12–14].

Порівняльна характеристика реакторів представлена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика реакторів

Показник	Види реакторів			
	Реактор РМ-2,5 (рамна мішалка) [12]	Реактор з якірною мішалкою [13]	Реактор РТ-3,0 (турбінна мішалка) [14]	Реактор, який проектується
1	2	3	4	5
Об'єм апарата, м <sup>3</sup>	2,5 (4)	2 (3)	3 (5)	2,5 (4)

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
Діаметр апарата, м	1,5 (4)	1,3 (2)	1,6 (5)	1,4 (3)
Добова продуктивність, кг/с	0,55 (3)	0,45 (2)	0,7 (5)	0,6 (4)
Частота обертання мішалки, об/хв	60 (2)	100 (3)	300 (4)	500 (5)
Потужність на перемішування, кВт	1,8 (3)	2,5 (2)	1,5 (4)	1,2 (5)
Робочий тиск, МПа	0,4 (3)	0,5 (4)	0,6 (5)	0,6 (5)
Теплообмінна поверхня, м <sup>2</sup>	6,5 (5)	5 (4)	0 (0)	6,5 (5)
Σ	24	1	28	31

Висновки: розроблені конструкції реактора та центрифуги мають покращені технічні характеристики порівняно з існуючими аналогами, що підтверджує їхню доцільність для впровадження у промислове виробництво.

За результатами порівняння найкращі показники має проєктована центрифуга, яка набрала 26 балів. Вона характеризується великим діаметром ротора (1000 мм) та значною площею поверхні осадження (7,3 м<sup>2</sup>), що забезпечує високу ефективність розділення при помірній швидкості обертання. Завдяки збалансованим параметрам розділення, об'єму та продуктивності вона є оптимальним варіантом для технологічного процесу, забезпечуючи ефективне протікання процесу.

Аналогічно, проєктований реактор (Σ = 31) отримав найбільшу кількість балів серед наведених типів апаратів. Він оснащений рубашкою, яка в нашому випадку

ЛМ41МП.02.100.000	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 45
-------------------	------------	--------------	------------	-------------

дуже важлива, тому реактор без неї в нашому випадку не підходить. Завдяки помірній потужності на перемішування (1,2 кВт) реактор забезпечує рівномірне, але не надмірно інтенсивне перемішування, що важливо для збереження структури каталізатора. Таким чином, проєктований реактор є найбільш збалансованим і технологічно доцільним варіантом.

У сукупності це свідчить, що обидві розроблені конструкції відповідають сучасним технічним вимогам, мають підвищену продуктивність і можуть бути рекомендовані для промислового використання як більш ефективні аналоги існуючого обладнання.

### 3.3 Вибір матеріалів елементів конструкцій апаратів

#### Центрифуга

Деталі центрифуги, що контактують з оброблюваною суспензією поліетилену, виготовляють зі сталі 12X18H10. Має межу міцності  $\sigma_m = 530$  МПа. Хімічний склад сталі 12X18H10T відповідно до ДСТУ EN 10088-1:2019 наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад сталі 12X18H10T [15].

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 2	9–11	≤ 0,02	≤ 0,035	17–19	≤ 0,3	0,4–1	~67

Кріпильні елементи апаратів варто виготовити з конструкційної сталі марки Ст35 згідно з ДСТУ 7809:2015 [16]. Ця сталь забезпечує надійність і довговічність з'єднань у конструкції і має межу міцності  $\sigma_m = 480 - 640$  МПа. Хімічний склад марки Ст35 згідно з ДСТУ 7809:2015 наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сталі марки Ст35 [16].

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>As</b>
0,32–0,4	0,17–0,37	0,5–0,8	≤ 0,3	≤0,035	≤0,03	≤ 0,25	≤ 0,3	≤ 0,08

Матеріал прокладок TESNIT® BA-203 (Aramid + NBR) – безасбестовий ущільнювальний матеріал на основі арамідних волокон, мінеральних наповнювачів та каучуку NBR. Відповідає вимогам стандарту DIN 28091. Призначений для роботи з водою, паром, маслами, паливом, слабкими кислотами й лугами, а також хімічно нейтральними середовищами.

Застосовується для виготовлення фланцевих прокладок у з'єднаннях, що працюють при тиску до 8 МПа і температурі до +250 °С. Матеріал відзначається високою еластичністю, стійкістю до старіння та відмінними механічними властивостями, що забезпечують довговічну герметизацію у насосах, теплообмінниках, резервуарах та реакторах у хімічній, нафтохімічній і енергетичній галузях [17].

#### Реактор

Оскільки в технології приготування каталітичного комплексу ставляться підвищені вимоги до чистоти сировини, а також у відповідності з рекомендаціями для виготовлення вузлів і деталей, що контактують з каталізатором вибираємо матеріал сталь 08X17H13M2T ГОСТ 9940-88. Має межу міцності  $\sigma_m = 510$  МПа. Хімічний склад марки 08X17H13M2T згідно з ГОСТ 9940-88 наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад сталі марки 08X17H13M2T [18].

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Fe</b>
≤ 0,08	≤ 0,8	≤ 2	12–14	≤ 0,02	≤ 0,035	16–18	≤ 0,3	2–3	~ 61

Для циліндричної частини рубашки та її днища будемо використовувати сталь марки Ст 16ГС. має межу міцності  $\sigma_m = 450 - 490$  МПа. Хімічний склад марки Ст 16ГС згідно ДСТУ 8541 наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Хімічний склад сталі марки Ст 16ГС [19].

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0,12–0,18	0,4–0,7	0,9–1,2	≤ 0,3	≤ 0,035	≤ 0,03	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,08

Набивка сальникового ущільнення виконується за ГОСТ 5152-84. Матеріал застосовується в сальникових ущільненнях арматури, що працює з нейтральними та агресивними рідкими і газоподібними середовищами при тиску до 4,5 МПа і температурі до 400 °С, а також у середовищі рідкого й газоподібного аміаку при тиску до 4,5 МПа і в діапазоні температур від –70 до 150 °С. Крім того, він використовується для ущільнення нерухомих з'єднань апаратів, що контактують із газоподібними середовищами, при тиску до 1 МПа і температурі до 600 °С.

### 3.4 Патентний огляд конструкцій основного обладнання установки

У розділі проведемо порівняння та аналіз закордонних патентів за останній рік. Для аналізу було обрано патенти [21-30]. Документація до патентного пошуку наведена в додатку Б. Патенти, які використано в патентному пошуку наведено в додатку Г.

#### Центрифуга

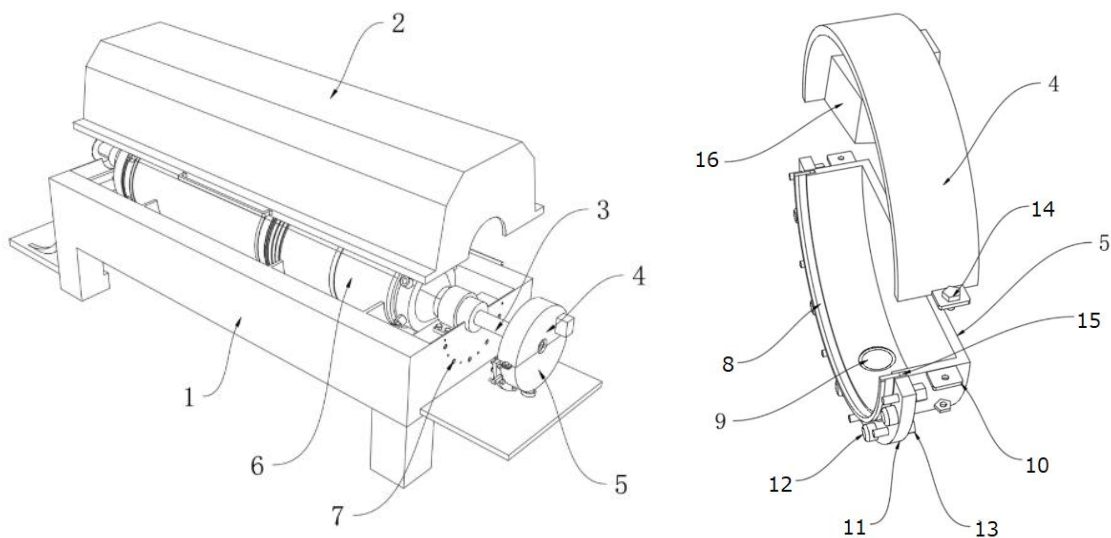
Горизонтальна центрифуга з автоматичним виявленням протікання [21].

Цей винахід стосується горизонтальної центрифуги, яка оснащена системою автоматичного виявлення витоків рідини в області з'єднання обертового вала з корпусом. У звичайній конструкції центрифуги барабан 6 і спіральний шнек

обертаються з високою швидкістю у одному напрямку, але з різницею в обертах. Матеріал подається у внутрішній циліндр шнека через подаючу трубу, після чого надходить в барабан. Під дією відцентрової сили тверда фаза відкладається на стінках барабана й за допомогою шнека переміщується до кінцевого кінця барабана, де виводиться через шлаковипускний отвір. Легка рідка фаза утворює внутрішнє рідинне кільце, яке переливається через великий кінець барабана і виводиться через зливний отвір [21].

Конструкція також містить фіксуєчі елементи, такі як фіксуєчі блоки, болти, позиціонуєчі штифти та важелі, які полегшують монтаж і демонтаж кожухів, забезпечуючи їхнє надійне кріплення до рами.

Зображення винаходу наведено на рисунку 3.3 [21].



- 1 – рама; 2 – верхня кришка; 3 – обертовий вал; 4 – верхній кожух;  
 5 – нижній кожух; 6 – обертовий барабан; 7 – отвори для позиціонування;  
 8 – ущільнювальна стрічка; 9 – отвір для зливу; 10 – перший фіксуєчий блок;  
 11 – другий фіксуєчий блок; 12 – позиціонуєчий штифт; 13 – перший болт;  
 14 – другий болт; 15 – приймальний паз; 16 – датчик вологості

Рисунок 3.3 – Горизонтальна центрифуга з автоматичним виявленням протікання

Запропонована конструкція центрифуги передбачає наявність системи автоматичного виявлення витоків. Вона складається з верхнього 4 й нижнього 5 кожуха, що охоплюють проблемну зону вала 3, датчика вологості 22, розташованого всередині верхнього кожуха, та сигналізації, яка активується у випадку фіксації вологи.

Таким чином, витік рідини виявляється оперативно, що дає змогу вчасно провести обслуговування та запобігти більшим проблемам. Для збору витеклої рідини в нижній частині конструкції передбачено дренажний отвір із приймальною ємністю.

Врахоучуючи це, дана горизонтальна центрифуга з автоматичним виявленням протікань дозволяє суттєво підвищити надійність роботи обладнання, зменшити ризики забруднення, а також спрощує технічне обслуговування завдяки оперативному виявленню несправностей та зручній системі монтажу.

Переваги винаходу:

1. Автоматичне виявлення витоків.
2. Захист обладнання та навколишнього середовища.
3. Покращена герметизація.

Недоліки винаходу:

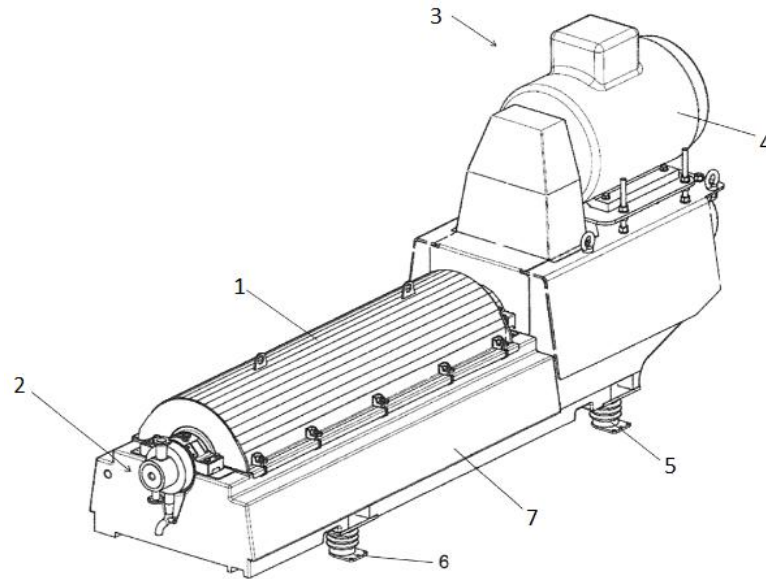
1. Необхідність технічного обслуговування додаткових систем.
2. Можливі хибні спрацювання датчика вологості, що може викликати помилкові сигнали про витік.
3. Через додаткові елементи та матеріали зростає собівартість виробу.

Шнекова центрифуги з суцільним барабаном [22].

Винахід стосується вдосконаленої шнекової центрифуги з суцільним барабаном, конструкція якої спрямована на покращення демпфувальних властивостей і зменшення вібрацій під час роботи. Основна інновація полягає у використанні ультрависокоміцного бетону (UHPC – Ultra High Performance

Concrete) для виготовлення станини машини, що значно покращує її динамічні характеристики порівняно з традиційними матеріалами, як-от сталь, полімербетон або мінеральні суміші [22].

Зображення винаходу представлено на рисунку 3.4 [22].



1 – кожух; 2 – лінія подачі суспензії; 3 – привід; 4 – привідний двигун  
5,6 – опорна лапа; 7 – рама машини

Рисунок 3.4 – Шнекова центрифуги з суцільним барабаном

УНРС має високу щільність ( $2500 - 3000 \text{ кг/м}^3$ ), високий модуль пружності (до  $80000 \text{ Н/мм}^2$ ), високу міцність на стиск, а також хороші демпфувальні властивості. Завдяки цьому станина з УНРС забезпечує вищу жорсткість і кращу стійкість до механічних коливань, що дозволяє зменшити передачу вібрацій від ротора до навколишніх конструкцій і самого корпусу.

Крім того, конструкція центрифуги передбачає підвищене співвідношення маси станини до маси ротора (наприклад – 2,4:1), що ще більше знижує рівень вібрацій та шуму. У результаті, ротор може працювати на вищих обертах без суттєвого збільшення рівня вібрації, що позитивно впливає на продуктивність.

розділення фаз у центрифугі. Конструктивно рама реалізована у вигляді твердого бетонного каркаса з поздовжніми та поперечними балками, в яких передбачені заглиблення для підшипників ротора, а також вставки з металу для з'єднання різних функціональних елементів – капотів, опор і приводу.

Переваги винаходу:

1. Покращена вібростійкість.
2. Зменшення коливань корпусу призводить до зниження шумового навантаження під час роботи.
3. УНРС стійкий до зносу, корозії та деформацій, а також потребує менше металевих компонентів, що робить виробництво більш екологічним.
4. Висока маса станини відносно ротора позитивно впливає на динамічну стабільність центрифуги.

Недоліки винаходу:

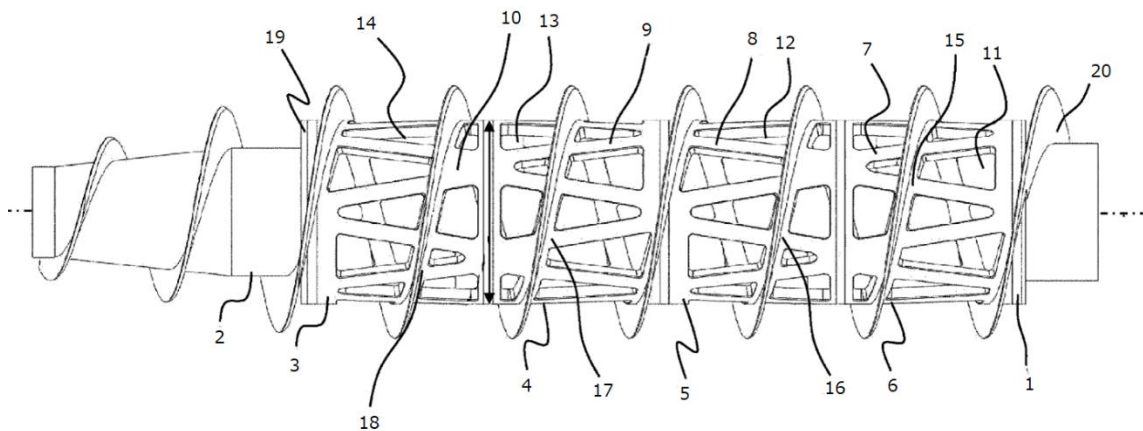
1. Висока вартість УНРС.
2. Складність обробки, УНРС є дуже твердим матеріалом, що ускладнює свердління, різання та інші обробні операції в порівнянні з металами.
3. Обмежена адаптивність, через монолітність конструкції із УНРС можливості для пізніших змін або модифікацій рами є обмеженими.
4. Висока міцність та щільність УНРС вимагають дуже точного лиття та контролю якості, що підвищує складність виробництва.

Гвинт для шнекової центрифуги [23].

Патент стосується центрифужного гвинта для шнекової центрифуги та способу його виготовлення. Головна новизна – модульна конструкція шнекової втулки з монолітних секцій, які з'єднуються механічно та за допомогою зварювання, при цьому стінка втулки зроблена з отворами, які покращують потік рідини в даній конструкції.

Було модифіковано секційну будову втулки, тобто замість суцільної втулки використано кілька монолітно відлитих та оброблених секцій. Секції мають комплементарні торцеві виступи та пази для точного з'єднання. З'єднання виконується у два етапи: фіксація механічним зчепленням (формозамиканням) остаточне скріплення зварюванням [23].

Схема корисної моделі зображена на рисунку 3.5 [23].



1 – шнекова втулка; 2–6 – окремі секції втулки; 7–10 – циліндричні стінки секцій;  
 11–14 – отвори в стінці; 15–18 – спіралеподібні ділянки стінки, що служить  
 основою для гвинтової лопаті; 19 – перехідний елемент між секціям;  
 20 – гвинтова лопать

Рисунок 3.5 – Гвинт для центрифуги

Також було модифіковано втулку, шляхом створення безлічі отворів для вільного руху рідини, що дозволяє збільшити шар рідини в барабані. Інтегровані елементи шнека, дають можливість відливати секцію одразу з частиною гвинтової лопаті або опорною основою для неї, що спрощує збирання та ремонт. Інтегровані балансувальні елементи деяких секцій мають додаткові потовщення для балансування ротора.

Сама центрифуга складається з шнекової втулки, яка має мінімум дві монолітні секції з отворами. Кожна секція має циліндричну стінку та два торці. З'єднання секцій відбувається за допомогою механічного зчеплення (виступи, пази, зубці, зацепи) та матеріальне з'єднання (зварювання, наплавка). Присутні також додаткові елементи, а саме гвинтова лопать та балансувальні виступи або зони

Переваги винаходу:

1. Можна змінювати довжину втулки.
2. Висока жорсткість, завдяки монолітному виготовленню секцій.
3. Покращене протікання рідини за рахунок отворів у стінках, які зменшують опір і дозволяють збільшити глибину осадження.
4. Можна відливати одразу з потрібними елементами.
5. Балансування без додаткових деталей, завдяки інтегрованим потовщенням.

Недоліки винаходу:

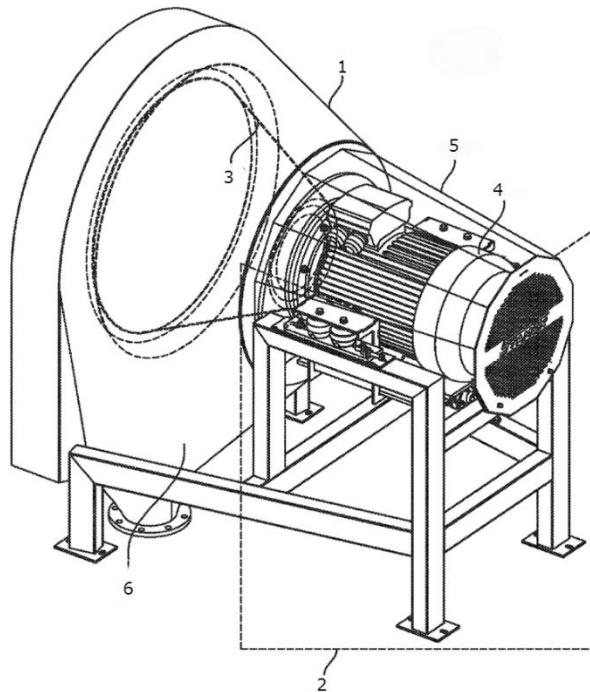
1. Складніше виготовлення окремих секцій, ніж просто суцільної втулки.
2. Більше зварних швів, які можуть привести до появи дефектів при неправильному виготовленні.
3. Вимога високої точності лиття/обробки, щоб з'єднання були щільними.
4. Потенційне накопичення забруднень у зонах стиків та отворів, якщо не передбачено спеціальне очищення.
5. Вища вартість на початковому етапі виробництва, яке може бути компенсовано при серійному випуску.

Горизонтальна центрифуга для розділення рідких і твердих фракцій [24].

Даний винахід стосується горизонтальних центрифуг, що використовуються для розділення рідких і твердих фракцій у промисловості (крохмальна, переробка мінералів, утилізація відходів тощо).

Основна мета винаходу – зменшити вібрації та сили, які передаються на опорну раму машини, навіть при дисбалансі навантаження, і тим самим підвищити швидкість, ефективність та надійність роботи [24].

Схема винаходу зображена на рисунку 3.6 [24].



1 – вузол ситової горизонтальної центрифуги; 2 – опорна конструкція;  
3 – ситовий кошик; 4 – двигун; 5 – корпус двигуна; 6 – камера для збору продукту  
Рисунок 3.6 – Горизонтальна центрифуга для розділення рідких і твердих фракцій

Для досягнення поставленої мети в конструкцію центрифуги було внесено наступні зміни:

1. Модифіковано опору на кардані підвіски, обертові частини закріплені так, щоб вони могли вільно працювати та не передавати дисбаланс на раму.

2. Зроблено пряму посадку кошика на вал двигуна за рахунок знехтування окремим привідним вузлом, що спрощує конструкцію, знижує вартість і полегшує обслуговування.

3. Виконано систему лабіринтних ущільнень з повітряним зазором, яка запобігає зворотному перетоку рідини у відсік для твердих частинок і навпаки.

4. Додано можливість встановлення кошиків різних розмірів без значних змін у конструкції. Система обмеження руху дозволяє обертовим частинам вільно рухатися до певної межі, після чого поглинає надмірні коливання.

5. Збільшена допустима швидкість обертання, завдяки зменшенню впливу дисбалансу можна працювати на більших обертах, підвищуючи продуктивність і ступінь зневоднення.

Переваги винаходу:

1. Значне зниження вібрацій (навіть при дисбалансі).
2. Можливість роботи на вищих обертах, що збільшує продуктивність і якість розділення.
3. Зниження вартості виробництва та експлуатації.
4. Продовження терміну служби кошика та рами.
5. Простота монтажу та обслуговування.

Недоліки винаходу:

1. Складність виробництва карданних підвісок. Виготовлення і налаштування з високою точністю може бути технологічно складним і дорогим.
2. Чутливість до зносу рухомих вузлів через постійні мікроколивання вузли можуть швидше зношуватися, ніж у жорстко закріплених конструкціях.
3. Вища потреба в балансуванні. Хоча система компенсує дисбаланс, при сильному перевантаженні чи неправильному розподілі маси ефективність може падати.
4. Складність у ремонті. Інтеграція кошика безпосередньо на вал двигуна ускладнює заміну лише однієї з цих частин (двигун або кошик).
5. Потреба у спеціалізованому обслуговуванні, не кожне підприємство має техніків, які розуміють особливості карданних підвісок та лабіринтної системи.

6. Обмеження по габаритах кошика. Хоча конструкція дозволяє змінювати розміри, діапазон може бути обмежений можливостями двигуна та балансуванням.

Декантерна центрифуга [25].

Винахід призначений для покращеного вилучення олії та рідкої фракції з суміші твердих і рідких компонентів (шлам, шламові суміші, відходи харчового виробництва, тощо) у декантерній центрифугі. Особливий акцент зроблено на збільшенні кількості олії, що виділяється з твердих частинок під час процесу центрифугування, за рахунок модифікації шнекового транспортера всередині центрифуги.

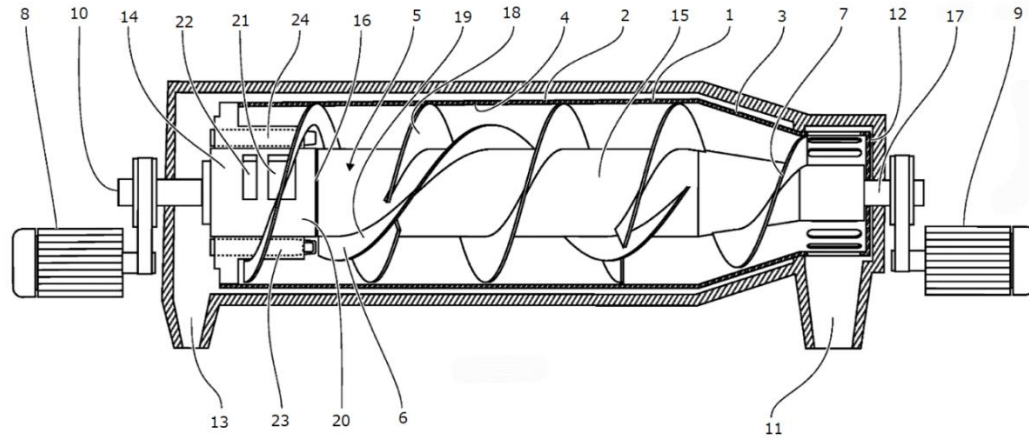
У даному винаході було модифіковано конструкцію шнека-транспортера, який використовується в декантерній центрифугі. Основною інновацією є застосування двох різних типів витків, що працюють у комплексі для підвищення ефективності вилучення олії.

Перший виток має більший діаметр і кут нахилу менше  $20^\circ$ , що дозволяє йому майже торкатися внутрішньої стінки барабана і виконувати функцію поздовжнього транспортування та зішкрібання шламу. Другий виток має менший діаметр і кут нахилу понад  $30^\circ$ , завдяки чому між ним і стінкою барабана утворюється зазор.

Цей зазор дозволяє розподіляти шлам тонким шаром, збільшуючи площу контакту твердих частинок із рідиною та сприяючи ефективнішому відокремленню олії. У деяких виконаннях конструкція також передбачає третій виток, який розташований паралельно другому та утворює з ним вузький канал для збору олії.

Додатково можуть застосовуватися четвертий і п'ятий витки, які дублюють другу і третю пари, але вони вже мають бути розташовані зі зсувом на  $180^\circ$ , що дозволить підсилити ефект розподілу шламу. [25].

Зображення винаходу наведено на рисунку 3.7 [25].



1 – обертовий барабан; 2 – циліндрична частина барабана; 3 – конічна частина барабана; 4 – внутрішня стінка барабана; 5 – шнек-транспортёр; 6 – циліндрична частина шнека; 7 – конічна частина шнека; 8 – приводний двигун барабана; 9 – зворотний приводний двигун шнека; 10 – вхідний отвір; 11 – вихідний отвір важкої фази; 12 – мала торцева втулка на конічній частині барабана; 13 – вихідний отвір легкої фази; 14 – основа (велика торцева втулка) на циліндричній частині барабана; 15 – центральне тіло шнека; 16 – перша опорна поверхня (на циліндричній частині шнека); 17 – друга опорна поверхня (на конічній частині шнека); 18 – перший виток шнека; 19 – другий виток шнека; 20 – цапфа; 21, 22 – вхідні канали для подачі матеріалу; 23, 24 – корпуси вихідних патрубків для легкої фази

Рисунок 3.7 – Декантерна центрифуга

Також для забезпечення компактності та безперервності транспортування матеріалу, другий виток може проходити крізь прорізи в першому, при цьому мінімізуючи переривання його роботи.

Переваги винаходу:

1. Підвищений вихід олії завдяки поєднанню транспортування і тонкого розподілу шламу.

2. Краще розділення фаз – рідина і тверда фракція розшаровуються ефективніше.

3. Вузькі канали запобігають утворенню твердого «коржа», що заважає вилученню олії.

4. Можливість роботи з важковідділюваними емульсіями.

5. Додаткові витки збільшують ефективність без значного збільшення габаритів.

Недоліки винаходу:

1. Складність виготовлення шнека з різними кутами нахилу і діаметрами витків.

2. Вища вартість виробництва через складну геометрію та додаткові витки.

3. Потреба у точному балансуванні для уникнення вібрацій.

4. Складніше очищення і ремонт через наявність кількох витків, каналів і прорізів.

5. Обмеження по типу оброблюваного матеріалу – надто абразивні тверді частинки можуть швидко зношувати вузькі канали та витки.

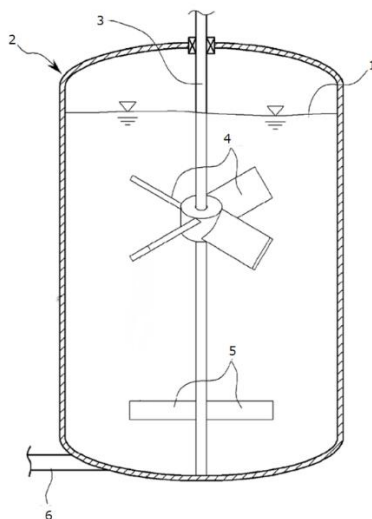
Реактори

Полімеризаційний реактор для виробництва ПВХ [26].

У даному патенті було змінено конструкцію мішалки полімеризаційного реактора для виробництва ПВХ. Замість традиційних лопатевих мішалок, які формують радіальний або низхідний потік, у верхній частині встановлено лопатевий перемішувач з лопатями під кутом від 5 до 50 градусів відносно осі мішалки. Нижні перемішувачі залишаються класичними прямими лопатями. Таке поєднання створює спрямований вгору осьовий потік, що забезпечує кращу циркуляцію і зменшення застійних зон [26].

Модифікований апарат складається з реакційної ємності та мішалки, що має декілька (два-три) ступенів перемішувачі. Перемішувачі розташовані уздовж осі мішалки на довільних інтервалах. Верхній перемішувач – нахилений, формує висхідний потік. Нижній перемішувач – прямий лопатевий, підтримує інтенсивне перемішування. Така конструкція використовується саме у полімеризаційних реакторах для отримання ПВХ.

Зображення винаходу наведено на рисунку 3.8 [26].



1 – реакційний матеріал; 2 – реакційна посудина; 3 – обертальний вал;  
4 – верхня мішалка (з нахиленими лопатями); 5 – нижня мішалка (з прямими лопатями); 6 – вихідний патрубок

Рисунок 3.8 – Полімеризаційний реактор для виробництва ПВХ

Переваги винаходу:

1. Зменшення утворення дефектів типу «fish eye» у ПВХ за рахунок подрібнення частинок і зниження зон з поганим перемішуванням.
2. Покращення якості кінцевого продукту (особливо у виробництві плівок із м'якого ПВХ).
3. Підвищення турбулентності потоку і зменшення «мертвих зон».

4. Можливість гнучкого налаштування кута нахилу верхньої мішалки для досягнення оптимальної гідродинаміки.

Недоліки винаходу:

1. Складніша конструкція мішалки, що ускладнює виготовлення та збільшує вартість обладнання.

2. Потреба у точному підборі кута нахилу верхньої мішалки для уникнення надмірного навантаження на систему.

3. Можливі труднощі з обслуговуванням і заміною мішалок через багатоступеневу конфігурацію.

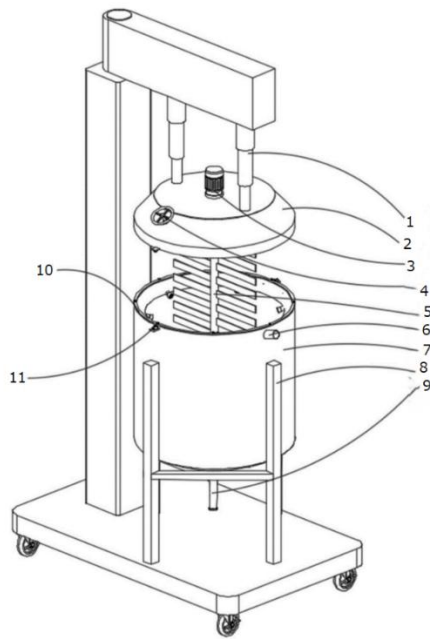
Реактор для виробництва високополімерного матеріалу [27].

В апараті для виробництва полімерних матеріалів гліколевої кислоти (гідроксиоцтової кислоти) було модифіковано вузол герметизації між верхньою кришкою та корпусом реактора. Замість фіксації ущільнювального кільця гвинтами у постійному стиснутому стані, додано пружинний механізм із можливістю автоматичного розслаблення ущільнювача при відкритті кришки.

Також інтегровано елементи позиціонування (з фіксаторами, пружинами та індикатором) і конструктивно вдосконалено основний корпус, включаючи кришку, підйомний механізм, мішалку, клапан, вхід і вихід для рідини, систему очищення.

Модифікації спрямовані на вирішення проблеми передчасного зношення ущільнювального кільця, яке в попередніх варіантах конструкцій залишалося постійно у стиснутому стані під дією гвинтів. Дане технічне виконання призводило до деформації ущільнювального кільця та його постійній заміні. Новий пружинний механізм дозволяє кільцю автоматично переходити у розслаблений стан після відкриття кришки, що значно продовжує його строк служби і знижує витрати на обслуговування [27].

Зображення винаходу представлено на рисунку 3.9 [27].



1 – підйомний пристрій; 2 – верхня кришка; 3 – двигун; 4 – клапан; 5 – мішалка;  
 6 – вхід для води; 7 – корпус резервуара; 8 – опорна рама; 9 – вихід рідини;  
 10 – ущільнювальний вузол; 11 – позиціонуючий вузол

Рисунок 3.9 – Реактор для виробництва високополімерного матеріалу

Переваги винаходу:

1. Значне збільшення терміну служби ущільнювального кільця.
2. Зменшення витрат на заміну ущільнювачів.
3. Автоматизація процесу розвантаження ущільнювача без ручного відкручування гвинтів.
4. Підвищення оперативності та зниження потреби у додаткових трудових витратах.
5. Інтегрована система позиціонування та безпеки (індикатор, фіксатори).

Недоліки винаходу:

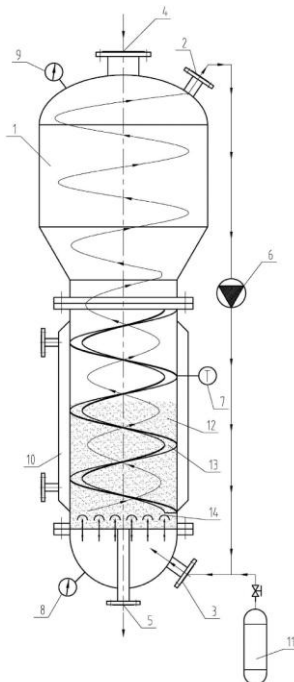
1. Більш складна конструкція, що може збільшити вартість виготовлення.
2. Потреба у технічному обслуговуванні пружинного механізму.

3. Можливість поломки пружин або зношування рухомих частин з часом.

Високополімерний реактор з обертовим псевдозрідженим шаром, що містить фтор [28].

У цьому патенті розроблено та вдосконалено конструкцію реактора для завершення реакцій фторовмісних полімерних матеріалів.

Зображення винаходу представлено на рисунку 3.10 [28].



- 1 – реакційна вежа; 2 – вихід газу; 3 – вхід газу; 4 – вхід порошкового матеріалу;  
5 – отвір труби; 6 – повітряний насос; 7 – термометр; 8 – другий барометр;  
9 – перший барометр; 10 – кожух; 11 – балон зі змішаним газом фтору та азоту;  
12 – полімерний матеріал, що містить фтор; 13 – спіральна направляюча пластина;  
14 – кришка для бульбашок

Рисунок 3.10 – Високополімерний реактор з обертовим псевдозрідженим шаром, що містить фтор

Зроблені модифікації необхідні для підвищення ефективності процесу закінчення вільних кінцевих груп фторовмісних полімерів. Це досягається завдяки

створенню закрученої внутрішньої циркуляції газової суміші фтору та азоту, що значно збільшує шлях газотвердого контакту, а також покращенню масообміну в режимі розрідженої газотвердої фазової флюїдизації. Крім того, нова конструкція забезпечує рівномірний нагрів і стабільні параметри процесу, що в сукупності веде до зменшення втрат матеріалу та підвищення якості кінцевого продукту .

До реактора додали: систему зовнішньої циркуляції газу з насосом для створення внутрішньої спіралеподібної циркуляції, багаторівневу конструкцію реакційної башти (секція розширення і осадження газу, газотвердореакційна секція, секція барботажу газу та порошку), спіральний напрямний елемент усередині реакційної зони; дно з множинними отворами для подачі газу з бульбашковими ковпаками, систему вимірювання тиску (два манометри) і температури, сорочку з теплопередавальним маслом для підігріву.

Переваги винаходу:

1. Закручена внутрішня циркуляція подовжує час контакту газу з матеріалом.
2. Покращений масообмін у режимі розрідженої фази.
3. Рівномірний розподіл газу через багатоточкові інжекційні отвори з ковпаками.
4. Можливість точного контролю температури та тиску.
5. Підвищена якість фторвмісного полімеру.

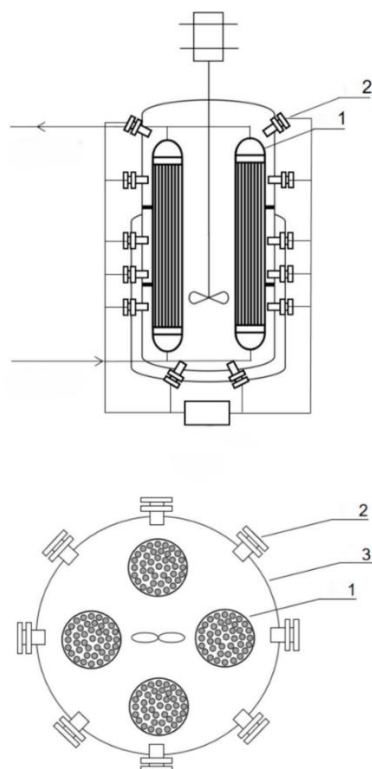
Недоліки винаходу:

1. Складніша конструкція з більшою кількістю вузлів.
2. Потреба у високоякісних герметичних з'єднаннях для роботи з фтором (токсичний і корозійний газ).
3. Дорожче виробництво та обслуговування через наявність насоса, сорочки підігріву та системи вимірювання.

Реактор з функцією видалення та нанесення полімеру [29].

У конструкцію котлового реактора для олігомеризації етилену (отримання 1-бутену та/або 1-октену) було додано систему ультразвукового онлайн-видалення полімерів, що утворюються та осідають на теплообмінниках. Модифікація передбачає монтаж ультразвукових випромінювачів між внутрішньою стінкою реактора і теплообмінними трубами, включно з установкою на бічних стінках та у нижній частині реактора під певними кутами [29].

Зображення винаходу представлено на рисунку 3.11 [29].



1 – теплообмінник; 2 – ультразвуковий перетворювач; 3 – бічна стінка корпусу реактора

Рисунок 3.11 – Реактор з функцією видалення та нанесення полімеру

Система доповнена зовнішнім ультразвуковим генератором, автоматизованим блоком керування та моніторингу, який у режимі реального часу відслідковує утворення накипу/відкладень, регулює потужність ультразвукових

випромінювачів, вмикає резервні модулі та змінює параметри подачі сировини залежно від рівня забруднення теплообмінника.

Модифікації виконані з метою уникнення частого ручного очищення теплообмінників від олігомерів, що утворюються під час процесу олігомеризації етилену.

У стандартних умовах відкладення полімерів на теплообмінних трубах погіршують теплопередачу, змушують зупиняти установку та проводити очищення кожні 5-7 днів. Запровадження ультразвукового очищення дозволяє запобігати налипанню та ефективно видаляти відкладення під час роботи, збільшуючи інтервал безперервної експлуатації до понад 30 днів, зменшуючи експлуатаційні витрати, підвищуючи стабільність процесу і якість продукту

Переваги винаходу:

1. Значне збільшення часу безперервної роботи (з 5-7 днів до понад 30 днів).
2. Зниження витрат на обслуговування і ремонт.
3. Відсутність потреби у використанні хімічних реагентів для очищення.
4. Збереження ефективності теплопередачі завдяки запобіганню утворенню відкладень.
5. Автоматичне регулювання режимів очищення у залежності від реального стану теплообмінника.
6. Підвищення безпеки та екологічності процесу.

Недоліки винаходу:

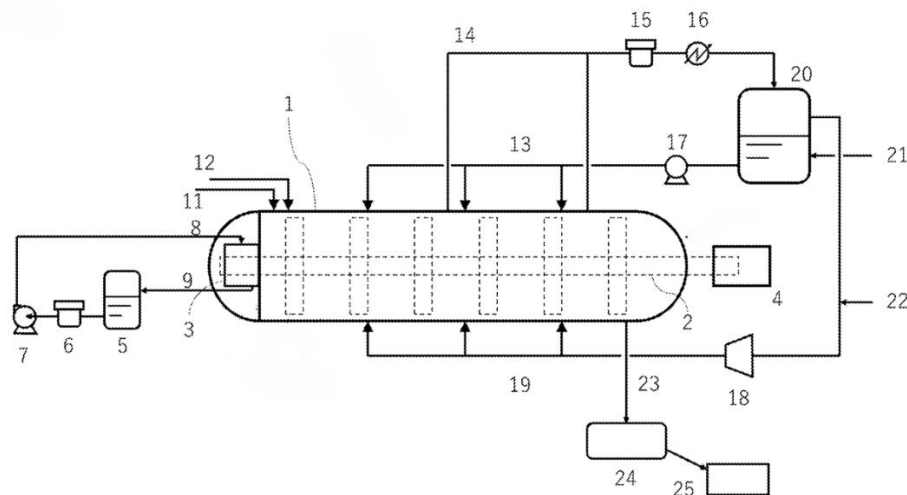
1. Ускладнення конструкції реактора та збільшення його вартості.
2. Необхідність у високоякісних, стійких до тиску та температури ультразвукових випромінювачах.
3. Можливе зниження ефективності очищення при значних коливаннях температури за межами оптимального діапазону (40-60 °C).

4. Потреба в точному налаштуванні системи для конкретних умов виробництва.

Полімеризаційний реактор [30].

У конструкції полімеризаційного реактора, призначеного для синтезу пропіленових полімерів, було змінено систему змащування підшипника мішалки [30].

Зображення винаходу представлено на рисунку 3.12 [30].



- 1 – реакційний бак; 2 – мішалка; 3 – підшипник; 4 – мотор; 5 – резервуар мастила;  
6 – фільтр; 7 – насос; 8 – трубопровід подачі мастила; 9 – трубопровід відведення мастила; 11 – порт подачі каталізатора; 12 – порт подачі каталізатора;  
13 – трубопровід подачі сировинного мономеру; 14 – трубопровід відведення непрореагованого газу; 15 – рукавний фільтр; 16 – конденсатор;  
17 – насос; 18 – компресор; 19 – газопровід подачі сировинного газу;  
20 – газорідинний сепаратор; 21 – трубопровід подачі сировинного пропілену;  
22 – газопровід подачі сировинного газу; 23 – трубопровід відведення полімеру;  
24 – пристрій для відновлення газу; 25 – пристрій для відновлення порошку

Рисунок 3.12 – Полімеризаційний реактор

Замість звичайних мастил, які в умовах полімеризації олефінів втрачають ефективність через розчинення мономерів у мастилі, застосовано фторвмісне мастило, зокрема перфторполіетер (perfluoropolyether). Це мастило подається у зазор між валом мішалки та підшипником, що дозволяє значно зменшити тертя та підвищити довговічність вузла

Модифікації були проведені для усунення проблеми високого тертя та зносу у вузлі «вал мішалки – підшипник», що виникає під час полімеризації пропілену через агресивний вплив мономерів на звичайні мастила.

Використання фторвмісного мастила, стійкого до дії олефінів, дозволяє зберегти стабільні змащувальні властивості, забезпечити плавну та рівномірну роботу мішалки, уникнути пошкодження вала чи підшипників та подовжити термін безперервної експлуатації реактора

Переваги винаходу:

1. Збереження ефективного змащування навіть в умовах контакту з олефіновими мономерами.
2. Значне зменшення зносу та пошкоджень вала мішалки і підшипників.
3. Плавна та стабільна робота мішалки, що позитивно впливає на якість перемішування.
4. Підвищена довговічність реактора та зменшення витрат на технічне обслуговування.
5. Можливість тривалої безперервної роботи без зупинок для ремонту.

Недоліки винаходу:

1. Вища вартість фторвмісних мастил порівняно зі звичайними.
2. Потреба у точному дозуванні та контролі стану мастила.
3. Можливість ускладнень при заміні або утилізації мастила через його специфічні властивості.

Висновки: розглянуті патенти центрифуг демонструють загальну тенденцію розвитку техніки у напрямку підвищення надійності, ефективності та стабільності роботи. Вони спрямовані на підвищення рівня автоматизації, зниження енергоспоживання, зменшення вібрацій і шуму, а також на забезпечення більш точного та ефективного розділення фаз. Основними напрямками модернізацій є інтеграція систем автоматичного контролю (наприклад, виявлення витоків), застосування нових матеріалів з унікальними демпфувальними властивостями (УНРС), використання модульних та багатофункціональних конструкцій шнеків для гнучкості й ефективності процесу, удосконалення системи підвісок та ущільнень для мінімізації дисбалансу й протікань, а також спеціальні геометричні рішення для підвищення виходу цінних компонентів, як-от олія. Попри ускладнення конструкцій і збільшення собівартості, усі рішення спрямовані на стабільну, безпечну, екологічну та більш економічно вигідну роботу центрифуг у різних галузях промисловості.

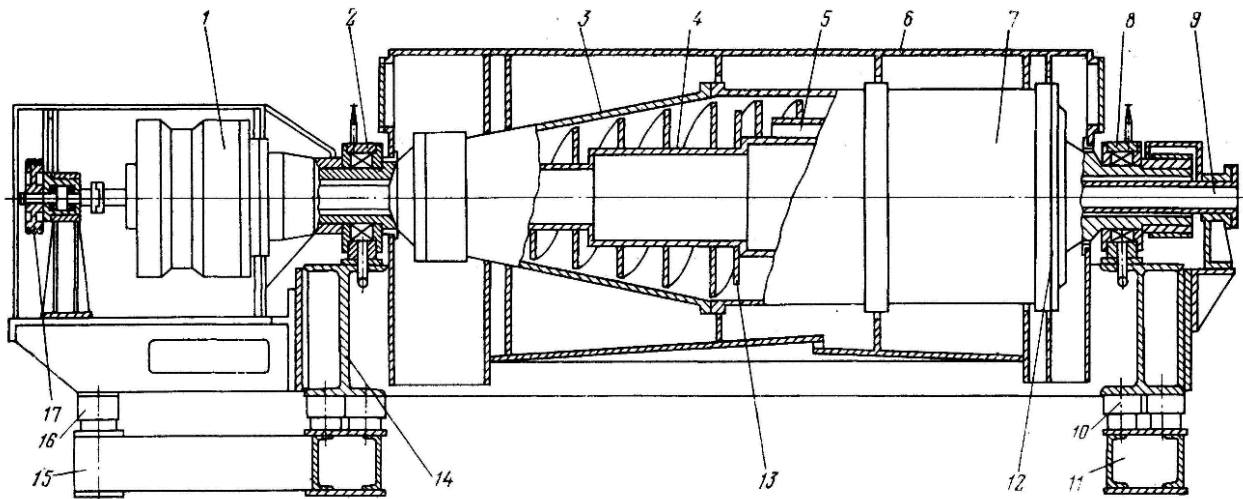
Сучасні патенти на реактори спрямовані на підвищення ефективності, надійності процесів полімеризації та обробки полімерів шляхом оптимізації гідродинаміки, вдосконалення масообміну та теплопередачі, застосування нових матеріалів і автоматизованих систем. Основними тенденціями є використання спеціальних мішалок для усунення застійних зон, інтеграція пружинних механізмів та фторвмісних мастил для продовження ресурсу вузлів, впровадження систем очищення (наприклад, ультразвукових) для зменшення простоїв, а також створення складних циркуляційних схем для покращення якості кінцевого продукту. Хоча такі рішення ускладнюють конструкцію та збільшують вартість обладнання, вони забезпечують більш стабільну роботу, зниження витрат на обслуговування і підвищення якості полімерних матеріалів, що відповідає сучасним вимогам промисловості.

## 4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій

### 4.1 Технологічний розрахунок центрифуги

Мета розрахунку: визначити продуктивність центрифуги за осадом  $G_{тр}$  та суспензією  $V_c$ ; перевірити забезпечення центрифугою необхідної продуктивності в установці.

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.1.



- 1 – планетарний редуктор; 2, 8 – коренні опори; 3 – ротор; 4 – шнек;  
5 – горизонтальні канали; 6 – кожух; 7 – камера; 9 – труба живлення;  
10, 16 – віброізолятори; 11, 15 – рами; 12 – лабіринтне ущільнювальне кільце;  
13 – суцільне з’ємне кільце; 14 – станина; 17 – додатковий привод

Рисунок 4.1 – Схема центрифуги ОГШ 1001К-01

Вихідні дані:

Необхідна продуктивність за твердим осадом,  $G_{н тр}$ , кг/год (кг/с) 4500 (1,25);

Масова концентрація твердої фази,  $x_t$ , % 12;

Густина твердої фази, $\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>	950;
В'язкість рідкої фази, $\mu$ , Па·с	$0,6 \cdot 10^{-3}$ ;
Густина рідкої фази, $\rho_p$ , кг/м	826;
Величина розділення, $\delta_k$ , м	$0,05 \cdot 10^{-3}$ ;
Частота обертання ротора центрифуги, $n$ , с <sup>-1</sup> (1050 об/хв)	17,5;
Внутрішній діаметр ротора, $D_v$ , м	1;
Довжина циліндричної частини ротора центрифуги, $l$ , мм	2316.

Розрахунок ведемо за джерелами [31–33].

Вибір типу центрифуги проведено на основі аналізу властивостей суспензії та технологічних вимог [31-33]. За необхідною продуктивністю обрали аналог проектної центрифуги ОГШ-1001К-01 (див. п. 3.1). Її технічні характеристики наведено у [31-33].

Конструктивна модифікація центрифуги НОГШ, згідно з вихідними даними, повинна мати вибухозахищене електрообладнання, контактуючі з робочим середовищем деталі мають бути виконані з корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 [34].

Для знаходження швидкості осадження часток у полі гравітаційних сил розрахуємо критерій Архімеда:

$$Ar = \frac{\delta_k^3(\rho_T - \rho_p)\rho_p \cdot g}{\mu^2} = \frac{(0,05 \cdot 10^3)^3 \cdot (950 - 826) \cdot 826 \cdot 9,81}{(0,6 \cdot 10^{-3})^2} = 0,349.$$

Якщо  $Ar < 3,6$  – то режим руху ламінарний.

Отже, режим осадження ламінарний, тому швидкість осадження розрахуємо за формулою Стокса:

$$\omega_0 = \frac{\delta_k^2(\rho_T - \rho_p)g}{18\mu} = \frac{(0,05 \cdot 10^3)^2 \cdot (950 - 826) \cdot 9,81}{18 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} = 2,816 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Середній діаметр потоку рідини в барабані дорівнює:

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{в}} + D_{\text{б}}}{2} = \frac{1 + 0,7}{2} = 0,85 \text{ м,}$$

де  $D_{\text{в}}$  – внутрішній діаметр ротора, м;  $D_{\text{б}} = 0,7$  – діаметр зливу рідини (борта), м.

Фактор розділення на середньому діаметрі:

$$Fr_{\text{ср}} = \frac{\omega^2 D_{\text{ср}}}{2g} = \frac{2\pi^2 n^2 D_{\text{ср}}}{g} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 17,5^2 \cdot 0,85}{9,81} = 524,$$

де  $n$  – частота обертання ротора центрифуги,  $\text{с}^{-1}$ .

Продуктивність центрифуги за суспензією знайдемо за формулою:

$$V_{\text{с}} = \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot l \cdot \omega_0 \cdot Fr_{\text{ср}} \cdot \eta_{\text{е}} = 3,14 \cdot 0,85 \cdot 2,316 \cdot 2,816 \cdot 10^{-4} \cdot 524 \cdot 0,2 = \\ = 0,182 \text{ м}^3/\text{с} = 656,8 \text{ м}^3/\text{год,}$$

де  $l$  – довжина шляху осадження, м (довжина циліндричної частини ротора центрифуги);  $\eta_{\text{е}}$  – коефіцієнт ефективності розділення, для центрифуги типу ОГШ, НОГШ,  $\eta_{\text{е}} = 0,2 \dots 0,25$  [31, 32], приймаємо 0,2.

Густина суспензії обчислюємо за формулою:

$$\rho_{\text{с}} = \frac{\rho_{\text{т}} \rho_{\text{р}}}{\rho_{\text{т}} - (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{р}}) x_{\text{т}}} = \frac{950 \cdot 826}{950 - (950 - 826) \cdot 0,12} = 840 \text{ кг/м}^3.$$

Продуктивність центрифуги за твердим осадом:

$$G_{\text{т}} = V_{\text{с}} \rho_{\text{с}} x_{\text{т}} = 656,8 \cdot 840 \cdot 0,12 = 6,62 \cdot 10^4 \text{ кг/год.}$$

Отримане значення продуктивності за осадом  $G_{\text{т}} = 6,62 \cdot 10^4$  кг/год більше за  $G_{\text{тmax}} = 8000$  кг/год. Тоді за [31, 32] приймають робочу продуктивність за осадом рівною  $G_{\text{тр}} = (0,6 \dots 0,8) G_{\text{тmax}}$ , приймаємо:

$$G_{\text{тр}} = 0,6 G_{\text{тmax}} = 0,6 \cdot 8000 = 4800 \text{ кг/год.}$$

Тоді максимальна продуктивність за суспензією буде рівна:

$$V_{\text{с}} = \frac{G_{\text{тр}}}{\rho_{\text{с}} x_{\text{т}}} = \frac{4800}{840 \cdot 0,12} = 47,62 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Необхідна кількість центрифуг:

$$z = \frac{G_{\text{нтр}}}{G_{\text{тр}}} = \frac{4500}{4800} = 0,94 \approx 1 \text{ шт.}$$

Для установки приймаємо одну центрифугу.

Висновок: у результаті розрахунку було отримано максимальне значення продуктивності центрифуги за суспензією  $V_c = 47,62 \text{ м}^3/\text{год} = 0,013 \text{ м}^3/\text{с}$  та робочої продуктивності  $G_{\text{тр}} = 4800 \text{ кг/год} = 1,333 \text{ кг/с}$ . Також, пересвідчилися, що розроблювана центрифуга задовольняє потреби за необхідною продуктивністю установки.

#### 4.2 Визначення основних параметрів центрифуги

Мета розрахунку: визначити основні параметри центрифуги, необхідні для забезпечення її ефективної та надійної роботи, а саме: індексу продуктивності, кутову швидкість обертання барабана та довжину крайової зони.

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.2.

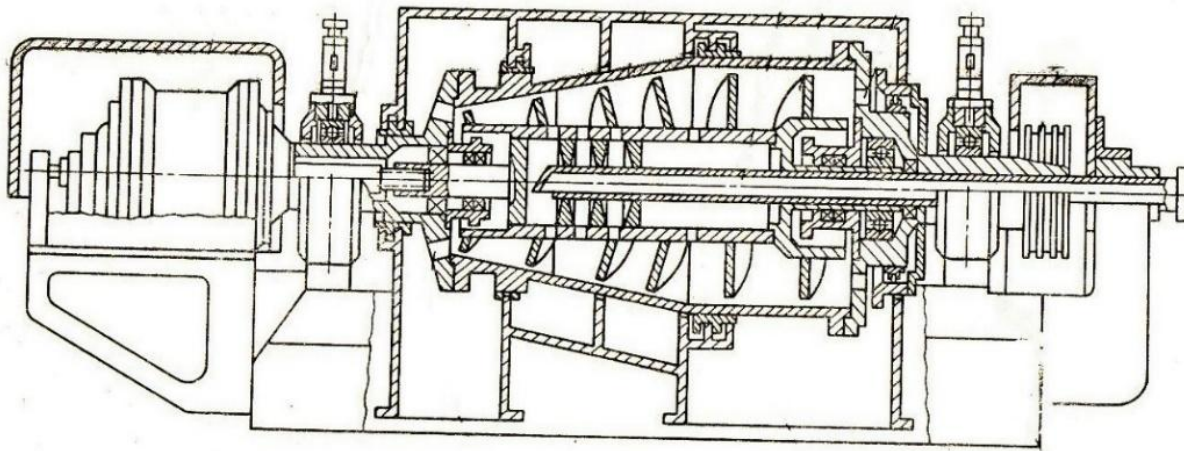


Рисунок 4.2 – Схема центрифуги ОГШ

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр барабана центрифуги, $D$ , мм	1000;
Внутрішній діаметр шару рідини в роторі, $D_0$ , мм	700;
Довжина барабану, $L$ , мм	2316;
Частота обертання ротору, $n$ , об/хв	1050;
Густина середовища, $\rho_c$ , кг/м <sup>3</sup>	840;
Розрахункова температура, $t$ , °С	20;
Матеріал ротора – сталь 12Х18Н10Т	
Густина матеріалу ротора, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> [34]	7920;
Модуль повздовжньої пружності, $E$ , МПа [34]	$1,98 \cdot 10^5$ ;
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,3;
Товщина стінки барабану, $S$ , мм	6;
Коефіцієнт міцності зварних швів, $\phi$	0,9;
Прибавка до розрахункової товщини, $C_1$ , м	0,0005;
Фактор розділення на середньому діаметрі, $Fr$	524.
Методика розрахунку згідно [5].	

1. Визначення коефіцієнту завантаження  $\psi$ :

$$\psi = \frac{V_{\text{матеріалу}}}{V_{\text{ротора}}} = \frac{\pi R^2 H - \pi r^2 H}{\pi R^2 H} = \frac{R^2 - r^2}{R^2}, \quad (4.1)$$

де  $R$  – внутрішній радіус барабана центрифуги, м;  $r$  – внутрішній радіус шару рідини:

$$R = \frac{D}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ м.}$$

$$r = \frac{D_0}{2} = \frac{0,7}{2} = 0,35 \text{ м.}$$

Звідси отримаємо за формулою (4.1):

$$\psi = \frac{R^2 - r^2}{R^2} = \frac{0,5^2 - 0,35^2}{0,5^2} = 0,51.$$

2. Кутова швидкість обертання барабана:

$$\omega = 2\pi n = 2\pi \frac{n}{60} = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1050}{30} = 109,9 \text{ с}^{-1},$$

де  $n$  в об/хв.

3. Визначення індексу продуктивності  $\Sigma$

Поверхню осадження обрахуємо, як площу бічної поверхні циліндра:

$$F_{oc} = 2\pi RL = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 2,316 = 7,276 \text{ м}^2,$$

де  $L$  – довжина барабану, м;  $R$  – внутрішній радіус барабана центрифуги, м.

Вплив всіх конструктивних чинників, що визначають здатність відстійних і фільтруючих центрифуг до розділення суспензій або емульсій, характеризує величина  $\Sigma$ :

$$\Sigma = F_{oc} \cdot Fr = 7,276 \cdot 524 = 3,813 \cdot 10^3 \text{ м}^2,$$

де  $F_{oc}$  – поверхня осадження, м;  $Fr$  – фактор розділення.

4. Визначення допустимих напружень для матеріалу барабану в безмоментній та крайовій зонах

Для сталі 12Х18Н10Т при  $\eta = 1$  при робочій температурі 20 °С [34]:

$$\sigma_p^* = 134 \text{ МПа.}$$

Поправковий коефіцієнт  $\eta$  – враховує вид заготовки, у нашому випадку обираємо вид заготовки листовий прокат, крім сталевих відливок –  $\eta = 1$ ,

Допустиме напруження для аустенітної сталі 12Х18Н10Т:

$$[\sigma] = \eta \cdot \sigma_p^* = 1 \cdot 134 = 134 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження для крайових зон:

$$[\sigma]_{кр} = 1,3 \cdot [\sigma] = 1,3 \cdot 134 = 174,2 \text{ МПа.}$$

5. Визначення коефіцієнту Ньютона  $Ne$

$$Ne = \frac{[\sigma]}{\rho \omega^2 R^2} = \frac{134 \cdot 10^6}{7920 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5^2} = 5,598,$$

де  $\rho$  – густина матеріалу обичайки,  $\text{кг/м}^3$ [3];  $\omega$  – кутова швидкість обертання центрифуги,  $\text{с}^{-1}$ .

Висновок: при значенні  $Ne = 5,598$  обичайку вважають тонкостінною. Обичайку можна використовувати.

#### 6. Визначення довжини крайової зони

Розрахунок проводиться для безмоментної зони.

Коефіцієнт затухання:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1 - \mu^2)}{R^2 s^2}} = \sqrt[4]{\frac{3(1 - 0,3^2)}{0,5^2 \cdot 0,006^2}} = 23,47.$$

Безмоментна зона віддалена від краю на відстань:

$$x \geq \frac{\pi}{2,5\beta} = \frac{3,14}{2,5 \cdot 23,47} = 0,054 \text{ м.}$$

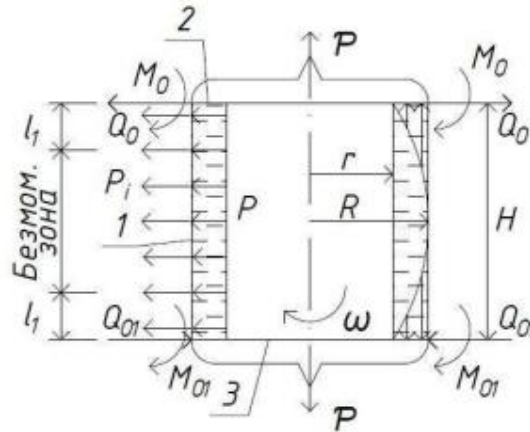
Приймаємо  $x = 0,055 \text{ м}$

Висновок: у результаті розрахунку було визначено основні параметри центрифуги, необхідні для забезпечення її ефективної та надійної роботи, а саме: індекс продуктивності  $\Sigma = 3,813 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ , кутову швидкість обертання барабана  $\omega = 109,9 \text{ с}^{-1}$ , та довжину крайової зони  $x = 0,055 \text{ м}$ .

### **4.3 Розрахунок циліндричної частини обичайки ротора центрифуги в безмоментній зоні**

Мета розрахунку: розрахувати товщину стінки циліндричної частини обичайки ротора в безмоментній зоні.

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.3.



1 – циліндрична обичайка; 2 – борт для запобігання витоку рідини; 3 – днище  
Рисунок 4.3 – Схема циліндричної обичайки

Вихідні дані:

Внутрішній радіус ротора, $R$ , м	0,5;
Радіус борта (зливу рідини), $r$ , м	0,35;
Коефіцієнт заповнення, $\psi$	0,51;
Кутова швидкість ротора, $\omega$ , $\text{с}^{-1}$	109,9;
Максимальна частота обертання ротора, $n$ , $\text{с}^{-1}$	17,5;
Густина суспензії, $\rho_c$ , $\text{кг/м}^3$	840;
Температура середовища, $t$ , $^{\circ}\text{C}$	20;
Допустиме напруження матеріалу обичайки ротора, $[\sigma]$ , МПа (12X18H10T [34])	134;
Густина матеріалу ротора, $\rho$ , $\text{кг/м}^3$ [34]	7920;
Модуль продольної пружності, $E$ , МПа [34]	$1,98 \cdot 10^5$ ;
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,3;
Коефіцієнт міцності зварних швів, $\varphi$	0,9;
Прибавка до розрахункової товщини, $S_1$ , м	$5 \cdot 10^{-4}$ .
Методика розрахунку згідно [5].	

1) Активні навантаження:

1. Тиск суспензії на стінку обичайки  $P$ :

$$P = \frac{\rho_c \omega^2}{2} (R^2 - r^2) = \frac{840 \cdot 109,9^2}{2} (0,5^2 - 0,35^2) = 6,468 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

2. Результуюча сила тиску на днище  $P$ :

$$P = \frac{\pi \rho_c \omega^2 (R^2 - r^2)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 840 \cdot 109,9^2 (0,5^2 - 0,34^2)^2}{4} = 1,295 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

2) Розрахункова товщина стінки циліндричної частини обичайки ротора центрифуги:

$$S_p = \frac{PR}{[\sigma]\varphi - \rho \omega^2 R^2} = \frac{6,468 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{134 \cdot 10^6 \cdot 0,9 - 7920 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5^2} = 3,345 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Прибавка на компенсацію мінусового допуску  $C_2$  та утоншення стінки  $C_3$  не враховуються, тому  $C = C_1 + C_2 + C_3 = 5 \cdot 10^{-4} + 0 + 0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$

Виконавча товщина стінки:

$$S = S_p + C = 3,345 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4} = 3,845 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Враховуючи стандартний ряд та вимоги до транспортування приймаємо значення  $S = 0,006 \text{ м}$

Навантаження сили інерції власних мас деталей, що діє на ротор

$$P_i = \rho \omega^2 R s = 7920 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5 \cdot 0,006 = 2,87 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

3) Головні нормальні напруження обичайки

1. Кільцеве напруження в обичайці:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{\rho_c \omega^2 (R^2 - r^2) R}{2(S - C)} + \rho \omega^2 R^2 = \\ &= \frac{840 \cdot 109,9^2 (0,5^2 - 0,35^2)}{2(0,006 - 5 \cdot 10^{-4})} + 7920 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5^2 = 8,271 \cdot 10^7 \text{ Па.} \end{aligned}$$

2. Меридіональне напруження в обичайці:

$$\sigma_N = \frac{P}{2\pi R(S - C)} = \frac{1,295 \cdot 10^5}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5(0,006 - 5 \cdot 10^{-4})} = 7,497 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

3. Радіальне напруження в обичайці:

$$\sigma_r = -(P + P_i) = -(6,468 \cdot 10^5 + 2,87 \cdot 10^5) = -9,338 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Аналіз напруженого стану:

Отримані напруження є головними нормальними напруженнями.

Максимальне за величиною напруження  $\sigma_t = 82,71 \text{ МПа};$

Мінімальне за величиною напруження  $\sigma_r = -0,934 \text{ МПа};$

Перше головне нормальне напруження  $\sigma_1 = \sigma_t = 82,71 \text{ МПа};$

Друге головне нормальне напруження  $\sigma_2 = \sigma_N = 7,497 \text{ МПа};$

Третє головне нормальне напруження  $\sigma_3 = \sigma_r = -0,934 \text{ МПа.}$

4. Еквівалентне напруження за третьою теорією міцності:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (4.2)$$

Оскільки напруження  $\sigma_r$  значно менше  $\sigma_t$ , то ним можна знехтувати, тоді еквівалентне напруження в обичайці:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 = \sigma_t = 8,271 \cdot 10^7 \text{ Па.}$$

Допустима швидкість обертання

Допустима кутова швидкість циліндричної частини обичайки ротора центрифуги:

$$[\omega] = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{[\sigma]\varphi}{\frac{\rho_c R \psi}{2(s-c)} + \rho}} = \frac{1}{0,5} \sqrt{\frac{134 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{\frac{840 \cdot 0,5 \cdot 0,51}{2(0,006 - 5 \cdot 10^{-4})} + 7920}} = 132,7 \text{ с}^{-1}.$$

4) Перевірка умови міцності за допустимою швидкістю

Умова міцності:

$$\omega \leq [\omega]$$

$$109,9 \text{ с}^{-1} < 132,7 \text{ с}^{-1}.$$

Умова міцності виконується.

Перевірка умови міцності по напруженням

Використовуємо умову міцності за методом допустимих напружень:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma]$$

$$8,271 \cdot 10^7 \text{ Па} < 1,34 \cdot 10^8 \text{ Па.}$$

Умова міцності виконується.

Висновок: у результаті проведення розрахунку було визначено виконавчу товщина циліндричної обичайки  $S = 0,006 \text{ м}$  і перевірено її на міцність.

#### 4.4 Розрахунок конічної частини обичайки ротора центрифуги в безмоментній зоні

Мета розрахунку: розрахувати товщину стінки конічної частини обичайки ротора в безмоментній зоні.

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.4.

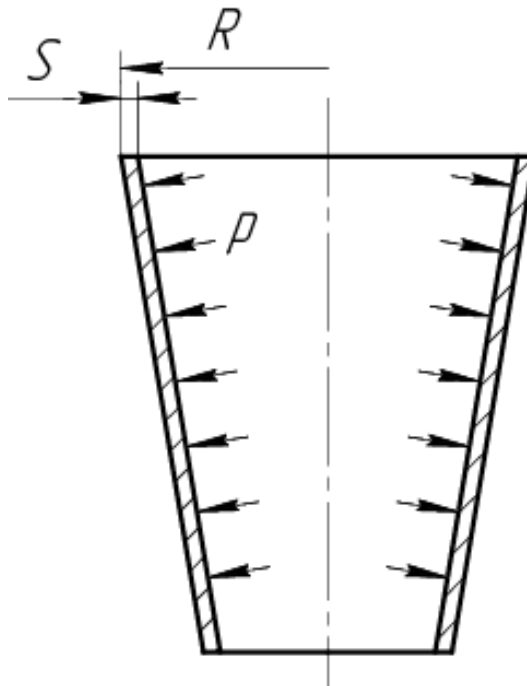


Рисунок 4.4 – Схема конічної обичайки

Вихідні дані:

Найбільший внутрішній радіус ротора, $R$ , м	0,5;
Внутрішній радіус шару матеріалу в роторі, $R_{11}$	0,35;
Коефіцієнт заповнення, $\psi$	0,51;
Кутова швидкість ротора, $\omega$ , $\text{с}^{-1}$	109,9;
Густина суспензії, $\rho_c$ , $\text{кг/м}^3$	840;
Густина матеріалу ротора, $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	7920;
Модуль продольної пружності, $E$ , МПа	$1,98 \cdot 10^5$ ;
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,3;
Допустиме напруження матеріалу обичайки ротора, $[\sigma]$ , МПа	134;
Коефіцієнт міцності зварних швів, $\varphi$	0,9;
Кут конусності обичайки, $\alpha$ , $^\circ$	7;
Прибавка до розрахункової товщини стінки, $C$ , м	$5 \cdot 10^{-4}$ .

Методика розрахунку згідно [5].

1) Розрахункова товщина стінки конічної частини обичайки:

$$S_k = \frac{\rho_c \omega^2 R^3 \psi}{2([\sigma] \varphi - \rho \omega^2 R^2) \cos \alpha} = \frac{840 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5^3 \cdot 0,51}{2(134 \cdot 10^6 \cdot 0,9 - 7920 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5^2) \cdot 0,993} = 3,368 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Прибавка на компенсацію мінусового допуску  $C_2$  та утоншення стінки  $C_3$  не враховуються, тому  $C = C_1 + C_2 + C_3 = 5 \cdot 10^{-4} + 0 + 0 = 5 \cdot 10^{-4}$  м. Виконавча товщина стінки:

$$S = S_k + C = 3,368 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4} = 3,868 \cdot 10^{-3}.$$

Враховуючи стандартний ряд та вимоги до транспортування приймаємо значення  $S_k = 0,006$  м

2) Активні навантаження:

1. Тиск середовища (максимальне значення при  $\chi = R$ :

$$P = \frac{\rho_c \omega^2}{2} (R^2 - R_{11}^2) = \frac{840 \cdot 109,9^2}{2} (0,5^2 - 0,35^2) = 6,468 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

2. Тиск від відцентрової сили інерції, що діє на ротор:

$$P_i^n = \rho \omega^2 R S_k \cos \alpha = 7920 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5 \cdot 0,006 \cdot 0,993 = 2,85 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

3. Сумарне питоме навантаження на конічну обичайку на радіусі  $R$ :

$$P_s = P + P_i^n = 6,468 \cdot 10^5 + 2,85 \cdot 10^5 = 9,317 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

4. Результуюча сила тиску на днище  $P$ :

$$P = \frac{\pi \rho_c \omega^2 (R^2 - R_{11}^2)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 840 \cdot 109,9^2 (0,5^2 - 0,35^2)^2}{4} = 1,295 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

3) Головні нормальні напруження обичайки

1. Кільцеве напруження в обичайці:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{0,5 \rho_c \omega^2 R^3 \psi + \rho \omega^2 R^2 S_k \cos \alpha}{S_k \cos \alpha} = \\ &= \frac{0,5 \cdot 840 \cdot 109,9 \cdot 0,5^3 \cdot 0,51 + 7920 \cdot 109,9^2 \cdot 0,5^2 \cdot 0,006 \cdot 0,993}{0,006 \cdot 0,993} = \\ &= 7,819 \cdot 10^7 \text{ Па.} \end{aligned}$$

2. Меридіональне напруження в обичайці:

$$\sigma_N = \frac{\rho_c \omega^2 (R^2 - R_{11}^2)^2}{8 R S_k \cos \alpha} = \frac{840 \cdot 109,9^2 \cdot (0,5^2 - 0,35^2)^2}{8 \cdot 0,5 \cdot 0,006 \cdot 0,993} = 6,92 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

3. Радіальне напруження в обичайці:

$$\sigma_r = -P_s = -9,317 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Аналіз напруженого стану:

Максимальне за величиною напруження	$\sigma_t = 78,19 \text{ МПа};$
Мінімальне за величиною напруження	$\sigma_r = -0,932 \text{ МПа};$
Перше головне нормальне напруження	$\sigma_1 = \sigma_t = 78,19 \text{ МПа};$
Друге головне нормальне напруження	$\sigma_2 = \sigma_N = 6,92 \text{ МПа};$
Третє головне нормальне напруження	$\sigma_3 = \sigma_r = -0,932 \text{ МПа.}$

Еквівалентне напруження за третьою теорією міцності:

ЛМ41МП.02.100.000	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 82
-------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4.3)$$

Оскільки напруження  $\sigma_r$  значно менше  $\sigma_t$ , то ним можна знехтувати, Тоді еквівалентне напруження в обичайці:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 = \sigma_t = 7,819 \cdot 10^7 \text{ Па.}$$

Допустима швидкість обертання

Допустима кутова швидкість конічної частини обичайки ротора центрифуги:

$$[\omega] = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{[\sigma]\varphi}{\frac{\rho_c R \psi}{2(S_k - C)\cos\alpha} + \rho}} = \frac{1}{0,5} \sqrt{\frac{134 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{\frac{840 \cdot 0,5 \cdot 0,51}{2(0,006 - 5 \cdot 10^{-4})0,993} + 7920}} = 132,4 \text{ с}^{-1}.$$

4. Перевірка умови міцності за допустимою швидкістю

Умова міцності:

$$\omega \leq [\omega]$$

$$109,9 \text{ с}^{-1} < 132,4 \text{ с}^{-1}.$$

Умова міцності виконується.

Перевірка умови міцності по напруженням

Використовуємо умову міцності за методом допустимих напружень:'

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma]$$

$$7,819 \cdot 10^7 \text{ Па} < 1,34 \cdot 10^8 \text{ Па.}$$

Умова міцності виконується.

Висновок: за результатами розрахунків визначено виконавчу товщину конічної обичайки  $S_k = 0,006$  м та підтверджено її міцність.

#### 4.5 Розрахунок днища і борта ротора центрифуги

Мета розрахунку: визначити основні параметри та значення напружено-деформованого стану днища і борта ротора центрифуги з метою забезпечення їх міцності та надійності

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.5.

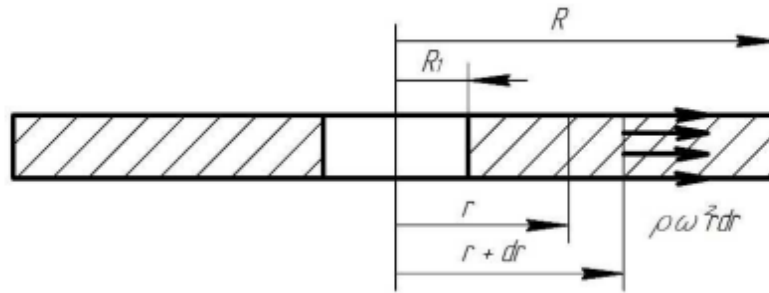


Рисунок 4.5 – Схема до розрахунку кільцевого диску днища і борта ротора

Вихідні дані

Зовнішній радіус кільцевого диску, $R$ , м	0,5;
Внутрішній радіус кільцевого диску, $R_1$ , м	0,35;
Кутова швидкість обертання диску, $\omega$ , $\text{с}^{-1}$	109,9;
Густина суспензії, $\rho_c$ , $\text{кг/м}^3$	840;
Матеріал диску – сталь 12Х18Н10Т	
Густина матеріалу диску, $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	7920;
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,3;
Допустиме напруження матеріалу диску, $[\sigma]$ , МПа	134;
Модуль повздовжньої пружності, $E$ , МПа	$1,98 \cdot 10^5$ ;
Методика розрахунку згідно [5].	

Знайдемо значення розрахункових радіусів ( $R_1 \leq r \leq R$ ):

$$\Delta r = \frac{S}{4} = \frac{R - R_1}{4} = \frac{0,5 - 0,35}{4} = 0,038 \text{ м.}$$

$$r_1 = R_1 = 0,35 \text{ м.}$$

$$r_2 = r_1 + \Delta r = 0,35 + 0,038 = 0,388 \text{ м.}$$

$$r_3 = r_2 + \Delta r = 0,388 + 0,038 = 0,426 \text{ м.}$$

$$r_4 = r_3 + \Delta r = 0,426 + 0,038 = 0,464 \text{ м.}$$

$$r_5 = R = 0,5 \text{ м.}$$

Для кожного значення  $r$  розрахуємо кільцеве напруження:

$$- r_1 = 0,35 \text{ м}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{t1} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_1^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r_1^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} \cdot 7920 \cdot 109,9^2 \left( 0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,35^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} \cdot 0,35^2 \right) = \\ &= 2,178 \cdot 10^7 \text{ Па.} \end{aligned}$$

$$- r_2 = 0,388 \text{ м}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{t2} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_2^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r_2^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} \cdot 7920 \cdot 109,9^2 \left( 0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,388^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} \cdot 0,388^2 \right) = \\ &= 1,931 \cdot 10^7 \text{ Па.} \end{aligned}$$

$$- r_3 = 0,426 \text{ м}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{t3} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_3^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r_3^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} \cdot 7920 \cdot 109,9^2 \left( 0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,426^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} \cdot 0,426^2 \right) = \\ &= 1,723 \cdot 10^7 \text{ Па.} \end{aligned}$$

$$- r_4 = 0,464 \text{ м}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{t4} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_4^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r_4^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} \cdot 7920 \cdot 109,9^2 \left( 0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,464^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} \cdot 0,464^2 \right) = \\ &= 1,542 \cdot 10^7 \text{ Па.} \end{aligned}$$

$$- r_5 = 0,5 \text{ м}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{t5} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_5^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r_5^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} \cdot 7920 \cdot 109,9^2 \left( 0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,5^2} - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} \cdot 0,5^2 \right) = \\ &= 1,385 \cdot 10^7 \text{ Па.}\end{aligned}$$

Для кожного значення  $r$  розраховуємо радіальне напруження:

$$- r_1 = 0,35 \text{ м}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{t1} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_1^2} - r_1^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} 7920 \cdot 109,9^2 (0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,35^2} - 0,35^2) = 0 \text{ Па.}\end{aligned}$$

$$- r_2 = 0,388 \text{ м}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{t2} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_2^2} - r_2^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} 7920 \cdot 109,9^2 (0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,388^2} - 0,388^2) = 7,311 \cdot 10^5 \text{ Па.}\end{aligned}$$

$$- r_3 = 0,426 \text{ м}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{t3} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_3^2} - r_3^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} 7920 \cdot 109,9^2 (0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,426^2} - 0,426^2) = 8,787 \cdot 10^5 \text{ Па.}\end{aligned}$$

$$- r_4 = 0,464 \text{ м}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{t4} &= \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_4^2} - r_4^2 \right) = \\ &= \frac{3 + 0,3}{8} 7920 \cdot 109,9^2 (0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,464^2} - 0,464^2) = 5,902 \cdot 10^5 \text{ Па.}\end{aligned}$$

$$- r_5 = 0,5$$

$$\sigma_{t5} = \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 \left( R^2 + R_1^2 + \frac{R^2 R_1^2}{r_5^2} - r_5^2 \right) =$$

$$= \frac{3 + 0,3}{8} 7920 \cdot 109,9^2 (0,5^2 + 0,35^2 + \frac{0,5^2 \cdot 0,35^2}{0,5^2} - 0,5^2) = 0 \text{ Па.}$$

Розраховуємо радіальне переміщення, при  $r = R$ :

$$\Delta R = \frac{\mu^2 - 1}{8E} \rho \omega^2 \left( r^2 - \frac{3 + \mu}{1 + \mu} (R^2 + R_1^2) r - \frac{3 + \mu}{1 - \mu} R^2 \frac{R_1^2}{r} \right) =$$

$$= \frac{0,3^2 - 1}{8 \cdot 1,98 \cdot 10^5 \cdot 10^6} 7920 \cdot 109,9^2 \cdot$$

$$\cdot \left( 0,5^3 - \frac{3 + 0,3}{1 + 0,3} \cdot (0,5^2 + 0,35^2) \cdot 0,5 - \frac{3 + 0,3}{1 - 0,3} \cdot 0,5^2 \cdot \frac{0,35^2}{0,5} \right) =$$

$$= 3,498 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Аналізуючи отримані розрахункові дані бачимо, що матеріал диска знаходиться у плоскому напруженому стані. Напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_t$  – розтягуючі у будь-якій точці диска, при цьому  $\sigma_t$  більше  $\sigma_r$ . Із розрахунку також випливає, що максимальне значення буде на внутрішній поверхні диска.

Також бачимо, що на внутрішньому і зовнішньому контурах диска радіальні напруження відсутні ( $\sigma_r = 0$  при  $r = R_1$  і  $r = R$ ).

Побудуємо епюру зміни напружень від поточного радіуса, рисунок 4.6.

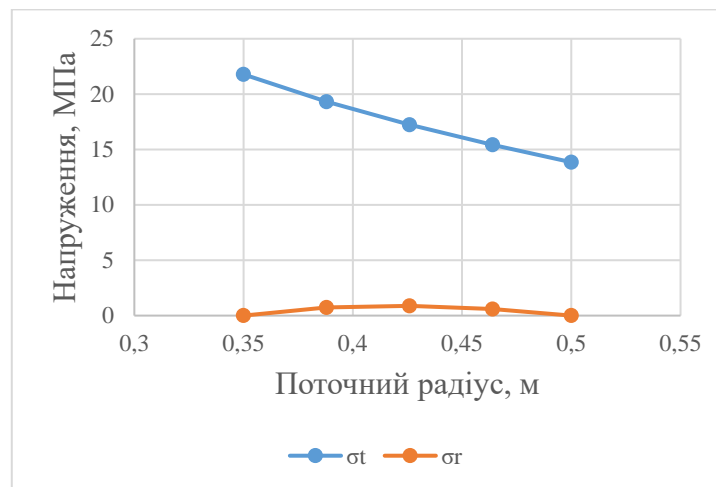


Рисунок 4.6 – Епюра напружень

При перевірці міцності диска відповідно до енергетичної теорії або теорії найбільших дотичних напружень  $\sigma_{\text{екв}} = \sigma_{t\text{max}}$ .

Умова міцності:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma]$$

$$21,78 \text{ МПа} < 134 \text{ МПа.}$$

Умова міцності виконується.

Дозволяє знайти допустиму швидкість обертання диска за формулою:

$$[\omega] = 2 \sqrt{\frac{2[\sigma]}{\rho(3 + \mu)(R_1^2 + 2R^2 - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} R_1^2)}} =$$
$$= 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 134 \cdot 10^6}{7920 \cdot (3 + 0,3) \cdot (0,35^2 + 2 \cdot 0,5^2 - \frac{1 + 3 \cdot 0,3}{3 + 0,3} \cdot 0,35^2)}} = 272,6 \text{ с}^{-1}.$$

Умова міцності:

$$\omega \leq [\omega]$$

$$109,9 \text{ с}^{-1} < 272,6 \text{ с}^{-1}.$$

Умова міцності виконується.

Висновок: у ході розрахунків визначено розподіл напружень у кільцевому диску залежно від поточного радіуса, а також радіальні переміщення. Встановлено, що окружне напруження  $\sigma_t$  перевищує радіальне  $\sigma_r$ , причому його максимальне значення спостерігається на внутрішній поверхні диска.

Отримані результати підтверджуються побудованими епюрами. Крім того, визначено допустиму швидкість обертання диска центрифуги, яка виявилася більшою за задану, що свідчить про виконання умови міцності.

## 4.6 Технологічний розрахунок реактора

Мета розрахунку: розрахувати число операцій, що повинно бути проведено за добу для забезпечення заданої продуктивності та зважаючи на резерв потужності апаратури для звичайних умов, прийняти необхідну у лінії кількість апаратів для приготування каталізаторного комплексу.

Схема апарата зображена на рисунку 4.7.

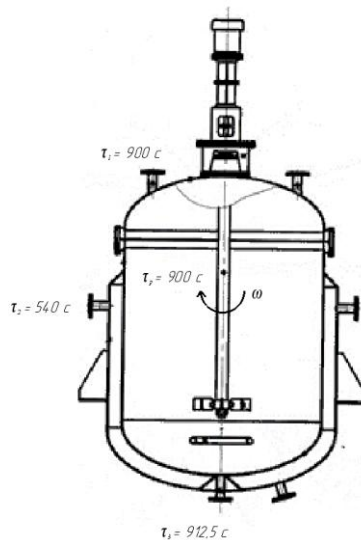


Рисунок 4.7 – Схема реактору

Вихідні дані:

Об'єм апарата, $V_a$ , м <sup>3</sup>	2,5;
Коефіцієнт заповнення, $\varphi$	0,75;
Добова продуктивність реактора, $G_d$ , $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	0,6;
Густина основної рідини, $\rho_r$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$0,743 \cdot 10^3$ ;
Густина дисперсної фази, $\rho_f$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$2,73 \cdot 10^3$ ;
Об'ємна доля дисперсної фази, $x$	0,05.
Методика розрахунку згідно з [35, 36, 37 с. 177–189].	

Густина перемішаного середовища:

$$\rho_c = \rho_\phi \cdot x + \rho_p \cdot (1 - x) = 2,73 \cdot 10^3 \cdot 0,05 + 0,743 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,05) = \\ = 842,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Робочий об'єм реактора  $V_p$  залежить від коефіцієнта заповнення  $\phi$ . У випадку процесу без піноутворення  $\phi = 0,75$  [36, ст. 188]:

$$V_p = V_a \cdot \phi = 2,5 \cdot 0,75 = 1,875 \text{ м}^3.$$

Задана добова продуктивність реактора  $G_d = 0,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 51840 \frac{\text{кг}}{\text{доба}}$ , тоді об'єм речовини, що переробляється за добу:

$$V_d = \frac{G_d}{\rho} = \frac{51840}{842,4} = 61,54 \frac{\text{м}^3}{\text{доба}}.$$

Число операцій, що повинно бути проведено за добу для забезпечення заданої продуктивності:

$$\alpha = \frac{V_d}{V_p} = \frac{61,54}{1,875} = 32,82.$$

Час проведення процесу  $\tau$  містить кілька складових:

$$\tau = \tau_p + \tau_b, \quad (4.4)$$

де  $\tau_p = 15 \text{ хв} = 900 \text{ с}$  – час процесу;  $\tau_b$  – допоміжний час роботи реактора, що складається з тривалостей підготовки реактора  $\tau_1$ , заповнення рідиною  $\tau_2$  та спорожнювання  $\tau_3$ , с:

$$\tau_b = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \quad (4.5)$$

Час підготовки реактора задається регламентом, в нашому випадку  $\tau_1 = 15 \text{ хв} = 900 \text{ с}$ .

Час спорожнювання реактора через зливний штуцер умовний діаметр якого дорівнює 100 мм:

$$\tau_3 = \frac{1,1 \cdot 10^3 \cdot V_p}{H_p^{0,5} \cdot D^2} = \frac{1,1 \cdot 10^3 \cdot 1,875}{1,33^{0,5} \cdot 1,4^2} = 912,5 \text{ с},$$

де  $H_p = 1,33$  м – висота рідини в реакторі;  $D = 1,4$  м – діаметр реактора з [37, табл. 2.1, стор. 18].

Час заповнення реактора через два штуцера з умовним діаметром 100 мм приблизно в два рази менший:  $\tau_2 = 9$  хв = 540 с.

Тоді за (4.5):

$$\tau_B = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 900 + 540 + 912,5 = 2,352 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

та за (4.4):

$$\tau = \tau_p + \tau_B = 900 + 2352 = 3,252 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

$$\tau = \frac{\tau}{3600} = \frac{3,252 \cdot 10^3}{3600} = 0,903 \text{ год} \approx 1 \text{ год.}$$

Число операцій, що можуть бути проведені за добу для одного апарата періодичної дії:

$$\beta = \frac{24}{\tau} = \frac{24}{1} = 24.$$

Часовий коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_T = \frac{\tau_p}{\tau} = \frac{15}{60} = 0,25.$$

Число реакторів в одній установці виходячи з умови обслуговування одним апаратчиком:

$$m \leq \frac{\tau}{\tau_B} = \frac{\tau}{1 - \eta_T} = \frac{1}{1 - 0,25} = 1,33.$$

Необхідна кількість робочих апаратів:

$$m_p = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{32,82}{24} = 1,368.$$

Число реакторів, що треба встановити з урахуванням резерву потужності:

$$m = m_p \cdot (1 + 0,01 \cdot \delta) = 1,368 \cdot (1 + 0,01 \cdot 0,1) = 1,369 \approx 2 \text{ шт.},$$

де  $\delta = 10$  % – резерв потужності апаратури для звичайних робочих умов.

Висновок: розрахувавши число операцій, які повинні бути проведені за добу для забезпечення заданої продуктивності та зважаючи на резерв потужності апаратури для звичайних умов, приймаємо необхідним використання у лінії 2-ох реакторів для приготування каталізаторного комплексу з заданою продуктивністю  $G_d = 0,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

#### 4.7 Тепловий розрахунок реактора

Мета розрахунку: розрахувати кількість теплоти, що має відводитись за один цикл роботи реактора для підтримки заданих технологічних умов.

Схема апарата зображена на рисунку 4.8.

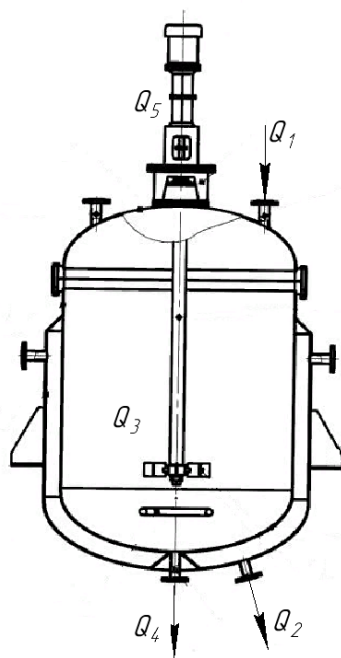


Рисунок 4.8 – Тепловий потік в реакторі

Вихідні дані

Кількість розчину у реакторі,  $G$ , кг

1580;

Теплоємність розчину до реакції,  $c_1, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$   $2,06 \cdot 10^3$ ;

Початкова температура реагентів,  $t_1, ^\circ\text{C}$  20;

Теплоємність розчину після взаємодії,  $c_2, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$   $2,11 \cdot 10^3$ ;

Температура продуктів реакції, що виносяться,  $t_2, ^\circ\text{C}$  30.

Методика розрахунку згідно з [35–37].

Рівняння, що виражає тепловий баланс процесу в апараті, можна надати у наступній формі:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5, \quad (4.6)$$

де  $Q_1$  – теплота, що вноситься в апарат з вхідними речовинами, кДж;

$Q_2$  – теплота, що відводиться холодильним агентом, кДж;

$Q_3$  – тепловий ефект хімічного процесу, кДж;

$Q_4$  – теплота, що виносяться з продуктами реакції, кДж;

$Q_5$  – теплота, що витрачається на нагрівання апарату, кДж.

Тоді основна величина  $Q_2$  знаходиться за формулою:

$$Q_2 = Q_4 + Q_5 - Q_1 - Q_3 \quad (4.7)$$

Теплота, що вноситься в апарат з вхідними речовинами може бути знайдена за рівнянням:

$$Q_1 = G \cdot c_1 \cdot t_1 = 1580 \cdot 2,06 \cdot 10^3 \cdot 20 = 6,51 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Теплота, що виносяться з продуктами реакції:

$$Q_4 = G \cdot c_2 \cdot t_2 = 1580 \cdot 2,11 \cdot 10^3 \cdot 30 = 1 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

Теплота, що витрачається на нагрівання апарата:

$$Q_5 = G_{\text{ап}} \cdot c_3 \cdot \Delta t = 2440 \cdot 0,59 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1,44 \cdot 10^7 \text{ Дж,}$$

де  $G_{\text{ап}} = 2440$  кг – маса апарата;  $c_3 = 0,59 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  – питома теплоємність матеріала, з якого виготовлений реактор;  $\Delta t = t_2 - t_1 = 30 - 20 = 10$  °C – різниця температур апарата при нагріванні.

Теплота ефекту хімічної реакції  $Q'_3 = 45,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

$$Q_3 = Q'_3 \cdot V_a \cdot \varphi \cdot \rho = 45,1 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 0,75 \cdot 842,4 = 7,123 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Тому кількість теплоти, що відводиться за 1 цикл роботи реактора має значення (граничний тепловий потік)  $Q_2$  за формулою (4.7):

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_4 + Q_5 - Q_1 - Q_3 = 1 \cdot 10^8 + 1,44 \cdot 10^7 - 6,51 \cdot 10^7 - 7,123 \cdot 10^7 = \\ &= -2,192 \cdot 10^7 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Відведення теплоти проходить за допомогою установки на реактор рубашки, в яку подається холодильний агент (вода).

За [37] для апарату з об'ємом  $2,5 \text{ м}^3$  площа поверхні теплообмінної рубашки  $6,5 \text{ м}^2$ .

Висновок: кількість теплоти, що має бути відведена за один цикл роботи реактора має значення  $Q_2 = -2,192 \cdot 10^4 \text{ кДж}$ .

#### 4.8 Розрахунок теплообміну в реакторі

Мета розрахунку: перевірити здатність стандартної рубашки забезпечити необхідний у процесі приготування каталітичного комплексу теплообмін.

Загальною особливістю розрахунку тепловіддачі від теплоносія в рубашці є необхідність врахування напрямку теплового потоку.

У випадках, коли теплоносій використовується для нагріву перемішуваного середовища, значення теплового потоку  $Q$  підставляється у розрахункові формули із знаком плюс.

У випадках, коли теплоносій використовують для охолодження перемішуваного середовища, значення теплового потоку  $Q$  підставляється у розрахункові формули із знаком «мінус».

Для даного випадку, згідно технології процесу, відбувається охолодження перемішуваного середовища, значення теплового потоку  $Q$  підставляється зі знаком «мінус» [38].

Схема апарата зображена на рисунку 4.9.

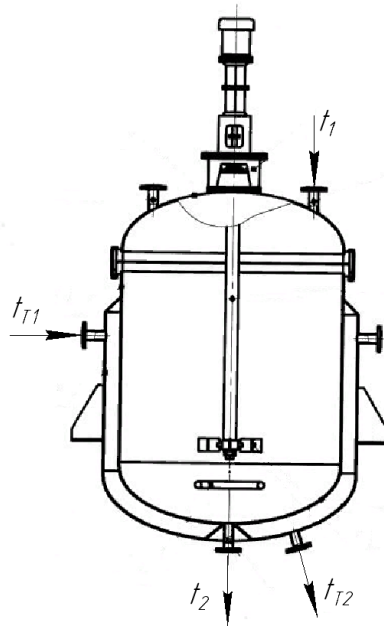


Рисунок 4.9 – Схема теплообміну в реакторі

Вихідні дані

Коефіцієнт теплопровідності перемішуваного середовища,

$$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}} \quad 0,115;$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості перемішуваного середовища,

$$\mu, \text{Па}\cdot\text{с} \quad 0,047;$$

$$\text{Густина перемішуваного середовища, } \rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad 842,4;$$

$$\text{Теплоємність перемішуваного середовища, } c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \quad 2,11 \cdot 10^3;$$

$$\text{Потужність, що витрачається на перемішування, } N, \text{Вт} \quad 1200;$$

$$\text{Прискорення вільного падіння, } g, \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad 9,81;$$

Товщина стінки обичайки, $\delta$ , м	0,012;
Коефіцієнт теплопровідності стінки, $\lambda_{ст}$ , $\frac{Вт}{м \cdot К}$	14,7;
Діаметр реактора, $D$ , м	1,4;
Час процесу, $\tau_p$ , с	900;
Теплота, що відводиться холодильним агентом (водою), $Q_2$ , Дж	$-2,192 \cdot 10^7$ .

Методика розрахунку згідно з [37, 38]

Теплообмін відбувається між перемішуваним середовищем та водою в рубашці.

Знайдемо безрозмірні коефіцієнти  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  [38]:

$$\alpha_1 = (c \cdot \lambda^2)^{0,33} = (2,11 \cdot 10^3 \cdot 0,115^2)^{0,33} = 3.$$

$$\alpha_2 = 0,0237 \cdot \alpha_1 \cdot \rho^{0,58} \cdot \mu^{-0,54} = 0,0237 \cdot 3 \cdot 842,4^{0,58} \cdot 0,047^{-0,54} = 18,44.$$

$$\alpha_3 = 0,93 \cdot \alpha_1 \cdot \rho^{0,36} \cdot \mu^{-0,24} = 0,93 \cdot 3 \cdot 842,4^{0,36} \cdot 0,047^{-0,24} = 65,69.$$

Тоді коефіцієнт тепловіддачі від перемішваного середовища до стінки апарата за [38]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{D} (\alpha_2 \cdot (N \cdot D)^{0,29} + \alpha_3 \cdot (N \cdot D)^{0,18}) = \\ &= \frac{1}{1,4} \cdot (18,44 \cdot (1200 \cdot 1,4)^{0,29} + 65,69 \cdot (1200 \cdot 1,4)^{0,18}) = \\ &= 292,1 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}. \end{aligned}$$

Граничний тепловий потік:

$$Q = \frac{Q_2}{\tau_p} = \frac{-2,192 \cdot 10^7}{900} = -2,435 \cdot 10^4 \text{ Вт.}$$

Температура води на вході в рубашку:

$$t_{T1} = 8 \text{ }^\circ\text{C} = 281 \text{ К.}$$

Температура води на виході з рубашки:

$$t_{T2} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C} = 285 \text{ K.}$$

Середня розрахункова температура в рубашці [38]:

$$t_{\text{Тср}} = \frac{t_{T1} + t_{T2}}{2} = \frac{281 + 285}{2} = 283 \text{ K.}$$

Температура стінки (в першому наближенні з подальшим уточненням) [38]:

$$t_{\text{ст}} = 0,5 \cdot (t_1 + t_{\text{Тср}}) = 0,5 \cdot (303 + 283) = 293 \text{ K,}$$

де  $t_1 = 30 \text{ }^{\circ}\text{C} = 303 \text{ K}$  – початкова температура середовища.

Середня різниця температур визначається для режиму охолодження середовища в реакторі теплоносієм, що не змінює агрегатний стан за формулами з [37, стр. 37]:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_{T1}}{t_2 - t_{T2}}} \cdot \frac{A - 1}{A \cdot \ln A} = \frac{303 - 293}{\ln \frac{303 - 281}{293 - 281}} \cdot \frac{1,5 - 1}{1,5 \cdot \ln 1,5} = 13,56 \text{ K,}$$

$$\text{де } A = \frac{t_2 - t_{T1}}{t_2 - t_{T2}} = \frac{293 - 281}{293 - 285} = 1,5 ,$$

де  $t_2 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 293 \text{ K}$  – кінцева температура середовища.

Якщо теплоносій – вода, добуток критеріїв  $GrPr$  можна розрахувати за формулою [37, стр. 39]:

$$GrPr = H_T^3 \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{Тср}}) \Delta = 0,98^3 \cdot (293 - 283) \cdot 8 \cdot 10^9 = 7,53 \cdot 10^{10},$$

де  $H_T = 0,98 \text{ м}$  – висота стінки посудини в рубашці.

Параметр  $\Delta$  беремо з [37, стр. 39-40] при середній температурі води 10 град:

$$\Delta = 8 \cdot 10^9.$$

За значенням  $GrPr > 10^9$  маємо величини наступних коефіцієнтів з [37, стр. 39]:

$$c_s = 0,15.$$

$$f = 0,33.$$

Тепер знайдемо коефіцієнт тепловіддачі від води, що проходить в рубашці [38]:

$$\alpha_T = c_s \cdot \lambda_T \cdot (GrPr)^f \cdot H_T^{-1} = 0,15 \cdot 0,574 \cdot (7,53 \cdot 10^{10})^{0,33} \cdot 0,98^{-1} =$$

$$= 341,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

де  $\lambda_T = 0,574 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  при температурі води 10 °С з [40, ст. 119].

Коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_T}} = \frac{1}{\frac{1}{292,1} + \frac{0,012}{14,7} + \frac{1}{341,3}} = 139,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Розрахункова величина теплового потоку, перше наближення (з тим же знаком, що і  $Q$ , так як іде процес охолодження):

$$Q' = -k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} = -139,5 \cdot 6,5 \cdot 13,56 = -1,23 \cdot 10^4 \text{ Вт},$$

де  $F = 6,5 \text{ м}^2$  – загальна поверхня теплообміну реактору.

Далі, відповідно до [38], після визначення першого наближення розрахункового теплового потоку, розрахунок повторюється. При цьому робиться уточнення температури  $t_{cm}$ , з урахуванням значення теплового потоку  $Q'$ .

Після визначення другого і наступних наближень теплового потоку (за потреби) робиться перевірка виконання умови (4.6):

$$\varepsilon = \left| \frac{Q - Q'}{Q} \right| \cdot 100 \% < 10 \%. \quad (4.8)$$

Отже,

$$\varepsilon = \left| \frac{Q - Q'}{Q} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-2,435 \cdot 10^4 - (-1,23 \cdot 10^4)}{-2,435 \cdot 10^4} \right| \cdot 100 = 49,51 \% > 10 \%.$$

Умова не виконується, виконуємо розрахунок другого наближення теплового потоку.

Уточнюємо температуру стінки (друге наближення):

$$t'_{ст} = t_{cp} - \frac{Q'}{F \cdot \alpha_T} = 283 - \frac{(-1,23 \cdot 10^4)}{6,5 \cdot 341,3} = 288,5 \text{ К}.$$

Уточнюємо добуток критеріїв  $GrPr$ :

$$GrPr' = H_T^3 \cdot (t'_{ст} - t_{тср})\Delta = 0,98^3 \cdot (288,5 - 283) \cdot 8 \cdot 10^9 = 4,174 \cdot 10^{10}.$$

Тепер уточнюємо значення коефіцієнту тепловіддачі від води з новим добутком  $GrPr'$ :

$$\begin{aligned} \alpha'_T &= c_s \cdot \lambda_T \cdot (GrPr')^f \cdot H_T^{-1} = 0,15 \cdot 0,574 \cdot (4,174 \cdot 10^{10})^{0,33} \cdot 0,98^{-1} = \\ &= 280,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Уточнюємо коефіцієнт теплопередачі:

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha'_T}} = \frac{1}{\frac{1}{292,1} + \frac{0,012}{14,7} + \frac{1}{280,9}} = 128,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Фактична величина теплового потоку (друге наближення):

$$Q'' = -k' \cdot F \cdot \Delta t_{ср} = -128,6 \cdot 6,5 \cdot 13,56 = -1,13 \cdot 10^4 \text{ Вт}.$$

Після визначення другого наближення теплового потоку робимо перевірку виконання умови (4.6):

$$\varepsilon = \left| \frac{Q' - Q''}{Q'} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-1,23 \cdot 10^4 - (-1,13 \cdot 10^4)}{-1,23 \cdot 10^4} \right| \cdot 100 = 8,076 \% < 10 \%.$$

Умова виконується. Похибка менше 10%, отже фактичний тепловий потік пораховано вірно.

Висновки: у результаті розрахунку бачимо, що задана стандартна конструкція рубашки забезпечує необхідний теплообмін в процесі приготування каталітичного комплексу.

#### 4.9 Розрахунок потужності, що витрачається на перемішування

Мета розрахунку: розрахувати потужність, що витрачається на перемішування в реакторі.

Схема апарата зображена на рисунку 4.10.

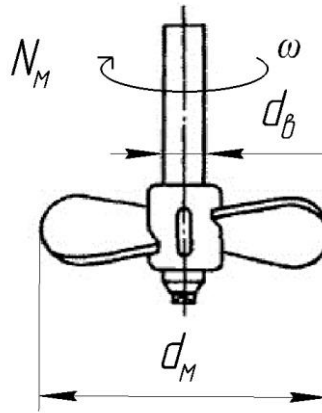


Рисунок 4.10 – Перемішувальний пристрій

Вихідні дані:

Динамічний коефіцієнт в'язкості перемішуваного середовища,

$\mu_c$ , Па·с 0,047;

Частота обертання мішалки,  $n$ ,  $s^{-1}$  8,33;

Густина перемішуваного середовища,  $\rho_c$ ,  $kg/m^3$  842,4;

Діаметр апарата,  $D_B$ , м 1,4.

Методика розрахунку згідно з [35, 37, 38, 40].

Діаметр пропелерної мішалки  $d_M$  знаходимо зі співвідношення:

$$\frac{D_B}{d_M} = 3,5.$$

$$d_M = \frac{D_B}{3,5} = \frac{1,4}{3,5} = 0,4 \text{ м.}$$

Кругова швидкість мішалки при частоті обертання  $n = 8,33 \text{ s}^{-1}$ :

$$\omega = \pi \cdot n \cdot d_M = 3,14 \cdot 8,33 \cdot 0,4 = 10,47 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Кутова швидкість лежить у рекомендованих межах [35] для пропелерних мішалок 3,8 – 16 м/с.

Центробіжний критерій Рейнольдса визначаємо за формулою:

$$Re_{ц} = \frac{\rho_c \cdot n \cdot d_M^2}{\mu_c} = \frac{842,4 \cdot 8,33 \cdot 0,4^2}{0,047} = 2,389 \cdot 10^4 > 10^3.$$

Критерій потужності  $K_N$  при даному значенні  $Re_{ц}$  визначаємо за графіком з [37, 38]:

$$K_N = 0,24.$$

Розрахункова потужність, що витрачається на перемішування визначається за формулою:

$$N_M = K_N \cdot \rho_c \cdot n^3 \cdot d_M^5 = 0,24 \cdot 842,4 \cdot 8,33^3 \cdot 0,44^5 = 1,197 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Приймаємо  $N_M = 1,2$  кВт

Висновок: розрахункова потужність, що витрачається на перемішування  $N_M = 1,2$  кВт.

#### 4.10 Визначення втрат потужності на подолання сил тертя в сальниковому ущільненні

Мета розрахунку: розрахувати втрати потужності на подолання сил тертя в сальниковому ущільненні.

Схема сальникового ущільнення зображена на рисунку 4.11.

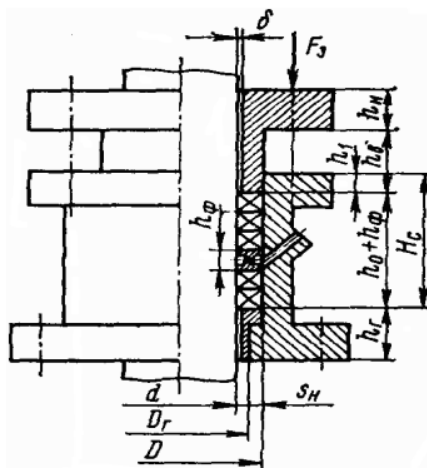


Рисунок 4.11 – Схема сальникового ущільнення

Вихідні дані:

Ширина набивки, $S_n$ , мм	16;
Висота сальникової набивки, $h$ , мм	94;
Діаметр ущільнюваного вала, $d$ , мм	65;
Кутова швидкість валу, $\omega$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	52,1;
Тиск герметичності, $p_r$ , МПа	0,3.

Методику розрахунку взято з [35, 37].

Сила тертя між набивкою та валом обчислюється так:

$$\begin{aligned} F_{\text{тр}} &= \left( \frac{\pi \cdot d \cdot S_n \cdot p_r \cdot f_{\text{кін}}}{2 \cdot k \cdot f} \right) \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot k \cdot f \cdot h}{S_n}} - 1 \right) = \\ &= \left( \frac{3,14 \cdot 65 \cdot 10^3 \cdot 0,016 \cdot 0,3 \cdot 10^6 \cdot 0,04}{2 \cdot 1 \cdot 0,08} \right) \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot 0,08 \cdot 1 \cdot 0,094}{0,016}} - 1 \right) = \\ &= 382,3 \text{ Н}, \end{aligned}$$

де  $k = 1$  – коефіцієнт бічного тиску для просякненої набивки;

$f = 0,08$  – коефіцієнт тертя (0,08...0,12);

$f_{\text{кін}} = 0,04$  коефіцієнт кінетичного тертя між валом і набивкою при тиску середовища;

$p = 0,1$  МПа та робочій швидкості  $V$ :

$$V = \frac{\omega \cdot d}{2} = \frac{52,1 \cdot 65 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,693 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Витрати потужності на подолання сил тертя в сальнику:

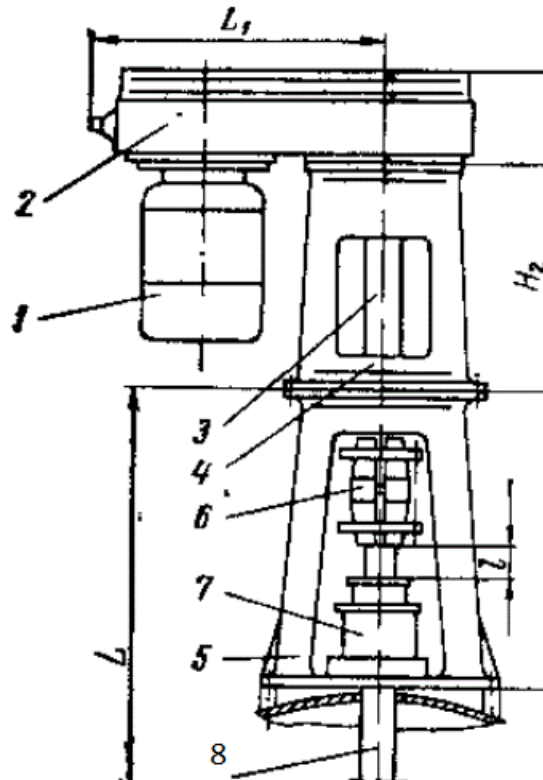
$$N_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{тр}} \cdot \omega \cdot d}{2} = \frac{382,3 \cdot 52,1 \cdot 65 \cdot 10^{-3}}{2} = 647,3 \text{ Вт}.$$

Висновок: потужність, що витрачається на подолання сил тертя в сальниковому ущільненні  $N_{\text{уп}} = 647,3$  Вт.

## 4.11 Розрахунок потужності приводу механічного перемішуючого пристрою реактора

Мета розрахунку: розрахувати потужність приводу механічного перемішуючого пристрою та обрати привод.

Схема приводу зображена на рисунку 4.12.



- 1 – електродвигун серії АО2 за ГОСТ 13859-68; 2 – клиноременна передача;  
3 – вал проміжний; 4 – стійка за МН 5859-66; 5 – стійка за МН 5855-66;  
6 – муфта за МН 5871-66; 7 – ущільнення за МН 5866-66 – МН 5870-66;  
8 – вал перемішуючого пристрою

Рисунок 4.12 – Схема вертикального приводу з клиноремінною передачею

Вихідні дані:

Витрати потужності,  $N_{уп}$ , Вт

647,3;

Потужність,  $N$ , Вт

$1,2 \cdot 10^3$ ;

Частота обертання мішалки,  $n$ ,  $\text{с}^{-1}$

8,33;

Методика розрахунку згідно з [35, 37].

Потужність приводу мішалки обчислюється за формулою:

$$N_{\text{дв}} = \frac{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_i \cdot N + N_{\text{уп}}}{\eta} = \frac{1,25 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 10^3 + 647,3}{0,8} = 2,872 \cdot 10^3 \text{ Вт},$$

де  $K_{\text{п}} = 1,25$  – коефіцієнт, що враховує наявність або відсутність перегородок в апараті (розраховуваний апарат без перегородок);

$K_{\text{н}} = 1$  – коефіцієнт, що враховує висоту рідини (в нашому випадку  $H_{\text{ж}} = D_{\text{в}}$ );

$K_i = 1,1$  – коефіцієнт, що враховує наявність гільзи термопари;

$\eta \approx 0,8$  – коефіцієнт корисної дії вертикального приводу;

$N_{\text{уп}}$  – потужність, що витрачається на тертя у сальниковому ущільненні вала мішалки, Вт.

Обираємо двигун потужністю  $N_{\text{дв}} = 3$  кВт Вибір нормалізованого приводу здійснений за [35].

З характеристик нормалізованих приводів механічних перемішувачів пристроїв підбираємо привід для частоти обертів  $n = 8,33 \text{ с}^{-1} = 500 \text{ хв}^{-1}$ : тип VII з клиноремінною передачею та електродвигуном серій АО2 та ВАО, номер МН 5861-66, потужність 1,1 – 10 кВт (рисунок 4.13)

Позначення приводу знаходимо в [35] за кількістю обертів  $n = 500 \text{ хв}^{-1}$  та потужністю двигуна  $N = 3$  кВт: 2 або 6. З [35] маємо основні параметри приводу (для позначення 2):

$d = 65$  мм;  $H = 1490$  мм;  $H_1 = 1160$  мм;  $H_2 = 510$  мм;  $l = 80$  мм;  $L = 3400$  мм;  $L_1 = 670$  мм,  $m = 408$  кг. Допустиме осьове навантаження на вал  $P = 1120$  Н.

Конструкція опорної частини приводу показана на рисунку 4.13

Основні розміри опорної частини:  $D_{\text{ф}} = 480$  мм,  $D_{\text{б}} = 435$  мм,  $D = 235$  мм,  $B = 320$  мм,  $d_1 = 23$  мм,  $h = 25$  мм.

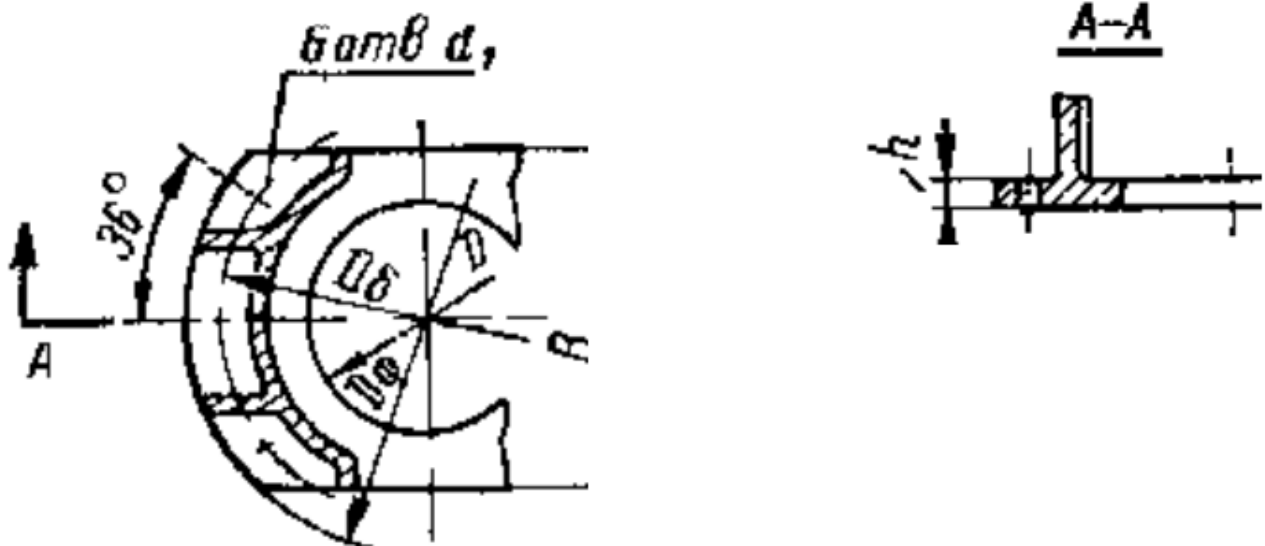


Рисунок 4.13 – Опорна частина вертикальних приводів перемішувачих пристроїв  
(за МН 5855-66 – МН 5863-66)

Висновок: після проведених розрахунків обрано привід типу VII з ланцюговою передачею та електродвигуном потужністю  $N_{дв} = 3$  кВт, що забезпечує частоту обертів  $n = 500$  хв<sup>-1</sup> та відповідає вимогам міцності й надійності висуваємих до коректної роботи перемішувачого пристрою.

#### 4.12 Розрахунок товщин стінок циліндричної обичайки та еліптичного днища рубашки

Мета розрахунку: визначити товщини стінок циліндричної обичайки та еліптичного днища рубашки, навантажених внутрішнім тиском, для яких виконуватимуться умови міцності.

Розрахункова схема рубашки зображена на рисунку 4.14.

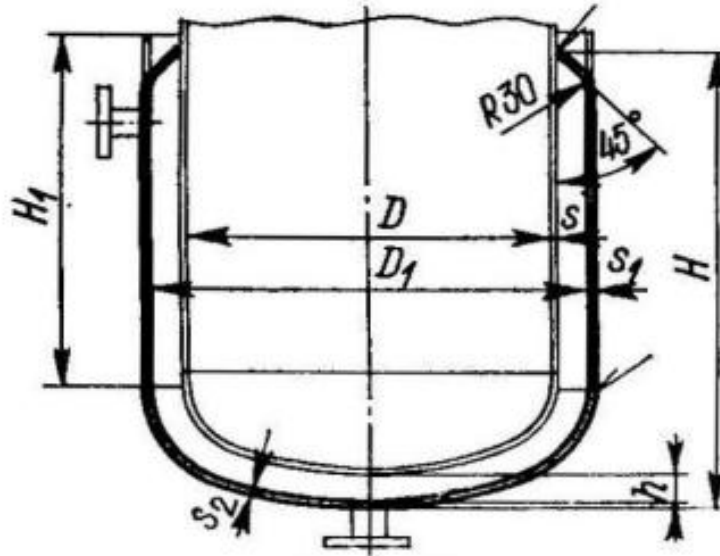


Рисунок 4.14 – Розрахункова схема рубашки

Вихідні дані:

Тиск в середині рубашки, $p_{pp}$ , МПа	0,6;
Діаметр рубашки, $D_1$ , м	1,5;
Допустиме напруження матеріалу рубашки Ст 16ГС, [ $\sigma$ ], МПа [40]	196;
Коефіцієнт зварного шва, $\varphi$	1;
Прибавка до розрахункової товщини, $C$ , м	$2 \cdot 10^{-4}$ .

Методика розрахунку згідно з [35].

Виконавча товщина:

- циліндричної обичайки рубашки:

$$s_1 > \frac{p_{pp} \cdot D_1}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p_{pp}} + C = \frac{0,6 \cdot 10^6 \cdot 1,5}{2 \cdot 1 \cdot 196 \cdot 10^6 - 0,6 \cdot 10^6} + 2 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 2,499 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

- еліптичного днища рубашки:

$$S_2 > \frac{p_{pp} \cdot R_e}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot p_{pp}} + C = \frac{0,6 \cdot 10^6 \cdot 1,5}{2 \cdot 1 \cdot 196 \cdot 10^6 - 0,5 \cdot 0,6 \cdot 10^6} + 2 \cdot 10^4 =$$

$$= 2,498 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

де  $R_e = D_1 = 1,5 \text{ м}$  – внутрішній радіус кривизни у вершині днища.

Приймаємо товщину циліндричної обичайки рубашки  $S_1 = 6 \text{ мм}$ .

Приймаємо товщину стінки рубашки  $S_2 = 6 \text{ мм}$ .

Допустимий внутрішній тиск:

- на обичайку рубашки:

$$[p]_{\text{рц}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (S_1 - C)}{D_1 + (S_1 - C)} = \frac{2 \cdot 196 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot (6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4})}{1,5 + (6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4})} =$$

$$= 1,51 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

- на еліптичне днище рубашки:

$$[p]_{\text{ре}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (S_2 - C)}{R_e + 0,5 \cdot (S_2 - C)} = \frac{2 \cdot 196 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot (6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4})}{1,5 + 0,5 \cdot (6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4})} =$$

$$= 1,513 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Перевірка умов міцності:

- обичайки рубашки:

$$p_{pp} < [p]_{\text{рц}}$$

$$6 \cdot 10^5 \text{ Па} < 1,51 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Умова міцності виконується

- еліптичного днища рубашки:

$$p_{pp} < [p]_{\text{ре}}$$

$$6 \cdot 10^5 \text{ Па} < 1,513 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

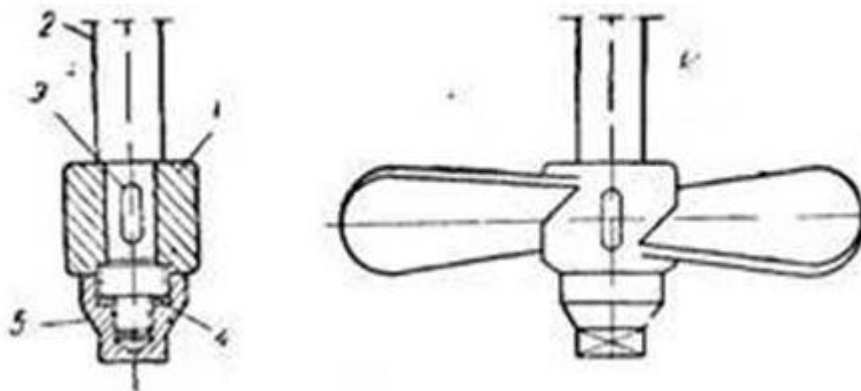
Умова міцності виконується

Висновок: після перевірки умови міцності, для забезпечення роботи реактора товщина стінки обичайки рубашки повинна дорівнювати  $S_1 = 6 \text{ мм}$ , товщина стінки еліптичного днища рубашки дорівнювати  $S_2 = 6 \text{ мм}$ .

### 4.13 Розрахунок перемішуючого пристрою реактора

Мета розрахунку: визначити номінальну виконавчу товщину лопаті пропелерної мішалки.

Розрахункова схема пропелерної мішалки зображена на рисунку 4.15.



1 – гвинт; 2 – вал; 3 – шпонка; 4 – шплінт; 5 – ковпачок

Рисунок 4.15 – Розрахункова схема пропелерної мішалки

Вихідні дані:

Допустиме напруження, $[\sigma]$ , МПа [40]	196;
Прибавка на корозію, $C$ , м	0,001;
Діаметр мішалки, $d_M$ , м	0,4;
Діаметр ступиці мішалки, $d_c$ , м	0,07;
Потужність на перемішування, $N_M$ , Вт	1200;
Швидкість обертання мішалки, $n$ , $c^{-1}$	8,33.

Методика розрахунку пропелерної мішалки згідно з [35].

Програма розрахунку наведена в додатку В.

Ширину розгортки лопаті  $b_i$  на різних радіусах знаходимо за формулою:

$$b_i = k_i \cdot \frac{d_M^2}{d_M - d_c}, \text{ м.} \quad (4.9)$$

де  $k_i$  – безрозмірний коефіцієнт ( $i = 0 \dots 10$ );  $d_m$  – діаметр мішалки, м;  
 $d_c$  – діаметр ступиці мішалки, м.

Кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею:

$$\alpha = \arctan \frac{d_m}{\pi \cdot d_c}, \text{ } ^\circ. \quad (4.10)$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha, \text{ } ^\circ. \quad (4.11)$$

Ширина лопаті в місці її з'єднання зі ступицею:

$$b = \frac{4 \cdot d_c^2 \cdot b_0}{\sin^2 \beta \cdot b_0^2 + 4 \cdot d_c^2}, \text{ м.} \quad (4.12)$$

Розрахункові згинаючі моменти, діючі на лопать:

- в напрямку, паралельному вісі вала:

$$M_{и} = \frac{0,298 \cdot (0,35 \cdot d_m - 0,5 \cdot d_c)}{d_m} \cdot \frac{N_m}{n}, \text{ Н} \cdot \text{ м.} \quad (4.13)$$

де  $N_m$  – потужність на перемішування, Вт;  $n$  – швидкість обертання мішалки,  $\text{с}^{-1}$ .

- в напрямку, перпендикулярному вісі вала:

$$M_{и1} = \frac{0,18 \cdot (0,3 \cdot d_m - 0,5 \cdot d_c)}{d_m} \cdot \frac{N_m}{n}, \text{ Н} \cdot \text{ м.} \quad (4.14)$$

Визначаємо розрахункові згинаючі моменти, що діють на лопать по головним осям в місці з'єднання зі ступицею:

- в напрямку вісі  $x$  за формулою:

$$M_{иx} = M_{и} \cdot \sin \alpha - M_{и1} \cdot \cos \alpha, \text{ Н} \cdot \text{ м.} \quad (4.15)$$

- в напрямку вісі  $y$  за формулою:

$$M_{иy} = M_{и} \cdot \cos \alpha - M_{и1} \cdot \sin \alpha, \text{ Н} \cdot \text{ м.} \quad (4.16)$$

Номінальна розрахункова товщина лопаті:

$$S = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{иy}}{b_0 \cdot [\sigma]} + \frac{3 \cdot M_{иx}}{b_0^2 \cdot [\sigma]}}, \text{ м,} \quad (4.17)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження, МПа.

Результати розрахунку за програмою:

ЛМ41МП.02.100.000	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 109
-------------------	------------	--------------	------------	--------------

1. Кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею  $\alpha = 61,2^\circ$ ;  $\beta = 28,8^\circ$ ;
2. Ширина лопаті в місці її з'єднання зі ступицею  $b = 0,081$  м;
3. Номінальна розрахункова товщини лопаті  $S = 1,903 \cdot 10^{-3}$  м.

Висновок: враховуючи двосторонню прибавку на корозію  $C = 0,001$  м та округлюючи, приймаємо товщину лопаті  $S = 0,005$  м.

## 5 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

Даний розділ магістерської дисертації присвячено питанням охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, що є обов'язковою вимогою згідно з Законом України «Про охорону праці» [41].

Мета даного розділу – ідентифікувати потенційні небезпечні та шкідливі виробничі фактори для проекту «Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги», та запропонувати обґрунтовані технічні рішення для гарантування безпечних умов праці персоналу.

Проект розглядає модернізацію технологічної лінії, що включає проектування реактора для синтезу каталізатора Циглера-Натта та осаджувальної горизонтальної центрифуги типу НОГШ-1001К-01.

Впровадження даного устаткування створює специфічні умови праці, що характеризуються комплексом НШВФ [41]:

1. Висока вибухопожежонебезпека (Приміщення категорії А, зона В-1а). Цей ризик обумовлений не лише наявністю горючого газу етилену та бензину, але й використанням пірофорних каталізаторів (сполуки титану та алюмінію), що здатні до самозаймання при контакті з повітрям.

2. Хімічна безпека: Можлива присутність у робочій зоні парів бензину, етилену та продуктів реакції компонентів каталізатора (наприклад HCl).

3. Акустичне та вібраційне навантаження: Джерелами є потужний привід (110 кВт) та високошвидкісний ротор центрифуги, а також привід реактора (3 кВт).

4. Електробезпека: Експлуатація потужного електрообладнання (380/220 В) в особливо небезпечному (вибухонебезпечному) середовищі.

Технічні рішення щодо безпечної експлуатації об'єкта

Гарантування безпечної експлуатації устаткування вимагає комплексу проектних заходів. Пріоритетним напрямком є електробезпека, оскільки приводи

реактора (3 кВт) та центрифуги (110 кВт) є потужними споживачами електроенергії, що розташовані у вибухонебезпечній зоні.

Електроживлення виробничого цеху здійснюється від трифазної 4-провідної електромережі 380/220 В, що функціонує з глухозаземленою нейтраллю (система занулення TN-C-S) згідно з ПУЕ (Правила улаштування електроустановок, Гл.1.7 Заземлення і захисні заходи електробезпеки)

Згідно з класифікацією з НПАОП 40.1-1.32-01 (Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок) та ДСТУ Б В.1.1-36:2016, виробниче приміщення, де розміщено технологічну лінію, належить до класу В-1а (зона, де вибухонебезпечні концентрації можливі в аварійних ситуаціях). Наявність зони В-1а автоматично кваліфікує приміщення як «особливо небезпечне» за ступенем ризику ураження струмом.

Для мінімізації ризиків ураження струмом, проектом імплементовано наступні технічні заходи:

1. Заходи для унеможливлення прямого контакту:

- Усі струмоведучі частини оснащуються оболонками зі ступенем захисту не нижче IP54 та розміщуються у шафах керування, що замикаються.

- Використовується виключно вибухозахищене електрообладнання (двигуни, світильники, апарати керування), маркування якого відповідає категорії та групі вибухонебезпечної суміші (наприклад, 1ExdІІВТ4).

Для живлення переносних освітлювальних приладів під час ремонтних чи оглядових робіт всередині ємнісного обладнання (реактор, центрифуга) застосовується наднизька напруга 12 В [41].

2. Заходи захисту в аварійних режимах (порушення ізоляції):

- Основним захисним заходом від непрямого дотику в мережі TN-C-S є захисне занулення. Передбачається приєднання всіх металевих неструмоведучих

частин (корпуси апаратів, станини двигунів) до нульового захисного (РЕ) провідника.

- Як додатковий захід захисту персоналу від струмів витоку, лінії живлення розеток та освітлення оснащуються пристроями захисного відключення (ПЗВ), що реагують на диференційний струм 30 мА.

- На вводі в будівлю цеху виконується повторне заземлення нульового провідника [41].

### 3. Електрозахисні засоби :

- Обслуговуючий та ремонтний персонал забезпечується комплектом необхідних електрозахисних засобів, що включають основні (діелектричні рукавиці, покажчики напруги) та додаткові (діелектричні килимки) [41].

### Розрахунок захисного заземлення

Хоча основним заходом захисту є занулення, для забезпечення надійного розтікання струму та роботи ПЗВ, а також для захисту від статичної електрики та блискавкозахисту, обладнання підключається до загального контуру захисного заземлення. Виконаємо перевірочний розрахунок заземлюючого пристрою .

Вихідні дані:

Тип електроустановки: Напруга 380/220 В з глухозаземленою нейтраллю.

Нормований опір ЗП:  $R_H < 10 \text{ Ом}$  (згідно з ПУЕ для повторного заземлення нульового проводу).

Ґрунт на майданчику: Суглинок (питомий опір ґрунту  $\rho_{гр} = 60 \text{ Ом*м}$ )

Кліматична зона: II (коефіцієнт сезонності  $\psi = 1,4$ ).

Параметри електродів:

Тип: Вертикальні стрижні зі сталі ( $d = 16 \text{ мм}, l = 3 \text{ м}$ ).

Глибина закладання (до середини електрода):

$$t = 0,7 + \frac{l}{2} = 0,7 + \frac{3}{2} = 2,2 \text{ м.}$$

Горизонтальна штаба: смуга 40x4 мм ( $b = 0,04$  м), глибина  $t_r = 0,7$  м.

Коефіцієнт екранування (використання) для вертикальних стрижнів:  $\eta_B$ .

Коефіцієнт екранування для горизонтальної штаби:  $\eta_r$ .

Розрахунок:

1. Розрахунковий опір ґрунту:

$$\rho_{роз} = \rho_{гр} \cdot \psi = 60 \cdot 1,4 = 84 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}.$$

2. Опір розтіканню одного вертикального електрода:

$$R_B = \frac{\rho_{роз}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + 0,5 \ln \frac{4t + l}{4t - l} \right) = \frac{84}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,016} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right) \\ = 27,99 \text{ Ом}.$$

3. Необхідна кількість вертикальних електродів (попередньо, без урахування штаби):

$$n_{поп} = \frac{R_B}{R_H} = \frac{27,99}{10} = 2,8 \approx 3 \text{ шт.}$$

Приймаємо 3 електроди, розташованих в ряд з кроком  $a = 3$  м (де  $a = l$ ).

Коефіцієнт екранування (використання) для 3-х електродів при  $\frac{a}{l} = 1$ :

$$\eta_B = 0,83.$$

4. Розрахунковий опір вертикальних електродів:

$$R_{верт} = \frac{R_B}{\eta \cdot \eta_B} = \frac{27,99}{3 \cdot 0,83} = 11,24 \text{ Ом}.$$

$$R_{верт} = 11,24 > R_H = 10 \text{ Ом}.$$

Отже, збільшимо кількість електродів до  $n = 4$  шт. Для 4-х електродів при  $\frac{a}{l} =$

$$1: \eta_B = 0,78; R_{верт} = \frac{R_B}{\eta \cdot \eta_B} = \frac{27,99}{4 \cdot 0,78} = 8,97 \text{ Ом}.$$

5. Опір розтіканню горизонтальної штаби (смуги), що з'єднує 4 електроди.

Загальна довжина штаби:

$$L_r = a \cdot (n - 1) = 3 \cdot (4 - 1) = 9 \text{ м};$$

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{роз}}}{\pi \cdot L_{\Gamma}} \ln \frac{2L_{\Gamma}^2}{b \cdot t_{\Gamma}} = \frac{84}{3,14 \cdot 9} \ln \frac{2 \cdot 9^2}{0,04 \cdot 0,7} = 25,72 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт екранування для штаби при  $n = 4$ :  $\eta_{\Gamma} = 0,68$ .

$$R_{\text{гориз}} = \frac{R_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} = \frac{25,72}{0,68} = 37,82 \text{ Ом.}$$

6. Загальний опір ЗП (паралельне з'єднання):

$$R_{\text{ЗП}} = \frac{R_{\text{верт}} \cdot R_{\text{гориз}}}{R_{\text{верт}} + R_{\text{гориз}}} = \frac{8,97 \cdot 37,82}{8,97 + 37,82} = 7,25 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{ЗП}} = 7,25 \text{ Ом} < R_{\text{Н}} = 10 \text{ Ом}$$

Умова виконується

Висновок: Отриманий опір  $R_{\text{ЗП}} = 7,25 \text{ Ом}$ , менше нормованого  $R_{\text{Н}} = 10 \text{ Ом}$ . Отже, умова електробезпеки виконана. Проектом передбачено контур заземлення з 4-х вертикальних сталевих стрижнів довжиною 3 м, з'єднаних горизонтальною штабою на глибині 0,7 м.

Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Робочий процес, який буде виконувати персонал, розділено на два типи: моніторинг та керування технологічним процесом, що відбувається в ізольованій операторській, та періодичне технічне обслуговування (обхід, ремонт), яке виконується безпосередньо у виробничому цеху [41].

Характеристика приміщення: Виробничий цех, площа  $S = 450 \text{ м}^2$  (довжина  $a = 30 \text{ м}$ , ширина  $b = 15 \text{ м}$ ), висота  $H = 10 \text{ м}$ .

Характеристика робіт: Робота оператора в операторській (постійне робоче місце) кваліфікується як Категорія Іб (легка, сидяча, енерговитрати 121-150 ккал/год) згідно з ДСН 3.3.6.042-99. Роботи з обслуговування в цеху (непостійне робоче місце) відповідають Категорії Іа-Іб (середньої важкості).

Джерела НШВФ: Технологічне устаткування (реактор, центрифуга), пари розчинника (бензин), мономер (етилен).

## 5.1 Мікроклімат

Параметри, що нормуються: температура ( $t$ , °C), відносна вологість ( $W$ , %), швидкість руху повітря ( $V$ , м/с) з ДСН 3.3.6.042-99. Джерела теплонадлишків.

Джерела теплонадлишків: джерелами явних теплонадлишків є нагріті поверхні реактора (процес екзотермічний,  $t_{\text{стінки}} \approx 30$  °C), та потужні електродвигуни центрифуги (110 кВт) і реактора (3 кВт).

Нормативні значення: для робочої зони операторської (Категорія Іб, постійне робоче місце) підтримуються оптимальні параметри мікроклімату. У таблиці 5.1 наведено оптимальні параметри мікроклімату робочої зони, де буде працювати оператор з постійним робочим місцем [41].

Таблиця 5.1 – Оптимальні параметри мікроклімату на постійному робочому місці

Період року	Температура повітря, °C	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Теплий	22 – 25	60 – 40	0,1
Холодний	19 – 22	60 – 40	0,1

Технічні рішення:

1. Для підтримки стабільних оптимальних параметрів в операторській кімнаті передбачено встановлення системи кондиціонування повітря.

2. Для асиміляції теплонадлишків у виробничому цеху використовується загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція.

3. Гарячі поверхні обладнання (якщо їх температура перевищує 45°C) підлягають тепловій ізоляції згідно з ДНАОП 0.00-1.22-72.

## 5.2 Склад повітря робочої зони

Параметри, що нормуються: контроль стану повітря ведеться за гранично допустимими концентраціями (ГДК) шкідливих речовин згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [41].

Джерела забруднення: потенційними джерелами забруднення є фланцеві з'єднання, ущільнення насосів, сальниковий вузол реактора та ущільнення центрифуги.

Можливі шкідливі речовини:

- Етилен: ГДК = 300 мг/м<sup>3</sup> (4-й клас небезпеки).
- Бензин (вуглеводні): ГДК = 300 мг/м<sup>3</sup> (4-й клас небезпеки).
- Компоненти каталізатора (напр., TiCl<sub>4</sub>): Реагують з вологою, утворюючи пари HCl (ГДК = 5 мг/м<sup>3</sup>).

Технічні рішення:

1. Максимальна герметизація технологічного устаткування (використання торцевих ущільнень для центрифуги та надійного сальникового вузла для реактора).

2. Проведення процесів синтезу та полімеризації під надлишковим тиском інертного газу (азоту), що унеможливорює як контакт пірофорних речовин з повітрям, так і витік парів назовні.

3. Облаштування місцевих відсмоктувачів від найбільш імовірних джерел витоку (сальники, вузли завантаження).

4. Монтаж стаціонарних автоматичних газоаналізаторів, зблокованих з аварійною вентиляцією, які спрацьовують при досягненні 20% від НКМПП.

### 5.3 Виробниче освітлення

Параметри, що нормуються: нормування параметрів штучного освітлення ( $E_H$ , лк), коефіцієнта пульсації ( $K_P$ , %) та показника засліпленості ( $P$ ) проводиться згідно з ДБН В.2.5-28:2018 [41].

Характер робіт: Обслуговування лінії, моніторинг показників приладів КВПіА, візуальний контроль герметичності. Розряд зорової роботи – IV (середньої точності).

Нормативні значення:

Для розряду IV у цехах (вибухонебезпечна зона В-1а)  $E_H = 200$  лк.

Для приміщення операторської (розряд IIIв)  $E_H = 300$  лк.

Коефіцієнт пульсації  $K_P < 15\%$ .

Технічні рішення:

1. В операторській застосовується система комбінованого освітлення (загальне та місцеве).

2. У виробничому цеху (зона В-1а) проектом реалізується загальне рівномірне штучне освітлення з використанням вибухозахищених світлодіодних (LED) світильників (типу ДСП-52 або аналоги) з рівнем захисту IP65 та відповідним маркуванням вибухозахисту.

3. Передбачено систему аварійного (евакуаційного) освітлення (не менше 2 лк).

Розрахунок штучного освітлення

Вихідні дані:

Приміщення:  $S = 450 \text{ м}^2$ , довжина  $a = 30$  м, ширина  $b = 15$  м.

Висота підвісу світильників над робочою поверхнею (робоча поверхня  $h_p = 0,8$  м від підлоги, висота приміщення  $H = 10$  м):

$$h = H - h_c - h_p = 10 - 0,5 - 0,8 = 8,7 \text{ м,}$$

де  $h_c$  – висота світильника

Нормована освітленість:  $E_H = 200$  лк

Коефіцієнти відбиття: стеля  $\rho_c = 50\%$ , стіни  $\rho_{ст} = 30\%$ , робоча поверхня  $\rho_p = 10\%$ .

Тип світильника: Вибухозахищений LED світильник (наприклад, потужністю  $P_{св} = 100$  Вт, світловий потік  $F_d = 12000$  лм.

Коефіцієнт запасу (для вибухонебезпечних приміщень):  $K_3 = 1,8$ .

Коефіцієнт нерівномірності (затінення):  $Z = 1,1$ .

Розрахунок:

1. Індекс приміщення:

$$i = \frac{S}{h \cdot (a + b)} = \frac{450}{8,7 \cdot (30 + 15)} = 1,15.$$

2. Коефіцієнт використання світлового потоку:  $\eta = 0,45$ .

3. Необхідний сумарний світловий потік

$$F_{\text{заг}} = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\eta} = \frac{200 \cdot 450 \cdot 1,8 \cdot 1,1}{0,45} = 396000 \text{ лм.}$$

4. Необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{F_{\text{заг}}}{F_d} = \frac{396000}{12000} = 33 \text{ шт.}$$

Висновок: для забезпечення нормативної освітленості 200 лк у цеху необхідно встановити 33 вибухозахищених LED світильника потужністю 100 Вт, розмістивши їх рівномірно у 3 ряди по 11 штук.

## 5.4 Виробничий шум

Параметри, що нормуються: еквівалентний рівень звуку  $L_A$ , дБА згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [41].

Джерела шуму: головним джерелом акустичного навантаження є центрифуга НОГШ-1001К-01. Очікуваний рівень шуму від її роботи на відстані 1 м становить 90-95 дБА.

Нормативні значення: згідно з ДСН 3.3.6.037-99, допустимий еквівалентний рівень шуму на постійних робочих місцях в операторській – 50 дБА (для диспетчерських), у виробничих приміщеннях – 80 дБА.

Технічні рішення:

1. Дистанційне керування: Розміщення основного пульта керування в окремому, звукоізолюваному приміщенні (операторській).
2. Віб्रोізоляція джерела: Встановлення центрифуги на віброізолюючий фундамент та використання віброізолюючих опор
3. Звукоізоляція: Застосування звукопоглинального кожуха для приводу центрифуги.
4. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): Використання персоналом в зоні обслуговування (поза операторською) ЗІЗ від шуму (протишумні навушники або беруші)
5. Впровадження раціональних режимів праці та відпочинку.

## 5.5 Виробничі вібрації

Параметри, що нормуються: контроль вібрації ведеться за корегованим рівнем віброшвидкості  $L_v$ , дБ або  $v$ , м/с згідно з ДСН 3.3.6.039-99 [41].

Джерела вібрації: центрифуга НОГШ-1001К-01 (високошвидкісний дисбаланс ротора).

Нормативні значення: Згідно з ДСН 3.3.6.039-99, для робочих місць в операторських (категорія 3, тип «в») допустима віброшвидкість  $v = 1,4 \cdot 10^{-4}$  м/с (67 дБ).

Технічні рішення:

- Зменшення вібрації у джерелі. Динамічне балансування ротора центрифуги на заводі-виробнику та під час планових ремонтів.
- Віброізоляція. Встановлення агрегату на віброізолятори.
- Організаційні заходи. Організація дистанційного керування з операторської, що виключає постійний контакт персоналу з вібруючим обладнанням.

## 5.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Вихідні дані:

Об'єкт (лінія виробництва ПВГ) класифікується як об'єкт підвищеної небезпеки (ОПН) згідно з Законом України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» та є вибухопожежонебезпечним.

Категорія приміщення: А (вибухопожежонебезпечне).

Клас зони: В-1а (зона, де вибухонебезпечні суміші можуть утворюватися лише в аварійних ситуаціях) [41].

Основні небезпечні речовини:

Етилен: горючий газ, НКМПП = 2,7% об.

Бензин: ЛЗР, пари утворюють вибухонебезпечні суміші.

Каталізатори Циглера-Натта: пірофорні речовини, самозаймаються при контакті з повітрям або водою.

## 5.7 Технічні та організаційні заходи щодо ліквідації та локалізації аварійних ситуацій

Для об'єкта розробляється план локалізації та ліквідації аварій (ПЛАС) згідно з Положенням щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і

аварій, який детально аналізує можливі сценарії розвитку аварій та регламентує чіткий порядок дій персоналу [41].

Основні сценарії аварій та дії персоналу:

1. Розгерметизація реактора/трубопроводу з витоком етилену/бензину:

Ознаки: Спрацювання газоаналізаторів, різкий запах, шум витoku.

Дії персоналу: негайно покинути загазовану зону (рухаючись перпендикулярно напрямку вітру), дистанційно (з операторської) активувати кнопку аварійної зупинки, що перекриває подачу реагентів, увімкнути аварійну вентиляцію, повідомити керівника, викликати ДСНС (101).

2. Розлив пірофорного каталізатора (напр., діетилалюмінійхлориду):

Ознаки: Інтенсивне димлення та самозаймання речовини при контакті з повітрям.

Дії персоналу: негайно задіяти систему пожежогасіння (тільки порошкову або піщану). Заборонено гасити водою або вуглекислою. Використовувати сухий спецодяг та ізолюючий протигаз.

Організаційні заходи:

Проведення регулярних протиаварійних тренувань персоналу з відпрацюванням дій за ПЛАС.

Забезпечення наявності надійних засобів зв'язку та оповіщення згідно з Постановою КМ України «Про затвердження Положення про організацію оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях».

Укомплектування аварійного запасу ЗІЗ (ізолюючі дихальні апарати, термостійкі костюми).

Технічні рішення системи запобігання пожеж та вибухів

Система запобігання пожежі (відповідно до ДБН В.1.1-7:2016) базується на виключенні можливості утворення горючого середовища або джерела запалювання.

1. Виключення вибухонебезпечного середовища:

Герметизація: Проектування обладнання (реактор, центрифуга) як єдиної герметичної системи.

Застосування інертного середовища: Усі технологічні операції проводяться під "азотною подушкою" (під надлишковим тиском інертного газу), що виключає наявність окисника (кисню) всередині апаратів.

Вентиляція: Використання загальнообмінної та аварійної вентиляції для запобігання утворенню небезпечних концентрацій (вище 20% НКМПП) у приміщенні.

2. Виключення джерела запалювання:

Вибухозахищене електрообладнання: Усе обладнання відповідає класу В-1а згідно з ДСТУ EN 60079-10-1:2018

Захист від статичної електрики: Всі апарати, трубопроводи та металоконструкції надійно заземлені для відводу статичних зарядів.

Блискавкозахист: Будівля цеху обладнується системою блискавкозахисту II категорії згідно з ДСТУ EN 62305.

Використання іскробезпечного інструменту під час проведення ремонтних робіт.

Технічні рішення системи протипожежного захисту

У випадку, якщо пожежа все ж виникла, система протипожежного захисту (згідно з ДБН В.1.1-7:2016) повинна забезпечити її локалізацію, гасіння та безпечну евакуацію людей [41].

1. Вогнестійкість конструкцій: Будівля цеху проектується з I або II ступенем вогнестійкості. Операторська відділяється від виробничої зони протипожежними перешкодами (згідно з ДБН В.1.1-7:2016).

2. Системи виявлення пожежі: Приміщення оснащується автоматичною пожежною сигналізацією (АПС) з використанням відповідних типу безпеки сповіщувачів (напр., теплових та сповіщувачів полум'я) згідно з ДБН В.2.5-56:2014.

### 3. Системи пожежогасіння:

- Монтується автоматична установка пожежогасіння. (Через наявність пірофорних речовин та ЛЗР, застосування води є неприпустимим. Найбільш доцільним є використання порошкових або газових (напр., азотних) систем гасіння).

- Наявність первинних засобів: порошкові вогнегасники (ОП-5, ОП-10) для гасіння ЛЗР та пірофорних сполук, вуглекислотні (ВВК-3, ВВК-5) для електрообладнання.

#### Евакуація персоналу:

- Проектом передбачено не менше двох евакуаційних виходів.
- Встановлюється аварійне освітлення шляхів евакуації.
- Монтується система протидимного захисту (аварійного димовидалення) для забезпечення безпечних умов евакуації.
- Евакуація проводиться негайно за сигналом тривоги (пожежна сигналізація, спрацювання газоаналізаторів або розпорядження керівника зміни).

План евакуації представлено на рисунку 5.1

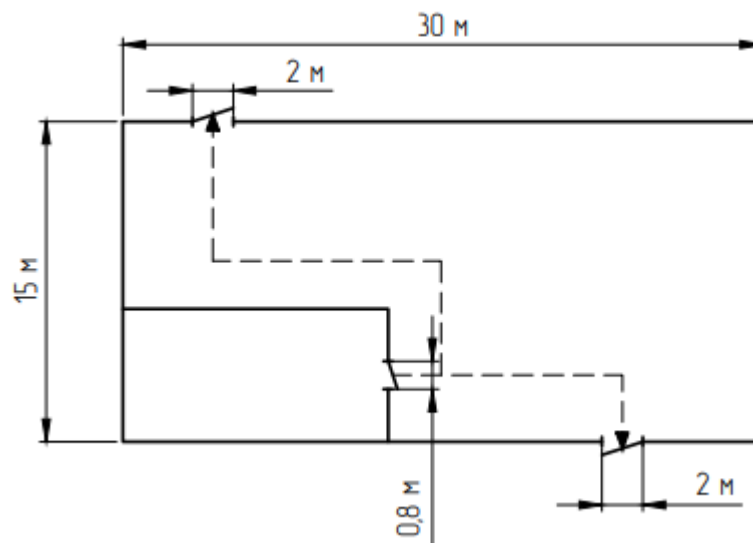


Рисунок 5.1 – План евакуації

Евакуація розпочинається негайно за сигналом тривоги, що вимагає швидких та скоординованих дій. Особа, що виявила НС, повинна негайно активувати ручний сповіщувач. Паралельно з цим, Оператор має перейти до дистанційної аварійної ізоляції: вимкнути основне електроживлення, перекрити подачу етилену та бензину у лінію та активувати аварійну вентиляцію. Після виконання цих дій він повинен повідомити ДСНС (101).

На етапі гасіння та порятунку персонал повинен керуватися принципом пріоритету життя, одягнувши ЗІЗ та перевіряючи наявність постраждалих. Дозволено лише первинне гасіння порошковими вогнегасниками, оскільки категорично заборонено використовувати воду через ризик вибуху (через пірофорні каталізатори) та електронезбезпеку.

Фінальним кроком є сама евакуація: весь персонал повинен без паніки рухатися найкоротшим безпечним шляхом до місця збору, заздалегідь визначеної безпечної зони на відстані 50 м від будівлі. Керівник зміни проводить перекличку та звітує рятувальним службам. Персоналу заборонено повертатися до цеху без дозволу ДСНС [41].

## **6 Рекомендації, щодо монтажу та експлуатації апаратів установки для виробництва поліетилену високої густини**

Правильний монтаж та експлуатація технологічних апаратів є важливими етапами життєвого циклу обладнання, які безпосередньо впливають на його надійність, довговічність, безпеку та економічну ефективність виробничого процесу. Недотримання технічних вимог під час монтажу може призвести до відмов (ДСТУ 2860–94), таких як порушення герметичності, значні вібрації або викривлення несучих конструкцій, що вимагатиме непланового, дороговартісного ремонту та спричинить простої виробництва [42].

Згідно з вимогами промислової безпеки (НПАОП 0.00-1.81–18), експлуатація обладнання, яке не було належним чином змонтоване та вивірене, суворо заборонена. Крім того, правильна експлуатація, що включає регулярне технічне обслуговування та дотримання регламентованого ремонту (ДСТУ 2960–94), дозволяє максимально використати технічний ресурс апарату, знизити інтенсивність зношування і корозії та підтримувати показники якості продукції на заданому рівні. Таким чином, ретельне планування та виконання робіт на цих стадіях є запорукою стабільної та безаварійної роботи всього хімічного виробництва [42].

### **Реактор [42]**

Вертикальний реактор належить до ємнісних апаратів з внутрішніми рухомими пристроями та охолоджувальною рубашкою. Це висуває підвищені вимоги до вивірення його положення та забезпечення герметичності рухомих з'єднань.

Перед початком монтажу вертикального реактора необхідно провести ретельну перевірку та підготовку фундаменту. Ця підготовка полягає у звіренні відповідності всіх геометричних розмірів і висотних позначок з проектною

документацією, при цьому допустимі відхилення повинні бути в межах норм, визначених для встановлення технологічного обладнання. Головним етапом є підтвердження міцності бетону: міцність бетону має становити не менше 50% від проєктної (якщо у технічній документації немає більш жорстких вимог). Після підтвердження міцності обов'язково слід очистити опорну частину реактора та поверхню фундаменту від будь-яких забруднень, як-от бруд, жир чи продукти корозії, для забезпечення якісного контакту.

Після підготовки фундаменту розпочинається процес встановлення та вивірення корпусу апарату. Монтаж корпусу на фундамент слід проводити за допомогою вантажопідійомних механізмів, забезпечуючи надійне стропування за спеціально передбачені пристрої (ГОСТ 13716-73), з обов'язковим контролем вертикальності за допомогою геодезичних приладів (теодоліта або нівеліра).

Схема строповки реактора наведена на рисунку 6.1

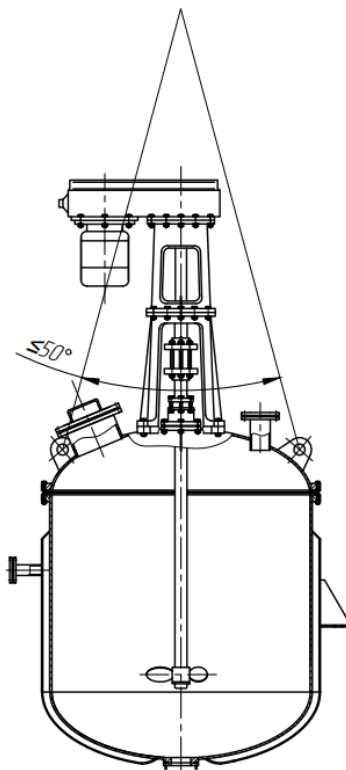


Рисунок 6.1 – Схема строповки реактора

ЛМ41МП.02.100.000

Інд. змін.

Дата видання

Мова  
UA

Аркуш  
127

Важливо, щоб реактор був ретельно вивірений як у плані, так і по вертикалі. Відхил від вертикальності не повинен перевищувати норм, встановлених проєктом, зважаючи на значну висоту апарату та наявність чутливого внутрішнього перемішувального пристрою. Конструкція апарату передбачає встановлення на чотири опорні елементи типу «лапа».

Наступний крок – остаточне закріплення та підливання. Для фіксації корпусу необхідно використовувати фундаментні болти, суворо дотримуючись послідовності та моменту затягування, вказаних у паспорті апарату. Після цього проводять підливання опорної частини бетонною сумішшю або цементним розчином, при цьому товщина підливи має бути в межах 50–80 мм, що забезпечує рівномірний розподіл навантажень.

Монтаж внутрішніх рухомих елементів, зокрема вала мішалки та ущільнення, здійснюється після остаточного вивірення корпусу. Також важливо забезпечити співвісність вала мішалки та опорних елементів (наприклад, підп'ятника), оскільки це запобігає появі вібрації та передчасному зносу ущільнювального вузла. Монтаж сальникового ущільнення має проводитись виключно згідно з інструкцією виробника, контролюючи відсутність будь-яких перекосів для запобігання витoku робочого середовища.

Завершальним етапом є підключення комунікацій. Трубопроводи, що підводяться до штуцерів та рубашки, не повинні створювати додаткових напружень у стінках апарату. Слід застосовувати фланцеві з'єднання з відповідними робочими прокладками згідно з умовами експлуатації, забезпечуючи герметичність та надійність системи.

Експлуатація реактора вимагає суворого дотримання правил, що стосуються роботи мішалки та теплового режиму. Категорично забороняється вмикати мішалку без заповнення апарату рідким середовищем, оскільки це може призвести до передчасного зношування ущільнення та підп'ятника. Після завантаження робочого

середовища запуск мішалки слід здійснювати плавно, постійно контролюючи відсутність нетипових шумів або надмірної вібрації (як критерію вібростійкості).

При регулюванні теплового режиму подачу теплоносія (охолоджувальної води) в рубашку необхідно здійснювати плавно, уникаючи різких температурних перепадів, які можуть спричинити термічні напруження і деформацію стінок реактора. При цьому швидкість зміни температури стінки апарата не повинна перевищувати норм, встановлених експлуатаційною документацією.

Після вимкнення апарату слід обов'язково забезпечити повне спорожнення рубашки для запобігання замерзанню (у холодну пору) або корозії в застійних зонах. Що стосується технічного обслуговування, необхідно регулярно перевіряти стан ущільнення вала на витоки, а сальникову набивку своєчасно підтягувати.

Також важливо контролювати рівень та якість мастила в редукторі мішалки, діючи суворо згідно з картою змащування та вимогами до індустріальних олів (ГОСТ 20799–88) [42].

#### Центрифуга [42]

Центрифуга типу НОГШ є важливим обладнанням, і до її монтажу та експлуатації висуваються особливо жорсткі вимоги. Ключовими аспектами, що гарантують її надійність, є динамічне балансування та ефективна віброізоляція, спрямована на мінімізацію навантажень на фундамент та підшипники.

При монтажі центрифуги важливо дотримуватися вимог до фундаменту та віброізоляції. Фундамент має бути монолітним, масивним та спеціально розрахованим на динамічні навантаження. Обов'язковим є встановлення віброізолюючих пристроїв, у нашому випадку, з пружинними елементами, між опорною рамою та фундаментом для зменшення передачі вібрації на будівельні конструкції.

Стропування центрифуги вимагає надзвичайної обережності, оскільки неправильне підняття може пошкодити підшипники або викликати деформацію

рами, що призведе до проблем з балансуванням. Для безпечного підйому слід чітко дотримуватися принципу використання виключно штатних, маркованих виробником точок на опорній рамі або корпусі, уникаючи контакту з патрубками, валами чи кожухами. Усі місця, де стропи торкаються обладнання, мають бути захищені гумовими прокладками, щоб запобігти подряпинам та локальному перенапруженню металу [42].

Схема строповки центрифуги наведена на рисунку 6.2

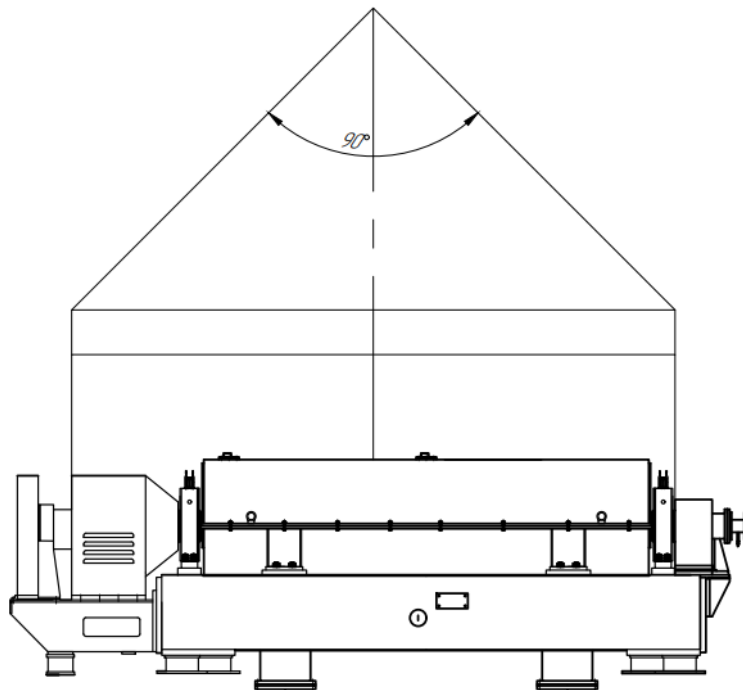


Рисунок 6.2 – Схема строповки центрифуги

Найголовніше – конфігурація стропів, яка часто відбувається із залученням траверс (балансирних балок). Дана конфігурація повинна гарантувати суворий вертикальний підйом та рівномірний розподіл ваги. Це мінімізує будь-які стискаючі зусилля на корпус і забезпечує, щоб центр ваги апарату залишався по осі підйомного гака, що критично важливо для уникнення розгойдування та перекосу під час переміщення.

Для забезпечення максимальної площі контакту та рівномірного розподілу навантажень перед фінальним затягуванням болтів необхідно провести підливання рами. Сама центрифуга повинна бути встановлена суворо горизонтально, а вивірення слід проводити високоточними рівнями (наприклад, брусковим рівнем, ГОСТ 9392–89) по контрольним базам, вказаним виробником на опорній рамі.

Також необхідно провести ретельне центрування приводу (електродвигуна) та вала центрифуги за допомогою гнучкої муфти. Це центрування є життєво необхідним для мінімізації навантажень на підшипники, причому допустиме радіальне та кутове зміщення мусить відповідати нормам, зазначеним у технічній документації.

На завершення, трубопроводи подачі суспензії, відведення фугату та вивантаження осаду не повинні мати жорсткого з'єднання з корпусом центрифуги; натомість рекомендується використовувати гнучкі компенсатори або патрубки. Крім того, на етапі монтажу слід забезпечити вільний доступ до всіх точок змащування та технічного обслуговування.

Експлуатація центрифуги починається з пробного запуску та балансування. Перед подачею сировини необхідно провести пробний запуск на холостому ході з поступовим набором обертів, контролюючи рівень вібрації корпусу. Якщо рівень вібрації перевищує допустимі значення, обов'язково слід провести динамічне балансування ротора, можливо, із залученням спеціалізованого персоналу. В процесі навантаження та робочого режиму подача суспензії має здійснюватися плавно, уникаючи різких змін у її кількості та концентрації, що може спричинити динамічну незрівноваженість ротора. Необхідно постійно слідкувати за рівномірним розподілом осаду для запобігання односторонньому навантаженню.

У разі виникнення надмірної вібрації (що супроводжується зростанням шуму або підвищенням температури підшипників), агрегат має бути негайно зупинений. Важливим є своєчасне змащування та охолодження підшипників, які працюють на

високих швидкостях, з використанням мастильних матеріалів, рекомендованих виробником (наприклад, пластичних мастил згідно з ДСТУ 4226:2003). Також слід регулярно перевіряти справність системи охолодження підшипникових вузлів та урухомника.

З точки зору безпеки та контролю, обов'язкова перевірка справності запобіжних пристроїв та блокувань, які виключають доступ до обертових частин та автоматично вимикають центрифугу у разі критичного зростання вібрації. Рекомендується проводити регулярне технічне діагностування стану підшипників та ротора шляхом вимірювання вібраційних характеристик та температури корпусу [42].

## 7 Рівень стандартизації та уніфікації

Стандартизація та уніфікація є фундаментальними процесами, які становлять нормативно-методичну основу для забезпечення якості продукції та конкурентоспроможності виробництва в цілому [43].

Термін «стандартизація» походить від англійського слова *standard*, що означає «норма» або «зразок». За своєю суттю, стандартизація є діяльністю, спрямованою на встановлення та запровадження єдиних вимог, правил і характеристик (стандартів) з метою досягнення оптимального ступеня впорядкованості у певній сфері.

Основна мета стандартизації – це оптимальне впорядкування об'єктів для прискорення науково-технічного прогресу, підвищення ефективності виробничих процесів, поліпшення якості кінцевої продукції та сприяння міжнародному економічному співробітництву.

Уніфікація є одним із найбільш ефективних методів, що використовується в рамках стандартизації. Уніфікація визначається як раціональне скорочення кількості типів, видів і розмірів виробів з однаковим функціональним призначенням, що зводяться до одноманітності. Іншими словами, це процес усунення невиправданої різноманітності об'єктів шляхом простого скорочення або приведення їх до уніфікованих груп (наприклад, типорозмірна уніфікація) [43].

Мета розрахунків – визначити коефіцієнти уніфікації і стандартизації для розроблюваних реактору і центрифуги.

Вихідні дані:

Центрифуга

Загальна кількість деталей,  $N$ , шт. 750;

Стандартні деталі,  $n_{ст}$ , шт. 479;

Уніфіковані деталі,  $n_y$ , шт. 243;

Унікальні деталі,  $n_{ун}$ , шт.

28.

Коефіцієнт уніфікації обчислюється за формулою:

$$K_y = \frac{n_{ст} + n_y}{N} = \frac{479 + 243}{750} = 0,96.$$

Коефіцієнт стандартизації обчислюється за формулою:

$$K_{ст} = \frac{n_{ст}}{N} = \frac{479}{750} = 0,64.$$

Висновки: після проведення розрахунку було отримано значення коефіцієнтів уніфікації  $K_y = 0,96$  та стандартизації  $K_{ст} = 0,64$ .

Вихідні дані:

Реактор

Загальна кількість деталей,  $N$ , шт. 109;

Стандартні деталі,  $n_{ст}$ , шт. 104;

Уніфіковані деталі,  $n_y$ , шт. 0;

Унікальні деталі,  $n_{ун}$ , шт. 5.

Коефіцієнт уніфікації обчислюється за формулою:

$$K_y = \frac{n_{ст} + n_y}{N} = \frac{104 + 0}{109} = 0,95.$$

Коефіцієнт стандартизації обчислюється за формулою:

$$K_{ст} = \frac{n_{ст}}{N} = \frac{104}{109} = 0,95.$$

Висновки: після проведення розрахунку було отримано значення коефіцієнтів уніфікації  $K_y = 0,95$  та стандартизації  $K_{ст} = 0,95$ .

## 8 Стартap-проект

### 8.1 Опис ідеї проекту

В основі даного стартап-проекту лежить інноваційна ідея, спрямована на вдосконалення технологічного процесу у хімічній промисловості. Вона полягає у розробці, виробництві та впровадженні модернізованого перемішуючого пристрою для реакторів приготування каталізаторів (зокрема, каталізатора Циглера-Натта) [44-53].

Ключовою інновацією є застосування комбінованої двоярусної мішалки, що створює зустрічні осьові потоки, що забезпечує максимальну інтенсивність перемішування.

Комерціалізація ідеї буде полягати у створення підприємства з виробництва та прямого продажу комплектів модернізації мішалок із наданням послуг їх впровадження.

Назва стартап-проекту – EcoPolyTech.

Логотип стартап-проекту представлено на рисунку 8.1.

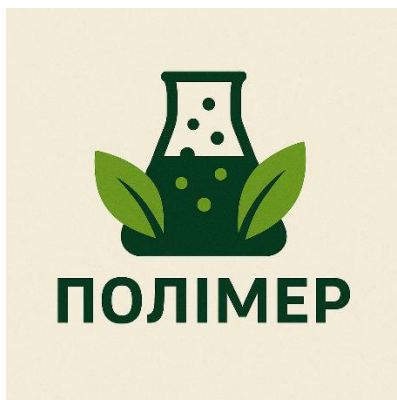


Рисунок 8.1 – Логотип стартап-проекту

Ідея стартап-проекту наведена в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення та реалізація комбінованої двоярусної мішалки, що створює зустрічні осьові потоки для інтенсифікації процесу перемішування в хімічних реакторах.	1. Хімічна промисловість: Модернізація існуючих та оснащення нових ліній виробництва поліетилену високої густини (ПЕВГ), зокрема на етапі приготування каталізатора.	1. Покращення якості каталізатора (вища однорідність), що веде до покращення якості кінцевого полімеру.
	2. Фармацевтична та харчова промисловість: Процеси, що вимагають високоефективного змішування багатоконпонентних рідких систем.	2. Зменшення часу технологічного циклу (процесу перемішування).
	3. Виробництво лакофарбових матеріалів: Отримання високодисперсних суспензій та емульсій.	3. Зниження енергетичних витрат на процес перемішування.
		4. Покращення гідродинамічних умов та інтенсифікація тепло- та масообміну в реакторі.

Після опису загальної концепції, наступним кроком є визначення її конкурентних переваг. Для цього необхідно провести порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик запропонованої ідеї з існуючими на ринку аналогами та рішеннями-конкурентами. У таблиці 2 наведено порівняння з провідними світовими виробниками промислових перемішуючих систем, такими як ЕКАТО, Pfaudler та Sulzer.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту наведено в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	ЕКАТО	Pfaudler	Sulzer Chemtech			
Інтенсивність перемішування	Висока (зустрічні потоки)	Середня-Висока	Середня	Середня-Висока	-	-	+
Енергоспоживання (на цикл)	Знижене	Стандартне	Стандартне	Стандартне	-	-	+
Час досягнення гомогенності	Короткий	Стандартний	Стандартний	Стандартний	-	-	+
Якість/однорідність суміші	Висока	Висока	Середня	Висока	-	-	+
Складність конструкції	Підвищена	Базова	Базова	Базова	+	-	-
Вартість виготовлення та впровадження	Вища	Стандартна	Стандартна	Висока	+	-	-
Надійність (механічна)	Висока	Дуже висока	Висока	Дуже висока	-	+	-
Впізнаваність бренду та довіра ринку	Відсутня	Дуже висока	Висока	Дуже висока	+	-	-

Визначений у таблиці 8.2 перелік сильних та слабких характеристик є підґрунтям для формування майбутньої ринкової стратегії. Аналіз показує, що проект має явні сильні сторони (S) у ключових операційних показниках (енергоефективність, час циклу, якість), що є вирішальним для хімічного

виробництва. Водночас, ідентифіковано очікувані слабкі сторони (W): вища початкова вартість за рахунок складної конструкції та повна відсутність впізнаваності бренду порівняно з лідерами ринку. Отже, конкурентна перевага проєкту має будуватися на доведеній технологічній перевазі, а не на ціні.

## 8.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

У межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проєкту. Визначення технологічної здійсненності ідеї передбачає аналіз того, які саме технології потрібні для створення продукту, чи існують вони, та чи є вони доступними для команди стартапу. Аналіз технологічної здійсненності ідеї проєкту наведено в таблиці 8.3

Таблиця 8.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Впровадження комбінованої двоярусної мішалки.	Комп'ютерне моделювання гідродинаміки (CFD) для оптимізації геометрії	Технології (програмне забезпечення для CFD) наявні.	Доступні (є компетенції в рамках КПП)
	Високоточне лиття або механічна обробка (фрезерування) лопатей зі спеціальних сталей (напр., 08X17H13M2T)	Технології наявні на машинобудівних підприємствах.	Доступні через підрядників або власні потужності (залежно від масштабу).
	Модернізація (Retrofitting) – демонтаж старої мішалки та встановлення нової у існуючий корпус реактора	Технологія стандартна для ремонту хімобладнання.	Доступна, виконується сервісними бригадами.

За результатами аналізу, наведеного в таблиці 3, робиться висновок, що технологічна реалізація проєкту є можливою (здійсненою). Усі необхідні технології (CFD-моделювання, точна металообробка, сервісні роботи) є зрілими та доступними. Обраний технологічний шлях передбачає власну розробку

конструкторської документації (R&D), розміщення замовлень на виробництво компонентів у підрядників та організацію власної сервісної служби для монтажу та обслуговування.

### 8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Щоб спланувати стратегію розвитку проєкту, необхідно врахувати стан ринкового середовища, потреби клієнтів та пропозиції конкурентів. Цей аналіз допоможе ідентифікувати потенційні ринкові можливості для впровадження та загрози, що можуть цьому перешкодити. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту наведена в таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	~10-15 ключових глобальних гравців (ЕКАТО, Sulzer, Pfaudler та ін.)
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~36 000 000
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає. Стабільний попит на поліетилен , попит на енергоефективність та якість
Наявність обмежень для входу	Високі: Бюджет (витрати на R&D та виробництво); Патенти (захист ІР); Репутація (довіра ринку)
Специфічні вимоги до стандартизації	Високі (Дотримання галузевих стандартів для обладнання, що працює під тиском та у вибухонебезпечних середовищах, напр. АТЕХ)
Середня норма рентабельності в галузі, %	~30-40% (для інноваційних інжинірингових рішень)

Висновок: згідно з даними таблиці, можна зробити попередній висновок про привабливість ринку для виходу. Незважаючи на значні бар'єри, висока

рентабельність та зростаючий попит на енергоефективність створюють сприятливі умови для запуску нішевого продукту.

Далі необхідно визначити ключові групи потенційних клієнтів, їхні особливості та сформулювати базовий набір вимог до продукту для кожної з цих груп. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту наведена в таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Потреба у зниженні собівартості виробництва ПЕВГ (енерговитрати, час) та підвищенні якості продукту.	Сегмент 1: Існуючі виробники ПЕВГ, що експлуатують застарілі або менш ефективні реактори (ринок модернізації).	B2B. Рішення приймає технічний директор/головний інженер. Потрібне чітке ТЕО (ROI, термін окупності).	До продукції: Гарантоване зниження енергоспоживання (%), скорочення часу циклу (%). До постачальника: Наявність сервісної бригади, гарантія, технічна підтримка.
Потреба в оснащенні нових виробничих ліній.	Сегмент 2: Інжинірингові компанії, що проектують нові заводи «під ключ».	B2B. Рішення приймає R&D відділ та керівник проекту. Важлива інноваційність та технічні переваги над конкурентами.	До продукції: Доведена надійність, простота інтеграції в лінію, наявність патентного захисту. До постачальника: Готовність до кастомізації (адаптації) під конкретний проєкт лінії.

Після окреслення цільових груп, проводиться аналіз зовнішнього середовища. Формуються переліки факторів, що можуть завадити реалізації

проекту, та тих, що створюють сприятливі умови. Фактори загрози наведено в таблиці 8.6.

Таблиця 8.6 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Домінуючі на ринку великі виробники хімічного обладнання (ЕКАТО, Sulzer)	Високий ризик того, що клієнти віддадуть перевагу відомому бренду, ігноруючи інновацію від новачка через консерватизм.	Патентний захист інноваційної конструкції мішалки. Фокусування на ніші (ретрофіт) з винятковим сервісом.
Висока вартість модернізації та необхідність зупинки виробництва для монтажу	Клієнти можуть відкласти покупку через небажання втрачати прибуток під час простою або через брак капітальних коштів.	Надання чіткого розрахунку окупності (ROI). Проведення монтажу в період планового ремонту заводу.
Скепсис ринку щодо нової, промислово не перевіреної технології	Довгий цикл прийняття рішення, вимога безкоштовних пілотних випробувань, що вимиває обігові кошти стартапу.	Надання результатів моделювання та даних з пілотних випробувань.
Нестабільність енергетичної системи (блекаути, дефіцит потужності)	Ризик зриву термінів виготовлення деталей мішалки підрядниками; неможливість проведення монтажних робіт у визначений час.	Забезпечення автономними джерелами живлення на виробництві, гнучкий графік роботи, збільшення складських запасів.
Процеси мобілізації та міграція кваліфікованих кадрів	Дефіцит вузькопрофільних інженерів-конструкторів та монтажників; ризик втрати ключових співробітників на критичних етапах проекту.	Бронювання критично важливих працівників (за можливості), створення бази знань, навчання дублерів, аутсорсинг непрофільних задач.
Логістичні ускладнення внаслідок воєнних дій	Подорожчання та затримки в постачанні спеціальних сталей (нержавіюча сталь 12X18H10T) та комплектуючих (приводи, ущільнення).	Диверсифікація постачальників, пошук альтернативних логістичних маршрутів, завчасне замовлення матеріалів.

Фактори можливостей наведено в таблиці 8.7.

Таблиця 8.7 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Глобальне та локальне зростання цін на енергоносії	Клієнти активно шукають будь-які способи зниження собівартості продукції, що робить енергоефективні рішення пріоритетними.	Активне просування проекту як енергозберігаючого (ключова перевага).
Дефіцит потужностей в енергосистемі України	Підприємства змушені економити електроенергію, щоб вписатися в ліміти споживання та не зупиняти виробництво.	Позиціонування продукту як інструменту підвищення якості каталізатора.
Зношеність парку реакторів на багатьох діючих виробництвах	Висока ймовірність того, що заводи шукатимуть бюджетні варіанти оновлення обладнання замість купівлі нових дорогих реакторів.	Пропозиція «retrofit-пакету» (комплект модернізації) як швидкого та ефективного оновлення.
Попит на високоякісні (спеціалізовані) марки ПЕВГ	Виробники потребують інструментів для покращення якості змішування, щоб конкурувати на ринку полімерів.	Позиціонування продукту як інструменту підвищення якості каталізатора та, як наслідок, кінцевого полімеру.

Зіставлення факторів показує, що основною загрозою є домінування відомих брендів та загальна інерційність промислового ринку. Водночас, ключова можливість – це глобальний тренд на економію енергоресурсів, що дозволяє позиціонувати наш проєкт як високоефективне інвестиційне рішення.

Наступний крок – аналіз пропозиції, що полягає у визначенні загальних характеристик конкуренції на обраному ринку.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку вказано в таблиці 8.8.

Таблиця 8.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії)
Монополістична конкуренція	Ринок складається з багатьох гравців (виробників обладнання), але кожен пропонує диференційований, часто запатентований продукт (різні конструкції мішалок, реакторів).	Необхідно чітко доводити унікальність та переваги власної конструкції (зустрічні потоки) порівняно з іншими.
Міжнародна (глобальна)	Виробники хімічного обладнання (такі як ЕКАТО, Sulzer) працюють на глобальних ринках, і замовники в Україні можуть обирати іноземне обладнання.	Необхідно орієнтуватися на міжнародні стандарти якості та сертифікації. Патентний захист має бути міжнародним.
Внутрішньогалузева	Конкуренція відбувається всередині однієї галузі хімічного машинобудування між виробниками аналогічного за призначенням обладнання.	Необхідно глибоко розуміти специфіку та потреби основних гравців (виробників ПЕВГ).
Товарно-видова	Конкуренція йде між різними видами перемішувачів пристроїв, що задовольняють одну потребу: наша двоярусна мішалка проти стандартних пропелерних, турбінних, якірних.	Маркетингова стратегія має бути сфокусована на доведенні переваг саме нашого <i>типу</i> мішалки для конкретного процесу (приготування каталізатора).
Нецінова	Ми не можемо конкурувати за найнижчою ціною (оскільки конструкція складніша). Переваги базуються на якості продукту, енергоефективності та скороченні часу циклу.	Позиціонування повинно базуватися на «загальній вартості володіння» (ТСО) та ROI. Ціна має бути обґрунтована цінністю (економією).
Марочна (брендова)	Клієнти (хімічні заводи) довіряють перевіреним, відомим брендам виробників обладнання, оскільки ризики зупинки виробництва дуже високі.	На початковому етапі необхідно формувати довіру через пілотні впровадження, наукові публікації та партнерства (наприклад, з КПП).

Згідно з аналізом, конкуренція в нашому сегменті є переважно нецінковою та марочною. Це означає, що успіх проєкту залежить не від найнижчої вартості, а від

здатності продемонструвати унікальні технологічні переваги та сформувані довіру до свого рішення.

Після окреслення загальних рис, виконується глибший аналіз конкурентних умов у галузі з використанням моделі п'яти сил М. Портера. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером наведено в таблиці 8.9.

Таблиця 8.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Виробники стандартних реакторів та мішалок (пропелерних, турбінних).	Інші R&D-центри та стартапи, що розробляють нові методи перемішування.	Постачальники високоякісної нержавіючої сталі, приводів, ущільнень.	Виробники ПЕВГ.	1. Інші типи мішалок (напр., ультразвукові). 2. Альтернативні технології виробництва каталізаторів.
Висновки:	Інтенсивність конкуренції висока. Потрібно довести переваги.	Бар'єри входу високі (R&D, патенти).	Сила постачальників в середня, але критична для якості.	Сила клієнтів висока. Вони концентровані та вимагають доведеної ефективності.	Загроза середня. Наша технологія є покращенням існуючої, а не революцією.

Висновок: аналіз за моделлю Портера підтверджує можливість роботи на ринку. Найбільший тиск створюють покупці (висока ринкова сила через концентрацію) та прямі конкуренти (висока інтенсивність боротьби). Щоб бути конкурентоспроможним, проєкт повинен мати чітко артикульовані та доведені переваги в операційних витратах (ефективність) та якості кінцевого продукту.

Спираючись на аналіз конкуренції (табл. 8.9), потреби клієнтів (табл. 8.5) та фактори середовища (табл. 8.6, 8.7), формується фінальний перелік ключових факторів конкурентоспроможності.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності наведено в таблиці 8.10.

Таблиця 8.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники значущості)
Енергоефективність (зниження витрат)	Пряма економія операційних витрат для клієнта. Дуже значущий фактор при зростанні цін на енергію.
Скорочення часу циклу	Пряме збільшення продуктивності лінії (throughput) без капітальних витрат на нову лінію.
Однорідність (гомогенність) суміші	Ключовий показник якості змішування. Вища однорідність компонентів каталізатора забезпечує рівномірні властивості полімеру.
Дисперсність частинок	Зустрічні потоки забезпечують краще подрібнення та розподіл твердої фази, що критично для активності каталізатора.
Стабільність властивостей (від партії до партії)	Гарантія відсутності браку. Клієнту важлива повторюваність результату незалежно від зовнішніх умов.
Термін окупності (ROI)	Ключовий показник B2B-продажів для промислового обладнання.
Довіра ринку (Бренд)	Висока інерція ринку; клієнти надають перевагу перевіреним постачальникам для критичного обладнання.

Сформований перелік факторів є основою для подальшого порівняння. Деталізація параметрів якості (однорідність, дисперсність) дозволяє точніше продемонструвати технічні переваги запропонованої конструкції мішалки, адже саме гідродинаміка зустрічних потоків впливає на ці показники найкращим чином.

Використовуючи визначені фактори конкурентоспроможності, проводиться порівняльний аналіз сильних та слабких позицій стартапу відносно існуючих рішень конкурентів

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту наведено у таблиці 8.11.

Таблиця 8.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги» з конкурентами: E – ЕКАТО; P – Pfaudler; S – Sulzer

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Енергоефективність	19	P,S	E					
Скорочення часу циклу	16		P,S	E				
Однорідність (гомогенність) суміші	16		E,P	S				
Дисперсність частинок	16		P,S	E				
Стабільність властивостей	11				E,S,P			
Термін окупності (ROI)	13		E		P,S			
Вартість впровадження	8					E,P,S		
Довіра ринку (Бренд)	3						P	E,S

Детальний аналіз показує, що наш проєкт має суттєві переваги (сильні сторони) саме в технічних параметрах процесу: енергоефективності (-3 і -2 для конкурентів) та дисперсності і однорідності суміші (-2 і -1). За показником стабільності ми знаходимося на рівні з лідерами (0), оскільки це залежить також від автоматизації. Слабкими сторонами залишаються вартість впровадження (+1) та відсутність бренду, де конкуренти мають значну перевагу (+2 і +3)

Нашою ключовою конкурентною перевагою є технологічна досконалість процесу. Ми значно випереджаємо ринкові аналоги за критично важливими для клієнта параметрами – енергоефективністю та у загальному, якістю суміші. Відсутність бренду доведеться компенсувати агресивним маркетингом, побудованим на цифрах, та, можливо, наданням пілотних проєктів для підтвердження заявлених характеристик.

Завершальним кроком ринкового дослідження є формування матриці SWOT-аналізу, яка систематизує дані про сильні та слабкі сторони та зовнішні.

Можливості і загрози SWOT-аналіз стартап-проєкту наведено в таблиці 8.12.

ЛМ41МП.02.100.000	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 146
-------------------	------------	--------------	------------	--------------

Таблиця 8.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Інноваційна технологія: Комбінована двоярусна мішалка зі зустрічними осьовими потоками.</li> <li>2. Високі показники якості: Забезпечення кращої однорідності (гомогенності) суміші та дисперсності частинок порівняно з аналогами.</li> <li>3. Операційна ефективність: Значне зниження енерговитрат та скорочення часу циклу виробництва.</li> <li>4. Наукова основа: Ефективність гідродинаміки підтверджено CFD-моделюванням в рамках магістерської дисертації.</li> <li>5. Швидкий ROI: Висока економічна ефективність для клієнта.</li> </ol>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Відсутність бренду: Нульова впізнаваність та відсутність сформованої довіри ринку порівняно з гігантами (ЕКАТО, Sulzer).</li> <li>2. Відсутність промислового зразка та доведеної історії експлуатації.</li> <li>3. Підвищена вартість виготовлення: Складніша конструкція зумовлює вищу початкову ціну порівняно зі стандартними мішалками.</li> <li>4. Складність впровадження: Необхідність зупинки виробничої лінії клієнта для проведення монтажних робіт.</li> </ol>
<p><b>Можливості:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Криза енергосистеми: Дефіцит потужностей змушує підприємства шукати будь-які шляхи зниження енергоспоживання для виживання.</li> <li>2. Ринок модернізації (retrofit): Велика кількість зношених реакторів, що потребують оновлення без капітального будівництва.</li> <li>3. Попит на якість: Зростаюча потреба ринку у високоякісних марках ПЕВГ (конкуренція якістю).</li> <li>4. Глобальний тренд: Зростання цін на енергоносії робить енергоефективні технології пріоритетними.</li> </ol>	<p><b>Загрози:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Інерція ринку: Консерватизм технічних директорів великих заводів, небажання ризикувати з новим обладнанням.</li> <li>2. Конкуренція: Сильні позиції глобальних брендів з великими бюджетами.</li> <li>3. Воєнні ризики (Логістика та Енергетика): Зриви поставок матеріалів, блекаути на етапі виробництва компонентів.</li> <li>4. Кадрові ризики: Дефіцит кваліфікованого персоналу через мобілізацію та міграцію.</li> <li>5. Ризик копіювання: Можливість відтворення технології конкурентами при слабкому патентному захисті.</li> </ol>

SWOT-аналіз показує, що головною стратегією має бути використання сильних сторін (унікальна енергоефективність та якість змішування) для максимальної реалізації можливості, яку створює енергетична криза. Це дозволить нівелювати головну слабку сторону (відсутність бренду) – клієнти будуть готові працювати з новачком заради критично важливої економії енергії. Водночас, необхідно розробити план дій для мінімізації воєнних загроз (диверсифікація постачальників, автономність) та подолання інерції ринку (через пілотні проекти та гарантії).

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту наведено в таблиці 8.13.

Таблиця 8.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Продаж патенту (ліцензування): Продати технологію великому виробнику обладнання.	Висока	Короткі (1-2 роки)
Нішевий виробник: Створити компанію, що виробляє лише ключовий вузол (мішалку) та комплекти для модернізації (retrofit kits).	Середня (потрібні інвестиції)	Середні (2-4 роки)
Виробник повного циклу: Створити виробництво повних реакторних систем.	Низька (дуже високі інвестиції)	Довгі (5+ років)

Обрана альтернатива – №2 (Нішевий виробник). Ця стратегія дозволяє зберегти контроль над технологією та брендом, сфокусувавшись на основній інновації, при цьому вимагає реалістичних інвестицій порівняно з будівництвом повного заводу.

## 8.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

На основі проведеного ринкового аналізу, наступним кроком є формування ринкової стратегії. Цей етап передбачає визначення цільових сегментів ринку, вибір базової стратегії розвитку та конкурентної поведінки, а також розробку стратегії позиціонування. Вибір цільових груп потенційних споживачів наведено в таблиці 8.14.

Таблиця 8.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи	Готовність сприйняти продукт	Орієнтовний попит	Інтенсивність конкуренції	Простота входу
(Обрано) Існуючі виробники ПЕВГ (модернізація реакторів).	Середня. Потрібні докази ROI.	Високий (багато старих ліній).	Висока.	Середня (потрібно довести переваги).
(Обрано) Нові проєкти будівництва заводів (через інжинірингові компанії).	Висока. Нові проєкти шукають найкращі доступні технології (ВАТ).	Середній (проєктів менше, ніж існуючих заводів).	Висока.	Складна (потрібно потрапити у специфікацію проєкту).

Стратегія охоплення ринку: Диференційований маркетинг. Для Сегменту 1 пропонується «пакет модернізації», для Сегменту 2 – «інноваційний вузол» для інтеграції у новий проєкт.

Для ефективної роботи в обраних сегментах необхідно сформуванню базову стратегію розвитку. Визначення базової стратегії розвитку наведено в таблиці 8.15.

Таблиця 8.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
Нішевий виробник (Альтернатива 2)	Диференційований маркетинг	Енергоефективність, вища якість продукту, швидший цикл.	Стратегія диференціації

Оскільки наш проєкт не може конкурувати за найнижчою ціною (лідерство по витратах) через складнішу конструкцію, обрано стратегію диференціації. Конкурентна перевага буде будуватися на унікальних характеристиках продукту (ефективність, якість), які є значущими для клієнтів і виправдовують вищу ціну.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки на ринку. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки наведено в таблиці 8.16.

Таблиця 8.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем»?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
Так. В ніші мішалок зі зустрічними потоками для цього процесу	Забирати існуючих у конкурентів, пропонуючи модернізацію.	Ні. Ми пропонуємо унікальну гідродинаміку.	Стратегія «Виклику лідера» (атака на слабкі місця – енергоефективність – стандартних мішалок)

Обрано стратегію «Виклику лідера» у форматі флангової атаки. Ми не будемо конкурувати з ЕКАТО «в лоб» на всьому ринку. Натомість, ми атакуємо їх на вузькому сегменті (реактори приготування каталізатора), пропонуючи значно

краще рішення для їхніх «слабких місць» – стандартної енергоефективності та гідродинаміки

На основі вимог споживачів (табл. 8.5) та обраних стратегій (табл. 8.15, 8.16) розробляється стратегія позиціонування. Вона полягає у формуванні чіткого образу проекту в свідомості цільової аудиторії. Визначення стратегії позиціонування наведено в таблиці 8.17.

Таблиця 8.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Доведена економія (ROI).</li> <li>2. Надійність.</li> <li>3. Підтримка.</li> </ol>	Диференціація	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Енергоефективність</li> <li>2. Скорочення часу циклу</li> <li>3. Висока однорідність (гомогенність) суміші</li> <li>4. Тонкодисперсність частинок</li> <li>5. Стабільність властивостей</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ефективність (менше енергії, менше часу)</li> <li>2. Висока якість змішування (висока однорідність та дисперсність)</li> <li>3. Стабільність (гарантований результат без браку)</li> <li>4. Інноваційність (сучасна інженерія)</li> </ol>

Результатом цього етапу аналізу є узгоджена система рішень. Стратегія позиціонування буде базуватися на чотирьох ключових асоціаціях: ефективність, висока якість змішування, стабільність та інноваційність.

Дана стратегія дозволить чітко донести до клієнтів цінність нашої диференційованої пропозиції, акцентуючи увагу не на абстрактній «якості», а на конкретних параметрах однорідності та дисперсності, які досягаються внаслідок використання нової конструкції перемішуючого пристрою.

ЛМ41МП.02.100.000	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 151
-------------------	------------	--------------	------------	--------------

## 8.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Першим кроком є підсумування ключових переваг товару, що формують його ринкову концепцію. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару наведено в таблиці 8.18.

Таблиця 8.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
Зниження операційних витрат.	Економія електроенергії на приводі мішалки.	Зустрічні осьові потоки створюють інтенсивне перемішування при менших енерговитратах порівняно з класичними турбінними мішалками.
Збільшення випуску продукції.	Скорочення часу циклу приготування каталізатора.	Висока інтенсивність змішування швидше призводить до гомогенізації суміші.

Концепція товару базується на двох ключових перевагах: економія операційних витрат та збільшення продуктивності. Це є прямою відповіддю на головні потреби цільових сегментів.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару, що описує його ідею, фізичні складові та сервісне підкріплення. Опис трьох рівнів моделі товару наведено в таблиці 8.19.

Таблиця 8.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1	2
I. Товар за задумом	Високоєфективне гомогенне змішування компонентів каталізатора.
II. Товар у реальному виконанні	Назва: «ProCatalyst-Duo» Властивості: Комбінована двоярусна мішалка з нержавіючої сталі 08X17H13M2T.

Продовження таблиці 8.19

1	2
	Якість: Відповідність стандартам хімічного машинобудування, низьке биття вала, якісні ущільнення Пакування: Промислове пакування для транспортування важкого обладнання.
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Інжиніринг, CFD-моделювання процесу клієнта, розрахунок ROI.
	Після продажу: Послуги монтажу, гарантія 24 місяці, сервісне обслуговування
Захист від копіювання: Патент на корисну модель або винахід, що захищає унікальну геометрію лопатей та принцип створення зустрічних потоків.	

Модель товару показує, що конкуренція буде відбуватися не лише на рівні «заліза» (II рівень), але й на рівні сервісу (III рівень). Інжиніринговий супровід та розрахунок ROI є невід'ємною частиною продукту. Захист від копіювання забезпечується патентуванням.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар. Визначення меж встановлення ціни в таблиці 8.20.

Таблиця 8.20 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи	Верхня та нижня межі ціни
1	2	3	4
Нижня межа: Вартість стандартної	Конкуренти (Преміум-сегмент): Високотехнологічні рішення від світових	Верхня межа: Розраховується на основі ROI.	Стратегія: «Ціноутворення на основі цінності»

Продовження таблиці 8.20

1	2	3	4
пропелерної мішалки. Діапазон: 20 000 – 35 000 грн.	лідерів (ЕКАТО, Pfaudler, Sulzer). Діапазон: 60 000 – 90 000 грн.	Максимальна сума, яку клієнт готовий інвестувати, щоб повернути кошти за рахунок економії електроенергії та зменшення браку за 18-24 місяці Діапазон: До 80 000 грн	(Value-Based Pricing). Ціна має бути вищою за стандартні рішення, але привабливішою за брендові аналоги. Діапазон: 45 000 – 55 000 грн

Аналіз показує, що ціна проєкту не повинна орієнтуватися на найнижчі ціни стандартних замінників (20–35 тис. грн.), оскільки вони не забезпечують необхідної енергоефективності. Водночас, ми встановлюємо ціну нижче преміальних брендів (60–90 тис. грн.), щоб зайти на ринок.

Ціна має бути обґрунтована цінністю (економією), яку отримує клієнт. Встановлений діапазон 45 000 – 55 000 грн. дозволяє забезпечити клієнту чіткий термін окупності (ROI) менше 24 місяців за рахунок зниження операційних витрат.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту. Формування системи збуту наведено в таблиці 8.21.

Таблиця 8.21 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	2	3	4
Тривалий цикл продажу (B2B). Потрібна технічна експертиза. Рішення приймає група (інженер, фінансист, керівник).	1. Технічні консультації. 2. Демонстрація (моделювання).	Прямий канал (виробник => клієнт).	Власна система збуту (прямі продажі). технічними директорами заводів.

Продовження таблиці 8.21

1	2	3	4
	3. Контрактація. 4. Монтаж.		Залучення власних інженерів-продажників, здатних вести переговори з

Через високу технічну складність продукту та необхідність інжинірингового супроводу, оптимальною є система прямих продажів (B2B). Це виключає посередників і забезпечує прямий контакт з клієнтом для надання кваліфікованих консультацій.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на обрану стратегію позиціонування. Концепція маркетингових комунікацій наведена в таблиці 8.22.

Таблиця 8.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Технічні спеціалісти, шукають докази ефективності (B2B).	1. Профільні промислові виставки (хімічне машинобудування). 2. Галузеві журнали. 3. LinkedIn (таргетинг на інженерів-хіміків).	Ефективність, Якість, Інноваційність.	Довести, що модернізація мішалки є інвестицією з швидкою окупністю, а не витратами.	«Менше енергії. Більше поліетилену»  (Технічні статті, кейс-стаді (White Papers) з розрахунками економії, 3D-візуалізації гідродинамічних потоків).

Результатом цього пункту є готова маркетингова програма. Концепція комунікацій буде сфокусована на каналах, де присутні інженери та технічні директори (виставки, профільні ЗМІ). Основне повідомлення має підкреслювати економічну вигоду: «Менше енергії. Більше поліетилену».

## **Висновки**

На основі проведеного маркетингового аналізу підтверджено, що проект модернізації реактора має високий комерційний потенціал. Ринок виробництва ПЕВГ демонструє стабільний попит на енергоефективні рішення, що особливо актуально в умовах дефіциту потужностей в енергосистемі. Проект є конкурентоспроможним завдяки суттєвим технічним перевагам: запропонована двоярусна мішалка забезпечує вищі показники однорідності суміші та дисперсності частинок при менших енерговитратах, ніж стандартні рішення відомих брендів (ЕКАТО, Sulzer). Ці переваги дозволяють нівелювати слабку сторону стартапу — відсутність сформованої репутації на ринку.

Для реалізації проекту обрано стратегію «Нішевого виробника», що фокусується на виробництві та прямому продажу комплектів модернізації (retrofit-пакетів). Встановлена цінова стратегія на основі цінності (діапазон 45 000 – 55 000 грн.) є привабливою для замовників, оскільки гарантує термін окупності інвестицій (ROI) менше 24 місяців за рахунок економії операційних витрат.

Враховуючи вищезазначене, подальша імплементація проекту є доцільною. Першочерговими наступними кроками мають стати: оформлення патентного захисту на інноваційну конструкцію, створення фізичного прототипу для верифікації результатів моделювання та розробка деталізованих комерційних пропозицій для пілотних клієнтів з урахуванням мінімізації логістичних та енергетичних ризиків.

## Висновки

У магістерській дисертації на тему «Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги», виконаній за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання».

Проведено опис технологічного процесу виробництва поліетилену високої густини, підбрано реактор з перемішуючим пристроєм і центрифугу, надано технічні характеристики апаратів, обґрунтовано вибрані конструкції. Було проведено патентний пошук і зазначено основні напрямки модернізацій розроблюваних апаратів. Проведено необхідні розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність центрифуги і реактора, частина розрахунків виконано у вигляді програм з описом методик розрахунків.

Розроблено вимоги до охорони праці і стартап-проект. Надано рекомендації щодо монтажу та ремонту установки, оцінено рівень стандартизації та уніфікації розроблюваних апаратів. Виконано комп'ютерне моделювання з симуляційним експериментом в апараті з перемішуючим пристроєм, що підтверджує запропоновану модернізацію та розроблено схему автоматичного керування технологічним процесом установки. Модернізація перемішуючого пристрою полягає у встановленні додаткової лопаткової мішалки.

Графічна частина проекту складається з: креслення технологічної схеми, схеми автоматизації, плакатів модернізації та складальних креслень реактора, центрифуги, ротора центрифуги і шнека, а також специфікацій до них

Під час виконання магістерської дисертації було опубліковано одну тезу на міжнародній конференції і дві на всеукраїнських конференціях.

## Conclusion

In the master's thesis on “Modernization of the high-density polyethylene production line with the development of a reactor and centrifuge,” completed under the educational and professional program “Engineering and computer-integrated technologies for the design of innovative industrial equipment.”

A description of the technological process of high-density polyethylene production was provided, a reactor with a mixing device and a centrifuge were selected, technical characteristics of the devices were given, and the selected designs were justified. A patent search was conducted and the main directions for the modernization of the devices under development were indicated. The necessary calculations were performed to confirm the operability and reliability of the centrifuge and reactor, and some of the calculations were performed in the form of programs with a description of the calculation methods.

Occupational safety requirements and a startup project were developed. Recommendations were provided for the installation and repair of the unit, and the level of standardization and unification of the developed devices was assessed. Computer modeling with a simulation experiment was performed in a device with a mixing device, confirming the proposed modernization, and a scheme for automatic control of the technological process of the installation was developed. The modernization of the mixing device consists in the installation of an additional blade mixer.

The graphic part of the project consists of: drawings of the technological diagram, automation diagram, modernization posters, and assembly drawings of the reactor, centrifuge, centrifuge rotor, and screw, as well as specifications for them.

During the completion of the master's thesis, one thesis was published at an international conference and two at all-Ukrainian conferences.

## Перелік посилань

1. Віленський В.О. Полімери: синтез, модифікація, дослідження : навчальний посібник. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. – 348 с. : іл.
2. Чорнобильський І.І. Полімеризаційні апарати - Харківська книжкова друкарня, 1967. - 163 с.
3. Брацихін Е. А., Шульгіна Е. С. Технологія пластичних мас: навчальний посібник для технікумів. - 3-е изд., перераб. та доп. - Л.: Хімія, 1982. – 328 с., іл.
4. Остапчук М.В., Рибак А.І. Системи технологій (за видами діяльності): Навчальний посібник. Рекомендовано МОН України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ЦУЛ. – 2003. – 890 с.
5. Комп'ютерне проектування обертових елементів обладнання хімічної технології: курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмою «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання» спец. 133 Галузеве машинобудування / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. В. Гусарова. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 288 с.
6. Meyer T., Keurentjes J. (Ред.) Довідник з інженерії полімерних реакцій (Handbook of Polymer Reaction Engineering). – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. – 2 томи (Volume 1, Volume 2).
7. Корнієнко Я.М. Процеси та обладнання хімічних технологій. Частина 2. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерноінтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спец. 133 Галузе машинобудування / Корнієнко Я.М., Степанюк А.Р., Гулієнко С.В., Гайдай С.С., Семінський О.О. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 520 с.

8. Лук'яненко В. М., Таранець А. В. Центрифуги: Довід. Вид. – М.: Хімія. 1988. 384 с.: іл.

9. Центрифуга ФГН-633Т-03. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу <https://priborpostavka.ru/item/centrifuga-fgn-633t-03> (дата звернення 14.10.2025)

10. Центрифуга Ж5-ЦТА-10. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <http://ukrpromservis.com/centrifuga-zsh5-cta-10> (дата звернення 14.10.2025)

11. Центрифуга GF75. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://filter-centrifuge.ru/catalog/trubchatye-tsentrifugi/tsentrifuga-trubchataya-gf75> (дата звернення 14.10.2025)

12. Реактор 2,5 м<sup>3</sup> з рамною мішалкою (Серія РМ) [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://prom.ua/ua/p1544574929-reaktor-nerzhaveyuschij-ramnoj.html> (дата звернення 14.10.2025)

13. Реактор 2,0 м<sup>3</sup> з якірною мішалкою (Серія АЯ) [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mashzavod.com/reaktor-s-yakornoymeshalkoy-2-0-m3> (дата звернення 14.10.2025)

14. Реактор 3,0 м<sup>3</sup> з турбінною мішалкою (Серія РТ, без рубашки). [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://himprod.com/catalog/reaktory-rt-30/> (дата звернення 14.10.2025)

15. Сталь 12Х18Н10Т ДСТУ EN 10088-1:2019. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://westa.kiev.ua/ua/standarty/marki-stali/stal-12x18h10t> (дата звернення 06.05.2025).

16. Сталь марки Ст35 з ДСТУ 7809:2015. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/35> (дата звернення 14.10.2025)

17. Tesnit BA-203 [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://juntec.es/wp-content/uploads/2015/10/TESNIT-BA-203.pdf> (дата звернення 14.10.2025)

18. Сталь 08X17H13M2T. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=323\\_\\_](https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=323__) (дата звернення 14.10.2025)

19. Сталь марки Ст 16ГС. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: [https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/16gs\\_\\_](https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/16gs__) (дата звернення 14.10.2025)

20. Набивка сальникового ущільнення. [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Режим доступу до ресурсу: <https://укррези́на.com.ua/ua/p744606139-nabivka-salnikovaya-gost.html> (дата звернення 14.10.2025)

21. Horizontal centrifuge capable of automatically detecting leakage: Patent CN222240784U: IPC B04B15/00; B04B7/02; CN202420852838U Application 2024-04-23; Publication 2024-12-27.

22. Solid-bowl centrifuge: Patent WO2025051481A1: IPC B04B1/20; B04B7/02; B04B9/12; F16M1/04; EP2024072451W Application 2024-08-08; Publication 2025-03-13.

23. Zentrifugenschnecke, Vollmantelschnecken zentrifuge und Verfahren zur Herstellung einer Zentrifugenschnecke: Patent DE102024103034A1: IPC B04B1/20; DE102024103034A Application 2024-02-02; Publication 2025-08-07.

24. Horizontal centrifuge: Patent WO2025153837A1: IPC B04B13/00; B04B15/00; B04B15/10; B04B15/12; B04B7/02; B04B7/16; B04B7/18; B04B9/12; IB2024050376W Application 2024-01-15; Publication 2025-07-24.

25. A decanter centrifuge for separating feed material: Patent WO2025114493A1: IPC B04B1/20; EP2024084012W Application 2024-11-28; Publication 2025-06-05.

26. Impeller reactor: Patent WO2025053431A1: IPC B01F27/112; B01F27/19; B01J19/00; B01J19/18; C08F14/06; C08F2/01; KR2024010739W Application 2024-07-24; Publication 2025-03-13.

27. Production reactor of glycolic acid high polymer material: Patent CN222369095U: IPC B01J19/00; B01J19/18; CN202420995279U Application 2024-05-09; Publication 2025-01-21.

28. Fluorine-containing high polymer material rotational flow bed end-capped reactor: Patent CN222855383U: IPC B01J8/24; CN202421688038U Application 2024-07-17; Publication 2025-05-13.

29. Kettle reactor with polymer online removal function and application: Patent CN119971966A: IPC B01J19/00; B01J19/18; F28G7/00; CN202311501570A Application 2023-11-10; Publication 2025-05-13.

30. Polymerization reactor and method for producing propylene-based polymer: Patent US2025242325A1: IPC B01J19/00; B01J19/18; C08F110/06; C08F2/01; US202218697128A Application 2022-10-20; Publication 2025-07-31.

31. Машини та апарати хімічних виробництв: Приклади та завдання. Навч. Посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Машини та апарати хімічних виробництв»/І. В. Доманський, В. П. Ісаков, Г. М. Островський та ін.; Під загальною редакцією В. Н. Соколова – Л.:Машинобудування, лєнінгр. Відділення, 1982. – 384., іл.

32. Федік Л. Ю. Виробничі процеси і обладнання об'єктів автоматизації: навч. посіб. / Л. Ю. Федік, Л. О. Гуменюк, П. О. Гуменюк. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 286 с.: іл.

33. Процеси і апарати. Гідромеханічні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, Н.П. Загорко, В.Г. Циб. – Мелітополь, 2019. – 212 с.

34. Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності “Галузеве машинобудування” (Спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології

хімічних та нафтопереробних виробництв) з дисципліни “Розрахунок і конструювання типового обладнання – 1. Розрахунок і конструювання тонкостінних посудин, опор та стропових пристроїв”: [Електронний ресурс]: НТУУ „КПІ”; уклад. І. А. Андреев. – Київ: НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. – 105 с.

35. Стороженко В.Я. Реактори об'ємного типу з перемішувальними пристроями (розрахунок та конструювання): навчальний посібник/ В.Я.Стороженко, В.А.Смирнов. – Суми: Сумський державний університет, 2010. – 283 с.

36. Іоффе І.Л. Проектування процесів і апаратів хімічної технології. – Л.: Хімія, 1991. – 352 с.

37. Ружинська Л.І. Проектування реакторів біотехнологічних та фармацевтичних виробництв. Навч. посібник / Укладачі: Л.І. Ружинська, І А Буртна, В.М. Поводзинський, В.Ю. Шибецький – Київ: НТУУ «КПІ», 2014 – 130 с.

38. РТМ 26-01-90-76 // Брагінський Л.М. Керівний технічний матеріал 26–01–90–76: Апарати з механічними перемішувальними пристроями вертикальні. – П.: НДІ Емальхім, 1976.

39. Автоматизація виробничих процесів: Посібник до практичних робіт / Укл.: В.В.Тичков, Р.В. Трембовецька, К.В. Базіло - Черкаси: ЧДТУ, 2016 – 137 с.

40. Андреев І.А. Конструювання і розрахунок основних елементів посудин та апаратів [Електронний ресурс]: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спец. 133 Галузеве машинобудування; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 428 с. ISBN 000-000-000-0.

41. Охорона праці та цивільний захист: Підручник для студентів, які навчаються за спеціальностями галузей знань «Автоматизація та приладобудування» / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний, Ю. О.

Полукаров, О. В. Землянська. За ред. О. Г. Левченка. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 420 с.

42. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв [Текст] : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 419 с.: іл. – Бібліогр.: с. 413–415

43. Боженко Л.І. Стандартизація, метрологія та кваліметрія у машинобудуванні: Навч. посібник. — Львів: Світ, 2003. — 328 с.; іл.

44. Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>

45. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

46. Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N., Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024). Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(13 (129)), 57–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997> <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/304997> .

47. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // *Marketing and Management of innovations*. 3’2017, P. 245-256. DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.

48. Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv*

Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2022. №23 (2022). PP. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.23.2022.264637>.

49. Yudina, N. Algorithym Of Marketing Decision Making. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2022. №22 (2022). PP. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.22.2022.260163>.

50. Yudina, N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2021. №19 (2021). PP. 1-9 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/240315>.

51. Yudina, N., Pidlisna, O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2021. №18 (2021). PP. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.18.2021.238105>.

52. Yudina, N., Instrumenty Zarządzania Przyszłością. Marketing Instytucji Naukowych I Badawczych, Vol. 38, Issue 4,, 2020, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Poland, Warszawa, p. 1-19 ISSN 2353-8503 eISSN 2353-8414. [http://minib.pl/wp-content/uploads/2020/12/4-Yudina\\_pl.pdf](http://minib.pl/wp-content/uploads/2020/12/4-Yudina_pl.pdf). DOI: 10.2478/minib-2020-0027.

53. Yudina, N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>

54. Контроль та керування хіміко-технологічними процесами : Метод. вказівки до викон. розрах.-графіч. роботи для студ. напр. підгот. «Хімічна технологія та інженерія» / Уклад. М. В. Лукінюк. – НТУУ «КПІ», 2016. – 61 с.

55. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст] : Довідник: У 2 ч. / А. К. Бабіченко та ін. Харків : НТУ «ХПІ», 2003. Кн. 1. Вимірювальні пристрої. 470 с. : іл. ISBN 966-593-232-2. Доступ : [https://drive.google.com/file/d/1SeW8N5bk2K7hAinwdz4hOy4sBnmXxGMB/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1SeW8N5bk2K7hAinwdz4hOy4sBnmXxGMB/view?usp=drive_link)

56. Лукінюк, М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами [у 2 кн.]. Кн. 1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, НТУУ «КПІ». Електронні текстові дані (1 файл: 4,46 Мбайт). Київ : Політехніка, 2012. 336 с. Назва з екрана. Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19085>. ISBN 978-966-622-520-0. ISBN 978-966-622-520-9

57. Інтелектуальна власність та патентознавство: підручник / І. О. Мікульонок. – 3-тє вид., переробл. та доповн. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 244 с. – Бібліогр.: с. 240–241.

## Додаток А

### Автоматична схема керування установкою

Відповідальна організація КПІ ім. Ігоря Сікорського	Технічне узгодження Новохань О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа Кафедра МАХНВ	Розробник документа Бєлокань А.	Назва, додаткова назва Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги	ЛМ4.1МП.067242.000			
	Документ затверджено Жученко О.		Інд. змін	Дата видання	Мова UA	Аркуш 171

## Вступ

Виробництво поліетилену високої густини є складним, багатостадійним технологічним процесом, що включає такі ключові етапи, як приготування каталітичного комплексу, безпосередньо полімеризація етилену, а також подальше промивання та сушіння готового полімеру.

Хіміко-технологічні процеси такого типу характеризуються високою швидкістю протікання, комплексністю та значною чутливістю до будь-яких порушень режиму. Наприклад, синтез поліетилену високої густини вимагає надзвичайно точного дотримання температурних параметрів (зокрема,  $(75\pm 4)$  °C у полімеризаторі та  $(20-40)$  °C при підготовці каталізатора) і тиску, а також оперує в умовах підвищеної вибухо- та пожежонебезпечності, що вимагає використання інертної атмосфери чистого азоту.

Ці фактори зумовлюють підвищену увагу до питань автоматизації. Впровадження систем автоматичного контролю та керування є необхідним для забезпечення високої якості продукції, яка критично залежить від чистоти реагентів та стабільності дотримання технологічних параметрів. Крім того, автоматизація сприяє раціональному використанню сировини та енергетичних ресурсів, подовженню термінів міжремонтного періоду роботи устаткування та зменшенню чисельності обслуговуючого технічного персоналу [54].

Метою виконання даного розділу магістерської дисертації є закріплення знань, отриманих під час вивчення курсів з автоматизації. Це включає розробку системи керування для даного технологічного процесу (виробництва поліетилену високої густини), застосування сучасних методів, що базуються як на засобах локальної автоматики, так і на мікропроцесорній техніці, а також більш детальне

ознайомлення із характеристиками та функціональними можливостями технічних засобів, що використовуються для побудови цих систем [54].

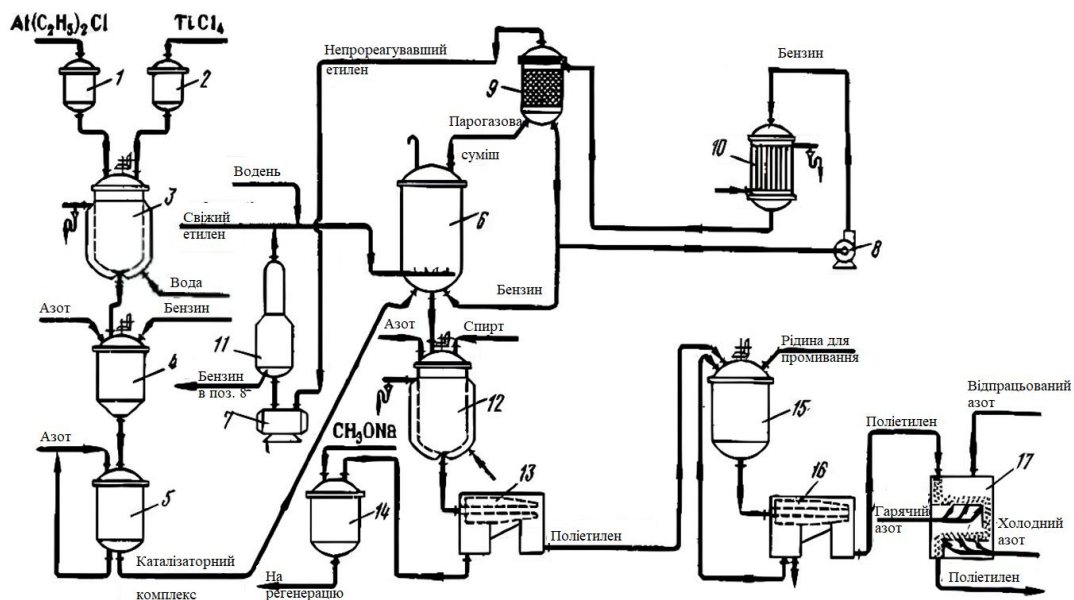
У процесі виконання даного розділу (де за об'єкт автоматизації взято технологічний процес в реакторі) здобуваються практичні знання та навички з таких питань:

- самостійний аналіз технологічних процесів (виробництво поліетилену високої густини) з позицій автоматизації;
- кваліфіковане формулювання завдання на автоматизацію технологічного процесу.
- розуміння принципів дії та особливостей застосування основних типів первинних вимірювачів (датчиків) ключових технологічних параметрів (наприклад, температури , тиску, витрати);
- ознайомлення з алгоритмами керування та функціональними можливостями автоматичних регуляторів (позиційних, аналогових, мікропроцесорних), а також з особливостями конструкції та умовами експлуатації пристроїв безпосереднього впливу на технологічні процеси (виконавчі механізми та регулювальні органи);
- ознайомлення з роботою схем та пристроїв сигналізації, автоматичного блокування і захисту (наприклад, для уникнення вибухонебезпечних ситуацій );
- засвоєння основ техніки читання та навичок розробки схем автоматизації хіміко-технологічних процесів відповідно до чинних стандартів.

## A.1 Опис технологічної схеми процесу виробництва поліетилену високої густини

У сучасному світі полімерні матеріали, зокрема поліетилен високої густини, займають провідні позиції завдяки своїм унікальним експлуатаційним характеристикам, універсальності та економічності.

Технологічна схема установки зображена на рисунку А.1.



1 – мірник діетилалюмінійхлориду; 2 – мірник чотирьохлористого титану;  
 3 – змішувач каталізаторного комплексу; 4 – апарат для розведення комплексу;  
 5 – проміжна ємність; 6 – полімеризатор; 7 – газодувка; 8 – відцентровий насос;  
 9 – абсорбер; 10 – холодильник кожухотрубний; 11 – газовідділювач; 12 – збірник для розкладу залишків каталізаторного комплексу; 13 – віджимна центрифуга;  
 14 – збірник маточного розчину; 15 – промивник; 16 – центрифуга; 17 – сушарка

Рисунок А.1 – Схема технологічного процесу виробництва поліетилену високої

густини

Технологічний процес виробництва поліетилену високої густини є складним багатостадійним комплексом, який вимагає точного контролю параметрів на кожному етапі для забезпечення якості кінцевого продукту [1].

Процес починається у вузлі приготування каталізатора. Вихідні компоненти, діетилалюмінійхлорид та чотиріхлористий титан, з вагових мірників 1 і 2 дозуються у змішувач 3. Для отримання якісного комплексу каталізаторів Циглера-Натта необхідно суворо підтримувати температуру в діапазоні 20-40 °С. Зі змішувача суміш надходить в апарат для розведення 4, куди також подається бензин, після чого розчин через проміжну ємність 5 направляється в основний апарат [3, 4].

Ключовий етап – полімеризація, відбувається в полімеризаторі 6. Процес є каталітичним та проходить при тиску в діапазоні (1,5–3) МПа та стабільній температурі (75±4) °С. У реактор безперервно подається розчин каталізатора та свіжий етилен. Перемішування реакційної маси здійснюється за рахунок барботування етилену, який циркулює в системі за допомогою газодувки 7 та подається через газорозподільник 11. У процесі утворюється суспензія поліетилену в бензині. Теплота екзотермічної реакції відводиться за рахунок випаровування бензину.

Парогазова суміш, що виходить з реактора 6, проходить через абсорбер 9, де вловлюються дрібні частинки полімеру, щоб запобігти їх осіданню в комунікаціях. Далі пари бензину конденсуються в холодильнику 10 і за допомогою насоса 8 повертаються в цикл, частково зрошуючи абсорбер 9 та повертаючись у полімеризатор 6.

Наступний етап – деактивація та промивання. Суспензія з полімеризатора 6 надходить у збірник 12, куди для розкладання залишків каталітичного комплексу

подають спирт (метиловий або ізопропіловий). Це необхідно для уникнення погіршення хімічної стійкості та діелектричних властивостей готового поліетилену.

Далі суспензія прямує на віджимну центрифугу 13. Маточний розчин (фільтрат) направляється в збірник 14 для нейтралізації. Твердий полімер з центрифуги 13 транспортується в промивник 15, де проходить обробку гарячим та холодним промиванням.

Завершальний етап – сушіння. Після промивання полімер знову віджимається на центрифугі 16 і, за умови досягнення вологості не вище 40%, подається в сушарку 17. Сушіння відбувається гарячим повітрям при температурі, що не перевищує 50 °С, після чого готовий порошок поліетилену високої густини відправляється на стабілізацію та грануляцію.

## **А.2 Аналіз процесу приготування каталітичного комплексу для виробництва поліетилену високої густини як об'єкта автоматизації**

Об'єктом автоматизації обрано реактор приготування каталізаторного комплексу (позиція 3 на технологічній схемі). У реакторі відбувається змішування компонентів каталізатора Циглера-Натта: діетилалюмінійхлориду та чотирьохлористого титану. Технологічний процес у цьому апараті характеризується наступними особливостями, що визначають вимоги до системи автоматизації [55]:

1. Точне дозування реагентів. Якість каталізаторного комплексу залежить від співвідношення компонентів. Тому необхідно забезпечити точний контроль та автоматичне регулювання витрати діетилалюмінійхлориду та чотирьохлористого титану, що подаються в реактор.

2. Суворий температурний режим. Реакція повинна проходити в чітко визначеному діапазоні температур (20–40 °С). Відхилення може призвести до дезактивації каталізатора. Процес супроводжується тепловим ефектом, тому необхідне ефективне регулювання подачі охолоджуючої води в сорочку апарата.

3. Підтримання рівня та матеріального балансу. Для забезпечення безперервності процесу та стабільного часу перебування реагентів у зоні реакції необхідний контроль рівня суміші в апараті. Регулювання рівня здійснюється шляхом зміни витрати готового продукту на виході з реактора.

4. Компоненти каталізатора є пірофорними, тому процес проводиться в середовищі інертного газу (азоту) під надлишковим тиском. Контроль тиску азоту є важливим параметром безпеки для запобігання підсосу повітря.

5. Забезпечення однорідності. Для рівномірного розподілу компонентів необхідне постійне перемішування, що вимагає контролю стану та дистанційного керування електроприводом мішалки.

Параметри контролю та керування для реактора приготування каталізатора зведено у таблиці А.1.

Таблиця А.1 – Параметри контролю та керування виробництвом

Назва стадії процесу (технологічний об'єкт) / місце виміру	Назва контрольованого чи регульованого параметра	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до рівня автоматизації
Трубопровід подачі діетилалюмінійхлориду	Витрата	$0,3 \pm 0,05$ кг/с	Контроль, регулювання
Трубопровід подачі чотирехлористого титану	Витрата	$0,3 \pm 0,05$ кг/с	Контроль, регулювання
Реактор для приготування каталізатора	Температура	$30 \pm 10$ °С	Контроль, регулювання, сигналізація (верхня/нижня)
Реактор для приготування каталізатора	Рівень	$1,0 \pm 0,1$ м (або 75% об'єму)	Контроль, регулювання, сигналізація (верхня/нижня)
Реактор для приготування каталізатора	Тиск	$0,1 \pm 0,02$ МПа (надлишковий)	Контроль, сигналізація (падіння тиску), сигналізація (нижній)
Електропривід мішалки	Стан роботи	500 об/хв (або вкл/викл)	Дистанційне керування, індикація стану

### А.3 Опис розробленої схеми автоматизації

Для забезпечення надійної, безпечної та ефективної роботи вузла приготування каталізаторного комплексу, дотримання суворого температурного режиму, а також мінімізації впливу людського фактора на перебіг технологічного процесу, розроблено схему автоматизації [56].

Для забезпечення точного співвідношення компонентів передбачено два ідентичних контури регулювання витрати. Первинні вимірювальні перетворювачі витрати FE 1А та FE 2А (в комплекті з проміжними перетворювачами FT 1Б та FT 2Б) вимірюють кількість діетилалюмінійхлориду та чотиріхлористого титану, що надходять у реактор. Сигнали від них надходять на мікропроцесорні регулятори FIC 1В та FIC 2В на щиті керування. Регулятори формують керуючі впливи на виконавчі механізми – регулюючі клапани 1Г та 2Г, встановлені на відповідних трубопроводах подачі реагентів.

Для підтримання заданого рівня реакційної маси використовується контур регулювання. Датчик рівня LE 3А (з перетворювачем LT 3Б) вимірює поточне значення рівня. Сигнал подається на регулятор LIC 3В, який керує виконавчим механізмом. Передбачено світлову сигналізацію граничних рівнів (HL1, HL2).

Температура реакційної суміші вимірюється термоперетворювачем опору TE 4А (з перетворювачем TT 4Б). Регулятор TIC 4В порівнює виміряне значення з уставкою (20–40 С) і керує клапаном подачі охолоджуючої води в сорочку апарата (клапан умовно не показаний на спрощеній схемі, але функція регулювання температури реалізована). При виході температури за межі норми спрацьовує сигналізація (HL3, HL4).

Для контролю тиску «азотної подушки» встановлено датчик тиску PE 5А (з перетворювачем PT 5Б). Вторинний прилад PIA 5В на щиті забезпечує індикацію

тиску та аварійну сигналізацію (HL5) при його падінні, що попереджає про небезпеку розгерметизації.

Первинний перетворювач витрати FE 6A (у комплекті з проміжним перетворювачем FT 6B) безперервно вимірює витрату охолоджуючої води, що подається в сорочку реактора. Сигнал надходить на регулятор FIC 6B, який формує керуючий вплив на регулюючий клапан 6Г, змінюючи подачу води відповідно до потреб процесу для підтримання заданого температурного режиму.

Керування мішалкою Дистанційне керування електроприводом мішалки M1 здійснюється за допомогою блоку керування NS 7A (кнопковий пост та пускач). Стан роботи двигуна («Робота» / «Зупинка») відображається сигнальними лампами HL6 та HL7 на щиті оператора [55, 56].

Таблиця А.2 – Специфікація устаткування, виробів і матеріалів

Поз и- ція на схе- мі	Назва парам- е-тра	Середови- ще, місце відбору інформації	Грани- чне значенн- я парамет- ра	Місце монта- жу	Назва, технічна характеристика	Тип, мар- ка мо- делі	Завод- виробник	Кіль- - кіст- ь
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4А	Темпе- - ратура	Суміш каталізатора, апарат поз. 3	–	Апарат	Термоперетворю- вач опору платиновий вибухозахищени- й. НСХ 100П; діапазон вимірювання: - 50...+100 °С; клас допуску В; довжина монтажної частини 120 мм; $P_y=6,3$ МПа	ТСП- 1187 Exd	ПрАТ «Тера», м. Чернігів	1 од.
5А	Тиск	Газова подушка (азот), апарат поз. 3	0,6 МПа	Апарат	Перетворювач тиску вимірювальний тензометричний. Верхня межа вимірювань 0,6 МПа; вихідний сигнал 4...20 мА; похибка 0,5%; виконання Exd	AIR- 20/M 2-DI	НВП «Елемер- Україна»	1 од.
3А	Рівень	Суміш каталізатора, апарат поз. 3	1,6 м	Апарат	Перетворювач різниці тиску (гідростатичний рівнемір) з виносними розділовими мембранами. $\Delta P_{max} = 16$ кПа; матеріал мембрани – сплав 36НХТЮ; вихід 4...20 мА;	Сафір -22 МП- ДД- Ex	ЗАТ «Маномет р», м. Харків	1 од.

ЛМ4 1МП.02.100.000

Інд. змін.

Дата видання

Мова  
UAАркуш  
177

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1А , 2А , 6А	Витрата	Реагенти (лінії 33, 34) та Вода (лінія 1)	5 м <sup>3</sup> /год	Трубопровід	Витратомір-лічильник електромагнітний фланцевий. D <sub>y</sub> =25 мм (для реагентів) та D <sub>y</sub> =50 мм (для води); матеріал проточної частини - фторопласт; вихід 4-20 мА;	ПРЕ М-Ех	«Теплоком» / Постачальник УА	3 од.
<b>ВТОРИННІ ПРИЛАДИ ТА РЕГУЛЯТОРИ (Щит керування)</b>								
1В , 2В , 6В	Витрата	–	–	Щит	Регулятор мікропроцесорний одноканальний. Вхід 4-20 мА; вихід аналоговий 4-20 мА (для клапана); ПІД-регулювання; індикація цифрова	МІК-121	ПрАТ «Мікрол», м. Івано-Франківськ	3 од.
4В	Температура	–	–	Щит	Регулятор мікропроцесорний. Вхід ТСП (опір); вихід аналоговий; функція ПІД-регулювання; сигналізація граничних значень	МІК-121	ПрАТ «Мікрол»	1 од.
3В	Рівень	–	–	Щит	Регулятор мікропроцесорний. Вхід 4-20 мА; вихід аналоговий; сигналізація рівнів	МІК-121	ПрАТ «Мікрол»	1 од.

ЛМ4 1МП.02.100.000

Інд. змін.

Дата видання

Мова  
УА

Аркуш  
178

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5В	Тиск	–	–	Щит	Індикатор технологічний мікропроцесорний з функцією сигналізації. Вхід 4-20 мА; релейні виходи для сигналізації аварії	ІТМ-11	ПрАТ «Мікрол»	1 од.
7А	Керування	Електродвигун	–	Щит	Блок керування електродвигуном (кнопковий пост «Пуск/Стоп» + індикація). Виконання щитове	ПКУ-15	ЗАТ «Променергоавтоматика»	1 од.
<b>ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ</b>								
1Г, 2Г, 6Г	–	–	–	Трубопровід	Виконавчий механізм мембранний пневматичний (МЕМ) з регулювальним клапаном. $D_y=25$ мм (1Г, 2Г), $D_y=50$ мм (6Г); матеріал корпусу 12Х18Н10Т; у комплекті з електропневматичним позиціонером (вхід 4-20 мА)	МЕ М-250	Завод «Промприлад», Івано-Франківськ	3 од.
<b>ЕЛЕКТРОАПАРАТУРА ТА МОНТАЖНІ ВИРОБИ</b>								
НЛ1. .. НЛ7	Сигналізація	–	–	Щит	Арматура світлосигнальна (лампа) світлодіодна. Кольори: Зелений (Робота/Норма), Червоний (Аварія/Стоп), Жовтий (Попередження); 24В	AD-22D S	«АсКо-Укрем»	7 од.

ЛМ4 1МП.02.100.000

Інд. змін.

Дата видання

Мова  
UA

Аркуш  
179

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
–	–	–	–	–	Кабель контрольний екранований (для аналогових сигналів 4-20 мА). Мідний, 2х 0,75 мм <sup>2</sup>	МКШ	Завод «Південкабель»	150 м
–	–	–	–	–	Кабель силовий (для клапанів та живлення). Мідний, 3х1,5 мм <sup>2</sup>	ВВГнг	Завод «Південкабель»	100 м
–	–	–	–	–	Труба сталева водогазопровідна 20 мм (для захисту кабелів у вибухонебезпечній зоні)	ДСТУ 8936	Дніпровський трубний завод	80 м
–	–	–	–	–	Коробка з'єднувальна вибухозахищена (для підключення датчиків). Алюмінієвий сплав, IP65, 4 вводи	КЗВ-20	ТОВ «ЗВО»	4 од.

**Додаток Б**  
**Документація до патентного дослідження**

Для знаходження об'єктів порівняння та перевірки патентної чистоти конструкції проведений патентний пошук. Розділ оформлено за [57].

## РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ № ЛМ41МП.02.101РП

Найменування теми: Реактор з перемішуючим пристроєм

шифр теми ЛМ41МП.02.101

Етап: Проектування апарата та його основних частин

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень:

ЛМ41МП.02.101 14.09.2025

Обґрунтування регламенту пошуку:

**Предмет пошуку:** реактор з перемішуючим пристроєм (об'єктом пошуку є винаходи та корисні моделі).

**Мета пошуку інформації** – визначення патентної ситуації щодо апаратів з перемішуючим пристроєм (визначення патентноздатності проєктованого апарата і визначення тенденцій розвитку даного напрямку в техніці).

**Визначення держав пошуку.** Встановлюємо такі держави пошуку: усі держави, окрім РФ та РБ.

**Ретроспективність.** Термін дії патенту на винахід в Україні – 20 років з дати подання заявки, на корисну модель – 10 років з дати подання заявки, тому регламент пошуку встановлюємо такий: 2024–2025 роки.

**Класифікаційні індекси.** Міжнародна патентна класифікація: МПК – B01F27/112; B01F27/19; B01J19/00; B01J19/18; B01J8/24; C08F14/06; C08F2/01; C08F110/06; F28G7/00.

Уніфікована десяткова класифікація УДК 66.095

**Джерела інформації:** 1) Патентна інформація: описи до винаходів, цифрова база патентів України та світу. 2) Науково-технічна інформація: монографії з тепломасообмінних процесів, підручники й навчальні посібники з курсу процесів та апаратів хімічних технологій.

Початок пошуку 14.09.2025 Закінчення пошуку 25.10.2025

ДОВІДКА ПРО ПОШУК № ЛМ41МП.02.101 ДП

Завдання на проведення патентних досліджень ЛМ41МП.02.101.000  
(номер, дата)

Етап – Проектування апарата та його складових частин.

Номер, дата, завдання на проведення патентних досліджень

ЛМ41МП 14.09.2025

Номер, дата регламенту пошуку ЛМ41МП.02.101 РП 14.09.2025,

Початок пошуку 14.09.2025 Закінчення пошуку 25.10.2025

Таблиця Б.1 – Регламент пошуку (форма А.1 згідно ДСТУ 3575-97)

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси МПК, НПК, МКПЗ, МКТП, УДК	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
Реактор з перемішувачим пристроєм	Визначення Патентно-ноздатності проєктованого апарата й тенденції розвитку цього напрямку в техніці	Україна, Велика Британія, США, Німеччина, Франція, Чехія, Японія, Китай, Швейцарія, Канада	МПК: B01F27/112; B01F27/19; B01J19/00; B01J19/18; B01J8/24; C08F14/06; C08F2/01; C08F110/06; F28G7/00.  УДК 66.095	2024–2025	Національні і зарубіжні офіційні бюлетені. Описи винаходів і корисних моделей; Всесвітня організація інтелектуальної власності або ВОІВ (англ. World Intellectual Property Organization, WIPO)

Таблиця Б.2 – Джерела інформації, які використані під час патентного пошуку

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науковотехнічна інформація
Реактор з перемішуючим пристроєм	Україна, Велика Британія, США, Німеччина, Франція, Чехія, Японія, Китай, Швейцарія, Канада	МПК: B01F27/11 2; B01F27/19; B01J19/00; B01J19/18; B01J8/24; C08F14/06; C08F2/01; C08F110/0 6; F28G7/00.  УДК 66.095	Фонд НТУУ «КПІ» Державний патентний фонд бази даних об'єктів промислової власності, до яких надається безоплатний доступ в Інтернеті <a href="http://ep.espacenet.com/">http://ep.espacenet.com/</a> <a href="http://Patents1.ic.gc.ca/intro-e.html">http://Patents1.ic.gc.ca/intro-e.html</a> <a href="http://www.depatisnet.de/">http://www.depatisnet.de/</a>	Описи винаходів патентів України №№1–60000.  Описи корисних моделей патентів України №№ 1–2000.  Описи винаходів патентів США №№ 2000000–2180000.	Я.М Корнієнко Процеси та обладнання хімічної технології. / К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 300с. Мікульонок І. О. Інтелектуальна власність та патентознавство [Електронний ресурс]: підручник для студентів, які навчаються за програмами підготовки магістрів / І. О. Мікульонок; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 3-тє вид., переробл. та доп. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,71 Мбайт). – Київ: Політехніка, 2019. – 246 с.

Таблиця Б.3 – Винаходи, що відібрані для аналізу

Назва апарата	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомість щодо їхньої дії
Impeller reactor	Patent WO2025053431A1: IPC B01F27/112; B01F27/19; B01J19/00; B01J19/18; C08F14/06; C08F2/01; KR2024010739W Application 2024-07-24; Publication 2025-03-13	Діє
Production reactor of glycolic acid high polymer material	Patent CN222369095U: IPC B01J19/00; B01J19/18; CN202420995279U Application 2024-05-09; Publication 2025-01-21	Діє
Fluorine-containing high polymer material rotational flow bed end-capped reactor	Patent CN222855383U: IPC B01J8/24; CN202421688038U Application 2024-07-17; Publication 2025-05-13	Діє
Kettle reactor with polymer online removal function and application	Patent CN119971966A: IPC B01J19/00; B01J19/18; F28G7/00; CN202311501570A Application 2023-11-10; Publication 2025-05-13	Діє
Polymerization reactor and method for producing propylene-based polymer	Patent US2025242325A1: IPC B01J19/00; B01J19/18; C08F110/06; C08F2/01; US202218697128A Application 2022-10-20; Publication 2025-07-31	Діє

Для знаходження об'єктів порівняння та перевірки патентної чистоти конструкції проведений патентний пошук. Розділ оформлено за [57].

## РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ № ЛМ41МП.02.102РП

Найменування теми: Центрифуга

шифр теми ЛМ41МП.02.102

Етап: Проектування апарата та його основних частин

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень:

ЛМ41МП.02.102 14.09.2025

Обґрунтування регламенту пошуку:

**Предмет пошуку:** центрифуга (об'єктом пошуку є винаходи та корисні моделі).

**Мета пошуку інформації** – визначення патентної ситуації щодо апаратів з перемішуючим пристроєм (визначення патентноздатності проєктованого апарата і визначення тенденцій розвитку даного напрямку в техніці).

**Визначення держав пошуку.** Встановлюємо такі держави пошуку: усі держави, окрім РФ та РБ.

**Ретроспективність.** Термін дії патенту на винахід в Україні – 20 років з дати подання заявки, на корисну модель – 10 років з дати подання заявки, тому регламент пошуку встановлюємо такий: 2024–2025 роки.

**Класифікаційні індекси.** Міжнародна патентна класифікація: МПК – B04B15/00; B04B7/02; B04B1/20; B04B9/12; F16M1/04; B04B13/00; B04B15/10; B04B15/12; B04B7/16; B04B7/18.

Уніфікована десяткова класифікація УДК 621.928.3

**Джерела інформації:** 1) Патентна інформація: описи до винаходів, цифрова база патентів України та світу. 2) Науково-технічна інформація: монографії з тепломасообмінних процесів, підручники й навчальні посібники з курсу процесів та апаратів хімічних технологій.

Початок пошуку 14.09.2025 Закінчення пошуку 25.10.2025

ДОВІДКА ПРО ПОШУК № ЛМ41МП.02.102 ДП

Завдання на проведення патентних досліджень ЛМ41МП.02.102.000  
(номер, дата)

Етап – Проектування апарата та його складових частин.

Номер, дата, завдання на проведення патентних досліджень

ЛМ41МП 14.09.2025

Номер, дата регламенту пошуку ЛМ41МП.02.102 РП 14.09.2025,

Початок пошуку 14.09.2025 Закінчення пошуку 25.10.2025

Таблиця Б.4 – Регламент пошуку (форма А.1 згідно ДСТУ 3575-97)

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси МПК, НПК, МКПЗ, МКТП, УДК	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
Центрифуга	Визначення Патентно-ноздатності проєктованого апарата й тенденції розвитку цього напрямку в техніці	Україна, Велика Британія, США, Німеччина, Франція, Чехія, Японія, Китай, Швейцарія, Канада	МПК: B04B15/00; B04B7/02; B04B1/20; B04B9/12; F16M1/04; B04B13/00; B04B15/10; B04B15/12; B04B7/16; B04B7/18.  УДК 621.928.3	2024–2025	Національні і зарубіжні офіційні бюлетені. Описи винаходів і корисних моделей; Всесвітня організація інтелектуальної власності або ВОІВ (англ. World Intellectual Property Organization, WIPO)

Таблиця Б.5 – Джерела інформації, які використані під час патентного пошуку

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науковотехнічна інформація
Центрифуга	Україна, Велика Британія, США, Німеччина, Франція, Чехія, Японія, Китай, Швейцарія, Канада	МПК: B04B15/00; B04B7/02; B04B1/20; B04B9/12; F16M1/04; B04B13/00; B04B15/10; B04B15/12; B04B7/16; B04B7/18.  УДК 621.928.3	Фонд НТУУ “КПІ” Державний патентний фонд бази даних об’єктів промислової власності, до яких надається безоплатний доступ в Інтернеті <a href="http://ep.espacenet.com/">http://ep.espacenet.com/</a> <a href="http://Patents1.ic.gc.ca/intro-e.html">http://Patents1.ic.gc.ca/intro-e.html</a> <a href="http://www.depatistnet.de/">http://www.depatistnet.de/</a>	Описи винаходів патентів України №№1–60000.  Описи корисних моделей патентів України №№ 1–2000.  Описи винаходів патентів США №№ 2000000–2180000.	Я.М Корнієнко Процеси та обладнання хімічної технології. / К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 300с. Мікульонок, І. О. Інтелектуальна власність та патентознавство [Електронний ресурс]: підручник для студентів, які навчаються за програмами підготовки магістрів / І. О. Мікульонок; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 3-тє вид., переробл. та доп. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,71 Мбайт). – Київ: Політехніка, 2019. – 246 с.

Таблиця Б.6 – Винаходи, що відібрані для аналізу

Назва апарата	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомість щодо їхньої дії
1	2	3
Horizontal centrifuge capable of automatically detecting leakage	Patent CN222240784U: IPC B04B15/00; B04B7/02; CN202420852838U Application 2024-04-23; Publication 2024-12-27	Діє
Solid-bowl centrifuge	Patent WO2025051481A1: IPC B04B1/20; B04B7/02; B04B9/12; F16M1/04; EP2024072451W Application 2024-08-08; Publication 2025-03-13	Діє
Zentrifugenschnecke, Vollmantelschneckenzenrifuge und Verfahren zur Herstellung einer Zentrifugenschnecke	Patent DE102024103034A1: IPC B04B1/20; DE102024103034A Application 2024-02-02; Publication 2025-08-07	Діє
Horizontal centrifuge	Patent WO2025153837A1: IPC B04B13/00; B04B15/00; B04B15/10; B04B15/12; B04B7/02; B04B7/16; B04B7/18; B04B9/12; IB2024050376W Application 2024-01-15; Publication 2025-07-24	Діє

Продовження таблиці Б.6

1	2	3
A decanter centrifuge for separating feed material	Patent WO2025114493A1: IPC B04B1/20; EP2024084012W Application 2024-11-28; Publication 2025-06-05	Діє

**Додаток В**  
**Програма розрахунку у Маткад**

ЛМ41МП.02.100.000

Інд. змін.

Дата видання

Мова  
UA

Аркуш  
193

Блок схема розрахунку перемішуючого пристрою реактору зображена на рисунку В.1.

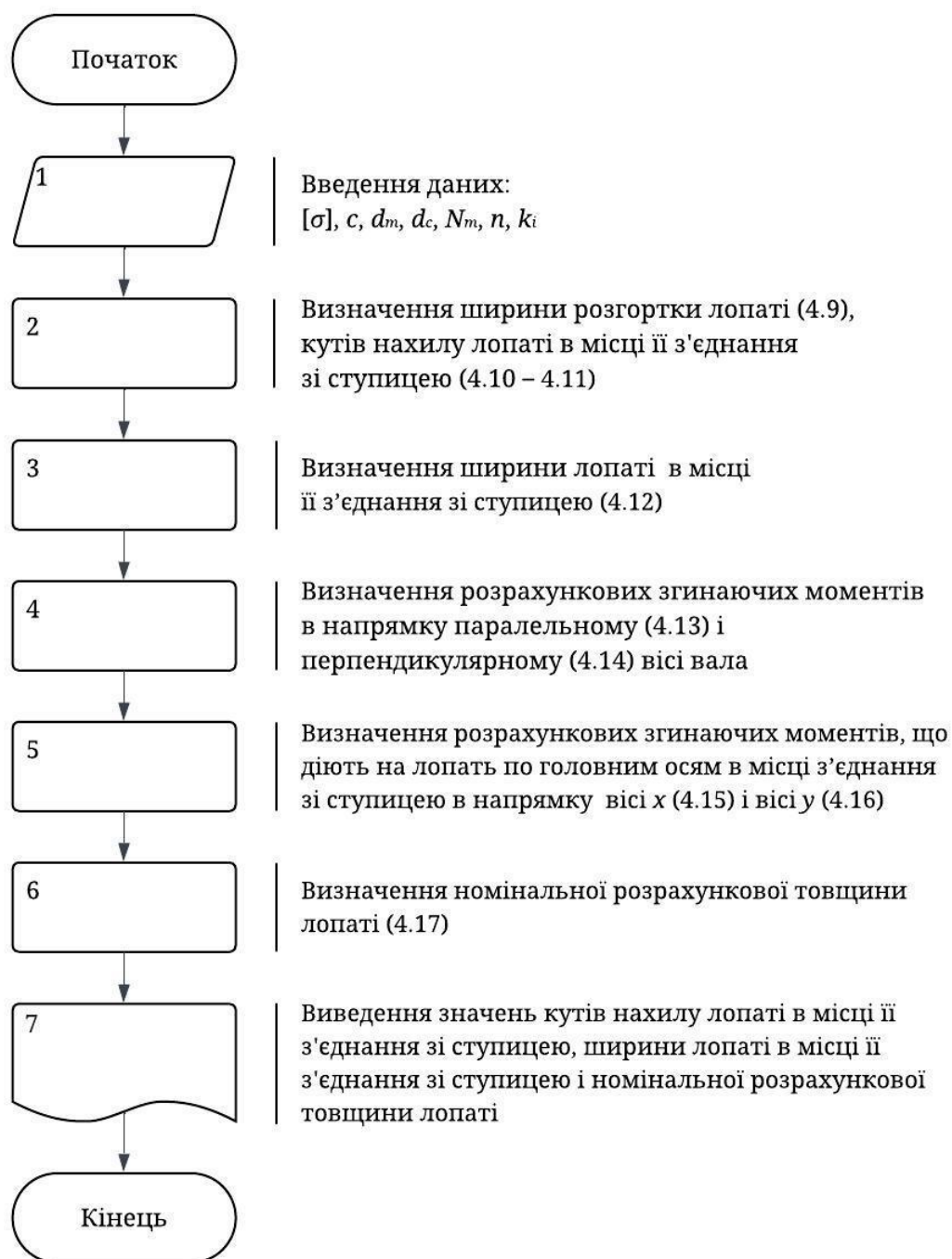


Рисунок В.1 – Блок схема розрахунку перемішуючого пристрою реактору

## Програма розрахунку перемішуючого пристрою реактору

$$[\sigma] := 196 \text{ МПа} \quad c := 1 \text{ мм} \quad d_m := 0.4 \text{ м} \quad d_c := 70 \text{ мм} \quad N_m := 1200 \text{ Вт} \quad n := 8.33 \text{ с}^{-1}$$

$$c := \frac{c}{10^3} = 1 \times 10^{-3} \text{ м} \quad [\sigma] := [\sigma] \cdot 10^6 = 1.96 \times 10^8 \text{ Па} \quad d_c := \frac{d_c}{10^3} = 0.07 \text{ м}$$

$$N_m := 1.2 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Ширину розгортки лопасті бі на різних радіусах знаходимо за формулою, м

$$k_0 := 0.182 \quad k_1 := 0.224 \quad k_2 := 0.26 \quad k_3 := 0.282 \quad k_4 := 0.31 \quad k_5 := 0.32$$

$$k_6 := 0.322 \quad k_7 := 0.308 \quad k_8 := 0.276 \quad k_9 := 0.212 \quad k_{10} := 0$$

$$b_0 := k_0 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.182 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.088$$

$$b_1 := k_1 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.224 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.109$$

$$b_2 := k_2 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.26 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.126$$

$$b_3 := k_3 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.282 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.137$$

$$b_4 := k_4 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.31 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.15$$

$$b_5 := k_5 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.32 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.155$$

$$b_6 := k_6 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.322 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.156$$

$$b_7 := k_7 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.308 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.149$$

$$b_8 := k_8 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.276 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.134$$

$$b_9 := k_9 \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0.212 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0.103$$

$$b_{10} := k_{10} \cdot \frac{d_m^2}{d_m - d_c} = 0 \cdot \frac{0.4^2}{0.4 - 0.07} = 0$$

Кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею, рад.:

$$\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{d_m}{\pi \cdot d_c}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{0.4}{\pi \cdot 0.07}\right) = 1.068 \quad \alpha_{\text{град}} := \alpha \cdot \frac{180}{\pi} = 61.199 \text{ град.}$$

$$\beta := 90 - \alpha = 90 - 61.199 = 28.801 \text{ град.} \quad \sin(\beta) := 0.482$$

Ширина лопаті в місці її з'єднання зі ступицею, м:

$$b := \frac{4 \cdot d_c^2 \cdot b_0}{\sin(\beta)^2 \cdot b_0^2 + 4 \cdot d_c^2} = \frac{4 \cdot 0.07^2 \cdot 0.088}{0.482^2 \cdot 0.088^2 + 4 \cdot 0.07^2} = 0.081$$

Радіус на якому ширина розгортки рівна  $b_0$  визначаємо за формулою, м:

$$R := d_c \cdot \left(\frac{b}{b_0} - 0.5\right) = 0.07 \cdot \left(\frac{0.081}{0.088} - 0.5\right) = 0.029$$

Розрахункові згинаючі моменти діючі на лопать, Н\*м:

- в напрямку паралельному вісі вала

$$M_u := \frac{0.298 \cdot (0.35 \cdot d_m - 0.5 \cdot d_c)}{d_m} \cdot \frac{N_m}{n} = \frac{0.298 \cdot (0.35 \cdot 0.4 - 0.5 \cdot 0.07)}{0.4} \cdot \frac{1.2 \cdot 10^3}{8.33} = 11.269$$

- в напрямку перпендикулярному вісі вала

$$M_{u1} := \frac{0.18 \cdot (0.3 \cdot d_m - 0.5 \cdot d_c)}{d_m} \cdot \frac{N_m}{n} = \frac{0.18 \cdot (0.3 \cdot 0.4 - 0.5 \cdot 0.07)}{0.4} \cdot \frac{1.2 \cdot 10^3}{8.33} = 5.51$$

Визначаємо розрахункові згинаючі моменти, що діють на лопать по головним вісям в місці з'єднання зі ступицею, Н\*м:

- в напрямку вісі x за формулою  $\sin(\alpha) := 0.876$   $\cos(\alpha) := 0.482$

$$M_{ux} := M_u \cdot \sin(\alpha) - M_{u1} \cdot \cos(\alpha) = 11.269 \cdot 0.876 - 5.51 \cdot 0.482 = 7.216$$

- в напрямку вісі y за формулою

$$M_{uy} := M_u \cdot \cos(\alpha) + M_{u1} \cdot \sin(\alpha) = 11.269 \cdot 0.482 + 5.51 \cdot 0.876 = 10.258$$

Номінальна розрахункова товщина лопаті

$$S_{\text{ном}} := \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\text{шв}}}{b_0 \cdot [\sigma]} + \frac{3 \cdot M_{\text{шк}}}{b_0^2 \cdot [\sigma]}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10.258}{0.088 \cdot 196000000} + \frac{3 \cdot 7.216}{0.088^2 \cdot 196000000}} = 1.903 \times 10^{-3}$$

Результати розрахунку за програмою:

кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею  $\alpha = 61.199$  град.;  $\beta = 28.801$  град.

ширина лопаті в місці її з'єднання зі ступицею  $b = 0.081$  м

номінальна розрахункова товщина лопаті,  $S = 1.903 \times 10^{-3}$  м

Висновок: враховуючи двусторонню прибавку на корозію  $c = 1 \times 10^{-3}$  м, округлюючи приймаємо товщину  $S_{\text{ном}} := 5 \cdot 10^{-3}$  м.

В таблиці В.1 наведено перелік ідентифікаторів використаних у даному розрахунку.

Таблиця В.1 – Перелік ідентифікаторів

Найменування величини	Позначення	Ідентифікатор	Розмірність
1	2	3	4
Допустиме напруження	$[\sigma]$	$[\sigma]$	МПа
Прибавка на корозію	$C$	$c$	м
Діаметр мішалки	$d_m$	$d_m$	м
Діаметр ступиці мішалки	$d_c$	$d_c$	м
Потужність на перемішування	$N_m$	$N_m$	Вт
Швидкість обертання мішалки	$N$	$n$	$c^{-1}$
Ширина розгортки лопасті на різних радіусах	$b_i$	$b_i$	м
Безрозмірний коефіцієнт	$k_i$	$k_i$	—
Кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею	$\alpha$	$\alpha$	$^\circ$
Кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею	$\beta$	$\beta$	$^\circ$
Ширина лопаті в місці її з'єднання зі ступицею:	$B$	$b$	м
Розрахунковий згинаючий момент в напрямку паралельному вісі вала	$M_{и}$	$M_{и}$	Н · м
Розрахунковий згинаючий момент в напрямку перпендикулярному вісі вала	$M_{и1}$	$M_{и1}$	Н · м

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4
Розрахунковий згинаючий момент, що діє на лопать по вісі $x$	$M_{ix}$	$M_{ix}$	$H \cdot m$
Розрахунковий згинаючий момент, що діє на лопать по вісі $y$	$M_{iy}$	$M_{iy}$	$H \cdot m$
Номінальна розрахункова товщина лопаті	$S$	$S$	$m$

Результати розрахунку за програмою розрахунку перемішуючого пристрою реактору наведено в таблиці В.2.

Таблиця В.2 – Результати розрахунку

Найменування величини	Позначення	Числове значення	Розмірність
Кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею	$\alpha$	61,2	$^{\circ}$
Кут нахилу лопаті в місці її з'єднання зі ступицею	$\beta$	28,8	$^{\circ}$
Ширина лопаті в місці її з'єднання зі ступицею	$b$	0,081	$m$
Товщина лопаток	$S$	$5 \cdot 10^{-3}$	$m$

## **Додаток Г**

### **Патенти, які використані в патентному дослідженні**

(19) 国家知识产权局



(12) 实用新型专利



(10) 授权公告号 CN 222240784 U

(45) 授权公告日 2024.12.27

(21) 申请号 202420852838.2

(22) 申请日 2024.04.23

(73) 专利权人 江苏高宏离心机制造有限公司  
地址 215621 江苏省苏州市张家港市乐余镇永利村乐丰路

(72) 发明人 王炳高 何晓平 顾亮

(74) 专利代理机构 苏州所术专利商标代理事务所(普通合伙) 32473  
专利代理师 颜慧婷

(51) Int. Cl.

B04B 15/00 (2006.01)

B04B 7/02 (2006.01)

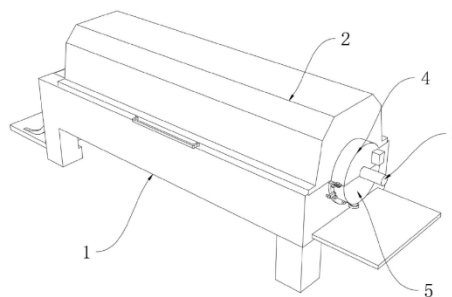
权利要求书1页 说明书3页 附图6页

(54) 实用新型名称

一种自动检测泄漏的卧式离心机

(57) 摘要

本实用新型公开了一种自动检测泄漏的卧式离心机,包括机架、设置于机架上端内侧的转鼓、设置与转鼓端部且向外延伸的转轴以及可拆卸设置于机架顶部且对转鼓罩设的上盖,所述上盖和机架端部与转轴的对应处设置有泄漏检测机构,所述泄漏检测机构包括设置于上盖端部与转轴对应处的上盖壳,所述机架端部与转轴的对应处设置有与上盖壳适配的下盖壳,所述上盖壳的内侧设置有湿气传感器,所述上盖壳的外侧设置有与湿气传感器电性连接的报警器。该自动检测泄漏的卧式离心机,通过在上盖、机架与转鼓端部的转轴处设置的上盖壳、下盖壳、报警器、湿气传感器的相互配合可以实现对密封处的泄漏进行自动检测,便于及时维检,不会污染设备和工作环境。



CN 222240784 U



US 20250242325A1

(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication**  
**MINO**

(10) **Pub. No.: US 2025/0242325 A1**

(43) **Pub. Date: Jul. 31, 2025**

(54) **POLYMERIZATION REACTOR AND METHOD FOR PRODUCING PROPYLENE-BASED POLYMER**

*C08F 2/01* (2006.01)  
*C08F 110/06* (2006.01)

(52) **U.S. CL.**  
CPC ..... *B01J 19/18* (2013.01); *B01J 19/0066* (2013.01); *C08F 2/01* (2013.01); *C08F 110/06* (2013.01); *B01J 2219/182* (2013.01)

(71) Applicants: **JAPAN POLYPROPYLENE CORPORATION**, Tokyo (JP); **JNC CORPORATION**, Tokyo (JP)

(72) Inventor: **Hiroshi MINO**, Tokyo (JP)

(57) **ABSTRACT**

(73) Assignees: **JAPAN POLYPROPYLENE CORPORATION**, Tokyo (JP); **JNC CORPORATION**, Tokyo (JP)

Provided is a polymerization reactor configured to keep the lubrication condition between the stirrer shaft of the stirrer disposed inside the reaction tank of the polymerization reactor and bearing in good condition, and configured to possess smooth and stable stirring performance and high durability that provides long-term resistance to damage. Also provided is a method for producing a propylene-based polymer. A polymerization reactor comprising: a reaction tank, a stirrer which is disposed inside the reaction tank and which has a stirrer shaft and stirring blades fixed on the stirrer shaft, and a bearing which bears an end portion of the stirrer shaft, wherein, as a lubricant, a fluorine-based oil is used in a gap between the stirrer shaft and the bearing. A method for producing a propylene-based polymer, wherein the polymerization reactor is used.

(21) Appl. No.: **18/697,128**

(22) PCT Filed: **Oct. 20, 2022**

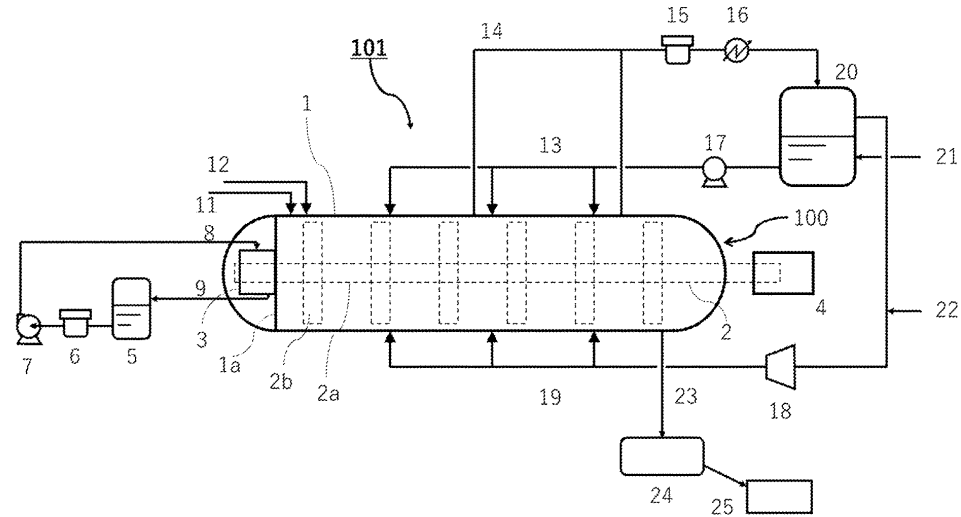
(86) PCT No.: **PCT/JP2022/039078**

§ 371 (c)(1),

(2) Date: **Nov. 6, 2024**

**Publication Classification**

(51) **Int. Cl.**  
*B01J 19/18* (2006.01)  
*B01J 19/00* (2006.01)



(19) 国家知识产权局



(12) 发明专利申请



(10) 申请公布号 CN 119971966 A

(43) 申请公布日 2025.05.13

(21) 申请号 202311501570.4

(22) 申请日 2023.11.10

(71) 申请人 中国石油天然气股份有限公司  
地址 100007 北京市东城区东直门北大街9号

(72) 发明人 曲家波 蒋岩 荣丽丽 王力搏  
王亚丽 王华 王锐 赵铁凯  
徐婷婷 刘丽军

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127  
专利代理师 刘静 姚亮

(51) Int. Cl.

B01J 19/18 (2006.01)

B01J 19/00 (2006.01)

F28G 7/00 (2006.01)

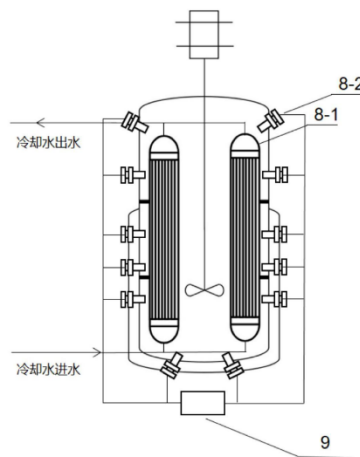
权利要求书2页 说明书12页 附图3页

(54) 发明名称

一种具有聚合物在线脱除功能的釜式反应器及应用

(57) 摘要

本发明公开了一种具有聚合物在线脱除功能的釜式反应器及应用。所述釜式反应器包括：反应器外壳、换热器、搅拌器、超声波换能器和超声波发生器；所述搅拌器的搅拌轴设置于所述反应器内的中轴位置；在所述反应器内环绕所述搅拌轴设置有多个所述换热器；所述超声波换能器安装于所述反应器外壳上，且位于所述反应器的内壁与换热器之间；所述超声波发生器位于所述反应器之外，并与所述超声波换能器电连接。本发明通过在反应器壁内部四周安装超声波换能器，通过超声波振荡作用阻止反应产生的低分子聚合物粘附在换热管上，实现聚合反应器长周期稳定运行。



CN 119971966 A

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property  
Organization  
International Bureau

(43) International Publication Date  
24 July 2025 (24.07.2025)



(10) International Publication Number  
**WO 2025/153837 A1**

(51) International Patent Classification:

*B04B 7/02* (2006.01)      *B04B 13/00* (2006.01)  
*B04B 7/16* (2006.01)      *B04B 15/00* (2006.01)  
*B04B 7/18* (2006.01)      *B04B 15/10* (2006.01)  
*B04B 9/12* (2006.01)      *B04B 15/12* (2006.01)

(21) International Application Number:

PCT/IB2024/050376

(22) International Filing Date:

15 January 2024 (15.01.2024)

(25) Filing Language:

English

(26) Publication Language:

English

(71) Applicant: **STAMEX TECHNOLOGY COMPANY LIMITED** [TH/TH]; 329, Mu 3, Nong Bua Sala Sub-

district, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima, 30000 (TH).

(72) Inventors: **HIRD, Wayne**; 3 Vane St, Tingalpa, Brisbane, Queensland 4173 (AU), **SCHUUR, Mark**; 3/5 Soi 19, Mit-traphap Road, Muang, Nakhon Ratchasima, 30280 (TH).

(74) Agent: **ANANDA INTELLECTUAL PROPERTY LIMITED**; 16th Floor, Unit A1, Buhajit Building, No. 20 North Sathorn Road, Silom, Bangrak, Bangkok, 10500 (TH).

(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,

(54) Title: HORIZONTAL CENTRIFUGE



WO 2025/153837 A1

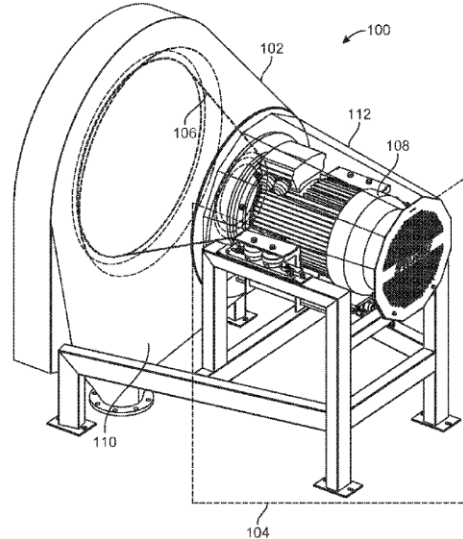


FIG. 1

(57) Abstract: The present invention discloses a horizontal centrifuge using the gyroscopic effect with horizontal centrifuge sieve assembly comprising a sieve basket disposed within the sieve assembly. A motor is coupled to the horizontal centrifuge sieve assembly and enables the sieve basket to rotate along with the horizontal centrifuge sieve assembly. The sieve basket is mounted to the motor shaft of the horizontal centrifuge sieve assembly. The support and drive structure comprising a support frame structure configured for mechanically supporting and transferring the weight of the horizontal centrifuge to the ground and at least a set of gimbal mounts configured for allowing rotating parts to freely spin to maintain a steady direction of its axis of rotation and prevent transfer of significant forces to the support frame structure. The motor supporting structure configured for holding the motor which is further connected with the horizontal centrifuge sieve assembly and securing the gimbal mounts.

[Continued on next page]



(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
13. März 2025 (13.03.2025)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2025/051481 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:

*B04B 7/02* (2006.01)      *B04B 9/12* (2006.01)  
*B04B 1/20* (2006.01)      *F16M 1/04* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/072451

(22) Internationales Anmeldedatum:  
08. August 2024 (08.08.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2023 123 680.6  
04. September 2023 (04.09.2023) DE

(71) Anmelder: **GEA WESTFALIA SEPARATOR GROUP GMBH** [DE/DE]; Werner-Habig-Str. 1, 59302 Oelde (DE).

(72) Erfinder: **DRIFTSCHROEER, Christian**; Maria-Rosenthal-Ring 13a, 33129 Delbrück (DE). **KNOSPE, Volker**; Zeisigweg 31, 48167 Münster (DE).

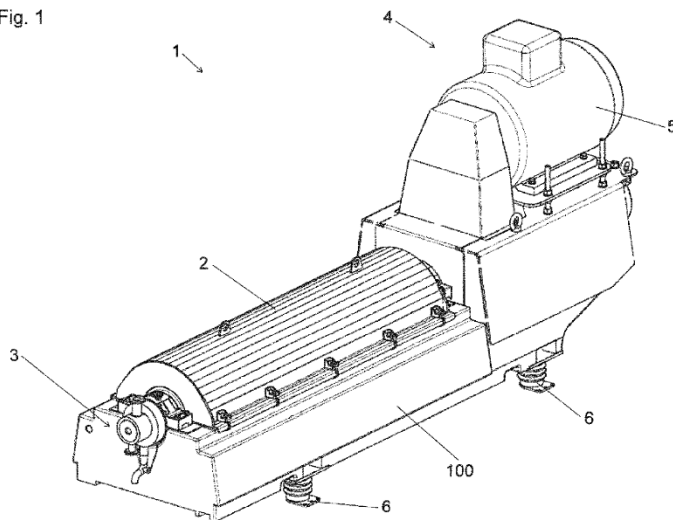
(74) Anwalt: **SPECHT, Peter** et al.; Loesenbeck - Specht - Dantz, Am Zwinger 2, 33602 Bielefeld (DE).

(81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: SOLID-BOWL CENTRIFUGE

(54) Bezeichnung: VOLLMANTEL-ZENTRIFUGE

Fig. 1



(57) **Abstract:** The invention relates to a solid-bowl centrifuge for processing a suspension (Su) in a centrifugal field, wherein the suspension (Su) is divided into at least one liquid phase (Fl) and a slurry or solid phase (Fe), comprising a machine frame (100) and a rotor which is rotatably mounted in the machine frame (100). The invention is characterized in that the machine frame (100) consists entirely or substantially of UHPC.

(57) **Zusammenfassung:** Eine Vollmantel-Zentrifuge zur Verarbeitung einer Suspension (Su) in einem Zentrifugalfeld, wobei die Suspension (Su) in wenigstens eine Flüssigkeitsphase (Fl) und eine Schlamm- oder Feststoffphase (Fe) getrennt wird, mit einem Maschinengestell (100) und einem in dem Maschinengestell (100) drehbar gelagerten Rotor, zeichnet sich dadurch aus, dass das Maschinengestell (100) ganz oder im Wesentlichen aus UHPC besteht.

WO 2025/051481 A1

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(19) 国家知识产权局



(12) 实用新型专利



(10) 授权公告号 CN 222855383 U

(45) 授权公告日 2025.05.13

(21) 申请号 202421688038.8

(22) 申请日 2024.07.17

(73) 专利权人 成都市星凯科技有限责任公司  
地址 610500 四川省成都市新都区新都镇  
天缘路一段99号

(72) 发明人 周凤举 陈世桦

(74) 专利代理机构 成都其知创新专利代理事务  
所(普通合伙) 51326  
专利代理师 曾凡波

(51) Int.Cl.  
B01J 8/24(2006.01)

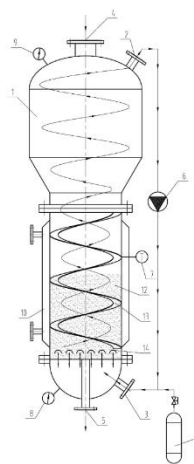
权利要求书1页 说明书3页 附图1页

(54) 实用新型名称

含氟高分子材料旋流床封端反应器

(57) 摘要

本实用新型公开含氟高分子材料旋流床封端反应器,包括反应塔、氟氮混合气钢瓶、外循环管线;所述反应塔的上段设有气体出口、粉体材料进口,中段外壁设有加热装置,中段内壁设有螺旋导流板,中段底部设有底板,下段设有气体进口;所述底板上设有管口,其与中段连通,且过下段底部穿出;所述氟氮混合气钢瓶与气体进口连通;所述外循环管线两端分别与气体出口、气体进口连通。本实用新型通过由下而上形成旋流状的内循环的氟氮混合气与反应段的含氟高分子材料进行传质反应,旋流状增大了气-固反应的路程以满足气-固呈稀相流化态传质反应的情况,达到含氟高分子材料自由端基封端的目的;从而为我国氟材料产品品质的提升,提供装备技术条件。



CN 222855383 U

(19) 国家知识产权局



(12) 实用新型专利



(10) 授权公告号 CN 222369095 U

(45) 授权公告日 2025.01.21

(21) 申请号 202420995279.0

(22) 申请日 2024.05.09

(73) 专利权人 泰兴市沃特尔化工有限公司  
地址 225441 江苏省泰州市泰兴市经济开发  
区滨江路16号及16-1号

(72) 发明人 姚如凤 吴强

(74) 专利代理机构 广州万研知识产权代理事务  
所(普通合伙) 44418  
专利代理师 韦肖燕

(51) Int.Cl.

B01J 19/18 (2006.01)

B01J 19/00 (2006.01)

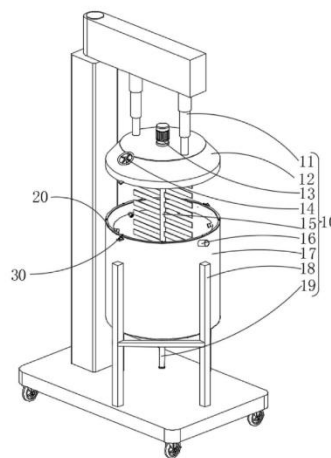
权利要求书1页 说明书3页 附图3页

(54) 实用新型名称

一种羟基乙酸高分子材料的生产反应器

(57) 摘要

本实用新型公开一种羟基乙酸高分子材料的生产反应器,包括:主体组件;密封组件,包括设置的凹槽、连接在凹槽内的第一弹簧、连接在第一弹簧上端的连接块、开设在连接块上的螺纹孔、连接在螺纹孔内的螺丝、连接在螺丝上的密封圈、以及开设密封圈上的沉孔;定位组件。密封圈因螺丝卡牢在罐体顶部,长久下来,密封圈会产生永久变形,就需要及时更换新的密封圈,若采用人为拧松螺丝来缓解密封圈压力,会浪费大量人力资源,又无法保证及时性。通过设置的密封组件配合主体组件使用,可在主体组件不使用时,打开顶盖后,密封圈在弹簧作用下自动弹起,处于松弛状态,可极大程度延长密封圈使用寿命,降低生产成本。



CN 222369095 U

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구  
국제사무국

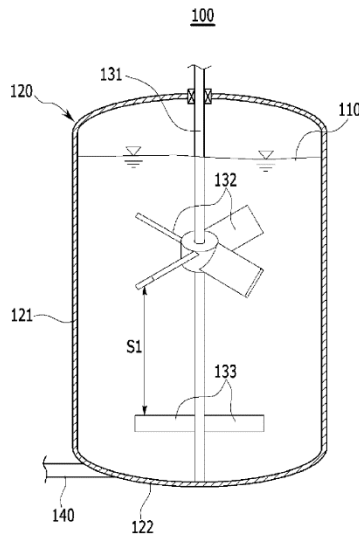
(43) 국제공개일  
2025년 3월 13일 (13.03.2025)



(10) 국제공개번호  
WO 2025/053431 A1

- (51) 국제특허분류: **B01J 19/00** (2006.01) **C08F 14/06** (2006.01)  
**B01J 19/18** (2006.01) **B01F 27/12** (2022.01)  
**C08F 2/01** (2006.01) **B01F 27/19** (2022.01)
- (21) 국제출원번호: PCT/KR2024/010739
- (22) 국제출원일: 2024년 7월 24일 (24.07.2024)
- (25) 출원언어: 한국어
- (26) 공개언어: 한국어
- (30) 우선권정보: 10-2023-0117870 2023년 9월 5일 (05.09.2023) KR
- (71) 출원인: 한화솔루션 주식회사 (HANWHA SOLUTIONS CORPORATION) [KR/KR]; 04541 서울특별시 중구 청계천로86, Seoul (KR).
- (72) 발명자: 안우열 (AHAN, Woo Youl); 34128 대전광역시 유성구 가정로 76, Daejeon (KR). 김영조 (KIM, Young Jo); 34128 대전광역시 유성구 가정로 76, Daejeon (KR). 이해원 (LEE, Hye Won); 34128 대전광역시 유성구 가정로 76, Daejeon (KR). 한기도 (HAN, Keedo); 34128 대전광역시 유성구 가정로 76, Daejeon (KR).
- (74) 대리인: 유미특허법인 (YOU ME PATENT AND LAW FIRM); 06134 서울특별시 강남구 테헤란로 115, Seoul (KR).
- (81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.
- (84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BI, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(54) Title: IMPELLER REACTOR  
(54) 발명의 명칭: 임펠러 반응기



(57) Abstract: A reactor according to an embodiment of the present invention comprises: a reaction vessel; and an agitator including two or more stages of impellers, wherein the impellers of each stage are positioned at arbitrary intervals along the shaft direction of the agitator, and the uppermost impeller in the agitator is a pitch paddle-type impeller having a blade angle of 5 to 50 degrees with respect to the agitator shaft and can generate an upward flow in the reaction vessel. The reactor can improve fluidity and suppress the generation of fish eyes by employing a pitch paddle-type impeller as the uppermost impeller.

(57) 요약서: 본 발명의 구현예에 따른 반응기는, 반응 용기; 및 2 단 이상의 임펠러를 포함하는 교반기;를 포함하며, 상기 각 단의 임펠러는 상기 교반기 축 방향을 따라 임의의 간격을 두고 위치하고, 상기 교반기에서 최상단 임펠러는 블레이드 각도가 교반기 축에 대하여 5 내지 50도인 피치 패들형으로서, 반응 용기 내에 상방 흐름을 형성할 수 있다. 상기 반응기는 최상단 임펠러로 피치 패들형의 임펠러를 적용하여 유동성을 개선시키고 피쉬 아이 생성을 억제시킬 수 있다.

WO 2025/053431 A1

[다음 쪽 계속]

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property  
Organization  
International Bureau

(43) International Publication Date  
05 June 2025 (05.06.2025)



(10) International Publication Number  
**WO 2025/114493 A1**

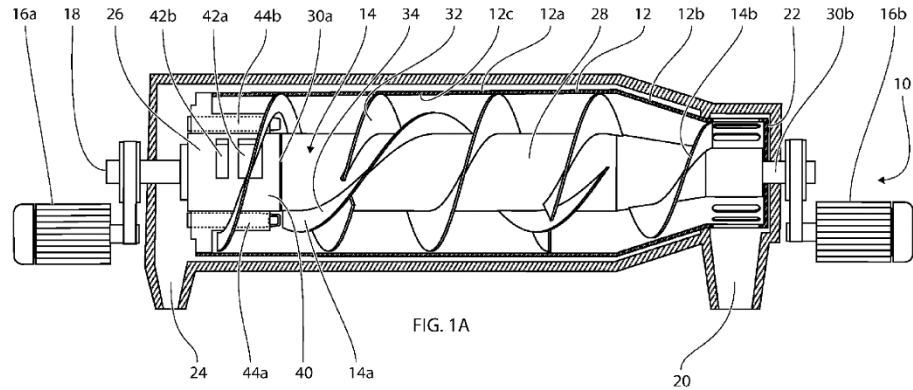
- (51) **International Patent Classification:**  
*B04B 1/20* (2006.01)
- (21) **International Application Number:**  
PCT/EP2024/084012
- (22) **International Filing Date:**  
28 November 2024 (28.11.2024)
- (25) **Filing Language:** English
- (26) **Publication Language:** English
- (30) **Priority Data:**  
23213451.0 30 November 2023 (30.11.2023) EP  
23213452.8 30 November 2023 (30.11.2023) EP  
23213454.4 30 November 2023 (30.11.2023) EP  
23213455.1 30 November 2023 (30.11.2023) EP
- (71) **Applicant:** ALFA LAVAL CORPORATE AB [SE/SE];  
SE-221 00 LUND (SE).
- (72) **Inventor:** MADSEN, Bent; Snogegaardsvej 29A, 2820  
GENTOFTE (DK).
- (74) **Agent:** ALFA LAVAL ATTORNEYS, ALFA LAVAL  
CORPORATE AB; Group Patent, SE-221 00 LUND (SE).
- (81) **Designated States** (*unless otherwise indicated, for every kind of national protection available*): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ,

CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) **Designated States** (*unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available*): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), European (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Declarations under Rule 4.17:**  
— of inventorship (Rule 4.17(iv))

(54) **Title:** A DECANter CENTRIFUGE FOR SEPARATING FEED MATERIAL



(57) **Abstract:** The present invention relates to a conveyor screw for a decanter centrifuge. The conveyor screw defines a cylindrical portion and a conical portion and comprises a central body. The conveyor screw defines a first flight attached to the central body. The first flight defines a first diameter and a pitch angle being less than 20°. The conveyor screw further defines a second flight attached to the central body. The second flight has the same winding direction as the first flight and being at least partially intertwined with the first flight. The second flight defines a pitch angle being greater than 30° and the second diameter being smaller than the first diameter.

WO 2025/114493 A1

[Continued on next page]

**Додаток Д**  
**Комп'ютерне моделювання**

ЛМ41МП.02.100.000

Інд. змін.

Дата видання

Мова  
UA

Аркуш  
211

# **CFD аналіз роботи модернізованої мішалки для приготування каталізатора Циглера-Натта**

## **Вступ**

Поліетилен високої густини є термопластичним полімером, який широко використовується завдяки своїм фізико-механічним властивостям, таким як висока міцність, хімічна стійкість та низька проникність для вологи. Виробництво даного виду поліетилену здійснюється шляхом полімеризації етилену за низького тиску в присутності каталізаторів Циглера-Натта.

Каталітичний комплекс отримують у реакторі із перемішуючим пристроєм на основі діетилалюмінійхлориду та чотирехлористого титану. Він випадає з розчину у вигляді дисперсного (колоїдного) темного порошку з доволі складною структурою. Цей каталізатор забезпечує іонно-координаційний механізм полімеризації, що дозволяє отримувати лінійні полімери з високим ступенем кристалічності.

Важливим фактором, що впливає на перебіг процесу та властивості полімеру, є співвідношення вихідних речовин при приготуванні каталізатора. Приготування каталізаторного комплексу здійснюється за температури близько 30 °С. Реакція супроводжується виділенням теплоти, оскільки вона є екзотермічною.

Робота по модернізації перемішуючого пристрою реактора та симуляційний експеримент доцільності модернізації у SolidWorks проводились в рамках участі у гуртку інженерного спрямування «Технічна майстерня».

## Д.1 Матеріали та методи

Для досягнення мети роботи та всебічного аналізу фізичних процесів, що протікають у досліджуваному реакторі, було застосовано методи обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics).

Цей підхід є сучасним напрямком механіки суцільних середовищ, який дозволяє за допомогою чисельних методів моделювати рух потоків рідин та газів, а також супутні процеси теплообміну.

Використання комп'ютерної симуляції надає можливість отримати детальну картину розподілу термодинамічних параметрів та оцінити ефективність конструкції без проведення високовартісних натурних експериментів. В якості основного програмного інструментарію для проведення розрахунків було обрано середовище SOLIDWORKS Flow Simulation, яке забезпечує безшовну інтеграцію з CAD-моделями та високу точність обчислень.

Математичною основою реалізованої моделі є система диференціальних рівнянь у частинних похідних, зокрема рівняння Нав'є-Стокса, що доповнюються рівняннями нерозривності та збереження енергії. Для перетворення цих рівнянь у вигляд, придатний для комп'ютерного розрахунку, у програмному комплексі використовується метод скінченних об'ємів (Finite Volume Method).

Суть даного методу полягає у дискретизації розрахункової області, тобто її розбитті на скінченну кількість елементарних контрольних об'ємів (комірок сітки). Вузлові точки, в яких шукаються значення фізичних величин, розташовуються в геометричних центрах цих об'ємів. Для кожного елемента складаються балансові співвідношення потоків через його грані, що дозволяє сформулювати та вирішити систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно шуканих змінних, таких як тиск, швидкість та температура.

Процедура моделювання виконувалася у чіткій логічній послідовності, що включала етапи препроцесингу, безпосереднього розрахунку та постпроцесингу.

На підготовчому етапі здійснювалася побудова тривимірної геометрії, вибір типу задачі та задання фізико-хімічних властивостей робочого середовища. Важливим кроком було визначення граничних умов, які описують параметри потоку на вході та виході з області, а також умови теплообміну та шорсткості на стінках моделі.

Після налаштування параметрів виконувалася генерація розрахункової сітки та запуск ітераційного процесу вирішення рівнянь до моменту стабілізації результатів.

Завершальним етапом став аналіз отриманих даних, який включав візуалізацію полів розподілу швидкостей, тиску і температур, а також побудову траєкторій руху частинок потоку для верифікації прийнятих технічних рішень.

## **Д.2 Результати та їх обговорення**

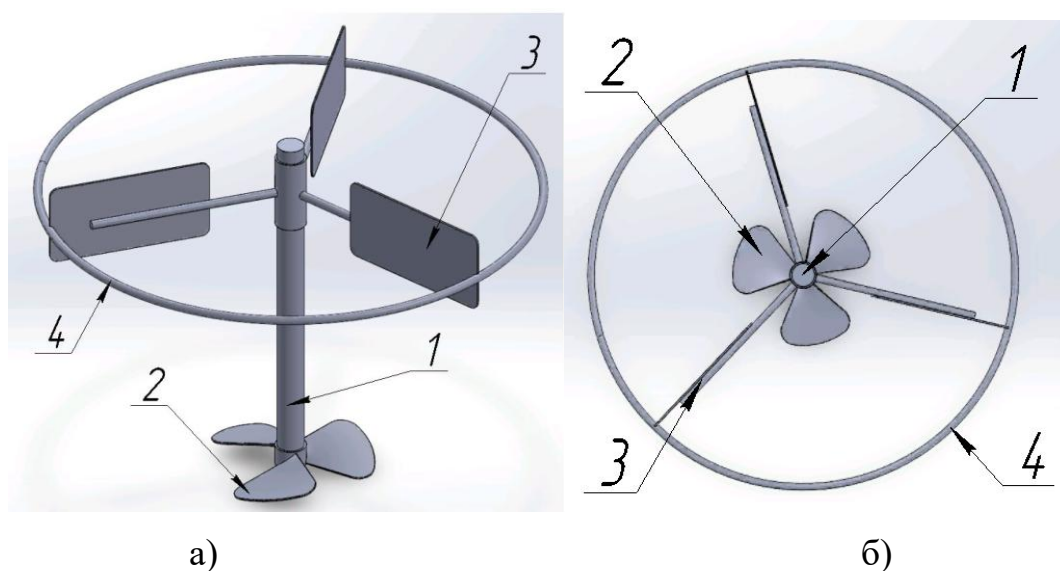
Під час приготування каталізаторного комплексу важливо забезпечити якість кінцевого продукту, гідродинамічні умови перемішування, оптимальний час, температуру, співвідношення компонентів та відведення теплоти.

Для виконання зазначеного процесу виготовлення каталізатора оптимальним вибором буде реактор із пропелерною мішалкою, яка забезпечує необхідні гідродинамічні умови перемішування та U-подібною рубашкою, що ефективно відводить теплоту, яка виділяється під час реакції. У процесі роботи відбувається теплообмін між каталізаторним комплексом та охолоджувальною водою.

Для покращення гідродинамічних умов перемішування запропоновано модернізувати перемішувачий пристрій. Мішалка містить у нижньому ярусі

стандартний пропелерний перемішуючий пристрій 2, який забезпечує осьові потоки рідини та добре скаламучує осад, а у верхньому – лопатковий (радіальний) 3, рисунок Д.1а. Три прямі прямокутні лопатки 3 розташовані у шаховому порядку відносно нижнього ярусу, рисунок Д.1б. Лопатки орієнтовані на створення потоку спрямованого вниз, назустріч висхідному потоку від пропелерної мішалки.

Ідея модернізації виконана в середовищі SolidWorks зображена на рисунку Д.1.



1 – вал, 2 – пропелерна мішалка, 3 – лопатки, 4 – кільце жорсткості

Рисунок Д.1 – Модернізований перемішуючий пристрій

Для прямокутних лопатей верхнього ярусу передбачене металеве кільце жорсткості 4, що з'єднує їхні зовнішні частини. Це необхідно для запобігання вигинанню та вібрації великих лопатей, забезпечуючи їх довговічність та стабільність гідродинамічних показників.

Шляхом зміни кута нахилу лопатей верхньої мішалки (30°, 45°, 60°, 90°) було визначено оптимальний кут, який забезпечує найкращу однорідність суспензії при мінімальній споживаній потужності. Також виконано експеримент

до модернізації, для кращого розуміння ефекта модернізації. Розподілення об'ємної концентрації каталізатору для апарату без модернізації зображено на рисунку Д.2а, та після модернізації в залежності від кута нахилу лопаток на рисунках Д.2б – Д.2д.

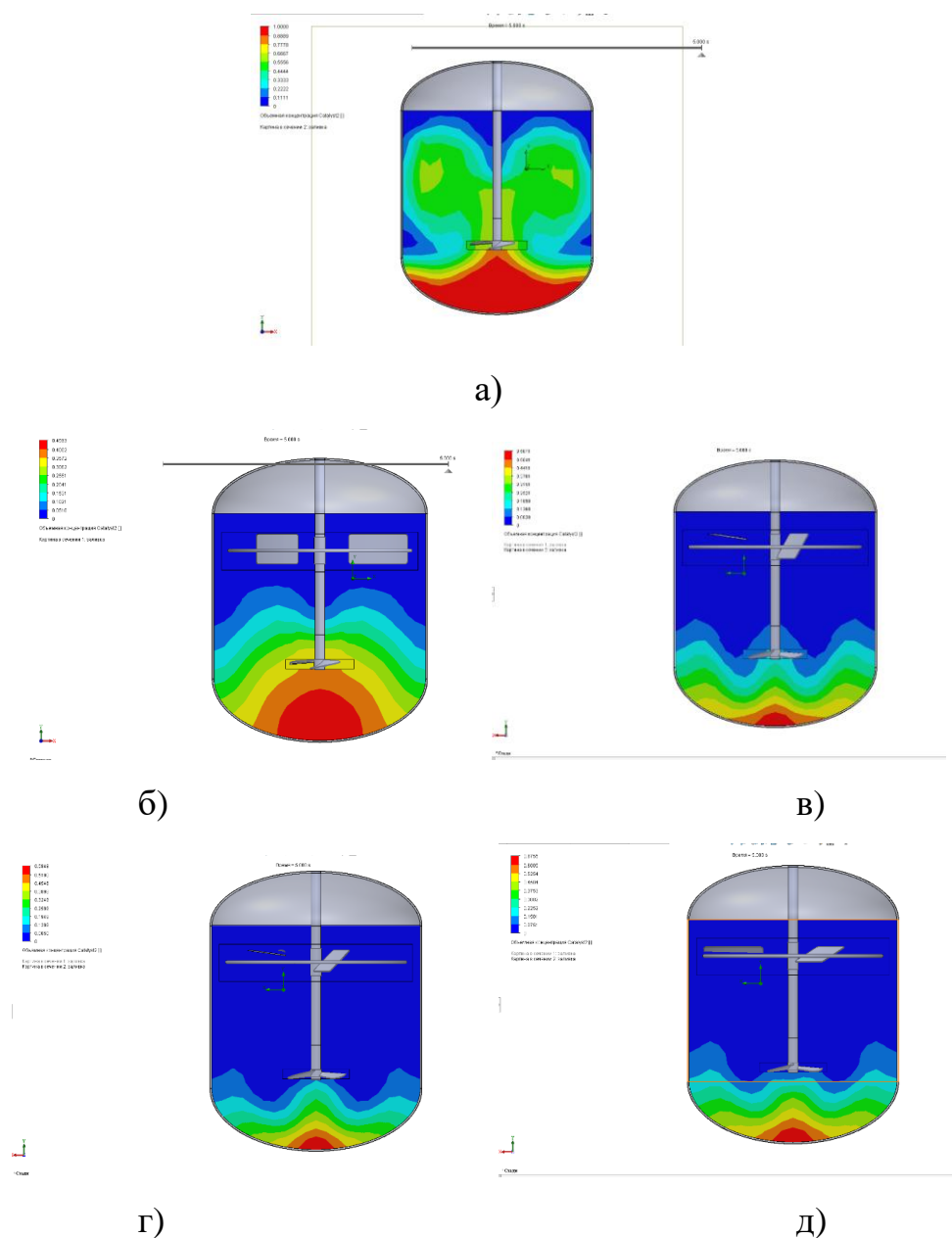


Рисунок Д.2 – Об'ємна концентрація каталізатору при різних кутах нахилу лопаткової мішалки

а) до модернізації; б) 90°; в) 60°; г) 45°; д) 30°

Для виявлення можливих недоліків та досягнення оптимальної ефективності проведено симуляційний експеримент у SolidWorks. На основі отриманих візуалізацій розподілу об'ємної концентрації каталізатора можна простежити чітку залежність якості суспендування від кута нахилу лопатей верхньої мішалки.

Апарат до модернізації демонструє найгіршу рівномірність розподілу об'ємної концентрацією, з наявністю великої застійної зони на дні апарату, яка вплине на кінцеву якість продукту і призведе до браку.

При куті нахилу  $90^\circ$  спостерігається найгірша рівномірність розподілу серед експериментів з модернізованим перемішувачем. Велика частина твердої фази (червона зона) сконцентрована на дні реактора. Це свідчить про те, що прямі лопаті створюють переважно радіальний потік, який недостатньо ефективно взаємодіє з висхідним потоком від нижньої пропелерної мішалки, не забезпечуючи підйом частинок у верхні шари.

При куті  $60^\circ$  зона високої концентрації на дні зменшується, а суспензія починає підійматися вище, однак розшарування все ще помітне.

При куті  $45^\circ$  спостерігається значне покращення однорідності. Зона з високою концентрацією на дні стає менш вираженою, а градієнт кольорів по висоті реактора стає плавнішим. Це вказує на те, що похилі лопаті створюють осьову складову потоку, спрямовану вниз, яка ефективно перемішується з висхідним потоком, утворюючи циркуляційні контури.

При куті  $30^\circ$  розподіл об'ємної концентрації схожий на варіант  $45^\circ$ , але візуально зона осадження може бути трохи більшою, оскільки занадто малий кут нахилу лопаті зменшує інтенсивність впливу на рідину.

Розподіл поля швидкості процесу перемішування в залежності від кута нахилу лопаток зображена на рисунку Д.3.

Аналіз рисунків розподілу швидкостей підтверджує висновки щодо гідродинаміки потоків.

При  $90^\circ$  можна помітити локальні зони високої турбулентності безпосередньо біля лопатей (внаслідок високого лобового опору), проте загальна циркуляція в об'ємі реактора є недостатньою, що призводить до утворення застійних зон.

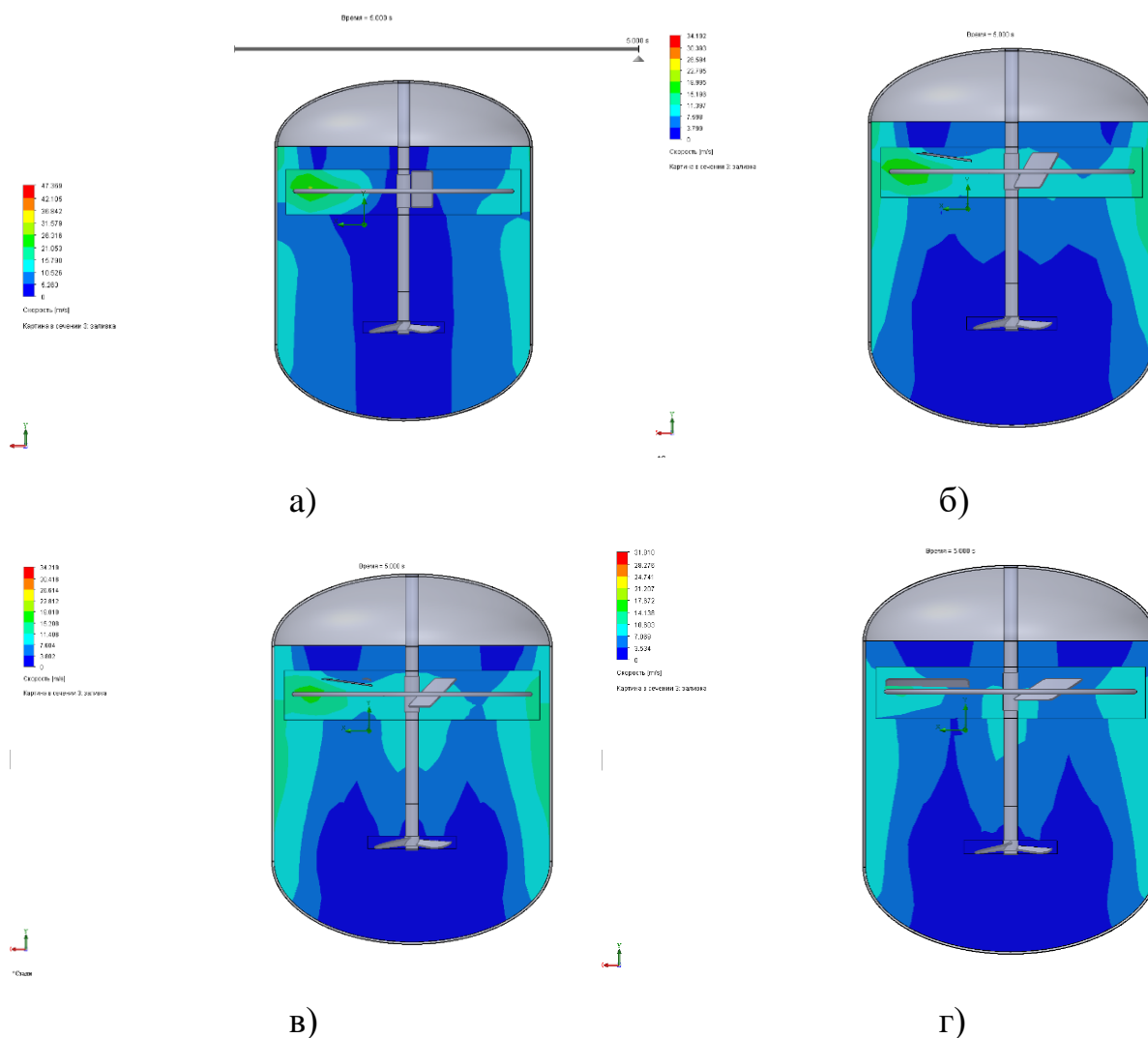


Рисунок Д.3 – Поле зміни швидкості при різних кутах нахилу лопаткової мішалки: а)  $90^\circ$ ; б)  $60^\circ$ ; в)  $45^\circ$ ; г)  $30^\circ$

При зміні кута від  $30^\circ$  до  $60^\circ$  вектори швидкості розподіляються більш рівномірно по всьому об'єму. Похилі лопаті сприяють інтенсивному макрозмішуванню всього об'єму реактора, а не лише зони навколо валу.

На рисунку Д.4 зображено час, який витрачається на перемішування в залежності від кута нахилу лопаток.

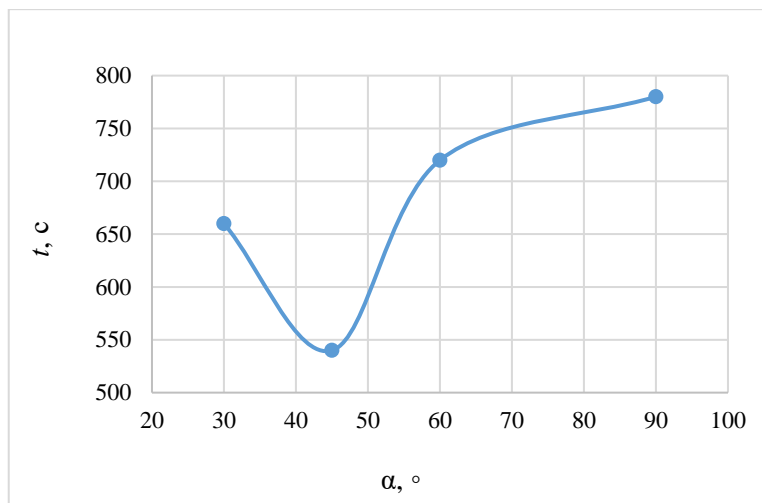


Рисунок Д.4 – Залежність часу на перемішування від кута нахилу лопаток

На рисунку Д.5 представлено залежність потужності, яка витрачається на перемішування в залежності від кута нахилу лопаток.

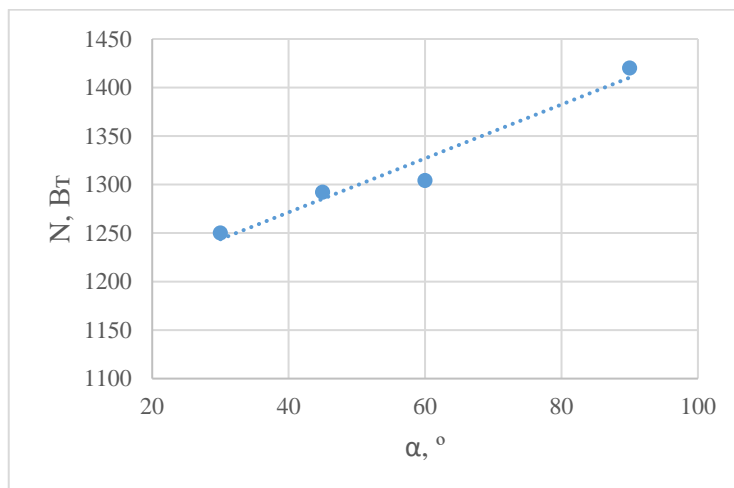


Рисунок Д.5 – Залежність потужності на перемішування від кута нахилу лопаток

Виходячи з даних показаних на рисунку Д.4, можна зробити висновок, що найкращий час перемішування досягається при використанні модифікованої мішалки з кутом нахилу  $45^\circ$ .

З огляду на це, оптимальний баланс ефективності досягається при куті нахилу  $45^\circ$  який забезпечує високу якість суспендування при суттєво менших енерговитратах порівняно з використанням прямих лопатей.

У результаті аналізу енергетичних характеристик процесу на рисунку Д.5 виявлено пряму залежність між геометрією мішалки та навантаженням на привід. Максимальне значення крутного моменту спостерігається при куті нахилу лопатей  $90^\circ$ , що пояснюється їх перпендикулярним розташуванням відносно потоку рідини та виникненням найбільшого гідродинамічного опору. При поступовому зменшенні кута атаки в діапазоні від  $60^\circ$  до  $30^\circ$  площа проєкції лопаті на площину, перпендикулярну вектору швидкості, скорочується, що закономірно призводить до зниження опору і крутного моменту.

Оскільки потужність на перемішування є прямо пропорційною до крутного моменту, варіант конструкції з кутом  $90^\circ$  виявляється найбільш енерговитратним, тоді як моделі з нахиленими лопатями демонструють значну економію електроенергії. Водночас, хоча при куті  $30^\circ$  досягаються мінімальні показники енергоспоживання, інтенсивність гідродинамічного впливу на рідину може бути недостатньою для ефективного перемішування.

## **Висновки**

У межах даного розділу було виконано CFD моделювання роботи модернізованої пропелерної мішалки, призначеної для приготування каталізатора Циглера-Натта. За результатами аналізу встановлено, що: наявність додаткової верхньої лопаткової мішалки є обов'язковою, бо вона значно впливає

на розподілення об'ємної концентрації в апараті, а також зміна кута нахилу лопатей верхньої лопаткової мішалки значно впливає на гідродинаміку потоків у реакторі і на час на перемішування.

Зокрема, використання плоских лопатей із кутом нахилу  $90^\circ$  виявилось неефективним внаслідок формування застійних зон та недостатнього підняття осаду з дна апарату. Натомість оптимальні показники однорідності суспензії, рівномірного розподілу концентрації каталізатора та часу перемішування досягаються при нахилі лопатей під кутом  $45^\circ$ , що пояснюється утворенням інтенсивної вертикальної циркуляції при взаємодії низхідного потоку від верхніх лопатей із висхідним потоком від пропелерної мішалки.

Окрім покращення якості технологічного процесу, аналіз енергетичних характеристик засвідчив, що перехід від прямих лопатей до похилих (у діапазоні  $45^\circ$ – $60^\circ$ ) дозволяє суттєво зменшити гідродинамічний опір і, як наслідок, знизити споживану потужність приводу.

Таким чином, для забезпечення стабільних гідродинамічних умов, ефективного відведення теплоти екзотермічної реакції, підвищення загальної енергоефективності і зменшення часу на перемішування рекомендовано застосування модернізованої конструкції мішалки з кутом нахилу лопатей  $45^\circ$ .

Модернізація перемішуючого пристрою дозволяє зменшити час на процес перемішування в 1,6 рази. Симуляційний експеримент доводить доцільність модернізації, але в подальшому необхідно проводити більш детальні дослідження.

**Додаток Е**  
**Публікації автора**

## **СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

студента групи ЛМ-41мп кафедри машин та апаратів хімічних і  
нафтопереробних виробництв

### **БЕЛОКОНЯ АРТЕМА ІГОРОВИЧА**

1. Гусарова О., Белоконь А. Модернізація лінії виробництва поліетилену високої густини з розробкою реактора та центрифуги // Збірник тез доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (28 листопада 2024 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2024. – с. 27–31.

2. Гусарова О., Белоконь А., Гусаров В. Обґрунтування конструкції центрифуги для виробництва поліетилену високої густини // Збірник тез доповідей XXXVI всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів" 28-29 травня 2025 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – с. 67–72.

3. Гусарова О., Дахненко В.Л., Белоконь А. Модернізація перемішуючого пристрою реактора для виробництва каталізатора Циглера-Натта // Збірник тез доповідей XXXVII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів" 01-10 грудня 2025 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – с. 174–180.

UDC 678.6

**MODERNISATION OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PRODUCTION  
LINE WITH DEVELOPMENT OF REACTOR AND CENTRIFUGE**

Ph.D. Husarova O.<sup>1,2</sup>, student Bielokon A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

<sup>2</sup> Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine

**ANNOTATION:** *The process of high-density polyethylene production is reviewed, a diagram of the manufacturing unit is presented and its operating principle is explained. To improve the unit's performance, it was suggested to modernise the reactor and centrifuge.*

**KEYWORDS:** REACTOR, CENTRIFUGE, SYNTHETIC, HIGH-DENSITY POLYETHYLENE.

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ  
ГУСТИНИ З РОЗРОБКОЮ РЕАКТОРА ТА ЦЕНТРИФУГИ**

ст. викладачка, к.т.н. Гусарова О.В.<sup>1,2</sup>, студент Белоконов А.І.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

**АНОТАЦІЯ:** *Розглянуто процес отримання поліетилену високої густини, наведено схему виробничої установки і пояснено принцип її роботи. Для підвищення ефективності установки, запропоновано модернізувати реактор і центрифугу.*

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** РЕАКТОР, ЦЕНТРИФУГА, СИНТЕТИЧНИЙ, ПОЛІЕТИЛЕН ВИСОКОЇ ГУСТИНИ.

A synthetic polymer is a high molecular weight compound that is created

artificially as a result of the synthesis of simple low molecular weight compounds. This polymer consists of a large number of repeating monomeric units connected by chemical bonds. These links are formed through chemical reactions (polymerisation and polycondensation).

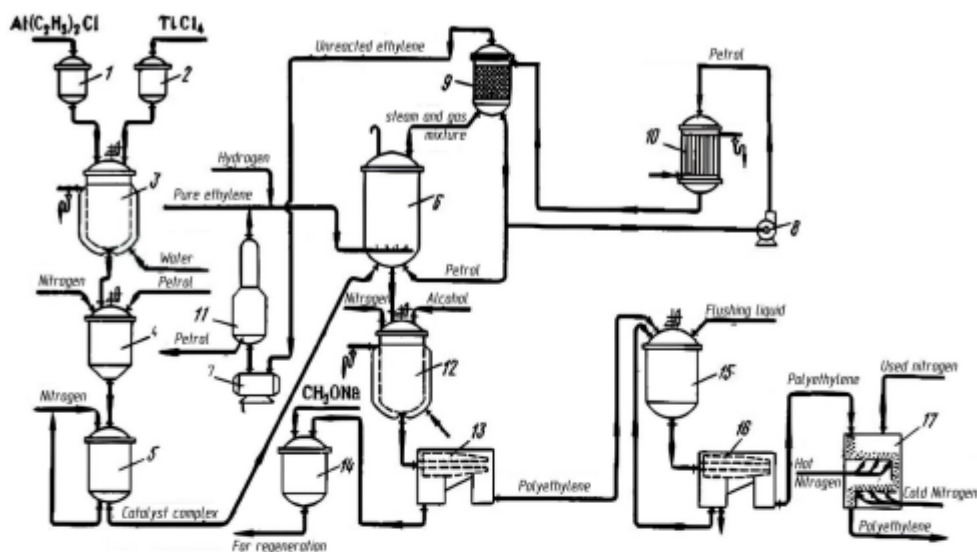
Synthetic polymer is widely used in the manufacturing industry and in everyday life. Therefore, the development and modernisation of production units is an important task at the current time [1].

The technological process for the production of high-density polyethylene includes the following steps: preparation of the catalytic complex; polymerisation of ethylene; decomposition of catalytic complex remnants and purging of polyethylene from catalyst decomposition products; drying and averaging of polyethylene; stabilisation, granulation; regeneration of solvent and purging solution [2, 3].

The polymerisation of ethylene is considered a catalytic process because it requires the presence of a catalytic complex. The catalytic complex is formed as a result of the reaction between diethylaluminium chloride and titanium tetrachloride. Prior to the polymerisation process, the raw materials and catalytic complex must be thoroughly cleaned of impurities, as their presence can adversely affect the final result. In addition, the specified proportions of ingredients and settings must be strictly adhered to obtain the desired result during mixing.

To obtain a high-quality catalytic complex, when using titanium tetrachloride and diethylaluminium chloride, it is necessary to maintain the temperature between 20 °C and 40 °C, while controlling the mixing time. It is important to keep in mind that to avoid explosion and spontaneous combustion, polyethylene production should be carried out in an atmosphere of dry, pure nitrogen.

A schematic diagram of a high-density polyethylene unit is shown in figure 1 [2, 3].



- 1 – diethylaluminium chloride measuring device; 2 – titanium tetrachloride measuring device; 3 – mixer for the catalyst complex; 4 – apparatus for diluting the complex; 5 – intermediate tank; 6 – polymeriser; 7 – gas blower; 8 – centrifugal pump; 9 – absorber; 10 – shell-and-tube refrigerator; 11 – gas separator; 12 – collector for decomposition of catalyst complex residues; 13 – spinning centrifuge; 14 – collector of mother solution; 15 – washer; 16 – centrifuge; 17 – dryer.

**Figure 1 – Diagram of the technological process of high-density polyethylene production**

The process of producing high-density polyethylene starts with the diethylaluminium chloride measuring device 1 and diethylaluminium chloride measuring device 2, the reagents are fed into a mixer 3, then into a complex dilution apparatus 4, which also receives the required portion of petrol. The solution of petrol and catalytic complex moves through an intermediate tank 5 down to the polymeriser 6.

For the correct polymerisation process, the pressure in reactor 6 should be

about 1.5-3 MPa and the temperature  $75\pm 4$  °C. During the process, a solution of the catalytic complex and ethylene are continuously fed into the reactor, and a polyethylene slurry is formed with a solid phase content of about 80-120 g/l. The mixing is carried out by bubbling ethylene through the gas distributor 11 using a gas blower 7.

Due to the evaporation of petrol, the heat of reaction is reduced, and the resulting petrol vapour mixture is removed from the reactor, condensed and returned to the cycle. Since the circulation of the vapour-gas mixture poses a risk of polymer particles entering and subsequently settling in the communication pipes and other apparatus, this unit uses an absorber 9 to separate petrol and polymer. Condensed petrol is pumped through a refrigerator 10 to irrigate the absorber 9 and then enters the polymeriser 6. The cooled ethylene is injected by a gas blower 7 into a gas separator 11, where the remaining solvent is separated and sent to the reactor 6.

Methyl or isopropyl alcohol is fed to the collector 12, where the polyethylene-in-gasoline suspension from the reactor is fed. There, a mixing process takes place, as a result of which soluble products are formed due to the decomposition of the catalyst complex that interacts with alcohol. This is all done to avoid reducing the chemical resistance and deterioration of its dielectric properties. It is worth noting that moisture should be avoided during the process of interaction of alcohol with aluminium and titanium compounds, as this will form insoluble aluminium and titanium hydroxide compounds that will affect its properties.

After treatment with alcohol, the suspension is squeezed out on centrifuge 13. Next, to neutralise HCl, the mother liquor is sent to collector 14, which also contains sodium methylate. The squeezed polymer is then transferred to the washer 15, where it is treated with hot and cold washing, from where it is transported to the centrifuge 16. Polyethylene is fed to the dryer 17 only when its moisture content does not exceed 40%. Hot air is used for drying, and the temperature should not exceed 50 °C [2, 3].

**Objective:** to design, with the necessary calculations, an apparatus with a stirring device for the preparation of the Ziegler-Nutt catalyst complex and a

centrifuge for separating polyethylene from the mother liquor by a continuous method, which are part of a line for the production of high-density polyethylene in solution at low pressure.

**Conclusions:** The production of high-density polyethylene is a complex multi-step process involving the preparation of a catalyst complex, polymerisation, purification, washing and drying of the polymer. Key steps include controlling the reaction conditions such as temperature and pressure, as well as ensuring the purity of the feedstock and proper mixing to prevent negative effects such as particle settling or polymer quality degradation. Designing efficient equipment for these processes is essential to increase the productivity and safety of polyethylene production.

**References:**

1. Chomobylskyi I.I. Polymerisation apparatus - Kharkiv Kommunist Book Printing House, 1967. –163 p.
2. Bratsykhin E.A., Shulgina E.S. Technology of plastic masses: a textbook for technical schools. - 3rd edition, revised and supplemented - L.: Khimiya, 1982. – 328 p., illus.
3. Ostapchuk M.V., Rybak A.I. Systems of technologies (by type of activity): Study guide. Recommended by the Ministry of Education and Science of Ukraine as a textbook for students of higher educational institutions. – Kyiv: TsUL, 2003. – 890 p.

UDC 678.6

**JUSTIFICATION OF THE CENTRIFUGE DESIGN  
FOR THE PRODUCTION OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE**

Ph.D. Husarova O.V.<sup>1,2</sup>, master student Bielokon A.I.<sup>1</sup>,  
senior engineer Husarov V.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

<sup>2</sup> Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine

**ANNOTATION:** *Scientific sources and patents of different countries are reviewed and analysed. Based on the generalisation of literature data, the choice of a centrifuge for the production of high-density polyethylene is substantiated.*

**KEYWORDS:** HORIZONTAL SEDIMENTATION CENTRIFUGE, HIGH-DENSITY POLYETHYLENE, MODERNISATION

**ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЦЕНТРИФУГИ ДЛЯ  
ВИРОБНИЦТВА ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ГУСТИНИ**

ст. викладачка, к.т.н. Гусарова О.В.<sup>1,2</sup>, магістр Белоконь А.І.<sup>1</sup>  
пров. інженер Гусаров В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

**АНОТАЦІЯ:** *Розглянуто та проаналізовано науково-технічні джерела та патенти різних країн. На підставі узагальнення літературних даних обгрунтовано вибір центрифуги для виробництва поліетилену високої густини*

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ГОРИЗОНТАЛЬНА ОСАДЖУВАЛЬНА ЦЕНТРИФУГА, ПОЛІЕТИЛЕН ВИСОКОЇ ГУСТИНИ, МОДЕРНІЗАЦІЯ

High-density polyethylene is a thermoplastic polymer that is widely used due to its physical and mechanical properties, such as high strength, chemical resistance, and low moisture permeability. This type of polyethylene is produced by polymerizing ethylene under low pressure in the presence of Ziegler-Natta catalysts [1-2].

Our process is based on a catalytic complex based on diethylaluminum chloride and titanium tetrachloride. This type of catalysts provides an ionic coordination mechanism for polymerization, which allows us to obtain linear polymers with a high degree of crystallinity [3].

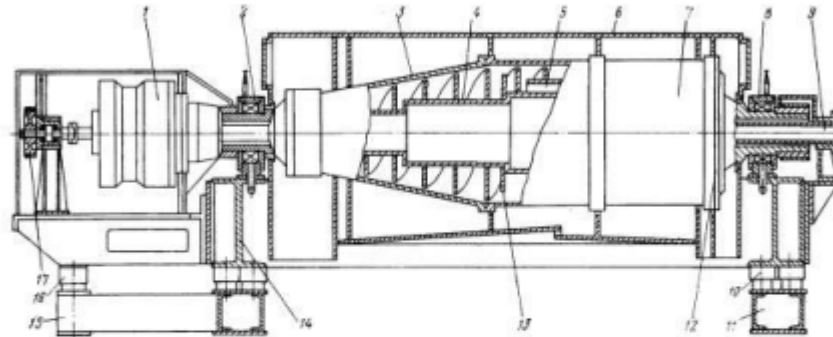
In the production of high-density polyethylene, continuous centrifuges are used to separate it from the mother liquor remaining after treatment of the polyethylene suspension with methyl or isopropyl alcohol. The centrifugation process provides fast and efficient separation of the components of the reaction mixture due to the action of centrifugal force, which accelerates the precipitation of polymer particles [4].

The choice of a specific type of centrifuge depends on the properties of the suspension and the requirements for the centrifugation process. According to technology, the temperature of the suspension is around 20 °C, and it contains a solid insoluble and non-abrasive phase. The suspension is non-toxic, but flammable and explosive.

Taking into account the requirements for the separation of the suspension and the data on the use of different centrifuges under similar conditions, a continuous horizontal sedimentation centrifuge was chosen for our work. The design of this centrifuge ensures smooth and efficient separation of the insoluble, non-abrasive solid phase from the liquid phase by means of screw discharge. Its advantage is the

possibility of a hermetic design, which contributes to safe operation in explosion hazardous environments [4-5].

An analog of the centrifuge that will be developed is the centrifuge ОГШ-1001К-01 shown in Figure 1 [5].



- 1 – planetary reducer; 2, 8 – root supports; 3 – rotor; 4 – auger;  
5 – horizontal channels; 6 – casing; 7 – chamber; 9 – supply pipe;  
10, 16 – vibration isolators; 11, 15 – frames; 12 – labyrinth sealing ring; 13 – solid detachable ring; 14 – frame; 17 – additional drive

**Figure 1 – Centrifuge scheme**

The rotor 3 consists of a cylindrical body, a cone and two trunnions that serve as covers and screw supports. Spherical roller bearings are installed in the rotor supports 2, 8. The right trunnion contains drain windows for adjusting the level of the drain thresholds. Screw 4 is located inside the rotor and transports the sludge to the discharge windows. Its rotation is transmitted through a planetary gearbox 1, which provides a speed difference between the auger and the rotor to move the sludge. The feed pipe 9 feeds the slurry into the internal cavity of the screw, from where it enters the rotor [5].

The solid phase settles on the rotor walls and is transported by the screw to the discharge windows. In the dewatering zone, moisture is squeezed out, after which the

solid phase falls into the receiving compartment of the casing. The clarified liquid (fugate) is discharged through the horizontal channels of the screw and the discharge windows. A labyrinth seal and ring 12 are installed to prevent the fugate from mixing with the slurry. An additional drive 17 with a thyristor electric drive allows you to change the relative speed of the screw. The casing 6 covers the rotating parts of the centrifuge and provides separate discharge of the fugate and sediment. The feed pipe 9 also has a channel for feeding flocculant into the rotor.

A patent search was conducted [6-8]. According to the patent [6], the essence of the invention is to improve the mechanism for fixing the handle of the centrifuge rotor cover to increase the efficiency of its fixation and reduce production costs. The main innovation is to change the design from a concentric to an eccentric shape of the connection between the handle and the shaft, which provides the function of preventing rotation, without the need to use complex anti-rotation elements. Thus, this invention improves the reliability of the rotor cover fastening, simplifies the production of components and reduces the impact of additional weight on the centrifuge operation.

According to the patent [7], the essence of the invention is the development and use of an improved housing for a centrifuge with a solid drum made of ultra-high-strength concrete. The main purpose of the invention is to significantly improve the damping and static properties compared to traditional steel or polymer concrete frames. The invention is aimed at increasing the efficiency of centrifuges with a drum due to improved mechanical characteristics of the frame structure and reduced energy consumption due to lower vibration and noise levels.

The patent [8] presents an invention relating to horizontal centrifuges, which provides for automatic detection of liquid leaks in the sealing areas between rotating elements and fixed parts of the casing. The basic idea is to introduce a mechanism for automatic leakage detection, which allows to quickly detect and eliminate leaks, preventing loss of suspension and environmental pollution. This modification

improves the reliability and efficiency of horizontal centrifuges, which is especially important for industries that require uninterrupted and clean operation of equipment.

**Conclusions:** based on the analysis of scientific and technical literature, the choice of the ОГШ centrifuge for the production of high-density polyethylene was justified. A patent search was conducted, which showed that the inventors' efforts are aimed at improving the designs of centrifuges, the proposed modernization contributes to reducing energy costs for production, increasing the reliability of equipment, etc.

#### **References:**

1. Chornobylsky I.I. Polymerization apparatus – Kharkiv Book Printing House “Communist”, 1967. – 163 p.

2. Bratsykhin E.A., Shulgina E.S. Technology of plastic masses: a textbook for technical schools. – 3rd ed. revised and supplemented – L.: Khimiya, 1982. – 328 p.

3. Husarova O., Bielokon A. Modernisation of high-density polyethylene production line with development of reactor and centrifuge // Collection of abstracts of the XXVII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists “Resource-Energy-Saving Technologies and Equipment” (November 28, 2024, Kyiv) / Compiled by Ya. M. Kornienko. – Kyiv: “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2024. – pp. 27-31.

4. Computer design of rotating elements of chemical equipment: course of lectures [Electronic resource]: a teaching aid for master's degree applicants in the educational program "Engineering and computer-aided design of innovative industry equipment" speciality 133 Industrial engineering / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; compiled by O. V. Husarova. – Electronic text data (1 file). - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024. – 288 p.

5. Luk'yanenko V. M., Taranets A. V. Centrifuges: Reference. Ed. - M.: Chemistry. 1988. 384 p.

6. Kishi Takuya, Sato Jun. Centrifuge and centrifuge rotor. Pat. WO2025053038A1, IPC: B04B5/02, Appl. JP2024030894W-29.08.2024. Pub. 13.03.2025.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/094924006/publication/WO2025053038A1?q=pn%3DWO2025053038A1>

7. Driftschroeer Christian, Knospe Volker. Solid-bowl centrifuge. Pat. WO2025051481A1, IPC: B04B1/20; B04B7/02; B04B9/12; F16M1/04, App. EP2024072451W-08.08.2024. Pub. 13.03.2025.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/092424124/publication/WO2025051481A1?q=pn%3DWO2025051481A1>

8. Wang Binggao, He Xiaoping, Gu Liang. Horizontal centrifuge capable of automatically detecting leakage. Pat. CN222240784U, IPC: B04B15/00; B04B7/02, Appl. CN202420852838U-23.04.2024. Pub. 27.12.2024.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/094009162/publication/CN222240784U?q=pn%3DCN222240784U>

UDC 678.742.2

**MODERNIZATION OF THE REACTOR AGITATION DEVICE  
FOR THE PRODUCTION OF THE ZIGLER-NATTA CATALYST**

Ph.D. Husarova O.V.<sup>1,2</sup>, Ph.D. Dakhnenko V.<sup>2</sup>,  
master student Bielokon A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

<sup>2</sup> Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine

**ANNOTATION:** *The design of a reactor with a stirring device for producing a Ziegler-Natta catalyst used in the production of high-density polyethylene under low pressure is considered. Based on a review of the literature, an idea for modernizing the stirring device is proposed, followed by modeling to confirm the feasibility of the proposed idea.*

**KEYWORDS:** REACTOR, ZIGLER-NATTA CATALYST, MODERNIZATION OF THE MIXING DEVICE, HIGH-DENSITY POLYETHYLENE

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ПЕРЕМІШУЮЧОГО ПРИСТРОЮ РЕАКТОРА  
ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КАТАЛІЗАТОРА ЦІГЛЕРА-НАТТА**

ст. викладачка, канд. техн. наук Гусарова О.В.<sup>1,2</sup>,  
канд. техн. наук, ст. наук. співр. Дахненко В.Л.<sup>2</sup>, магістр Белоконов А.І.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

**АНОТАЦІЯ:** *Розглянуто конструкцію реактора із перемішуючим пристроєм для одержання каталізатора Циглера-Натта який використовується для виробництва поліетилену високої густини під низьким тиском. На підставі узагальнення літературних даних запропоновано ідею модернізації перемішуючого пристрою з подальшим моделювання для підтвердження доцільності запропонованої ідеї.*

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** РЕАКТОР, КАТАЛІЗАТОР ЦИГЛЕРА-НАТТА, МОДЕРНІЗАЦІЯ ПЕРЕМІШУЮЧОГО ПРИСТРОЮ, ПОЛІЕТИЛЕН ВИСОКОЇ ГУСТИНИ

### **Introduction**

High-density polyethylene is a thermoplastic polymer that is widely used due to its physical and mechanical properties, such as high strength, chemical resistance, and low moisture permeability. This type of polyethylene is produced by low-pressure polymerization of ethylene in the presence of Ziegler-Natta catalysts [1-3].

The catalytic complex is obtained in a reactor with a stirring device based on diethylaluminum chloride and titanium tetrachloride. It precipitates from the solution as a dispersed (colloidal) dark powder with a rather complex structure. This catalyst provides an ion-coordination polymerization mechanism, which allows obtaining linear polymers with a high degree of crystallinity [1-3].

An important factor affecting the course of the process and the properties of the polymer is the ratio of the starting materials in the preparation of the catalyst. The preparation of the catalyst complex is carried out at a temperature of about 30 °C. The reaction is accompanied by the release of heat, since it is exothermic [1-3].

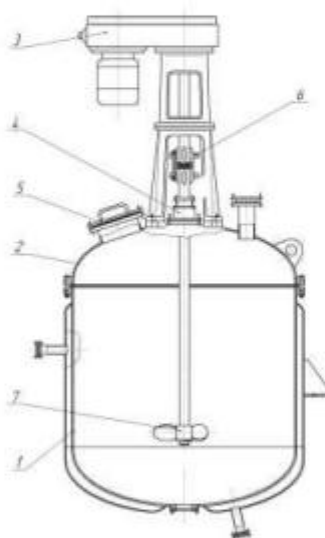
During the preparation of the catalyst complex, it is important to ensure the quality of the final product, hydrodynamic mixing conditions, optimal time, temperature, component ratio, and heat removal.

Description of the reactor for obtaining the catalyst complex

To perform the specified catalyst manufacturing process, the optimal choice would be a reactor with a propeller stirrer, which provides the necessary hydrodynamic mixing conditions and U-shaped

#### **Description of the reactor for obtaining the catalyst complex**

To perform the specified catalyst manufacturing process, the optimal choice would be a reactor with a propeller stirrer, which provides the necessary hydrodynamic mixing conditions, and a U-shaped jacket that effectively removes the heat generated during the reaction. During operation, heat exchange occurs between the catalyst complex and the cooling water. The reactor diagram is shown in Figure 1.



1 – body; 2 – reactor cover; 3 – drive; 4 – gland seal; 5 – hatch cover; 6 – coupling;  
7 – propeller agitator

**Figure 1 – Structural diagram of a reactor with a mixing device**

The reactor consists of a body 1 with a jacket welded to it, four supports, and fittings for supplying and removing cooling water to the jacket; a cover 2 with fittings

for introducing reagents and a thermometer sleeve; a mixing device with a propeller stirrer 7; a vertical drive 3 with a V-belt transmission and a stand for its mounting. The agitator shaft is connected via a coupling 6 to the drive shaft and equipped with a gland seal 4, which is installed in the cover of the apparatus. Additionally, the cover has a hatch 5, which is used for visual observation of the internal volume of the apparatus and performing auxiliary operations.

#### **Purpose of the work**

The purpose of the work is to modernize the reactor mixing device for the preparation of the Ziegler-Natta catalyst and further computer simulation of the process in the SolidWorks environment.

#### **Materials and methods**

SolidWorks is a powerful CAD (computer-aided design) software package, its main purpose is to automate the work of industrial enterprises at the stages of design and technological preparation of production, providing an end-to-end process for designing products of any complexity.

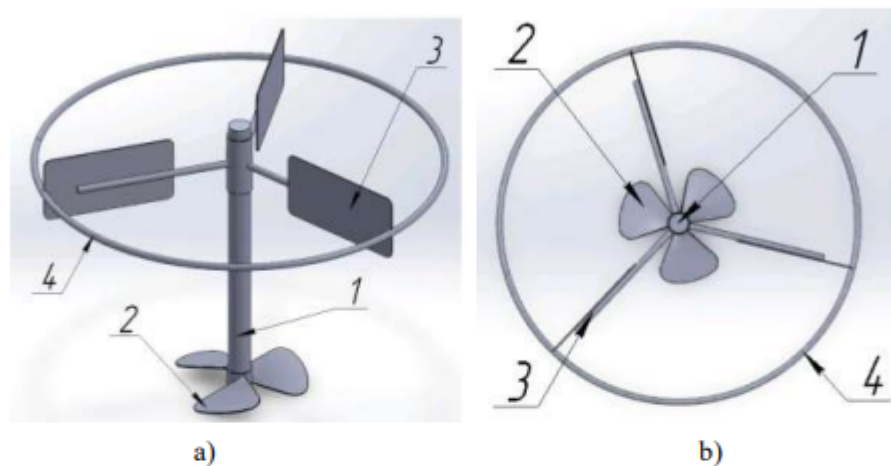
SolidWorks is a solid parametric modeling design system that allows engineers to develop 3D models of parts and assemblies, create 2D drawings from them, perform engineering analysis (e.g., strength, dynamics of mechanisms) using modules such as SolidWorks Simulation and SolidWorks Motion, and simulate sheet metal parts [4].

#### **Modernization of the mixing device**

To improve the hydrodynamic conditions of mixing, it is proposed to modernize the mixing device. The idea of modernization implemented in SolidWorks is shown in Figure 2.

The mixer contains a standard propeller mixing device 2 in the lower tier, which provides axial fluid flows and thoroughly stirs up the sediment, and a blade (radial) device 3 in the upper tier, Figure 2a. Three straight rectangular blades 3 are arranged in a staggered order relative to the lower tier, Figure 2b. The blades are

oriented to create a downward flow, counter to the upward flow from the propeller mixer.



1 – shaft, 2 – propeller mixer, 3 – blades, 4 – stiffening ring

**Figure 2 – Modernized mixing device**

For the rectangular blades of the upper tier, a metal stiffening ring 4 is provided, connecting their outer parts. This is necessary to prevent bending and vibration of large blades, ensuring their durability and stability of hydrodynamic performance.

To identify possible shortcomings and achieve optimal efficiency, a simulation experiment in SolidWorks is planned. By changing the angle of inclination of the upper agitator blades (30°, 45°, 60°, 90°), the optimal angle will be determined, which ensures the best suspension homogeneity with minimum power consumption.

#### **Expected result of modernization**

The propeller agitator lifts the sediment, while the paddle agitator captures the upper phase and directs it downward. This forms two intense circulation circuits that completely cover the volume of the apparatus and prevent liquid stagnation. Creating

counterflows is more effective than using a single type of agitator. Thanks to intensive mixing in the central zone, the mixing speed increases significantly. Reducing the time by up to 20% increases the reactor's productivity. This leads to a decrease in specific energy consumption per unit volume.

### **Conclusions**

It was proposed to modernize the reactor's mixing device. The modernization of the mixing device is based on the use of a combined two-stage agitator, which creates counter-axial flows to ensure maximum intensity of mixing of components to obtain a catalyst.

Such a mixer will improve the hydrodynamic conditions of the mixing process, increase the quality of the catalyst, reduce the time spent on the process, and reduce energy costs.

### **References:**

1. Chornobytsky I.I. Polymerization apparatus - Kharkiv book printing house "Communist", 1967. - 163 p.
2. Bratsyhin E.A., Shulgina E.S. Technology of Plastics: A Textbook for Technical Colleges. - 3rd ed., rev. and expanded. - L.: Chemistry, 1982. - 328 p.
3. Husarova O., Bielokon A. Modernization of high-density polyethylene production line with development of reactor and centrifuge // Collection of abstracts of the XXVII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists "Resource and Energy Saving Technologies and Equipment" (November 28, 2024, Kyiv) / Compiled by Y.M. Kornienko. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024. – pp. 27-31.
4. 3D Engineering: SolidWorks [Electronic resource]: lecture notes: textbook for bachelor's degree students in the educational program "Computer-Integrated Technologies for the Design of Chemical Engineering Equipment," specialty 133 Industrial Engineering / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; compiled by: O. A.

**Збірник тез доповідей XXXVII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних  
матеріалів"**

---

Novokhat. – Electronic text data. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
2024. – 250 p.