

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

**Інженерно-хімічний факультет**

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

«На правах рукопису»

«До захисту допущено»

УДК \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри, д-р. тех. наук, проф.

\_\_\_\_\_ Я.М. Корнієнко

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2018 р.

## **Магістерська дисертація**

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних і нафтопереробних виробництв»

на тему: **Гідродинаміка і процес теплообміну у роторному плівковому апараті з шарнірним закріпленням лопатей**

Виконав: студент VI курсу групи ЛН-61м

Бишко Микита Андрійович

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник: доцент, канд. техн. наук, Зубрій О.Г.

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях

канд. техн. наук, доцент Ковтун І.М.

\_\_\_\_\_ (підпис)

Розроблення стартап-проекту

канд. екон. наук, доцент кафедри промислового маркетингу Юдіна Н.В.

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада вчене звання науковий ступінь, прізвище і ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада вчене звання науковий ступінь, прізвище і ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

Студент \_\_\_\_\_ М.А. Бишко

Київ – 2018

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут**  
**імені Ігоря Сікорського»**

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних і нафтопереробних виробництв»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, д-р. тех. наук, проф.

\_\_\_\_\_ Я.М. Корнієнко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію**

студенту Бишко Микиті Андрійовичу

**1. Тема дисертації:** «Гідродинаміка і процес теплообміну у роторному плівковому апараті з шарнірним закріпленням лопатей».

Науковий керівник: Зубрій Олег Григорович, доцент, к.т.н.

затверджена наказом по університету від «21» березня 2018 р. № 979-с.

**2. Термін здачі студентом дисертації:** травня 2018 р.

**3. Об'єкт дослідження:** процес гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей.

**4. Предмет дослідження:** витрати потужності в роторному плівковому апараті, теплообмін при нагріві.

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

- проаналізувати існуючі відомості гідродинаміки і теплообміну;
- розробка фізичної і математичної моделі процесу гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті;
- обґрунтувати методи дослідження гідродинаміки та теплообміну;
- розробити експериментальний стенд для проведення досліджень;
- розробити методику експериментальних досліджень;
- перевірити адекватність математичної моделі теплообміну;
- узагальнити результати досліджень;
- розробити методику та алгоритм розрахунку промислового апарата;
- розробити проект роторного плівкового апарата;
- підготувати публікації наукових статей, тез доповідей та патентів.

**6. Перелік ілюстративного матеріалу:** презентація магістерської дисертації.

**7. Перелік публікацій:** основний зміст дисертаційної роботи викладено в 7-ми опублікованих роботах у тому числі: двох статтях у наукових фахових виданнях України; чотирьох публікаціях тез доповідей міжнародних конференцій та наукових семінарах; один патент на корисну модель України.

### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	канд. техн. наук, доцент Ковтун І.М.		
Розроблення стартап проекту	канд. екон. наук, доцент кафедри промислового маркетингу Юдіна Н.В.		

**9. Дата видачі завдання** 09 вересня 2016 р.

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_ М.А. Бишко  
(підпис)

**Науковий керівник дисертації**

\_\_\_\_\_ О.Г. Зубрій  
(підпис)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів дисертації	Примі тка
1	2	3	4
1	Аналіз літературних і патентних джерел по дослідженню процесу гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті. Формулювання задач теоретичних та експериментальних досліджень.	01.09.2016 – 27.12.2016	
2	Розробка фізичної моделі гідродинаміки та теплообміну. Розробка математичної моделі процесу теплообміну .	05.01.2017 – 30.05.2017	
3	Формулювання процесу проведення дослідів. Удосконалення методики проведення експериментів.	13.09.2017 – 30.01.2018	
4	Проведення експериментальних досліджень	03.10.2017 – 02.03.2018	
5	Обробка та узагальнення результатів дослідження.	02.03.2018 – 14.03.2018	
6	Висновки й рекомендації щодо визначення .	16.03.2018 – 25.03.2018	
7	Підготовка матеріалів до публікації за результатами досліджень.	26.03.2018 – 15.04.2018	

1	2	3	4
8	Попередній захист	26.04.2018 – 26.04.2018	
9	Оформлення атестаційної роботи магістра та її підготовка до захисту.	27.04.2018 – 15.05.2018	

**Студент**

\_\_\_\_\_

(підпис)

М.А. Бишко

**Науковий керівник дисертації**

\_\_\_\_\_

(підпис)

О.Г. Зубрій

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень .....	13
Вступ.. .....	15
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	21
1.1 Стан та проблеми роторних плівкових апаратів.....	21
1.2 Класифікація плівкових апаратів .....	23
1.2.1 Типи роторних плівкових апаратів .....	33
1.3 Процеси гідродинаміки та теплообміну в роторних плівкових апаратах.....	36
1.3.1 Процес гідродинаміки в роторному плівковому апараті з падаючою плівкою .....	36
1.3.2 Потужність, яка витрачається на розподілення та перемішування рідини.....	39
1.3.3 Процес теплообміну в роторному плівковому апараті зі стікаючою плівкою .....	40
1.3.4 Вплив швидкості ротора.....	41
1.4 Висновки .....	44
1.5 Мета і задачі досліджень .....	45
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ .....	47
2.1 Фізична модель гідродинаміки в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей.....	47
2.2 Фізична модель процесу теплообміну .....	50
2.3 Математична модель процесу теплообміну .....	51
2.4 Обґрунтування методики проведення експериментальних досліджень .....	60
2.4.1 Методика дослідження тепловіддачі .....	60
2.4.2 Методика дослідження потужності .....	61
2.5. Опис лабораторної установки.....	62

2.6 Охорона праці та безпека в незвичайних ситуаціях.....	68
2.7 Висновки .....	79
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ .....	80
3.1 Методика дослідження гідродинаміки .....	80
3.1.1 Дослідження витрат потужності при сухому терті .....	80
3.1.2 Дослідження витрат потужності на розподілення та перемішування рідини.....	83
3.2 Методика дослідження тепловіддачі .....	86
3.3 Висновки .....	91
4 ОБҐРУНТУВАННЯ І ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	92
4.1 Опис технологічного процесу.....	92
4.2 Конструктивні особливості та опис роботи апарата .....	96
4.3. Методика розрахунку роторного плівкового апарату.....	97
4.3.1. Вихідні дані .....	97
4.3.2 Алгоритм розрахунку роторного плівкового апарата.....	98
4.4 Висновки .....	101
5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	103
5.1 Опис ідеї проекту .....	103
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	104
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	106
5.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проекту .....	112
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	114
5.6 Висновки .....	116
Висновки .....	118
Выводи .....	119
Conclusions .....	121
Перелік посилань.....	122
Додаток А Розрахунок критерія Фішера .....	129

Додаток Б Розрахунок похибок вимірювань .....	131
Додаток В Приклад розрахунку роторного плівкового апарата .....	137
Додаток Г Програма розрахунку роторного плівкового апарата.....	153
Додаток Д Публікації автора відповідно до магістерської дисертації .....	165
Додаток Е Копії опублікованих праць .....	168
Додаток Ж Специфікація до складального креслення .....	194

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $R$  - внутрішній радіус апарату, м;  
 $d$  - діаметр ротора, м;  
 $\Delta$  - зазор, мм;  
 $r$  - радіус, м  
 $h$  - висота робочої частини апарату, м<sup>2</sup>;  
 $z$  - число лопатей;  
 $\delta$  - середня товщина плівки, м;  
 $\rho$  - густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості, нс/м<sup>2</sup>;  
 $\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  
 $\sigma$  - поверхневий натяг, н/м;  
 $\Theta$  - краєвий кут, град;  
 $c_p$  - питома теплоємність рідини, Дж/град;  
 $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(мК);  
 $\lambda_{cm}$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(мК);  
 $\tau$  - час, с;  
 $g$  - прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  
 $G$  – масові витрати рідини, кг/с;  
 $V$  - об'ємні витрати рідини, м<sup>3</sup>/с;  
 $\Gamma$  – густина зрошення, м<sup>2</sup>/с;  
 $W$  – швидкість рідини, м<sup>2</sup>/с;  
 $n$  – число обертів ротора, об/с;  
 $\omega$  – швидкість обертання ротора, рад/с;  
 $P$  – тиск в плівці рідини, н/м<sup>2</sup>;  
 $N$  – потужність, Вт;  
 $K_n$  – коефіцієнт потужності;  
 $E$  – енергія, Дж;

$Q$  – зальний тепловий потік, Вт;

$q$  – питомий тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>;

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

$Re_{ni} = \frac{4\Gamma}{\nu}$  - плівковий критерій Рейнольдса;

$Re_{ei} = \frac{nd^2}{\nu}$  - відцентровий критерій Рейнольдса;

$Fr = \frac{nd^2}{g}$  - відцентровий критерій Фруда;

$Pr = \frac{\alpha}{\nu}$  - критерій Прандтля.

$Nu_d = \frac{\alpha \cdot \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}}{\lambda}$  – критерій Нуссельта.

## Вступ

Актуальність теми.

Питання екології та якості продукції являються найбільш нагальними для сьогодення. Для виробництва та обробки високоякісних продуктів постає необхідність створення перспективних технологій, обладнань і процесів. Для вирішення даних проблем у виробництво впроваджуються енергоефективні технології та апарати. Найбільш сучасними апаратами для пастеризації, випарювання рідин і сушки в'язких, термолабільних матеріалів є роторні плівкові апарати (РПА) безперервної дії.

У хімічній та харчовій промисловості доводиться мати справу з речовинами, які можна обробляти тільки в тонкому шарі – виробництво окремих видів пластмас і кремнієвих продуктів, упарювання харчових продуктів, чутливих до великих температур, підігрів та концентрування речовин, які можуть пригорати та полімерізуватися при тривалому контактуванні з поверхнею нагріву [1].

Останнім часом широкого застосування в промисловості набули плівкові апарати з ротором, що обертається. В РПА рідинна фаза розподіляється ротором по твердій поверхні, що обігривається, та турбулізується ротором. Це призводить до значної інтенсифікації процесів тепло- та масообміну. Для підвищення якості термолабільних речовин основною вимогою є забезпечення нерозривності плівки та досить малого часу перебування продукту на гріючій поверхні. У роторних апаратах з плівкою що стікає найбільшою проблемою є підтримання цілісності та нерозривності плівки, особливо в ході відносно інтенсивного випаровування.

Одним з найбільш вагомих напрямлень при дослідженні теплообмінної апаратури є вивчення гідродинаміки та теплообміну в апаратах, в яких виникає значна турбулізація граничного шару потоків при невеликих швидкостях руху. Вагоме місце при дослідженні теплообмінного обладнання відводиться вивченню гідродинамічних особливостей тепло- та масообмінних процесів,

які проходять в апаратах з неметалевих стерильних матеріалів та покриттів (скло, емаль, кераміка, полімери).

Опрацювання продуктів, які характеризуються значною термолабільністю, проводиться в апаратах з невеликим часом перебування в зоні підігріву. Використовувати плівкові апарати найбільш доцільно коли технологічні умови дають змогу використовувати однопрохідні режими, що, наприклад, має місце в ряді прикладів нагріву чи охолодження рідин. Дані апарати являються найбільш ефективними при нагріві, охолодженні та упарюванні рідин при невеликих значеннях теплового потоку ( $q < 40 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>) та малої різниці температур ( $\Delta t$  до  $10^0$  С). При високих значеннях  $q$  та  $\Delta t$  використання апаратів з плівкою виправдовується при необхідності оптимізації технологічного процесу.

Проблема утворення плівки значно спрощується при використанні апаратів з ротором, в яких розподілення рідини по теплообмінній поверхні забезпечується спеціальними пристроями. В таких апаратах є можливість оброблювати недостатньо чисті рідини та упарювати до сухого залишку. Але для таких апаратів постає необхідність установки спеціального приводу з плавним регулюванням числа обертів, вирішення проблем надійного ущільнення вала ротору та охолодження підшипників. Використання роторного плівкового апарата пов'язано з необхідністю проведення повного розрахунку апарата. При порушенні рівномірного зрошення теплообмінної поверхні рідиною, ефективність плівкових апаратів падає. Утворення та підтримка стійкого рівномірного шару рідини на поверхні теплообміну включає потребу у спеціальних пристроїв розподілення, виготовлення апаратури з великою точністю, що може ускладнити конструкцію, потребує допоміжних, більш жорстких вимог до підтримки оптимальних параметрів їх роботи (густина зрошення, тепловий потік та інше). В кожному особливому випадку доцільність використання РПА повинно вирішуватись на основі аналізу умов роботи апарата.

Таким чином, РПА з шарнірним кріпленням лопатей може застосовуватися для нагріву, випарювання, дистиляції, при розділенні й очищенні, у виробництві харчових продуктів, лікарських препаратів, коли особливо важливо запобігти їхньому термічному розпаду.

Через складність вивчення гідродинаміки в роторному плівковому апараті недостатньо теоретичних та експериментальних даних, що не дозволяє провести достатньо повний аналіз умов роботи плівкових апаратів. В даній атестаційній магістерській роботі здійснена спроба уточнити дослідження та роботи в області гідродинаміки тонкої плівки рідини в РПА.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Магістерська робота виконана згідно з тематичним планом кафедри МАХНВ НТУУ «КПІ» та у відповідності з держбюджетом за ініціативною темою «Експериментальне дослідження гідродинаміки і теплообміну у роторно-плівкових апаратах» № 03/15 IXФ, номер державної реєстрації 0115U004770 та за напрямом підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізація «Інжиніринг обладнання та технології хімічних і нафтопереробних виробництв».

### **Мета і задачі дослідження**

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження процесу гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей.

Об'єкт дослідження: процес гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті.

Предмет дослідження: теплообмін при нагріві, витрати потужності на розподілення та перемішування рідини.

Методи досліджень: фізико-математичне моделювання процесів гідродинаміки та теплообміну.

Завдання дослідження:

- проаналізувати існуючі відомості гідродинаміки і теплообміну;

- розробка фізичної і математичної моделі процесу гідродинаміки і теплообміну в роторному плівковому апараті;
- обґрунтувати методи дослідження гідродинаміки та теплообміну;
- розробити експериментальний стенд для проведення досліджень;
- розробити методику експериментальних досліджень;
- перевірити адекватність фізичної і математичної моделей;
- узагальнити результати досліджень;
- визначення потужності в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей;
- розробити методику та алгоритм розрахунку апарата;
- розробити проект роторного плівкового апарата.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертації одержано такі наукові результати:

- обґрунтовано фізичні моделі гідродинаміки і теплообміну;
- експериментально визначена потужність на розподілення та перемішування рідини;
- отримано узагальнене критеріальне рівняння для визначення потужності;
- експериментально досліджено процес теплообміну;
- отримано узагальнене критеріальне рівняння для процесу теплообміну.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів:

- положення та висновки дисертаційної роботи базуються на фундаментальних фізичних законах покладених в основу фізичної та математичної моделі, достовірність яких перевірено експериментально;
- мінімальна похибка проведених розрахунків досягається шляхом використання обчислювальної техніки та сучасного програмного забезпечення і підтверджується відповідністю результатам експериментальних досліджень;
- обґрунтованість технологічних рішень, прийнятих на основі отриманих в роботі результатів.

## Практичне значення отриманих результатів

Розроблено методику, алгоритм і програму інженерного розрахунку роторного плівкового апарату з шарнірним кріпленням лопатей, що дозволяє обчислювати необхідну поверхню нагріву, коефіцієнта теплопередачі, витрати потужності на привід ротору за яких забезпечується необхідна якість виробу.

За результатами роботи запропоновано нові конструкції робочих органів, які захищені патентом на корисну модель України.

## Особистий внесок здобувача

Особистий внесок автора полягає в постановці мети й задач дослідження, формулюванні фізичних і математичних моделей, модернізації установки, написанні алгоритмів і програм для ПК; розробці методики і проведенні експериментальних досліджень; написанні та опублікуванні статей з даної проблеми; розробці технічної документації та апробації запропонованої технології. Роботи виконувались під керівництвом та рекомендаціями наукового керівника О. Г. Зубрія.

## Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на наступних конференціях:

– XI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”: Київ 06-07 грудня 2016 р. :зб. тез доп. –К.: НТУУ “КПІ”, 2016р., с.36-37;

– XII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”: Київ, 26-27 квітня 2017р. :зб. тез доп. –К.: НТУУ “КПІ”, 2017р., с.11-12;

– XIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”: Київ, 29-30 листопада 2017р. :зб. тез доп. –К.: НТУУ “КПІ”, 2017р., с9-10;

– XIV міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”: Київ, 18-19квітня 2018р. :зб. тез доп. –К.: НТУУ “КПІ”, 2018р., с.9-10;

– Патент України на корисну модель “Роторний плівковий апарат” № 201710606 заявл 01.11.2017, опубл 23.03.2018р, Бюл №6.;

– Міжнародний науковий журнал “Інтернаука”, випуск №5 (45), 2018р., с.39-42;

– Міжнародний науковий журнал “Інтернаука”, випуск №8 (45), 2018р.с 37-40.

Публікації: Матеріали магістерської дисертації опубліковані у двох наукових статтях в фахових виданнях, чотирьох збірках тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях та одному патенті України на корисну модель.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з п’яти розділів, загальних висновків, переліку посилань та додатків. Повний обсяг дисертації становить 196 сторінки, 30 рисунків, 26 таблиць і списку літературних джерел з 67 найменувань (на 7 сторінках), перелік умовних позначень на 2 сторінках, додатки складають 68 сторінок.

# 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Стан та проблеми роторних плівкових апаратів

Широкого розповсюдження в промисловості набули процеси в тонких шарах рідини. Тонкий шар рідинної фази рухається доверху або донизу, починаючи взаємодіяти з іншим потоком або через тверду стінку (теплообмінні процеси), або при повному контакті фаз (процеси тепло і масообміну). В тонких шарах рідини, які характеризуються незначним термічним опором, виникає інтенсивне перемішування рідини, що в свою чергу породжує інтенсивний тепловий та масовий перенос. Це забезпечують процеси, що утворюють хвилю, тобто механічно утворена турбулізація потоку різними методами. Плівкові процеси поширились в хімічній, харчовій, паперовій технології, та успішно використовуються в технологіях хіміко-фармацевтичних речовин, в біотехнології, металургії. Дані процеси проводяться в плівковому теплообмінному обладнанні. До них відносять: плівкові теплообмінники, плівкові випарники, плівкові конденсатори і т.д. В окрему групу можна віднести роторні плівкові апарати, що набули широкого поширення у багатьох галузях і успішно застосовуються наприклад: для однофазного нагріву, в процесах ректифікації, при хлоруванні парафіну, у виробництві фосфорної кислоти і анілінових фарбників, для одержання латексу і концентруванні барвників, для регенерації етилового спирту, у виробництві молочної кислоти, ізопропілацетону і розчинних у воді полімерів [1].

Роторні випарні апарати рекомендується застосовувати для процесів глибокого концентрування та дистиляції харчових продуктів в якості самостійних технологічних апаратів або ж в комплекті з апаратами інших типів [2]. Також вони мають змогу використовуватись в якості кінцевого ступеня багатокорпусної випарної установки, у якій початкові корпуси виготовляються як трубчаті випарні апарати (зі стікаючою плівкою, природною або примусовою циркуляцією). Такі установки мають змогу

застосовуватися для упарювання відхідних вод великого різноманіття виробництв. Також, роторні апарати служать для застосування в ректифікаційному обладнанні а якості кубового випарника [3].

Найперший роторний плівковий апарат був представлений Мюллером в 1944р., розроблена конструкція включала в себе жорстко закріплені лопаті на роторі. З того моменту даний типа апаратів удосконалювався за допомогою поліпшення конструктивних особливостей апарата, збільшення інтенсивності процесів та приведення технологічних і конструкційних параметрів до оптимуму, а також збільшення переліку варіативності процесів і продуктів для яких застосовується даний тип апарату.

Виробничий апарат даного типу вперше був використаний у 1946 році і в той же час швейцарська фірма "Luwa" розпочала серійний випуск даних апаратів. Далі розпочалося конструювання та випуск роторних плівкових апаратів з лопатевим ротором [4]. В даний час їх масове використання забезпечене у великій кількості розвинених зарубіжних країн, основну частину світових масштабних виробництв забезпечує Швейцарський концерн «SulzerAG» [5]. У 1958 році в Англії запропоновано роторний плівковий апарат з висхідною плівкою [6], та сьогодні такі апарати випускає американська фірма [7] "ArtisanIndustries".

Використання роторних випарних апаратів рекомендується для процесів глибокого концентрування та дистиляції продуктів харчування в якості самостійних технологічних апаратів або ж в комплекті з апаратами інших типів [8].

У харчовому виробництві, де об'єм термічного впливу на продукти споживання має першочергову роль, необхідно використовувати роторні плівкові апарати. Їх використовують для загущення молока, концентрування фруктових соків, одержання екстрактів розчинної кави, чаю, м'ясного екстракту, зневоднення фосфатидних концентратів. За допомогою цих апаратів виготовляють вітаміни, аскорбінову кислоту, антибіотики та інші препарати фармацевтичної промисловості [9].

## 1.2 Класифікація плівкових апаратів

В даний момент існує велика кількість конструкцій роторних плівкових апаратів (РПА), які можна поділити на дві основні групи. До першої групи відносяться апарати з обертаючою поверхнею, яка виконана у дисковому, конусному чи еліпсоїдному вигляді. Утворене плівкове покриття наближається в бік збільшення радіуса обертання під дією відцентрових сил. При цьому звужується шар плівкового покриття. До другої групи включають апарати, що мають нерухому робочу поверхню, по якій рідини починають рух завдяки дії сил тяжіння та перемішуючого пристрою, що закріплений на роторі. Тому далі, роторними плівковими апаратами доцільно називати такі апарати, що мають відношення до другої групи. По виду руху матеріальних потоків можна поділити на апарати з падаючою та підіймаючою плівкою рідини, а при наявності газової фази на прямоточні і противоточні.

Апарати з нерухомим корпусом за способом утворення плівки поділяються на:

- апарати з “ковзаючим” ротором;
- апарати з ротором, що утворює плівку.

За конструктивною ознакою корпуса апарати поділяються на:

- роторні тонкоплівкові апарати з циліндричним корпусом ;
- роторні тонкоплівкові апарати зі ступінчатим циліндричним корпусом;
- з конічним корпусом.

В залежності від типу ротора роторні випарні апарати поділяються на апарати [10]:

- з жорстко закріпленими лопатями (жорстким ротором) ;
- з рухомо закріпленими лопатями ;
- з комбінованим кріпленням лопатей.

Роторні плівкові апарати з жорстко закріпленими лопатями розділяються на апарати зі скошеними кінцями лопатей та апарати без них. В

апаратах такого типу степiнь зазору мiж кiнцевими частинами лопатей i стiнкою корпусу змiнюється вiдносно товщини лопатей. В апаратах з лопастями, якi вiльно чи шарнiрно закрiпленi, степiнь зазору мiж кiнцями лопастей та стiнкою корпусу утворюється самочинно в ходi роботи апарата.

В порiвняннi з iншими видами тепло- i масообмiнних апаратiв РПА мають рад переваг, основнi з яких наступнi:

1. Високi значення коефiцiєнтiв тепло- масопередачi.
2. Невеликий час перебування рiдини на грiючiй поверхнi.
3. Незначний тиск в пливцi рiдини.
4. Незначний опiр парi, яка рухається.
5. Практично немає застiйних зон.

Разом з тим, роторнi пливковi апарати мають рад недолiкiв, це перш за все наступнi:

1. Невелика площа нагрiву (до 20 м<sup>2</sup>).
2. Складнiсть конструкцiї.
3. Складнiсть ущiльнення вала ротора.

По типу лопатевого ротора, РПА роздiляють на апарати з шарнiрно закрiпленими лопатями, з жорстко закрiпленими лопатями, з рухливо закрiпленими лопатями i з комбiнованим типом пiдвiски лопатей. У РПА з ротором на якому жорстко закрiпленi лопатi (рисунок 1.1, а ) зазор  $\Delta$  мiж крайками лопатей i робочою поверхнею корпусу є постiйним i не змiнюється в процесi роботи апарата. Зазначений зазор зазвичай встановлюється на 0,5-3 мм. Лiнiйна швидкiсть крайок лопатей в апаратах з жорстко закрiпленими лопатями досягає 12-15 м/с. Ключевим геометричним параметром РПА у цьому етапi являється вiдстань  $l$ , що вимiрюється по колу мiж крайними кiнцями сусiднiх лопатей:

$$l = \pi d_{\text{л}}/z, \quad (1.1)$$

де  $d_{\text{л}}$  – дiаметр кола, захоплюваної кiнцями лопатей при обертаннi ротора;  $z$  –кiлькiсть лопатей.

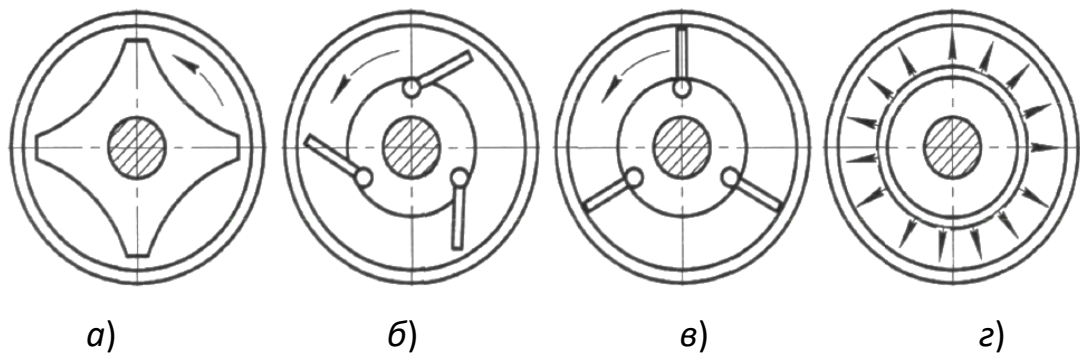


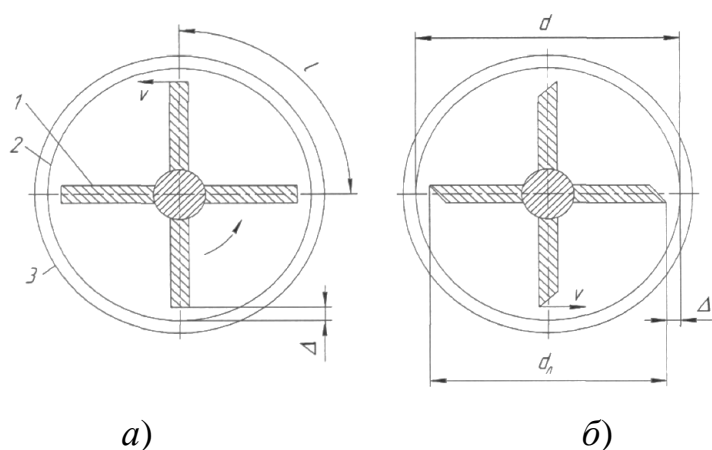
Рисунок 1.1 – Ротори вертикальних плівкових апаратів: *а* – жорстко закріплені лопаті; *б* – шарнірно закріпленні лопаті; *в* – маятникові лопаті; *г* – розбризкуючого типу

До найбільш поширених відносять РПА першої групи, в яких лопать рухомого ротора має активний вплив на плівкове покриття, завдяки його розподілу та перемішуванню. Такі апарати діляться на вертикальні (циліндричного формфактору) і горизонтальні (конічної формфактору). Ротори вертикальних циліндричних апаратів (рисунок 1.1) в загальному поділяються на три види, в яких: 1) лопаті жорстко закріплені на валу і мають постійну величину зазору між внутрішньою поверхнею корпусу та лопаттю (рисунок 1.1*а*); 2) лопаті закріплені шарнірно, в яких зазор між крайкою лопаті і корпусом апарата встановлюється самостійно під час роботи (рисунок 1.1*б*); 3) лопаті закріплені маятником (рисунок 1.1*в*); на вал ротора використовуючи підвіси вмонтовуються лопаті, які під час обертання ротора приймають радіальне положення з найменш можливим зазором (0,3-0,5 мм). В апаратах з перерозподілом рідини по висоті тепло- та масообмінної поверхні іноді застосовуються ротори розбризкуючого типу (рисунок 1.1*г*). В процесі обертання ротора на лопать набігає турбулентний валик рідинний, а за лопаттю формується тонке плівкове покриття шару рідини, яке стікає в ламінарному режимі під дією сил тяжіння. З кожним наступним набігом лопаті рідина в цьому шарі перемішується, а вільна поверхня оновлюється.

Апарати, які приходять в працю через дію відцентрових сил, зазвичай називають роторними ректифікаторами. Апарат даного виду типу часто має

ротор, який складений з набору контактних пристроїв (ступеней), що закріплені на валу обертання. У роторно-спіральної ректифікаційної колони всі ступені являють собою багато- або однозахідну Архімедову спіраль. Речовина скітає по внутрішній поверхні обертової спіралі у формі плівки від центру до крайніх точок. Починає контакт з рідиною, пар (газ) протікає крізь пази між спіральних витків. Речовина, яка спадає з зовнішніх крайок спіралей, помтупає в кільцевий збірник, де починає перетікати в розташований нижче щабель, де процес починається знову. Роторні плівкові апарати також застосовуються для роботи з високов'язкими рідинами (до декількох тисяч Па·с), у виробництві жирних кислот і спиртів, гліколей, вазеліну, желатину, гліцерину, силіконових масел, полімерів та ін [11].

Роторні плівкові апарати з жорстко закріпленими лопатями доцільно розподілити на апарати, які не мають скосу на кінцях лопастей (рисунк 1.3а) та апарати, що включаються в себе такий скіс (рисунк 1.3б). У апаратах за скосом степінь зазору між стінкою корпусу та кінцями лопатей змінна по всій товщі лопатей; в процесі обертання ротору даний зазор починає утворювати для продукту що оброблюється канал, який має тенденцію звужувати живий перетин.



*a* – без скоса кінців лопатей; *б* – з скосом кінців лопатей

1 – ротор; 2 – робоча поверхня корпусу; 3 – оболонь нагріву

Рисунок 1.3 – Схема поперечного перетину РПА з жорстко закріпленними лопатями

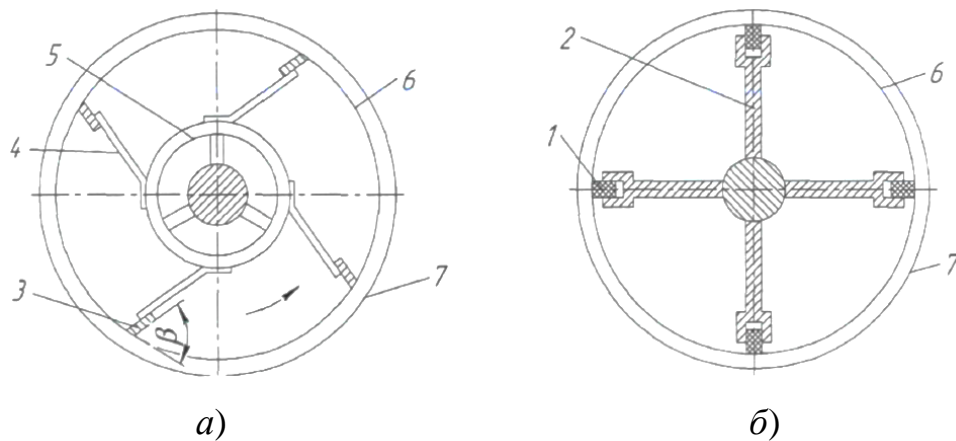
Для апаратів з жорстко закріпленими лопатями крайки лопастей рекомендують виробляти у вигляді накладок, які мають можливість пересуватися паралельно поздовжній осі валу ротора в радіальному напрямку і мати вплив на величини зазора  $\Delta$  між робочою поверхнею апарата та між лопатями.

У роторному плівковому апараті з лопатями, що закріплені рухомо степінь прогавини між стінкою корпусу та кінцями лопатей починає самовстановлюватися при роботі апарата у віднодності до ряду факторів: маси лопастей, щільності зрошення речовиною робочої поверхні, в'язкості і щільності продукту, що оброблюється, швидкості обертання ротора, а також геометричних розмірів конструктивних елементів ротора. Лопаті даних апаратів вмонтовани маючи дві ступені свободи, одною з яких є - обертання разом з валом ротора навколо його поздовжньої осі що є одною для всіх РПА даного класу. Друга ступінь свободи не являється однаковою для всіх апаратів з рухомо-закріпленими лопастями : для апаратів з пружно закріпленими лопатями (рисунок 1.4а) другою степінню свободи є факт повороту лопатей навколо осей на яких вони закріплені на роторі, а для апаратів з ротором стирання – переміщення в радіальному напрямку лопатей-стирання в кронштейнах (рисунок 1.4б) та апаратів з маятниковим закріпленням лопатей (рисунок 1.5а), з шарнірним закріпленням лопатей (рисунок 1.5б).

В роторних плівкових апаратах з пружно закріпленими лопатями, притискання лопаток до робочої поверхні проходить з використанням пружин. Такі апарати найбільш часто процають в режимі стирання лопатей, але можуть процавати і в плаваючому режимі, тільки тоді, коли сила що забезпечує пружинне притискання не стає вищою за силу гідродинамічного тиск з боку оброблюваної речовини. При обробці речовин в стираючому режимі РПА з лопатями, що закріплені на пружинах проводять самоочистку поверхні обробки як це роблять загальновідомі скребкові апарати. Але одна з найбільших відмінностей постає в тому, що кут атаки  $\beta$ , що утворюється за

допомогою фронтальної поверхні лопаті і дотичної до корпусу в точці її дотику з лопаттю, в РПА з пружно закріпленими лопатями менше  $90^\circ$ , в той час як в скребковому обладнанні даний кут перевищує  $90^\circ$ . Ще одна важлива відмінність постає в тому, що апарати скребкового типу являються цільнопоточними і продукт, що обробляється цілком займає весь робочий простір апарата, виключаючи, будь-які можливості для проведення процесу обробки харчових продуктів в системі пар - рідина.

В плівкових апаратах зі стираючим ротором (рисунок 1.4б) кронштейни лопатей закріплюються радіально до валу, а лопаті вставляються вільно в поздовжні пази кронштейнів і тому мають змогу вільно переміщатися в радіальному напрямку.



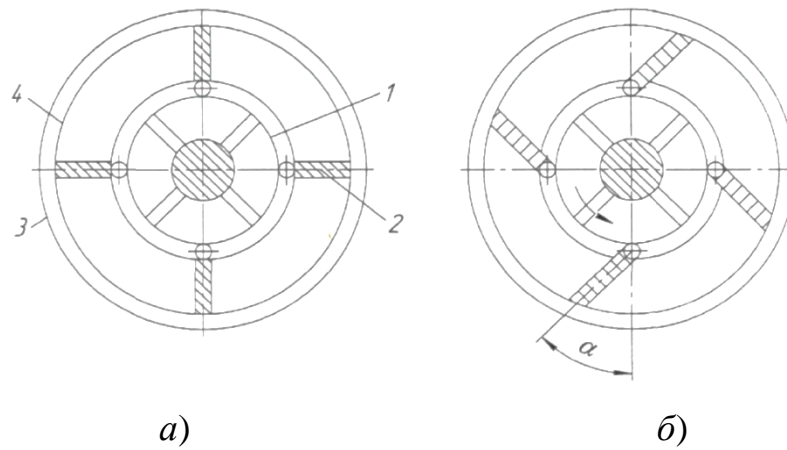
1 – лопать-стирання; 2 – кронштейн для кріплення лопатей; 3 – лопать;  
4 – пластинчата пружина; 5 – диск для кріплення лопатей; 6 – робоча  
поверхня корпусу; 7 – оболонь нагріву (охолодження).

Рисунок 1.4 – Схема поперечного перетину РПА з підпружиненими лопатями (а) і з лопатями-стирання (б)

Під час обертання ротора стираючі лопаті починають притискаються під дією відцентрової сили до робочої поверхні і оброблюваний продукт починає рівномірно розподіляють по по всій робочій поверхні. Стираючі лопаті досить обмежені в рухах в процесі роботи апарату. З цієї позиції РПА зі стираючими лопатями менш універсальні, ніж інші апарати з лопатями, що мають змогу рухатися. У випадках коли з'являється необхідність збільшити ефект

самоочищення робочої поверхні між стираючими лопатями і кронштейнами встановлюються пружини, які можуть створювати додаткову силу притискання стираючих лопатей до корпусу апарату.

В роторних плівкових апаратах з ротором, на якому маятникові лопаті кріпляться з використанням шарнірів на дисках (хрестовинах) ротора, таким чином що крайки лопатей можуть контактувати з робочою поверхнею корпусу і при цьому розташовуватися радіально (рисунок 1.5а). В процесі обертання ротора лопаті починають відхилятися від радіального положення через вплив сил гідродинамічного опору з боку продукту що оброблюється, і їх крайки самовстановлюються, утворюючи зазор в межах 0,2-3,0 мм відносно робочої поверхні. В процесі роботи РПА з ротором, на якому установлені маятникові лопаті тертя лопатей по робочій поверхні не виникає. Більше того, РПА з шарнірно закріпленими лопатями можуть працювати в такому режимі, що прогавина між стінкою корпусу та крайками лопатей наближається до нуля, і в такому випадку лопаті починають ковзати по робочій поверхні (так званий стираючий режим). Такі особливості РПА з шарнірним шарнірно закріпленими лопатями зумовлені тим, що кріплення лопатей в шарнірах виконується не радіально, а додаючи деякий кут  $\alpha$  установки відносно лінії, що з'єднує осі шарніра та вала ротора (рисунок 1.5б). У цьому випадку під час роботи апарата на лопаті починає діяти відцентрова сила, яка спряє притисканню крайок лопатей до робочої поверхні. У тому випадку, коли сили гідродинамічного опору з боку рідини почнуть перевищувати відцентрову силу, лопаті поступово почнуть віджиматися від стінки корпусу і їх крайки утворять деякий зазор між робочою поверхнею (такий режим прийнято називати плаваючим). При зворотному співвідношенні сили притискання лопатей і сили гідродинамічного тиску апарат почне працювати в стираючому режимі. РПА з шарнірно закріпленими лопатями зазвичай працюють при лінійній швидкості крайок лопатей в межах 0,8-4,0 м/с, в той час як РПА з маятниково закріпленими лопатями в межах 8-15 м/с.



1 – диск для кріплення лопатей; 2 – лопаті; 3 – оболонь нагріву;  
4 – робоча поверхня корпусу

Рисунок 1.5 – Схема поперечного перетину РПА з маятниковим (а) і шарнірним (б) кріпленням лопатей

Великого поширення на виробництвах набули апарати з жорстким ротором і шарнірним ротором. У випадку жорсткого закріплення лопатей на роторі продуктивність роботи РПА найчастіше в незначній мірі схильна до впливу зміни в'язкості продуктів, при їх обробці, що має важливе значення, наприклад, у процесах концентрування і сушіння харчових рідин, результатом яких є різке зростання в'язкості протягом всього часу обробки.

Роторні плівкові апарати з шарнірним ротором простіші у розробці тому, що для їх виготовлення не потребується висока точність при механічній обробці робочої поверхні корпусу і центруванні ротора відносно до робочої поверхні корпусу, а також зникає потреба балансування ротора. Окрім цього, в шарнірному роторі, лопаті почнуть піддаватися самостійній механічній обробці в процесі їх приробітку в стираючому режимі, що відбувається на робочій поверхні апарата при підтриманні холостого ходу апарата. Але разом з тим, через той факт, що самовстановлення величини зазору між робочою поверхнею і краївками лопатей опрацювання продукту може протікати в стираючому режимі (при відносно малій щільності зрошення робочої поверхні, великій масі лопатей і надлишкової швидкості обертання ротора, що перевищить величину, яка відповідає за умову переходу від плаваючого

режиму до стираючого режиму), через це з'являється небезпека швидкого зносу лопатей через їх тертя об стінку корпусу і також забруднення робочого продукту (в тому випадку, коли крайки лопатей не обладнані накладками зі зносостійкого матеріалу). Через те ж у РПА з шарнірним ротором виникає проблема використання в умовах пожежо- і вибухонебезпечного виробництва, де можливість утворення іскок і накопичення статичної електрики при терті повинно чітко запобігатися. В умовах високої в'язкості робочого продукту і навіть при незначній щільності зрошення робочої поверхні степінь зазору встановлюється самостійно і може досягати від 2 до 3 мм, що в результаті різко знижує ефективність апарату (ступінь упарювання, коефіцієнти масо і тепловіддачі, ступінь перетворення реагентів і тощо). Через це обґрунтувати вибір необхідного і достатнього типорозміру РПА з шарнірним ротором і вивести його на найоптимальніший режим роботи набагато складніше у порівнянні з РПА з жорстким ротором.

З рисунка 1.4. та 1.5 можна побачити, що РПА з маятниковим ротором може нести в собі основні конструктивні ознаки жорсткого і шарнірного кріплення лопатей (гарантований зазор між поверхнею корпусу і крайками лопатей).

Щоб підвищити ефективність роботи РПА та сумістити в них декілька послідовно або одночасно робочих стадій опрацювання продуктів можна використовувати ротори з підвіскою, яка може комбінувати типи лопатей, посекційно оснащених жорсткими лопатями і різного виду рухомими лопатями. Посекційна зміна способу монтажу лопатей по висоті апарату базується на врахуванні можливої зміни щільності зрошення робочої поверхні по мірі обробки продукту, його в'язкості і фізико-хімічних властивостей, а також виходячи з потреб підвищення кінцевої концентрації продукту, питомого паровиділення з відносного об'єму робочої поверхні та інших показників ефективності. В результаті посекційного поєднання різних видів закріплення лопатей досягається більш стійке зрошення робочої поверхні продуктом по всій довжині робочої поверхні апарату, у разі потреби надається можливість

додатково ввести в РПА робочого продукту або рециркуляції частини готового продукту в деякий поперечний переріз робочої поверхні корпусу за умов плавного розподілення даного додаткового потоку речовини по всій робочій поверхні, запобігання налипання оброблюваної речовини на робочу поверхню при зміні його фізико-хімічних властивостей у процесі протікання крізь апарат, забезпечуються умови для легкого і безшкідного відведення кінцевого продукту з РПА.

Апарат з комбінованим типом кріплення лопатей надає набагато більші можливості під час термообробки продуктів у порівнянні зі простими РПА, які включають в себе підвіску лопатей лише одного з вищенаданих типів, але вони також представляють собою апарати з підвищеною конструктивною складністю. Посекційна зміна виду закріплення лопатей по довжині вала ротора досить часто проходить у поєднанні із перерозглядом геометричної форми корпусу апарата (в кінці корпусу в циліндричну і навпаки, стушагову зміну діаметральних розмірів корпусу циліндричної чи конічної форми тощо). Завдяки цьому додається ефект покращення зрошення робочої поверхні по всій висоті корпусу апарата та виключається її часткове запустіння, яке може виникнути через значну міру концентрування кінцевого продукту.

По конструкції корпусу РПА підрозділяють на апарати з горизонтальним корпусом, вертикальним корпусом і з комбінованим корпусом. В залежності від напрямку руху фаз РПА поділяють на апарати з протитечею опрацьованого рідкого продукту і парової фази, і апарати з прямоточним потіком рідкого продукту і парової фази. За формфактором РПА застосовують з циліндричним корпусом, конічним корпусом, ступінчастим циліндричним корпусом, з комбінованими частинами корпусу.

Тому, роторні плівкові апарати значно збільшують інтенсивність процесів масо- та теплообміну і мають своє місце у використанні для різних галузях виробництва, тісно пов'язаних з випуском в'язких і термолабільних продуктів.

### 1.2.1 Типи роторних плівкових апаратів

Конструктивна особливість випарного апарату повинна повністю покривати деякі вимоги, такі як: висока продуктивність, інтенсивність теплопередачі, менші витрати металу для його випуску, простота конструкції, надійність в ході експлуатації, легкість очищення робочої поверхні, легкість оглядів, ремонтів та заміни окремих частин.

Вибір конструктивних ознак та матеріалу випарного апарату призначається в кожному окремому випадку фізико-хімічними властивостями речовини яка йде на випарювання (в'язкість, температурна депресія, утворення кристалів, термічна стійкість, хімічна агресивність та ін.).

Потік плівок рідин в даних апаратах проходить під дією гравітаційних, відцентрових сил, сил поверхневого натягу рідини та силами з боку лопатей, де гравітаційна складова перевищує інші та змушує плівкове покриття стікати донизу.

У процесі створення роторних плівкових апаратів з великою потужністю, потребується не зруйнувати принцип тонкошарового розподілу рідкої, і газової фази. В такому випадку з'являється необхідність у пошуку спеціальних конструкторських рішень, через те що просте збільшення розмірів апарата не призведе до бажаного кінцевого результату.

Випарник «Лува», являє собою вертикальний циліндричний корпус з ротором, що обігривається зовні за допомогою оболоні [11]. У схожих роторних апаратах одночасно може знаходитися відносно невелика кількість речовини на протязі невеликого часу, що дає змогу для широкого їх використання для обробки термічно нестійких продуктів.

Мінусом ректифікатора «Лува» є ускладнення можливості розробки апарату великих розмірів з мінімальними зазорами між лопаттю ротора і стінкою досить зрозуміла, тому в використовуються лише в процесах, що не потребують підвищеної ефективності розділення. Способи покращення ректифікатора «Лува» описані в патентах [16, 17].

Задля забезпечення більш ефективного зняття конденсату з поверхні ротора на лопатях через деяку відстань запропоновані спеціальні канали. Охолоджувати ротор запропоновано не водою, а повітрям, що, на думку авторів, має збільшити економічні показники процесу. Головною конструктивною ознакою ректифікатора «Лува» є охолодження ротора водою з його середини. У масовому випуску найбільший діаметр апарата становив 0,8 м. Дослідження Райхле і Біллета [18, 19] довели, що із збільшенням діаметру апарату типу «Лува» загальна ефективність його знижується.

Потреба підтримання зазору з однаковою відстанню між жорсткими лопатями ротора і корпусом по всій висоті апарата в умовах змінних температур потребує більшої точності розробки циліндричної частини повсій довжині апарата, враховуючи температурні деформації. В такому випадку, недопустимі навіть найменші відхилення від циліндричного формфактору. Ротор потребує стійкого динамічного балансування. При використанні роторних апаратів з'являється необхідність у ретельному догляді за ущільненнями і вузлами підшипника. Не дозволяється припускати переповнення апарату продуктом. Особлива обережність необхідна під час пуску і зупинки апарата для того, щоб не викликати дебаланс і застоювання ротора. Труднощі збільшуються і під час зміни розмірів апаратів на більші, що викликає затримку у виготовленні великих виробничих апаратів великої потужності. Знос роторних апаратів проходить набагато скоріше, ніж апаратів, що мають нерухомими контактні елементи [12, 13].

Апарати з тонкою плівкою все частіше починають застосовуватися для сушки рідких продуктів і суспензій. Особливою рисою даних сушильних апаратів являється більша швидкість сушіння, безперервний спосіб роботи і сприятливі умови для вакуумного сушіння [14].

При появі необхідності вирішення проблеми запобігання осадження та забруднення поверхні нагрівання в процесі випаровування і сушки розчинів, суспензій і паст, для таких цілей застосовуються апарати під видом ротора що має маятникові елементи з лопатями на пружинах. В залежності від швидкості

обертання ротора під дією відцентрової сили ці лопасті починають наближатися до поверхні нагріву, та активно перешкоджати утворенню будь-яких залишків на ній [15].

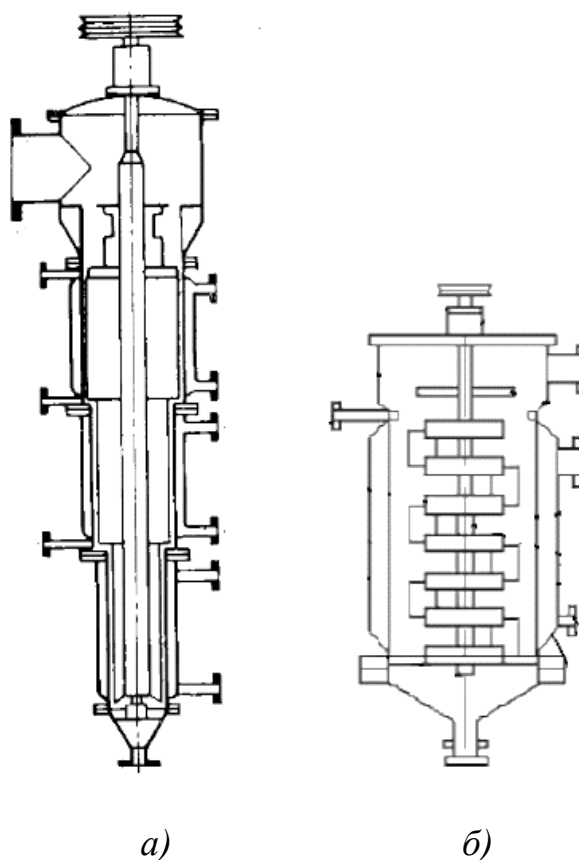


Рисунок 1.5 – Конструкції РПА:

*а* – ступінчатого типу; *б* – циліндричного типу;

По конструкції корпусу РПА підрозділяють на апарати з вертикальним корпусом, горизонтальним корпусом і з комбінацією вертикального і горизонтального корпусів. Залежно від взаємного напрямку руху фаз РПА поділяються на апарати з протитечією оброблюваного рідкого продукту і парової фази, і апарати з прямоточним рухом продукту і парової фази. За формою корпусу РПА бувають з циліндровим корпусом (рисунок 1.5*б*), конічним корпусом, ступінчастим циліндричним корпусом (рисунок 1.5*а*), з конічними і циліндричними частинами корпусу.

Отже, роторно-плівкові апарати інтенсифікують процеси тепло-масообміну і знаходять своє використання в різних галузях промисловості,

пов'язаних з виробництвом в'язких і термолабільних продуктів. Використання таких апаратів є економічно вигідним.

### **1.3 Процеси гідродинаміки та теплообміну в роторних плівкових апаратах**

#### **1.3.1 Процес гідродинаміки в роторному плівковому апараті з падаючою плівкою**

Питання про рух рідини в роторному плівковому апараті формувались основуючись на візуальних спостереженнях, фото, вивченнях утримуючої здатності апарату (середньої товщини плівкового покриття), часі перебування, витратах потужності, тепловіддачі.

Під час руху плівки по теплообмінній поверхні, незалежачи від швидкості обертання ротора, безпосередньо перед лопаттю формується хвиля, яка несе в собі високу ступінь турбулентності. Дана рідинна хвиля постійно перебуває перед лопаттю, і через це рідина в даній зоні перебуває у стані посиленого перемішування. Дослідження визначили, що поверхня плівкового покриття постійно оновлюється рідиною з цієї хвилі. Форма і розмір хвилі завжди пропорційна і залежна від фізичних властивостей рідини, витрати, швидкості обертання і конструкції ротора. Тонка рідинна плівка, що знаходиться безпосередньо за хвилею, починає випаровуватися, а при досить високих питомих теплових навантаженнях в ній починають утворюватися бульбашки з пару. Найбільші бульбашки починають руйнуватися наступною набігаючою лопаттю.

Змочуваність поверхні апарату, швидкість обертання ротора та ін. як правило мають прямий вплив на процес тепловіддачі. Стійкість режиму також залежить і від ширини зазору між лопатою і стінкою.

Характер змочуваності гріючої поверхні, яка залежна від швидкості обертання ротора, установлює інтенсивність теплообміну. При відносно невеликих швидкостях обертання розподілення плівкового покриття на

гріючій поверхні являється несучільною та малоефективною. Зображення приблизного характеру плівки приведено на рисунку 1.10а. Вплив на швидкість обертання ротора дозволяє досягти рівномірного змочування. Зростання швидкості лінійного руху лопасті ротора спричиняє згладжувальне формування потоку хвилі, що напливає на лопать (рисунки 1.10б). Стартовий обертальний період, під час якого швидкість обертання ротора змінюється від  $n_0$  до  $n_{кр}$  в цьому випадку, його можна співставити з зоною гідродинамічного стабілізування, що характерна для ділянки гравітаційної течії плівки. В такому випадку очікується зменшення величин коефіцієнта тепловіддачі через нерівномірне і неповне змочування поверхні. Зростання  $\alpha$  буде виникати під час досягнення визначені швидкості обертання ротора, що забезпечить рівномірне змочення.

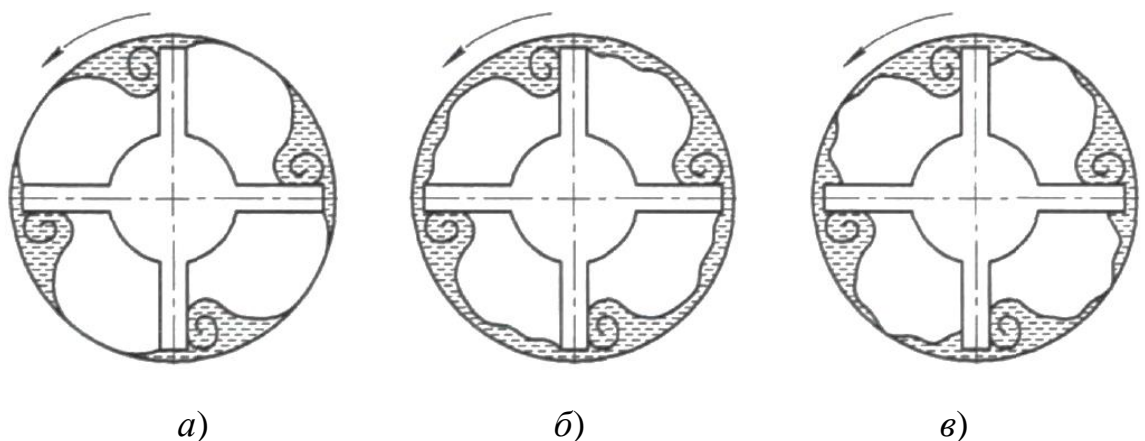


Рисунок 1.10 – Схема розподілення рідинної плівки по поверхні нагріву при малих (а), середніх (б) і високих числах обертів (в)

При подальшому збільшенні швидкості обертання ротора, все більші об'єми рідини будуть перебігати у хвилю напливу, яка знаходиться безпосередньо перед лопаттю, а в плівковому покритті, що утворюється за лопаттю, виникають розірвані зони (рисунки 1.10в) [31, 32, 33].

Хвиля, що з'являється перед лопаттю, містить в собі високу ступінь турбулентності. Контактуючи з лопаттю хвиля рухається разом з нею. Розміри і форми хвиль залежать від фізичних властивостей речовин, витрат, швидкості обертання і конструктивних ознак ротора. Час від часу, довжина хвилі зростає

до 100 мм і може контактувати з попередньою лопаттю. За [31] висота хвилі в 2-25 разів більша за величину зазору. Зі зростанням швидкості обертання ротора висота хвилі має тенденцію зменшуватися. За лопатями розташована зона, за якими виникають пульсації турбулентного характеру, що викликаються ротором та починають поступово згасати і, в кінці кінців, рідина набуває вільного руху від дії сили тяжіння. Проблеми ускладненого руху плівкового покриття в роторних плівкових апаратах роз'яснюється в роботі [34]. Автори роботи описують гідродинамічну складову даного руху речовини таким чином: шарнірна лопать підштовхує хвилю, що має дуговий вигляд, протяжність якої залежна від властивості продукту і швидкості вертикального гравітаційного руху; дугова хвиля контактує з високо турбулентною і спокійною зоною. Наведений трьохстадійний процес (рисунок 1.11) повторяється слідуючою лопаттю.

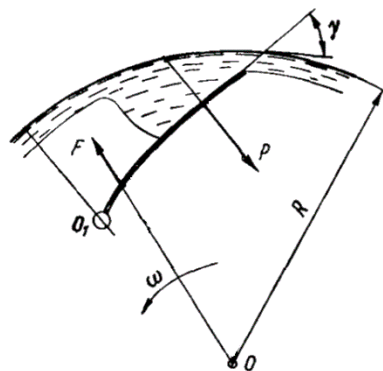


Рисунок 1.11– Схема руху рідини в роторному апараті [35]

Величина зон відповідає багатьом факторам  $[Γ, ρ, μ, n, z, δ]$ . Їх різноманітні комбінації можуть призводити, наприклад, до зростання зони турбулентної течії, і звуження зони спокою від дії сили тяжіння та навпаки.

При розробці та використанні РПА задля того, щоб оцінити його ефективність потрібно визначити середній час перебування оброблюваної речовини в робочій зоні (що найбільш вагомо під час обробки термолабільних речовин); та потужність, яка витрачається на перемішування та розподілення рідини; ефективну теплообмінну поверхню. Але, в той же час, необхідно

врахувати, що гідродинамічний стан, і як наслідок, характер теплообміну часто значно змінюється по всій висоті апарата. Під час приблизного розрахунку апарата, теплофізичний характер властивостей і параметри режиму зрівнюються по висоті апарату. Вивчені питання вказують на складність характеру руху рідини в роторному плівковому апараті. В такому випадку можна виділити три основні види руху рідини:

1. вільний - стікання від дії сили тяжіння;
2. вимушений - хвиля, що виникає на всій поверхні апарата;
3. рух, який містить в собі попередні два.

Існують наступні види гідродинамічного режиму руху рідини: ламінарний; турбулентний; перехідний від ламінарного до турбулентного.

### **1.3.2 Потужність, яка витрачається на розподілення та перемішування рідини**

Проведення досліджень витрат потужності у роторному плівковому апараті, що являється одною найважливіших гідродинамічних характеристик і може використовуватися задля опису різноманітних процесів у плівковому покритті. Звичайні роторні апарати включають в себе приводи, потужності яких можуть вагомо перевищувати, що була викликана механічним процесом оброблювання речовини. Загальна потужність, що підводиться на вал ротора знаходиться по формулі:

$$N_{нов} = N_{кін} + N + N_{тр}, \quad (1.3)$$

де  $N_{кін}$  – потужність, яка була витрачена на подолання кінетичної енергії стартового руху рідини;  $N$  – потужність, що була витрачена на перемішування рідини;  $N_{тр}$  – потужність, яка витрачається в ущільненнях та опорах валу.

Найбільша зацікавленість авторів, для дослідження, припадає саме на потужність, що витрачається на перемішування рідини. Дана частина потужності може бути розрахована різними способами, в залежності від типу закріплення лопатей.

Лопать, що закріплена шарнірно працює або в стираючому режимі, коли її крайка контактує з внутрішньою поверхнею корпусу, або в плаваючому режимі, коли між крайкою лопатті і корпусом самостійно встановлюється деякий зазор.

Для визначення даної потужності використовують загальновідомий вираз для апаратів з механічним перемішуючим пристроєм (мішалкою):

$$N = K_N \rho_p n^3 D^5, \quad (1.4)$$

що для роторних апаратів представляється у наступному виді [54]:

$$N = K_N \rho_p n^3 D^4 H, \quad (1.5)$$

де  $K_N$  - коефіцієнт потужності, який залежить від режиму роботи лопатей,  $\rho_p$  - густина речовини,  $n$  – швидкість обертання ротора,  $D$  - діаметр апарата,  $H$  – робоча висота апарата.

### **1.3.3 Процес теплообміну в роторному плівковому апараті зі стікаючою плівкою**

Передача тепла плівці рідини може відбуватися при:

- а) чистому нагріві (охолодженні) плівки рідини;
- б) нагріві (охолодженні) плівкового покриття з одночасним тепло- і масопереносом зі зміною фази (наприклад, упарювання).

Тепловіддача при нагріванні (охолодженні) плівки рідини залежить від режиму її гідродинамічної течії.

Процес теплообміну при кипінні в плівці, характеризується фазовим перетворенням. Він являє собою перехід рідини в праву фазу, при якій виникає поглинання теплоти пароутворення. При розгляді типу з плівковою течією найчастіше беруть до уваги тільки найступні види пароутворення:

- 1) Випарювання з вільної поверхні рідини.
- 2) Бульбашкове кипіння, при якому пароутворення відбувається за рахунок періодично утворених на поверхні нагріву бульбашок.

Необхідно відзначити, що процес передачі тепла від теплообмінної поверхні до плівкового покриття визначає характер кипіння і умови паровиділення. Тепловий потік розділяється на дві складові: тепло, що передається всьому об'єму плівки від стінки за допомогою теплопровідності, і тепло, що утворює та надходить до новоутворених бульбашок і яке витрачається випаровування речовини. Складова тепла що містить випаровування являється найважливішою під час кипіння в плівці та визначається лише на основі аналітичного розрахунку збільшення і утворення бульбашок.

### **1.3.4 Вплив швидкості ротора**

Підвищення швидкості пересування рідини в роторному апараті порівнюючи зі швидкістю пересування в апараті з плівковим покриттям, яке довільно стікає призводить до підвищення плівкової турбулізації, зниження величини шару ламінарного потоку та до поліпшення умов процесу теплообміну.

Автор [37] відзначає, що результуюча швидкість плівкового покриття в роторному апараті завжди більше, ніж в апаратах з плівкою, яка довільно стікає.

В роботі [38] відзначають, що плівкове покриття повинне бути тонким і значно турбулізованим так, щоб різниця між температурами гріючої поверхні і різних частин плівки була найменшою. Зростання турбулізації плівки, що призводить звуження ламінарного підшару і поліпшення умов теплообміну, забезпечується збільшенням швидкості руху рідини за допомогою колової швидкості.

Але, як вказали автори [37], збільшення швидкості обертання ротора приводить до інтенсифікації теплообмінного процесу на певну ступінь, після якої, на колову швидкість закінчується вплив коли утворюється стійка плівка. Коефіцієнт теплопередачі набуває свого максимального значення при

використанні жорсткої конструкції ротора та при досягненні колової швидкості до 8,5-9,5 м/сек. Але використання роторного апарата з використанням жорстких лопатей більш доцільніше та ефективніше з зазором до 1 мм при процесах теплообміну без змін фази продукту.

Ефект впливу відцентрових сил для тонкоплівкових процесів визначається в роботі [31]. В даному дослідженні, автор виділяє, що при використанні низьких швидкостей руху лопатей можуть почати утворюватися сухі зони безпосередньо на стінці апарату перед тим як лопаті почнуть перерозподіляти плівку. В такому випадку при процесі теплопередачі буде використовуватися тільки невелика частина теплообмінної поверхні. Підвищення швидкості обертання ротора зумовлює виникненню повного змочування теплообмінної поверхні апарату. При використанні більших швидкостей обертання зростає і середня товщина плівкового покриття. Дана умова обмежується тільки нескінченною по всій довжині апарата швидкість лопатей і стала товщина плівки.

Не зважаючи на те, що процес теплообміну у роторному плівковому апараті має досить складний характер, який залежний від різноманіття факторів, автори [36] отримали залежність  $\alpha \sim n^{0,33}$ . Автор відмітив, що режим руху рідини визначається залежністю швидкість обертання ротора від коефіцієнта тепловіддачі. Під час ламінарного руху  $\alpha \sim n^{0,18}$ , при цьому під час перехідного руху характер впливу ротора більш сильніший –  $\alpha \sim n$ . При дослідженні турбулентного режиму руху рідини авторами [39] було отримано залежність з якої випливає, що  $\alpha \sim n^{0,16}$ . Такий відносно великий вплив швидкості ротора характеризується, як турбулізацією плівки, так і змоченням поверхні.

В роботі [21] висловлюється твердження, що відцентрові і динамічні сили всередині апарата зрівноважені. Було визначено, що рідина, яка знаходиться у зазорі між робочим органом та корпусом апарата, розглядається як клин з кутом при вершині. За рахунок витіснення рідини перед фронтом лопаті, утворюється хвиля.

При стисканні рідини в клині між стінкою апарата та лопаттю ротора виникає тиск на неї і відповідна сила, направлена по нормалі до її поверхні. При цьому виникає гідродинамічна обстановка, аналогічна при терті в підшипниках ковзання. Тому подальші дослідження пропонується виконувати, опираючись на теорію змазки.

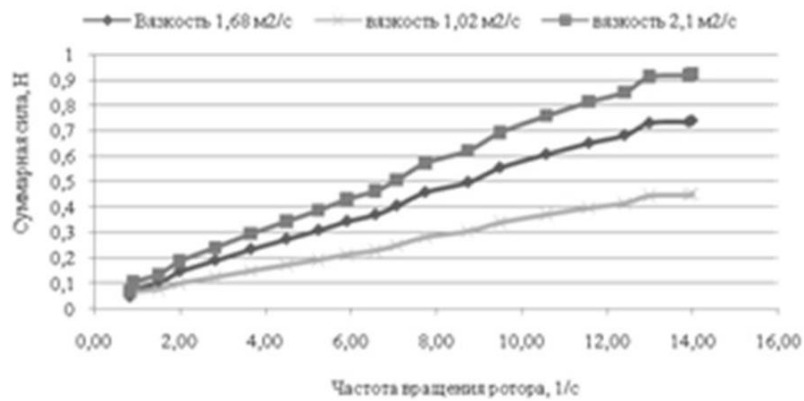


Рисунок 1.8 – Графік залежності сумарної сили від швидкості обертання ротора

В результаті дослідження було виявлено, що залежність частоти обертання ротора та сумарної сили має лінійний характер (рисунок 1.8).

Також, в роботі [22] було підкреслено, що частота обертання ротора також впливає і на процеси теплопередачі (рисунок 1.9).

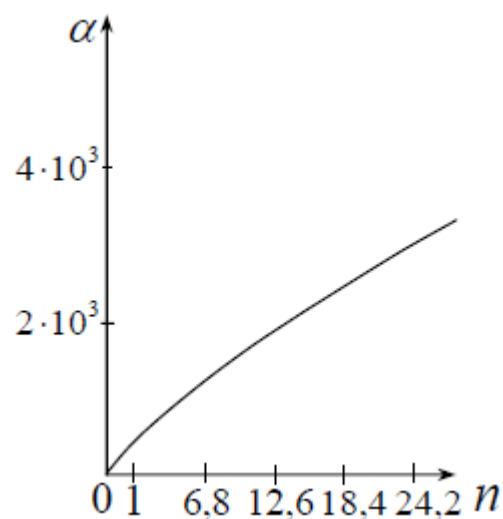


Рисунок 1.9 – Графік впливу числа обертів ротора (об/с) на коефіцієнт тепловіддачі

Було відмічено, що зі збільшенням швидкості обертання ротора кінетична енергія потоку рідини, яка в результаті ударної взаємодії з лопатями дисипується. В місцях взаємозв'язку виникають зони підвищеного тангенціального напруження. Інтенсивність теплообміну між стінкою та киплячою плівкою в значній мірі залежить від того, яку кількість енергії передають плівка потоку рідини.

Розглянуті результати вказують на те, що тепловідача характеризується, як режимом руху рідини, так і взаємодією ротора з плівкою.

#### **1.4 Висновки**

Під час проведення аналізу літературних джерел, можна сказати, що використання тепло- та масообмінної з течією рідини плівкового характеру, а саме роторного плівкового обладнання на в даний час значно поліпшує економічний результат.

Об'єктами використання даних апаратів можуть являтися технологічні схеми виробництва термолабільних речовин; установки для сушіння; установки для концентрування; технологічні схеми виробництва біологічних речовин тощо.

Досить велика частина факторів, які мають вплив на процес гідродинаміки в роторних плівкових апаратах, свідчить про те, що точний аналітичний розв'язок даної задачі є відносно не простим і все ще відсутній. Найбільш близькі до нього базуються на напівемпіричній моделі переносу при плівковій течії рідини.

Роторні плівкові апарати можна розраховувати основуючись на даних експериментальних досліджень, емпіричних формул і критеріальних рівнянь.

Проведення аналізу робіт з розгляду коефіцієнта тепловіддачі показує на те, що вираження впливу ротора полягає в забезпеченні зрошення всієї робочої поверхні теплообміну та в інтенсифікації процесу за рахунок підвищення

турбулентності стікаючого шару. Теоретичне розв'язання цієї задачі потребує уточнення.

Складність процесу гідродинаміки в роторному плівковому апараті робить неможливим його описання використовуючи тільки теоретичні функціональні залежності. Через це, вивчення цього процесу повинне спиратися на значну експериментальну базу, яка дає можливість отримати необхідні розрахункові залежності у виді емпіричних критеріальних рівнянь, що можуть цілком відобразити реальну картину процесу.

В розглянутих роботах процеси, що протікають у роторному плівковому апараті розглянуті не повністю, та конкретизовані дані не були отримані, які б дали можливість аналітично оцінити ступінь загального впливу всіх перерахованих факторів, в яких є досить велика необхідність під час експлуатуванні та розробці даного апарата. Тому доцільність проведення експериментальних дослідів є актуальною.

## **1.5 Мета і задачі досліджень**

Підводячи підсумки по літературному та патентному аналізі поставлена наступна мета роботи: теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження процесу гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі дослідження:

- розробка фізичної і математичної моделі гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті;
- обґрунтувати методи дослідження гідродинаміки та теплообміну;
- удосконалити лабораторний стенд для проведення досліджень;
- розробити методіку експериментальних досліджень;
- провести експериментальні дослідження витрат потужності в роторному плівковому апараті;

- провести експериментальні дослідження коефіцієнта тепловіддачі в роторному плівковому апараті;
- узагальнити результати досліджень;
- розробити методику та алгоритм розрахунку апарата;
- розробити проект роторного плівкового апарата.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ

### 2.1 Фізична модель гідродинаміки в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей

Процес плівкового руху рідини у роторному плівковому апараті являється досить складним (рисунок 2.1), тому можна виділити три основні ділянки:

- I – ділянка виникнення хвилі перед лопаттю;
- II – ділянка стиснення потоку рідини;
- III – ділянка гравітаційного руху плівки рідини.

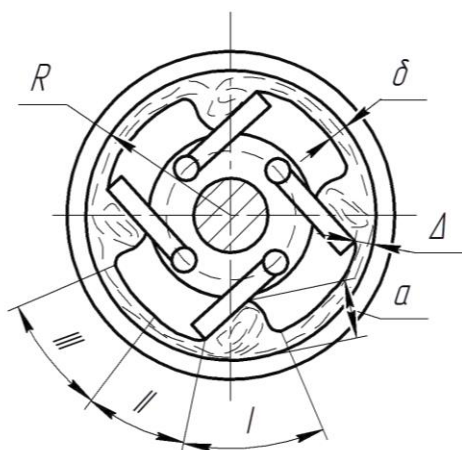


Рисунок 2.1 – Характер течії плівкового покриття в роторному плівковому апараті

Для ділянки вільного гравітаційного руху рідини було вирішено обрати метод аналітичного розв'язання задачі гідродинаміки та теплообміну.

Для ділянок, що не включають в себе цей рух існують теоретично-експериментальні залежності.

В процесі проектування та використання роторних плівкових апаратів для того щоб оцінити їх ефективність потрібно мати дані про час перебування оброблюваної речовини в робочій зоні апарату, потужність, яка була

витрачена на перемішування плівкового покриття та характер інтенсивності теплообміну.

Для визначення часу перебування продукту в роторному плівковому апараті використовується залежність:

$$\tau = \frac{V_{\text{пл}}}{U}, \quad (2.1)$$

де  $V_{\text{пл}}$  - об'єм плівкового покриття в апараті,  $U$  – об'ємна продуктивність.

Для того, щоб оцінити час перебування оброблюваного продукту в роторному плівковому апараті потрібно визначити об'єм плівкового покриття  $V_{\text{пл}}$  [51], в апараті в даний момент часу, для чого попередньо треба знайти значення середньої товщини плівки  $\delta$ .

Форма утворюваного плівкового покриття можна визначити з використанням умов течії оброблюваного продукту через зазор  $\Delta$  між крайкою лопаті і внутрішньою стінкою апарата (ділянка II) при швидкостях руху, яка рівна швидкості обертання ротора. Режим роботи шарнірно закріпленої лопаті може змінюватися від «стирання», коли її крайка контактує з внутрішньою поверхню корпуса ( $\Delta = 0$ ), до «ковзання», коли між крайкою лопаті і поверхнею корпуса самовстановлюється деяка щілина  $\Delta$  (рисунок 2.2). Коли ця щілина більше за нуль, то знос лопатей ротора практично відсутній, і оброблюваний продукт не змінює своїх характеристик, тобто не забруднюється [53].

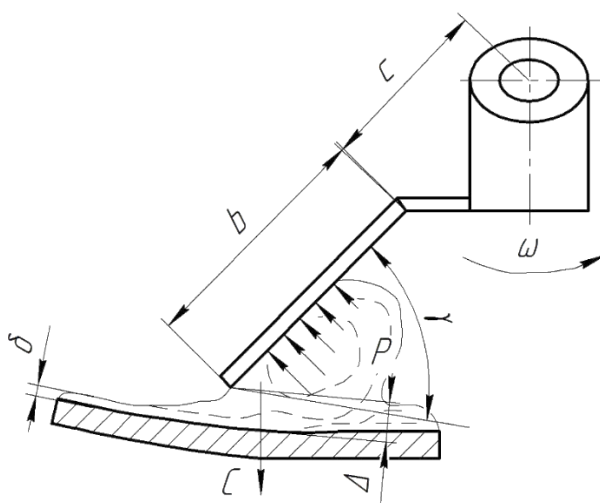


Рисунок 2.2– Схема руху рідини в роторному апараті [54]

Товщину плівки безпосередньо за лопаттю можна визначити за наступою формулою [54]:

$$\delta = \varepsilon \cdot \Delta \quad (2.2)$$

де  $\varepsilon$  - коефіцієнт стискання рідинного потоку, який залежить від  $Re_{пл}$ . (рисунок 2.3).

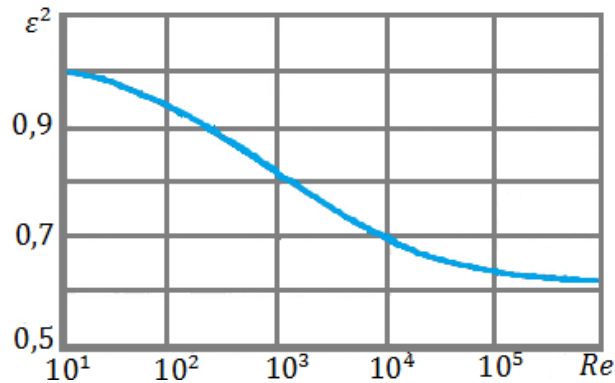


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта стискання рідинного потоку від значень числа Рейнольдса [53]

Під час роботи лопатей в режимі «ковзання» на лопать лягає дія тільки двох сил (рисунок 2.2): відцентрої сили  $C$  і сили гідродинамічного тиску валика рідини, що діє відносно нормалі поверхні лопаті. Складаємо рівняння моментів зазначених сил відносно точки повороту шарнірно закріпленої лопаті, вирішення його дасть наступну залежність [53]:

$$K_N = 15.5 \cdot \frac{z \cdot m_{уд}}{\rho_p \cdot D^2} \cdot \frac{b + 2c}{b + c} \cdot \sin 2\gamma \quad (2.3)$$

де  $m_{уд}$  - маса лопаті з довжиною 1 м, а через те що використовуються второпластові лопаті, їх маса незначна,  $b$  і  $c$  - розміри лопаті та  $\gamma=60^0$  - кут атаки лопаті що приведений на рисунку 2.2.

Вивчаючи характер руху плівкового покриття можна виявити, що перед шарнірною лопаттю при деяких умовах виникає хвиля, що містить в собі високу ступінь турбулентності. Після контакту хвилі із лопаттю, вона починає рухатись. Розміри та форми хвиль напряму залежать від теплофізичних

властивостей оброблюваної рідини. Безпосередньо за лопаттю виникає ділянка, в межах якої містяться поступово затухаючі турбулентні пульсації, що викликаються ротором та після цього плівкове покриття починає переходити у вільний гравітаційний рух від дії сили тяжіння. Отже до хвилі, що має дуговий характер, приєднуються також спокіна і високотурбулентна зони. В той же час перед хвилею починає утворюватися завихрення - «валик» рідини, приймають дію турбулентних пульсацій, що викликаються ротором (дотичні напруження) і сила тяжіння [53]:

$$\tau_{\omega} = \sqrt{\rho g \delta}, \quad (2.4)$$

де  $\delta$  визначається як:

$$\delta = 230 \cdot \varepsilon \cdot D \cdot \text{Re}_{\text{вц}}^{-1.85} \text{Re}_{\text{пл}}^{0.75} K_{N1}^{-1.3} z^{0.85} \left( \frac{b+c}{b+2c} \right)^{1.3} (\sin 2\gamma)^{0.33} \quad (2.5)$$

Величина зон може залежити від різноманітних факторів. Комбінуючи їх різним чином, можна викликати збільшення зон турбулентної течії, та зменшення спокійних зон від дії сили тяжіння [53].

## 2.2 Фізична модель процесу теплообміну

Представлений аналіз задачі теплообмінного процесу в роторному плівковому апараті з шарнірним закріпленням лопатей у випадку ламінарного режиму руху плівки за лопаттю.

Спрощена фізична модель представлена на рисунку 2.4.

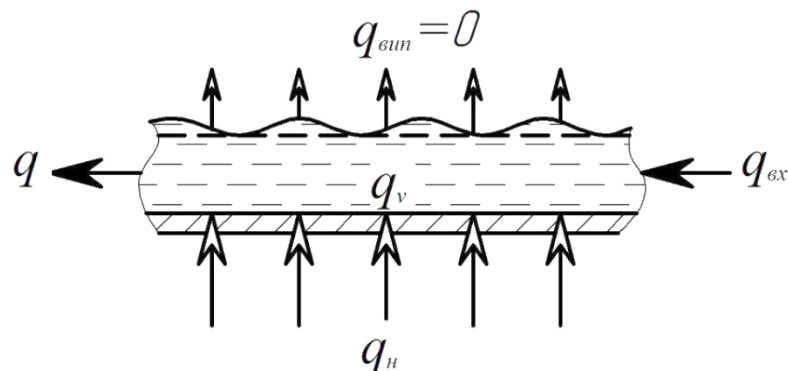


Рисунок 2.4 - Схема теплових потоків

Спрощену фізичну модель можна сформулювати наступном чином: по нерухомій теплообмінній поверхні вимушено рухається рідина з нерівномірним профілем. Тоді тепловий баланс можна записати у наступному вигляді:

$$q = q_{\text{вх}} + q_{\text{н}} - q_{\text{в}} + q_{\text{в}}. \quad (2.6)$$

Поступаюча рідина містить в собі деяке тепло  $q_{\text{вх}}$ . Під час руху рідини у виді плівки, у ній утворюється енергія дисипації  $q_{\text{в}}$ , що викликається обертанням ротора. Від гріючої поверхні рідина отримує  $q_{\text{н}}$ . Оскільки розглядається процес нагрівання, то частина тепла  $q_{\text{в}}$ , що відводиться в процесі парування – не враховується. Формулюючи фізичну модель слід прийняти наступні припущення:

- утворення вторинної пари не відбувається  $q_{\text{в}} = 0$ ;
- потік чітко розділений по всій поверхні гідродинамічного пристінного шару та валиків;
- потужність, що витрачається на перемішування рівномірно десипується тільки в зоні пристінного шару;
- течія у зоні пристінного шару має усталений рух, конвективне перенесення теплоти в напрямку течій відсутнє;
- валики, що рухаються по пристінному шару рідини проковзують;
- температура стінки по всій робочій висоті апарата постійна.

### 2.3 Математична модель процесу теплообміну

Для вирішення задачі теплообміну потрібно скласти декілька рівнянь [54]:

- 1) тепловідачі;
- 2) енергії;
- 3) руху;
- 4) суцільності.

А також визначити граничні умови та умови однозначності.

Представлені далі рівняння використовується для дільниці з вільною гравітаційною ламінарною течією плівки рідини.

1) Рівняння тепловіддачі:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2.7)$$

$$q = \alpha(t_c - t_p) \quad (2.8)$$

$$\alpha = -\frac{\lambda}{t_c - t_p} \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (2.9)$$

Що при зміні температурного поля тільки в напрямку  $y$  набуває вигляду:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{t_c - t_p} \frac{\partial t}{\partial y}, \quad (2.10)$$

де  $t_c$  – температура стінки,  $t_p$  - температура середовища

2) Рівняння енергії:

$$\frac{\partial t}{\partial x} + W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_y \frac{\partial t}{\partial y} + W_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2.11)$$

де  $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$  – коефіцієнт температуропровідності.

Для стаціонарного переносу тепла в напрямку осі  $z$ :

$$W_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad (2.12)$$

3) Рівняння руху:

$$v \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} - g = 0 \quad (2.13)$$

$$\mu \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} - \rho \cdot g = 0 \quad (2.14)$$

4) Рівняння суцільності:

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

Задаємося граничними умовами.

При  $y = 0$ :

$$W_x = W_z = W_y = 0, \quad (2.16)$$

а тепловий потік:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \quad (2.17)$$

При  $y = \delta$ :

$$\frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad (2.18)$$

що пояснює відсутність передачі тепла до повітря в середині апарата.

Приймаємо умову відсутності контакту плівки і газового середовища, тоді зовнішня поверхня ( $y = \delta$ ):

$$\frac{\partial W_z}{\partial y} = 0. \quad (2.19)$$

Температури рідин на вході в апарат постійна по всьому перерізу при  $z = 0$ :

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0. \quad (2.20)$$

Виникнення пульсацій швидкостей в напрямку що має перпендикулярне направлення щодо стінки, описується турбулентною течією однофазного потоку. Пульсації швидкостей можна вирахувати використовуючи дотичні напруження. Існування пульсацій швидкостей призводить до збільшення інтенсивності процесу перенесення кількості руху, теплоти та речовин, які можна оцінити використовуючи коефіцієнт турбулентних в'язкості, теплопровідності та дифузії.

Частина витрат енергії при перемішуванні плівки рідини пов'язане з виникненням дисипації та передачі цієї енергії на нагрів рідини. Присутність у рідині джерела тепла такого виду у багатьох випадках призводить до значного поліпшення інтенсивності процесу теплообміну в апараті.

Граденти швидкостей найбільші саме в пристінних шарах рідини. Зробивши припущення, що потужність  $N$ , що витрачається на перемішування,

рівномірно розсіюється в гідродинамічному шарі товщиною  $\delta_{гд}$ , тоді об'ємна щільність джерела тепла складатиме [54]:

$$q_v = \frac{N}{2\pi RH\delta_{гд}} \quad (2.21)$$

На інтенсивність теплообміну значно може вплинути лише частинка потужності  $N_T$ , що дисипується в пристінному шарі товщиною  $\delta_T$ , тоді можна скористатися залежністю:

$$\delta_T = \delta_{гд} Pr^{-1/3} \quad (2.22)$$

Оскільки [54]:

$$N_T = 2\pi RH\delta_T q_v \quad (2.23)$$

тоді з урахуванням (2.22) знайдемо:

$$N_T = N Pr^{-1/3}. \quad (2.24)$$

Використовуючі приведені судження можна стверджувати, що при перемішуванні, коли плівкове покриття, яке знаходиться за лопаттю, товщиною  $\delta$  турбулентне,  $Pr > 1$  а потік тепла на поверхні апарата  $Q$  більше або дорівнює  $N$ , тоді величиною  $q_v$  яка може впливати на розрахунки теплообміну можна не враховувати [54].

Зі зростанням в'язкості рідини, що переміщується турбулентність в залишковому за лопатею шарі товщиною  $\delta$  спадає. У випадку, коли проходить підрізання пристінного гідродинамічного шару лопатею ротора, то майже вся енергія перемішування дисипується в шарі товщиною  $\delta$ . Тоді об'ємна в'язкість внутрішнього джерела тепла буде дорівнювати:

$$q_v = \frac{N}{2\pi RH\delta} \quad (2.25)$$

а потужність, яка починає розсіюватися в тепловому пристінному шарі:

$$N_T = N \frac{\delta_T}{\delta}. \quad (2.26)$$

Найвагоміший вплив  $q_v$  на теплообмін в плівковому покритті одержується у випадку підрізання лопатею ротора теплового пристінного

шару. В такому випадку весь об'єм потужності, що затрачений на механічне перемішування рідини, переноситься за допомогою теплопровідності.

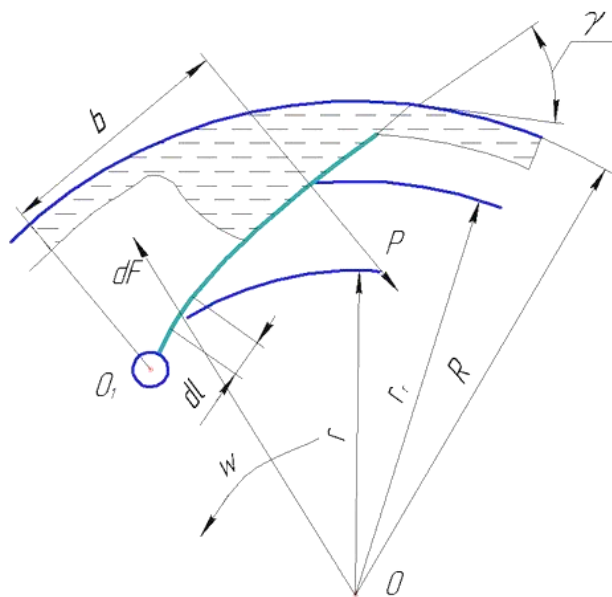


Рисунок 2.5– Схема зображення математичної моделі процесу теплообміну [54]

На теплообмінній поверхні апарата знаходиться практично не оновлюваний шар рідини товщиною  $\delta$ , в якому рівномірно розсіюється енергія  $N$ , що випрачається на перемішування рідини. Набігаючи разом з лопатями ротора рідинні валики ковзають і котяться по поверхні шару товщиною  $\delta$ . При цьому, якщо тепловий потік на стінці рівний  $Q$ , то відшару товщиною  $\delta$  до рідинних валиків передається теплота в кількості  $Q \pm N$  ( $+N$  – при нагріві,  $-N$  – при охолодженні рідини в апараті) [54].

Коефіцієнт теплопередачі  $\alpha$  в роторному плівковому апараті звичайно зводять до виду теплового потоку на стінці, тобто [54]:

$$\alpha = \frac{Q}{F(T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}})}, \quad (2.27)$$

де  $T_{\text{ст}}$  – середня температура шару, що не оновлюється в перетині апарата,  $T_{\text{ж}}$  – середня температура речовини в перетині апарата;  $F = 2\pi RH$  – площа теплообмінної поверхні роторного апарата.

Відповідно до фізичної моделі, що була запропонована в теплообмінному процесі можна висвітлити наступні характерні частини коефіцієнтів тепловіддачі.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки апарата до рідинного шару, безпосередньо за лопаттю (ділянка II, III (рисунок 2.1)) :

$$\alpha_{\text{пл}} = \frac{Q}{F(T_{\text{ст}} - T_{\text{пл}})}, \quad (2.28)$$

де  $T_{\text{пл}}$  – середня температура шару рідини в перетині апарата, що неоновлюється.

Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні шару до рідинних валиків (ділянка I):

$$\alpha_{\text{вл}} = \frac{Q \pm N}{F_{\text{вл}}(T_{\text{п.пл}} - T_{\text{вл}})}. \quad (2.29)$$

В даному рівнянні  $T_{\text{п.пл}}$  – температура рідини на умовній границі поділу шару та валика рідини;  $F_{\text{вл}}$  – площа поверхні контакту рідинних валиків з шаром, що не оновлюється:

$$F_{\text{вл}} = zaH, \quad (2.30)$$

де  $a$  – контактний периметр валика з плівкою (рисунок 2.1).

Знаходження будь-якого з окремих коефіцієнтів тепловіддачі являється іншою, не залежною від інших, задачею. Розглянемо приклад послідовного рішення таких задач [54].

Процес теплообміну поперек неоновлюваного шару товщиною  $\delta$  реалізується за рахунок теплопровідності. Припустивши, що течія рідини усталена і те, що конвективний перенос теплоти в напрямку течії нехтовно малий у порівнянні з тепловим потоком поперек шару, скористаємось для розрахунку поля температур, в ньому рівняння теплопровідності для середовища з внутрішнім джерелом [54]:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dy^2} + q_v = 0 \quad (2.31)$$

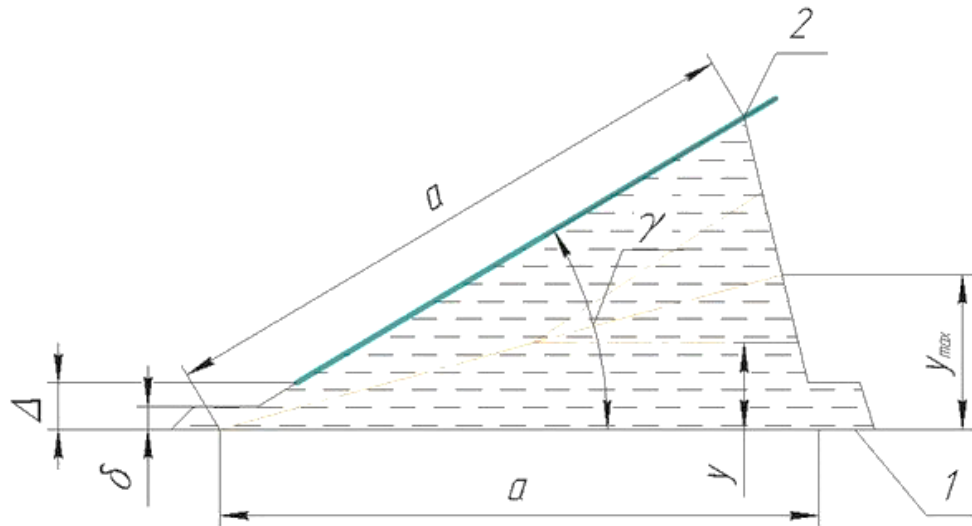


Рисунок 2.5 - Схема розподілу рідини в перетині апарата

Задаючись умовою  $q_v = const$  з (2.27) та граничними умовами:

- при  $y = 0, T = T_{ст}, q = const$ ;
- при  $y = \delta, q = 0, Q/F = -\lambda (dT/dy)$ .

Інтегрування рівняння (2.32) дасть слідуочий розподіл температур в шарі товщиною  $\delta$ :

$$T_{ст} - T = \frac{Q}{\lambda F} y + \frac{N}{\delta F \lambda} \frac{y^2}{2}, \quad (2.32)$$

з якого при  $y = \delta$  можна знайти температуру поверхні плівки:

$$T_{ст} - T_{п.пл.} = \frac{Q\delta}{\lambda F} + \frac{N\delta}{2\lambda F}, \quad (2.33)$$

Знайдене рівняння (2.33) дає змогу проінтегрувати вираз для середньої температури плівки рідини:

$$T_{пл} = \frac{1}{\Gamma_{пл}} \int_0^{\delta} u_z T dy. \quad (2.34)$$

Припустивши, що розподілення осьових швидкостей  $u_z$  відповідає рівнянню:

$$u_z = \left( \delta - \frac{y}{2} \right) \frac{gy}{\nu}, \quad (2.35)$$

що в свою чергу справедливе тільки для плівки, що вільно стікає, в результаті загального рішення (2.32) і (2.33) знайдемо:

$$T_{\text{ст}} - T_{\text{пл}} = \frac{5 Q \delta}{8 \lambda F} \left( 1 + \frac{9 N}{25 Q} \right). \quad (2.36)$$

Тоді знайдений вираз дасть змогу знайти коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_{\text{пл}} = \frac{8 \lambda}{5 \delta} \left( 1 + \frac{9 N}{25 Q} \right)^{-1}. \quad (2.37)$$

Для визначення розрахункової залежності коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\text{вл}}$  та неоновлюваного шару, можна скористатися рівнянням теорії пенетрації, яка по характеру однакова з рівнянням масообміну і має вигляд [54]:

$$\alpha_{\text{вл}} = \frac{2}{\sqrt{5}} \sqrt{\frac{c_p \lambda \rho}{t_{\text{дф}}}}, \quad (2.38)$$

де  $t_{\text{дф}}$  – час оновлювання теплообмінної поверхні між валиками по поверхні шару,  $t_{\text{дф}} = \alpha / u_{\text{от}}$ ;  $u_{\text{от}}$  – швидкість пересування рідинних валиків в поверхневому шарі.

Враховуючи те, що валики рідини прокачуються по шару з проковзуванням ( $u_{\text{от}} < \omega R$ ), можна записати [54]:

$$u_{\text{от}} = k \omega R, \quad (2.39)$$

де  $k$  – коефіцієнт, величина якого зазвичай становить менше одиниці; експериментально найдено  $k = 0,5$ .

Тоді рівняння (2.29) приймає наступний вигляд:

$$\alpha_{\text{вл}} = 0,8 (C \lambda \rho \omega)^{\frac{1}{2}} (R/a)^{1/2}. \quad (2.40)$$

Рівняння (2.32), (2.33), (2.36) з урахуванням співвідношень:

$$V_{\text{ж}} T_{\text{ж}} = V_{\text{пл}} T_{\text{пл}} + z V_{\text{вл}} T_{\text{вл}} \quad (2.41)$$

де  $V_{\text{ж}}, V_{\text{пл}}, V_{\text{вл}}$  – об'ємні витрати рідини в апараті, в шарі товщиною  $\delta$  і в валику відповідно, після найпростіших перетворень одержуємо:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{\text{пл}}} + \frac{3 \delta}{8 \lambda} \left( 1 + \frac{11 N}{15 Q} \right) \frac{z V_{\text{вл}}}{V_{\text{ж}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вл}}} \left( 1 + \frac{N}{Q} \right) \frac{F}{F_{\text{вл}}} \frac{z V_{\text{вл}}}{V_{\text{ж}}}. \quad (2.42)$$

Враховуючи, що модель теплообміну має приблизний характер, рівняння (2.42) можна спростити:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{пл}}} \left(1 \pm \frac{3}{5} \frac{zV_{\text{вл}}}{V_{\text{ж}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\text{вл}}} \frac{F}{F_{\text{вл}}} \left(1 \pm \frac{N}{Q}\right) \frac{zV_{\text{вл}}}{V_{\text{ж}}}}. \quad (2.43)$$

У рівнянні (2.43) доданки, які змінюють знак слід обирати додатними при нагріві і від'ємними при охолодженні рідини в апараті.

Відстань від оболоні (рисунок 2.6) до найвіддаленішої рідинної частинки:

$$y_{\text{max}} = f_{\text{вл}}/a \quad (2.44)$$

$$y_{\text{max}} = \frac{1}{2} a \sin\gamma \quad (2.45)$$

$$y_{\text{max}} = \left(\frac{1}{2} f_{\text{вл}} \sin\gamma\right)^{1/2} \quad (2.46)$$

При ламінарному стіканні рідини в валиках число  $a$  можна знайти шляхом спільного розв'язку рівнянь (2.44)-(2.46), та отримуємо рівняння [54]:

$$a = \left(\frac{56\nu}{g \sin^3\gamma}\right)^{1/4}. \quad (2.47)$$

Залежність з врахуванням (2.31), (2.40) дозволяє визначити:

$$\alpha_{\text{вл}} \frac{F_{\text{вл}}}{F} = 0,21z(C\lambda\rho\omega)^{1/2} \left(\frac{V_{\text{вл}}\nu}{gR^2 \sin^3\gamma}\right)^{1/8}, \quad (2.48)$$

яке спрощує процес розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  по (2.43).

Співвідношення  $zV_{\text{вл}}/V_{\text{ж}} = 1 - (g\delta^3)/(3\Gamma\nu)$  з урахуванням:

$$\frac{\Gamma_{\text{пл}}}{\nu} = \frac{1}{3} \frac{g(8\Delta)^3}{\nu} \quad (2.49)$$

можна визначити по формулі:

$$\frac{zV_{\text{вл}}}{V_{\text{ж}}} = 1 - \frac{g\delta^3}{3\Gamma\nu}, \quad (2.50)$$

де  $\Gamma = V_{\text{ж}}/(2\pi R)$  – середня щільність зрошення в роторному апараті.

Математичне описання теплообмінного процесу дає змогу визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  з відхиленням для випадку ламінарної течії оброблюваної рідини за лопаттю, відповідно до прийнятих припущень.

## **2.4 Обґрунтування методики проведення експериментальних досліджень**

### **2.4.1 Методика дослідження тепловіддачі**

Дослідження проводились на скляному роторно плівковому апараті. В якості робочої рідини використовувалася вода та розчини 20%, 30%, 40% та 50 % гліцерину у воді.

Дослідження проводилися в наступній послідовності. В оболонь апарата насосом подавався теплоносіє з температурою, що відрізнялася від температури оброблюваного продукту безпосередньо на вході в апарат. Температури теплоносія на вході і виході із зовнішньої оболоні і продукту на вході і виході із апарата контролювалися приладом А 565 [65].

Встановлювалися швидкість обертання ротора, що фіксувалися за допомогою тахометра типу ТЦ-3М (100 об/хв), з паузою в 5-10 хв., для встановлення необхідного температурного режиму, після чого замірялися температур теплоносія та продукту на вході і на виході з апарату, а також встановлювалися витрати теплоносія та продукту, які були зафіксовані за допомогою секундоміра, далі швидкість обертання поступово збільшувалася за допомогою важеля на 100 об/хв за крок проводячи викладені вище дії аж до 600 об/хв [65].

Після чого проводилася зміна витрати продукту і повторювалися всі виміри при цьому змінюючи швидкість обертання ротора від 100-600 об/хв.

Під час проведення досліджень на гліцерині, в апарат насосом-дозатором подавався розчини від 20% до 50% гліцерину з водою. В якості теплоносія в апарат подається вода. Показники температури теплоносія фіксували приладом А565. Далі встановлювалися швидкість обертання ротора і фіксувалися тахометром ТЦ-3М від 100 об/хв. до 600 об/хв. Змінювалися витрати розчину 20%, 30, 40% та 50 % гліцерину у воді, і знову проводили дослідження [65].

## 2.4.2 Методика дослідження потужності

Експериментальні дослідження проводяться з використанням роторного плівкового апарата. Для того щоб визначити витрати потужності, що витрачаються на розподілення та перемішування рідини робочою речовиною була використана вода, розчини 20%, 30%, 40% та 50 % гліцерину у воді.

Дослідження проводилось наступним чином. За допомогою насоса в оболонь апарата подавався теплоносіє. А в робочу зону апарата за допомогою напірної колби подавалися або вода або розчини 20%, 30%, 40% та 50% гліцерину у воді, в залежності від того який дослід проводився [65].

Встановлювалися швидкість обертання ротора, що фіксувалися за допомогою тахометра типу ТЦ-3М (100 об/хв), з паузою в 5-10 хв., для встановлення необхідного температурного режиму, після чого замірялися температур теплоносія та продукту на вході і на виході з апарату, а також встановлювалися витрати теплоносія та продукту, які були зафіксовані за допомогою секундоміра, далі швидкість обертання поступово збільшувалася за допомогою важеля на 100 об/хв за крок проводячи викладені вище дії аж до 600 об/хв [65].

Фіксувалися показники амперметра та вольтметра.

Після чого проводилася зміна витрати продукту і повторювалися всі виміри при цьому змінюючи швидкість обертання ротора від 100-600 об/хв.

Для визначення потужності, яка витрачається на обертання ротора під час сухого тертя в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей, необхідно було б для проведення дослідження розібрати конструкцію апарата, тобто, зняти лопаті, які закріплені на роторі, але за такої конструкції апарата цього робити недоцільно, тому що ротор у такому випадку не мав би опори і виникла б можливість його коливання [65].

Тому дослідження проводилася в апараті з шарнірним кріпленням лопатей, але для того, щоб визначити потужність яка втрачається в ущільненнях та опорах валу було вирішено використовувати ПАВ (розчин

мила у воді) та за допомогою цього можливо максимально зменшити коефіцієнт тертя.

Дослідження проводилось наступним чином. В корпус апарата через напірну колбу подавався ПАВ (розчин мила у воді).

Встановлювали швидкість обертання ротора які фіксувалися тахометром типу ТЦ-3М приблизно 150-200 об/хв., фіксували показника амперметра та вольтметра. Після чого збільшували швидкість обертання ротора на 50-70 об/хв. і знову знімали виміри до досягнення граничної швидкості обертання ротора 650-750 об/хв [65].

## **2.5. Опис лабораторної установки**

Установка призначена для оцінки можливості застосування блоку роторний плівковий апарат – конденсатор вторинної пари для дистиляції в'язких і термолабільних сумішей і упарюванні розчинів; визначення параметрів процесу і витратних характеристик; дослідження процесів масообміну тепла.

Особливістю даної установки (рисунок 2.6) є її антикорозійне стерильне виготовлення. Основне апаратне оформлення виконане з хімічного лабораторного термостійкого скла типу ТУ ГОСТ 9111-59. Апарат може працювати під тиском до  $10^{-3}$  мм. рт.ст. Комунікації, по яких рухається продукт, виконані або з вищезгаданого матеріалу, або з фторопластових трубок. Лопатки ротора виготовлені з фторопласту марки Ф4. Торцеве ущільнення ротора має конструкцію, що виключає попадання запірної рідини в корпус випарника. Насос для подачі в апарат продукту – сильфонний, фторопластовий дозатор виконаний також в стерильному корозійностійкому виконанні [65].

Дослідна установка РППК виконана з матеріалів, що дозволяють проводити дослідження гідродинаміки, масообміну теплообміну при обробці

стерильних, особливо чистих, медичних, харчових, хімічно агресивних і інших продуктів.

#### Технічні характеристики установки.

Продуктивність по відігнаній волозі	1,5 кг/год
Робочий тиск, кПа	1,5...100
Напруга, В	220/380
Габарити, мм	1480·590·2850
Вага, кг	2160

#### Роторний плівковий апарат

##### корпус:

поверхня нагрівання	0,934 м <sup>2</sup>
діаметр внутрішній	0,05 м
довжина робоча	0,595 м
товщина стінки	0,0015 м
матеріал	скло типу ТУ ГОСТ 9111-59

##### оболонь:

діаметр зовнішній	0,08 м
товщина стінки	0,002 м
температура теплоносія	20-100°С
витрати теплоносія	60 м <sup>3</sup> /с
матеріал	скло типу ТУ ГОСТ 9111-59

##### ротор:

тип ротора	шарнірний
кількість ярусних лопаток	14
кількість лопаток в ярусі	2-3-4
частота обертання ротора	0-700 об/хв
регулювання обертів	безступінчате

##### конденсатор вторинної пари:

конденсатор пари змієвиковий	
поверхня охолодження	0,3 м <sup>2</sup>

матеріал	скло типу ТУ ГОСТ 9111-59
<u>конденсатор пари трубчастий:</u>	
діаметр трубки	0,03 м
довжина трубки	0,78 м
поверхня охолодження	0,006 м <sup>2</sup>
матеріал трубки:	скло типу ТУ ГОСТ 9111-59
полімерний рукав	полікарбонат
метал	нержавіюча сталь
витрати хладагента	42 м <sup>3</sup> /с
температура хладагента	5-20 <sup>0</sup> С

Установка (рисунок 2.6) складається з наступних основних вузлів: роторний плівковий апарат 1 з оболонню 2 і шарнірним ротором 3 з приводом 4 і торцевим ущільненням 5 і конденсатор вторинних парів із змінною трубкою або змієвиковий конденсатор 6.

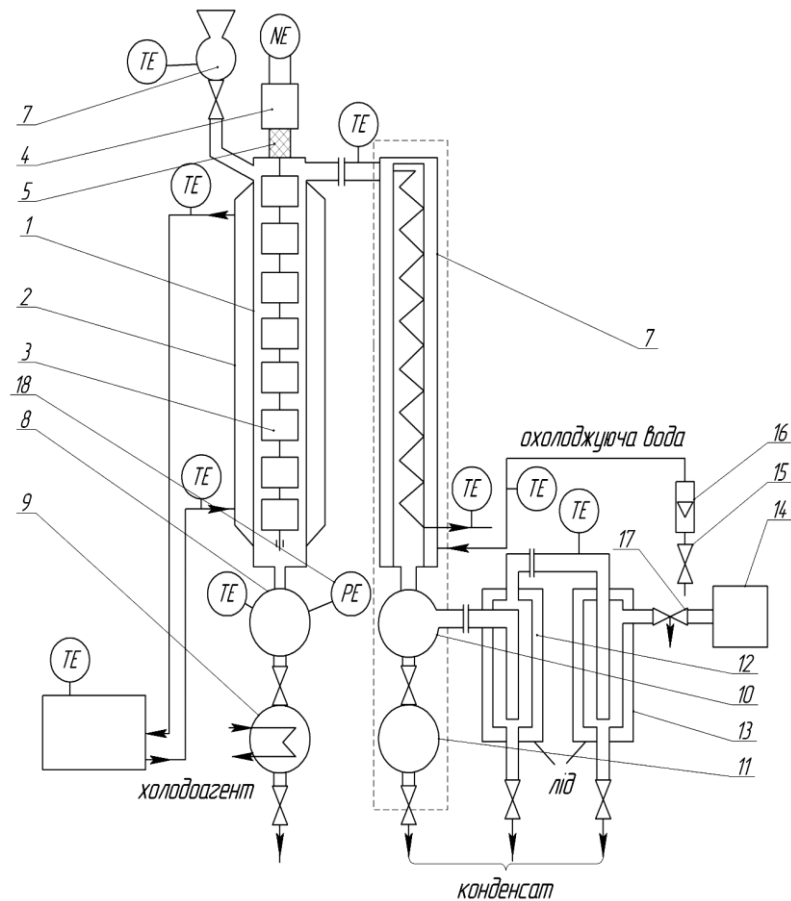


Рисунок 2.6– Схема дослідної установки

- 1 – корпус РПА; 2 – оболонь; 3 – ротор; 4 – привід; 5 – торцеве ущільнення;  
 6 – напірна посудина; 7 – конденстаор; 8 – приймальна ємність;  
 9 – ємність зливу; 10 – приймальна ємність конденсату;  
 11 – зливна ємність конденсату; 12 пастка першого ступеня;  
 13 – пастка другого ступеня; 14 – вакуум-насос; 15 – вентиль; 16 – ротаметр;  
 17 – вентиль; 18 – вакууметр;

Початковий розчин подається в двох вентильний живильник з напірною судиною 7 з регулюючими витратами і поступає в РПА 1, захоплюється лопаткою ротора 3 і розподіляється у вигляді тонкого рідинного шару по внутрішній поверхні апарату, що обігривається оболонню 2. Упарений розчин стікає в приймальну і зливну 8, 9 колби. Вторинні пари поступають в конденсатор вторинної пари 6. Якщо в якості поверхні охолодження використовуються змінні труби 6, пари конденсуються на ній і конденсат стікає в нижню частину корпусу. Частина парів, що сконденсувалися на

внутрішній поверхні корпусу 6 стікає в нижню частину поверхні корпусу. А та її частина, що не сконденсувалася, поступає в пастки 12, 13, підключені до вакууму-насоса 14 [65].

У випадку, коли в якості поверхні охолодження в конденсаторі вторинних парів використовується змійовик 6, то дистилат стікає в приймальну колбу 10 і збирається в зливній колбі 11 [65].

Регулювання витрат охолоджуючого агента в конденсаторі проводиться за допомогою вентиля 15 і контролюється за допомогою ротаметра 16 типу РМ 6,3 ТУЗ. Регулювання частоти обертання ротора виконується ЛАТРОм і вимірюється з використанням цифрового тахометра ТЦ-3М [65].

Глибина вакууму регулюється вентилем 17 і контролюється вакуумметром 18. Регулювання витрати вторинної пари проводилася вентилем 17.

#### Технічні характеристики установки.

Напруга, В	220/380
Габарити, мм	1480·590·2850
Вага, кг	2160
<u>Роторний плівковий апарат корпус:</u>	
поверхня нагрівання	0,1 м <sup>2</sup>
діаметр внутрішній	0,05 м
довжина робоча	0,595 м
товщина стінки	0,0015 м
матеріал	скло типу ТУ ГОСТ 9111-59
<u>оболонь:</u>	
діаметр зовнішній	0,08 м
товщина стінки	0,002 м
температура теплоносія	20-550 <sup>0</sup> С
витрати теплоносія	55 м <sup>3</sup> /с
матеріал	скло типу ТУ ГОСТ 9111-59

ротор:

тип ротора	шарнірний
кількість ярусних лопаток	14
кількість лопаток в ярусі	2-3-4
частота обертання ротора	0-1100 об/хв
регулювання обертів	безступінчате
метал	нержавіюча сталь

Використовувані прилади і устаткування

Вакуум-насос типу ЗНВР-ИД

швидкість дії	0,001 м <sup>3</sup> /с
граничний залишковий тиск	6,7 (5·10 <sup>-2</sup> )
заводський номер	10374
рік випуску	2008

A565-002-01 – універсальний цифровий прилад Державної системи

промислових приладів і засобів автоматизації (ГСП)

клас точності	0,15/0,05
вирішуєма здатність, °С	0,1
заводський номер	120940
рік випуску	1985

Тахометр цифровий типу ТЦ-ЗП

діапазон вимірювання швидкості обертання, об/хв.	50-5000
межа допустимої основної погрішності вимірювання швидкості обертання, об/хв	1
заводський номер	2406
рік випуску	1985

Ротамерт типу РМ 6,3 ГУЗ4

межа допустимої основної погрішності, %	4
межа вимірювання, м <sup>3</sup> /Г	0...6,3

Електронний секундомір «Престіжіо»

ціна поділки, сек	0,01
-------------------	------

заводський номер

BA130722A

рік випуску

2013

Прилад за умовами експлуатації відноситься до 2-ї групи, згідно ГОСТ 22261-76.

## **2.6 Охорона праці та безпека в назвичайних ситуаціях**

Сучасний розвиток науки і техніки приносить принципові нововведення у всі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та матеріали, що використовуються, предмети та знаряддя праці. В свою чергу зміни технології та устаткування призводять до трансформації умов праці та трудового процесу в цілому.

Апарати, які вводяться в експлуатацію, як і все інше обладнання, повинно відповідати всім вимогам техніки безпеки і охорони праці, які сформульовані в галузевих стандартах, а також в затверджених інстанціями інструкціях, правилах і нормах. Темою магістерської дисертації є «Процес гідродинаміки та теплообміну у роторному плівковому апараті з шарнірно закріпленими лопатями». Контроль параметрів технологічного процесу здійснює оператор лінії, пульт якого знаходиться в виробничому приміщенні, площею 300 м<sup>2</sup> і об'ємом 1800 м<sup>3</sup> та висотою 6м.

Шкідливими і небезпечними виробничими факторами при роботі та обслуговуванні виробничої схеми є :

- повітря робочої зони;
- ураження електричним струмом;
- небезпека впливу елементів устаткування нагрітих до високих температур;
- виробничий шум, вібрація;
- пожежонебезпека.

Виходячи з прийнятої технологічної схеми маємо приміщення без надлишкового тепловиділення, тобто  $Q < 20$  ккал/год м<sup>3</sup> або  $Q < 23.27$  Дж/с. м<sup>3</sup>

Категорія робіт оператора легка, так як показник енерговитрати складає до 273 Дж/с. Параметри повітря робочої зони представлені в таблиці 3.1, в якій вказані також оптимальні умови.

В процесі роботи видаляються шкідливі речовини, такі як: формальдегіди, ацетальдегіди, двоокис і окис вуглецю. Гранично допустима концентрація цих речовин наступна:

- формальдегід - 2 мг/м;
- ацетальдегід —4 мг/м;
- двоокис і окис вуглецю —14 мг/м.

Фактична концентрація цих речовин така:

- формальдегід —2 мг/м;
- ацетальдегід —4 мг/м;
- двоокис і окис вуглецю — 1 мг/м.

Фактична концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони відповідають ГОСТ 12.1.005-88/98.

Параметри повітря робочої зони відповідають ДСН 3.3.6.042-99. Забезпечення параметрів здійснюються в зимовий час за допомогою водяного опалення з температурою теплоносія 70-90 °С, а в теплий час року вентиляцією та кондиціонуванням.

Для відводу цих речовин в конструкції лінії передбачена місцева вентиляція відкритого типу. До місцевих відсмоктувачів відкритого типу належать витяжні, зонти, всмоктувальні панелі, бортові відсмоктувачі. Витяжні зонти передбачені для вловлювання потоків шкідливих речовин, які направлені вгору. Їх доцільно використовувати у випадку, коли джерело утворення пилу, парів та газів переміщується по площині робочого місця як в горизонтальній, так, і у вертикальній площинах.

Параметри повітря робочої зони наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Параметри повітря робочої зони

Сезон року	Категорія робіт	Фактична температура, °С	Фактична відносна вологість, %	Фактична швидкість руху повітря, м/с
Холодний період року	Легка I	19-20	40-65	0,2
Теплий період року	Легка I	20-25	40-70	0,2

При проектуванні штучної (механічної) загально обмінної вентиляції, яка призначена для видалення з приміщення надлишків тепла, вологи та інших шкідливих виділень необхідно приймати розрахункові параметри згідно з СніП2.04.05 —91.

Розрахунок механічної вентиляції повинен включати визначення найбільш раціонального способу видалення або попередження утворення токсичних, пожежо - чи вибухонебезпечних концентрацій пароповітряних сумішей (загальнообмінні або місцеві вентиляційні установки і системи); визначення необхідної кількості повітря для обмінної вентиляції виходячи із відомої кратності повітрообміну в приміщенні, кількості шкідливих речовин, які вилучаються з приміщення, або надлишкового тепла, яке необхідно асимілювати до санітарно - допустимих норм відповідно ГОСТ 12.1.005—88/98.

Устаткування лінії, що розробляється, буде знаходитись в сухому приміщенні з нормальною температурою і вологістю повітря. Підлога приміщення залізобетонна. Згідно ПУЕ воно відноситься до приміщень з підвищеною безпекою .

Для живлення елементів установки використовується трифазна напруга 220/380 В з частотою 50 Гц з глухозаземленою нейтраллю.

Причини ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом можуть бути такими:

- помилкове включення установки;
- замикання на корпусі;
- випадки дотику людей до відкритих струмопровідних частин електроустановки;
- старіння ізоляції і, як наслідок, втрата ізоляційних властивостей;
- дотик до частин установки, що можуть опинитися під напругою у випадку короткого замикання.

Для забезпечення електробезпечності передбачені організаційні і технічні заходи:

- Інструктаж і навчання безпечним методам праці.
- Установлення плакатів і знаків безпеки (на небезпечних місцях - джерелах живлення, на регуляторах, і т. ін.)
- Вирівнювання потенціалу.
- Ізоляція струмоведучих частин. Контроль ізоляції здійснюється прибором ПНКИ.  $R_{із}=0,5\text{МОм}$
- Установлення попереджувальної сигналізації, блокувань.
- Використання електрозахистних засобів, у т.ч. діелектричних рукавичок, інструментів з ізолюючими ручками, покажчиків напруги.
- Захисне занулення.
- Захисне відключення.

Так як маємо установку з глухозаземленою нейтраллю, то використовуємо захисне занулення (рисунок 3.13).

Занулення виконують електричним з'єднанням металічних частин електроустановок з заземленою точкою джерела струму за допомогою нульового захисного провідника.

В аварійному режимі

$$I_{к.з.} = \frac{U_{\phi}}{z + r_0} = \frac{220}{0,2 + 0,4} = 366,67 \text{ A} > 300 \text{ A}$$

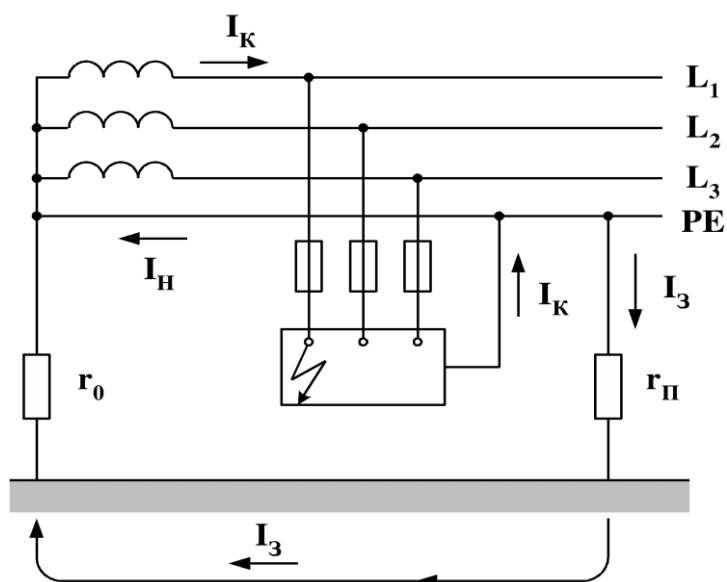


Рисунок 3.13 – Захисне занулення

Параметри відповідають ГОСТ 12.1.030-87

Причинами травм може бути дотик людей до нагрітих поверхонь. Щоб уникнути травм, ці поверхні покриваються шаром ізоляції з мінеральної вати марка 300 ГОСТ 4640-76.

Зовнішня температура ізоляції не перевищує  $45^{\circ}\text{C}$  що відповідає СН 245-71. Температура поверхні теплоізоляції контролюється термометром за ГОСТ 2823-73.

Шум може тимчасово активізувати або постійно пригнічувати психічні процеси організму людини. Фізіологічні та біологічні наслідки можуть з'являтися у формі порушення функцій слуху та інших аналізаторів, зокрема вестибулярного апарату, координуючої функції кори головного мозку, нервової системи, систем травлення і кровообігу.

Встановлено, що втрата слуху настає при впливі шуму в діапазоні частот 3000 – 6000 Гц, а порушення розбірливості мови - при частотах 1000 – 2000 Гц. Максимальна вірогідність втрати слуху протягом перших десяти років роботи і з плином часу ця небезпека зростає.

Несподівані та імпульсні шуми можуть викликати переляк та неадекватну поведінку. Постійний шум може негативно впливати на сенсорні функції знижуючи, наприклад, швидкість руху очей, звуження поля зору,

викликаючи зміну кольорового сприйняття, порушення рівноваги, втрату больової чутливості.

Індивідуальні особливості людини, пов'язані з різними психологічними реакціями на вплив шуму суттєво впливають на його сприйняття. Шум не лише погіршує самопочуття людини і знижує продуктивність праці на 10-15%, але нерідко призводить до професійних захворювань. Матеріальні збитки від цих захворювань значно більші, ніж від інших професійних захворювань. У зв'язку з цим боротьба з шумом має не лише санітарно - гігієнічне, але й велике техніко - економічне значення. Тому необхідно розробити комплекс інженерно - технічних та організаційних заходів щодо зниження шуму до нормативних значень.

Рівень звукового тиску (дБ) в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку (дБА) для постійних робочих місць при працюючій установці, встановлені за ДСН 3.3.6.037-99. Так як шумові характеристики електродвигунів згідно ГОСТ 16372-84 перевищують передбачені ДСН норми допустимих рівнів звукового тиску рівня звуку і еквівалентних рівнів звуку на робочих місцях, то в цьому випадку необхідно вжити заходів щодо зниження шуму до нормативних значень.

Рівень звукової потужності виробничої лінії (джерело шуму) наведено в таблиці 2.2. Загальна площа огорожувальних поверхонь = 1260 м.

Необхідно визначати величину додаткового звукопоглинання  $\Delta A_n$  для розрахункової точки, розташованої на віддалі 6 м від джерела шуму і вибрати конструкцію звукопоглинача.

Таблиця 2.2 – Акустична потужність джерела шуму

Середньо-геометрична частота Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукової потужності дБ	193	95	98	95	96	97	98	93

Визначаємо величину граничного радіусу за формулою:

$$r = 0.2 \sqrt{B_{8000}} \text{ м}$$

Для об'єму  $V=1800\text{м}^3$  знаходимо постійну приміщення (категорія б, таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Вибір індексу прямої

Опис приміщення	Індекс прямої
Без меблів, з невеликою кількістю людей (металообробні цехи, вентиляційні камери, генераторні, машинні зали, випробувальні стенди і т.п.).	а
З жорсткими меблями або з невеликою кількістю людей і м'якими меблями (лабораторії, ткацькі та деревообробні цехи, кабінети і т.п.).	б

Визначаємо  $B_{1000}$  за графіком;  $B_{1000}=100\text{м}^2$ ,

$$B_{8000}=\mu B_{1000}$$

де  $\mu$  частотний множник, який знаходиться по таблиці 3.5.

Таблиця 2.4 – Частотний множник  $\mu$

Об'єм приміщення $\text{м}^3$	Середньо геометрична частота, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1800	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6

тоді  $B_{8000}=\mu B_{1000}=100 \cdot 6=600 \text{ м}^2$ .

При таких вихідних даних:

$$r = 0,2\sqrt{B_{8000}} = 0,2\sqrt{600} = 4,9 \text{ м.}$$

Величина очікуваного рівня звукового тиску визначається за формулою:

$$L = L_p + 10 \lg \left( \frac{a}{S} + \frac{4}{B_{\text{ш}}} \right),$$

де  $L_p$  — октавний рівень звукової потужності шуму, дБ;

$S$  — площа уявної поверхні правильної геометричної форми, що оточує джерело і проходить через розрахункову точку,  $\text{м}^2$ .

Тоді необхідне зниження рівнів звукового тиску в розрахунковій точці від одного джерела шуму визначається як різниця очікуваного рівня звукового тиску в розрахунковій точці до реалізації заходів щодо зниження шуму  $L$  та допустимого рівня  $L_{\text{доп}}$ :

$$\Delta L_{\text{н}} = L - L_{\text{доп}} \quad \text{дБ} \quad \lim_{x \rightarrow \infty}$$

При визначенні  $\Delta L_n$  як  $L_{доп}$  приймаємо криву граничного спектра ГС-75. Розрахунок наведено в таблиці 2.5.

В зоні відбитого звуку  $\Delta L_n$  такі, що звукопоглинальне облицювання може забезпечити необхідне зниження рівня звукового тиску. За графіками знаходимо величину  $\Delta A_n$  додаткового звукопоглинання. Значення  $\Delta A_n$  знаходимо для октавних смуг, в яких має місце максимум частотної характеристики  $f$ -1000 та 2000 Гц.

Таблиця 2.5– Розрахунок необхідного зниження шуму

Величина, що визначається	Одиниці вимірювання	Середньо геометрична частота октавної смуги, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_p$	дБ	93	95	98	95	96	97	98	93
$B_{1000}$	м	-	-	-	-	100	-	-	-
$\mu$	-	0,5	0,5	0,5 5	0,7	1	1,6	3	6
$B=\mu B_{1000}$	м	50	50	55	70	100	160	300	600
$a'/2\pi r^2$ ( $a'=1, r=6$ м)	-	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$4/B$	м <sup>2</sup>	0,08	0,08	0,07 3	0,0 58	0,0 4	0,0 25	0,01 3	0,0 06
$\Sigma=4/B+ a'/2\pi r^2$	м <sup>2</sup>	8,4* $10^{-2}$	8,4* $10^{-2}$	7,7* $10^{-2}$	6,2* $10^{-2}$	4,4* $10^{-2}$	2,5* $10^{-2}$	1,7* $10^{-2}$	1* $10^{-2}$
$10/\lg \Sigma(4/B+a'/2\pi r^2)$	-	- 11,8	- 11,8	-11,1	- 12, 1	- 13, 6	- 15, 4	-17,7	-20
$L= L_p+10/\lg \Sigma^*$ ( $4/B+ a'/2\pi r^2$ )	дБ	81	83	87	83	82	81	80	73
$L_{доп}(ГС-75)$	дБ	93	86	81	78	75	73	71	70
$\Delta L_n=L-L_{доп}$	дБ	-	-	6	5	7	8	9	3

Вибираємо плити “Вініпор” напівжорсткі товщиною 50 мм з повітряним прошарком 150мм.

Визначається необхідна площа облицювання. Результати розрахунку наведено в таблиці 2.6. Загальна площа облицювання складає 560 м<sup>2</sup> (стеля – 300 м<sup>2</sup> і стіни - 260 м<sup>2</sup>). Це відповідає необхідній величині площі облицювання.

Таблиця 2.6 – Розрахунок додаткового звукопоглинання

Величина, що визначається	Одиниці вимірювання	Середньгеометрична частота октавної смуги, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$B$	м <sup>2</sup>	50	50	55	70	100	160	300	600
$B+S$	м <sup>2</sup>	1310	1310	1315	1330	1360	1420	1560	1860
$a=B/(B+S)$	-	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,11	0,19	0,32
$k$	-	-	-	0,13	0,1	0,22	0,48	0,41	0,2
$\Delta A_H$	м <sup>2</sup>	-	-	175	150	300	550	500	250
$a_{ліч}$	-	-	-	0,83	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$S_{ліч}=\Delta A_H/a_{ліч}$	м <sup>2</sup>	-	-	210	150	300	550	500	250

Використання для акустичної обробки цеху звукопоглинальних плит забезпечує зниження рівнів відбитого звуку, а рівні звукового тиску в контрольній точці не перевищують допустимих величин, тобто 65 дБА.

В такому випадку величина загальної технологічної вібрації на постійних робочих місцях при працюючій установці у виробничих приміщеннях не перевищує норм, встановлених за ДСН 3.3.6.039-99.

Виходячи з цього технологічний процес виробництва спіненого біополімеру відноситься до категорії В (ОНТП-24-86).

Стійкість споруди за ПУЕ відповідає ступеню вогнестійкості II. Згідно ПУЕ клас зони установки II-Іа.

Серед причин, що можуть викликати загорання, найбільш імовірними є такі:

- несправність електроустаткування;
- струми короткого замикання і навантаження кабелів живлення;
- загорання ізоляції електропроводки;

- використання вогню в неналежному місці.

Засоби запобігання виникненню пожежі:

- дотримання технологічних норм і правил експлуатації;
- обмеження в застосуванні відкритого вогню;
- паління тільки у відведених для цього місцях;
- своєчасне проведення інструктажу з техніки безпеки серед обслуговуючого персоналу;
- наявність засобів сигналізації, зокрема, системи електричної пожежної сигналізації (ЕПС) і засобів оперативного зв'язку з пожежною частиною;
- наявність засобів пожежогасіння в безпосередній близькості від установки (пісок, вогнегасники).

Для гасіння невеликих ділянок загорання при виключеному та включеному (до 1000В) електроустаткуванні застосовують вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 (6 шт.) та установки пожежогасіння порошкові закачані типу «САМ9» (15 шт.).

Для захисту органів дихання застосовують повітряний апарат МПА-4х20.

В приміщенні, де розташовується установка, на відстані 30 метрів одне від одного повинні бути встановлені пожежні гідранти з рукавами довжиною до 10 метрів. Відстань до пожежного виходу повинна бути не більше 40 метрів.

Кількість виходів - не менше двох. Ширина дверей еваковиходу - 2 метри. Двері еваковиходу повинні відкриватись на зовні.

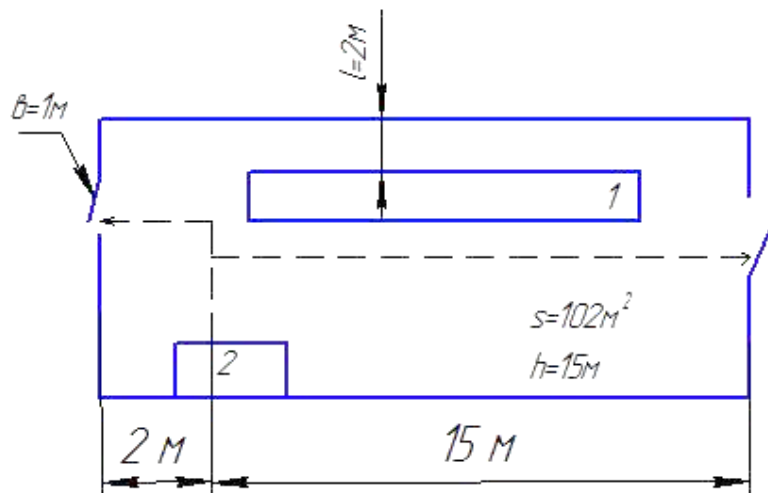


Рисунок 3.14 – План евакуації

Відповідність обладнання до вимог охорони праці

1. Робота допускається при наявності в цеху вентиляції і пристроїв для видалення і нейтралізації шкідливих речовин, що виділяються при переробці вихідної сировини.
2. Перед початком роботи необхідно перевірити наявність усіх заземлень.
3. Шафа керування приводом закрита.
4. Температура нагрівання зовнішніх поверхонь корпусу, доступних дотику з людиною не більше  $45^{\circ}\text{C}$ .
5. Підходи до електроприводів, пульта і шаф вільні.
6. Робота в спецодязі.
7. На випадок можливого самозаймання передбачені засоби гасіння.
8. Рівень шуму, вимірюваний при роботі машини, не перевищує 75 Дб на частоті 1000 Гц.
9. Доторкатися до розплаву полімеру можливо тільки у рукавицях типу АТВ ДСТ 12.4.010-75
10. Під час роботи лінії категорично заборонено:
  - проводити ремонтні роботи;
  - опускати руки в бункер-дозатор;
  - знімати огороження з обертових частин.

Відповідно до закону про охорону праці і національної програми по охороні праці, виробничі будівлі, споруди, устаткування, технологічні процеси повинні відповідати вимогам, що забезпечують безпечні умови праці.

## **2.7 Висновки**

Запропоновано та обґрунтовано фізичну модель гідродинаміки та теплообміну у роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей. Визначено параметри, що впливають на процес гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті.

Сформульовано та представлено математичну модель гідродинаміки та теплообміну в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей. Запропоновано методику експериментального дослідження. Описано схему експериментальної установки та надані рекомендації з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ

### 3.1 Методика дослідження гідродинаміки

#### 3.1.1 Дослідження витрат потужності при сухому терті

При роботі апарата з'являється можливість того, що почнуть виникати сухі зони у нижній частині апарата, а також відкладання залишків сухого обробленого продукту продукту при випарюванні до стану сухого залишку. В апаратах, що використовують ковзаючі лопаті в такому випадку може відбуватися тертя по сухій обробленій поверхні, на що також виникають витрати енергії.

Провести розрахунок потужності при сухому терті, тобто без рідини в середині апарата, можна в наступних випадках:

- 1) при холостму ході;
- 2) при досягненні мінімальної густини зрошення;
- 3) при повному випаровуванні рідини до сухого залишку.

Для подальшого розрахунку загальної потужності розглянемо сили, які діють на лопать (рисунок 3.1).

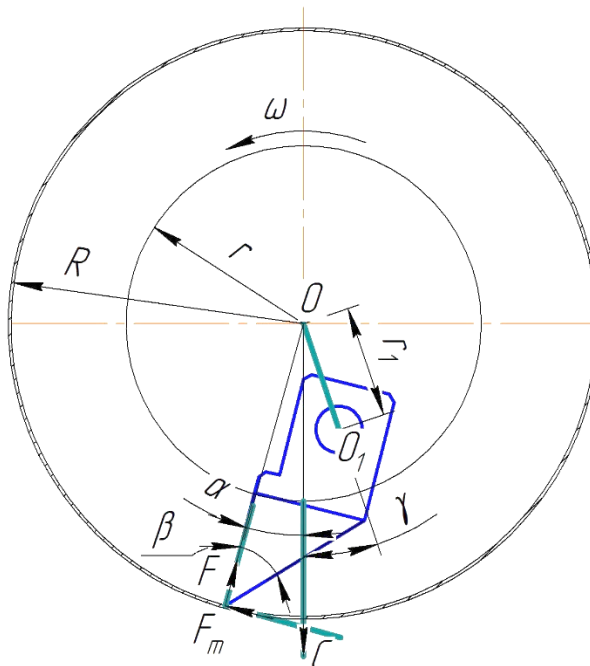


Рисунок 3.1 – Сили, які діють на лопать

Сила відцентрового тиску, що притискає лопать до оболоні корпусу, визначаємо використовуючи рівняння:

$$C = m_{л} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot z, \quad (3.1)$$

де  $m_{л}$  – маса лопаті;  $\omega$  – кутова швидкість;  $r$  – радіус центра мас лопаті;  $z$  – кількість лопатей.

Зкладаємо рівняння моментів сил відносно точки  $O_1$ :

$$F \cdot r_1 \cdot \sin(\alpha + \gamma) + F \cdot f(R - r_1 \cdot \cos(\alpha + \gamma)) - C \cdot r_1 \cdot \sin \gamma = 0 \quad (3.2)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя.

Нормальну силу визначаємо як:

$$F = \frac{C \cdot r_1 \cdot \sin \gamma}{r_1 \cdot \sin(\alpha + \gamma) + f(R - r_1 \cdot \cos(\alpha + \gamma))} \quad (3.3)$$

Сила тертя:

$$F_T = F \cdot f \quad (3.4)$$

Коефіцієнт тертя  $f$  між фторопластом та склом визначається експериментом.

Крутний момент ( $M_{кр}$ ) визначаємо за виразом:

$$M_{кр} = F_T \cdot R \quad (3.5)$$

Тоді потужність, що витрачається на обертання ротора:

$$N = M_{кр} \cdot \omega = \frac{m_{л} \cdot \omega^3 \cdot r \cdot z \cdot r_1 \cdot \sin \gamma \cdot f \cdot R}{r_1 \cdot \sin(\alpha + \gamma) + f(R - r_1 \cdot \cos(\alpha + \gamma))} \quad (3.6)$$

За допомогою рівняння (3.6) було знайдено теоретичну залежність потужності у випадку сухого тертя (рисунок 3.4).

Для знаходження потужності, що витрачається у випадку сухого тертя скористаємося формулою:

$$N_c = N_{тр.} + N_{с.т.}, \quad (3.7)$$

де  $N_c$  – потужність у випадку сухого тертя у попередньо змоченим водою апараті;  $N_{тр.}$  – потужність, що витрачається в ущільненнях та опорах вала;  $N_{с.т.}$  – потужність у випадку сухого тертя.

Перед знаходженням величини  $N_c$  безпосередньо перед запуском установки необхідно попередньо змочити внутрішню поверхню оболоні роторного плівкового апарата водою.

При проведенні дослідження у визначенні  $N_{тр}$  протрібно звести до мінімуму коефіцієнт тертя, а для такого ефекту, було використано ПАВ (розчин мила у воді). Тобто даний розчин подавався безпосередньо в корпус роторного плівкового апарата, що дало можливість провести дослідження з визначення потужності, яка витрачається в ущільненнях та опорах вала. Результати проведеного дослідження наведено у вигляді залежностей на рисунку 3.2.

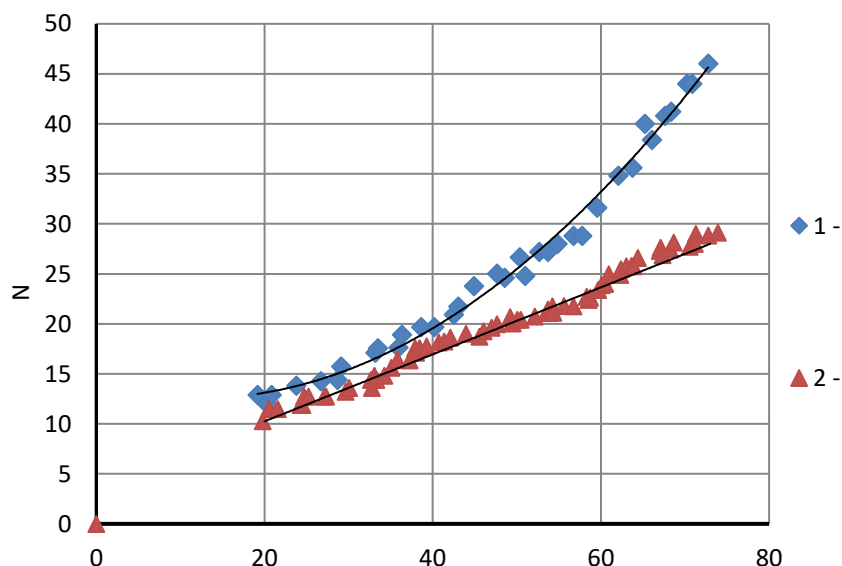


Рисунок 3.2 – Залежність потужності від кутової швидкості у випадку сухого тертя та при втратах в ущільненнях і опорах вала

Використовуючи знайдені дані, використовуючи залежність (рисунок 3.2) були запропоновані рівняння для визначення потужності:

1) в апараті, що попередньо змочений водою для випадку сухого тертя:

$$N_c = 0,009 \cdot \omega^2 - 0,2177 \cdot \omega + 13,868, \quad (3.8)$$

за точності апроксимація 0,9911;

2) що втрачається в ущільненнях то опорах валу:

$$N_{тр} = 0,386 \cdot \omega + 1,653, \quad (3.9)$$

за точності апроксимація 0,9909.

Використовуючи запропоновані залежності, можна визначити потужність при сухому терті та при втратах в ущільненнях.

### 3.1.2 Дослідження витрат потужності на розподілення та перемішування рідини

В якості робочого агенту при проведенні досліджень використовувалась вода та розчин 20%, 30%, 40% та 50 % гліцерину у воді.

Результати досліджень потужності від кутової швидкості наведено у вигляді залежностей на рисунку 3.5.

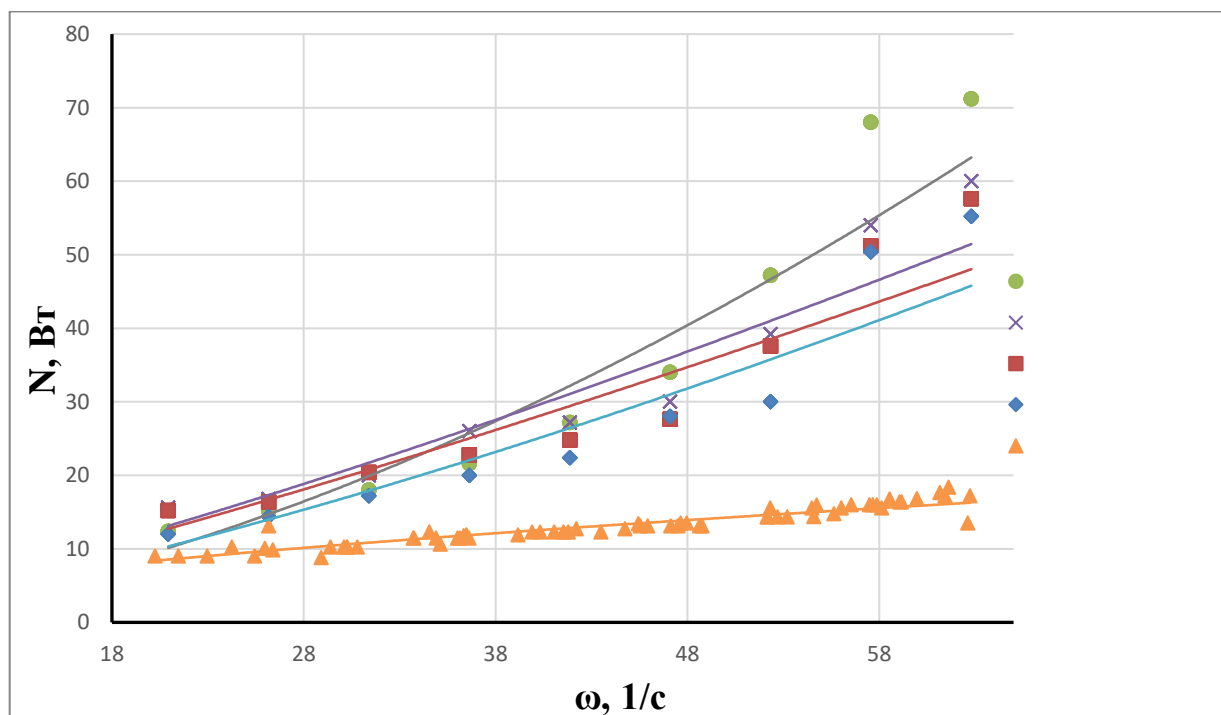


Рисунок 3.5 – Залежність потужності N від кутової швидкості для розчинів 20% (4), 30% (2), 40% (3), 50% (1) гліцерину у воді та води (5)

Як видно з рисунку 3.5 кутова швидкість показує вагомий вплив на значення потужності. Також був оцінений вплив витрат рідини на потужність.

За результатами досліджень та за відомими літературними даними було запропоновано використовувати узагальнююче рівняння у вигляді [66]:

$$K_N = A \cdot Re_{\text{ц}}^{\alpha} \cdot Re_{\text{пл}}^{\beta} \quad (3.13)$$

Коефіцієнт потужності:

$$K_N = \frac{N}{\omega^3 \cdot \rho \cdot D^4 \cdot h}, \quad (3.14)$$

де  $N$  – потужність, що витрачається на переміщення рідини в апараті,  $\omega$  – кутова швидкість,  $\rho$  – густина рідини,  $D$  – діаметр апарата,  $h$  – висота робочої поверхні апарата.

Відцентровий критерій Рейнольдса:

$$Re_{\text{ц}} = \frac{\omega \cdot D^2}{\nu}, \quad (3.15)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Плівковий критерій Рейнольдса:

$$Re_{\text{пл}} = \frac{4 \cdot \Gamma}{\nu} \quad (3.16)$$

Густина зрошення поверхні апарата:

$$\Gamma = \frac{V}{\pi D}, \quad (3.17)$$

де  $V$  – витрати рідини.

Використовуючи логарифмічну систему координат, рисунок 3.6, було знайдено область зміни виду залежності величини  $K_N$  від критерію  $Re_{\text{ц}} = 8000$ . В літературі ця область зазвичай оцінюється як критична і характеризує зміну режиму течії рідини (перехід до турбулентного режиму течії). За [8]  $Re_{\text{ц}} = 4000 - 5000$  (для апарата з жорстким кріпленням лопатей) [66].

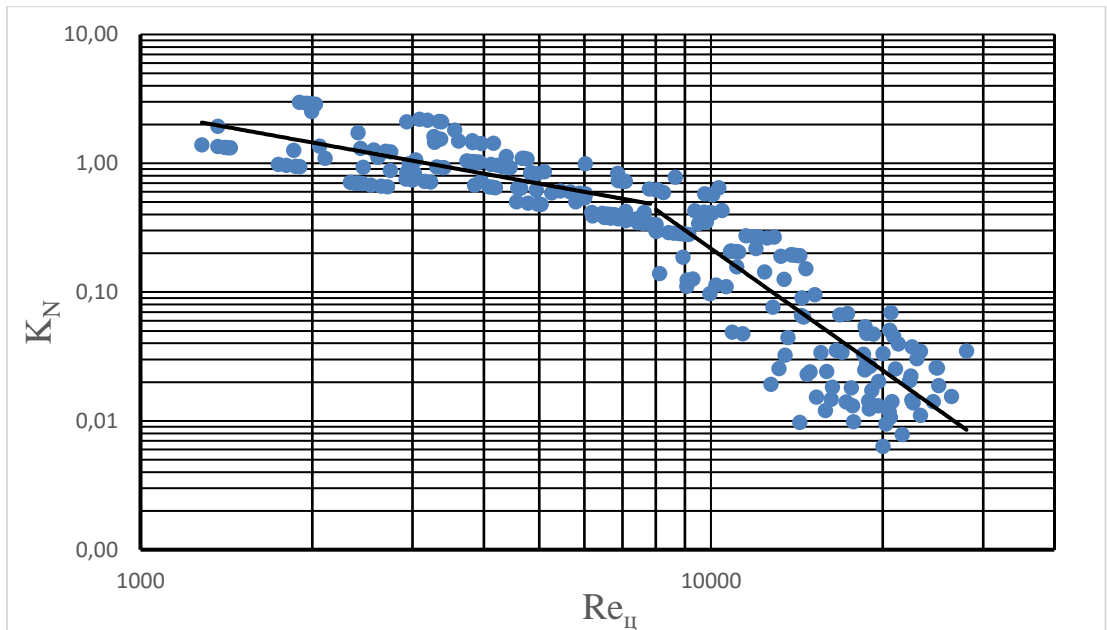


Рисунок 3.6 - Залежність коефіцієнта потужності  $K_N$  від відцентрового критерію  $Re_{ц}$  в логарифмічній системі координат

Основаючись на основі одержаних даних з експериментальних досліджень було встановлено залежність коефіцієнта потужності від відцентрового критерію Рейнольдса з постійними величинами  $Re_{пл}$  (рисунок 3.7) [66].

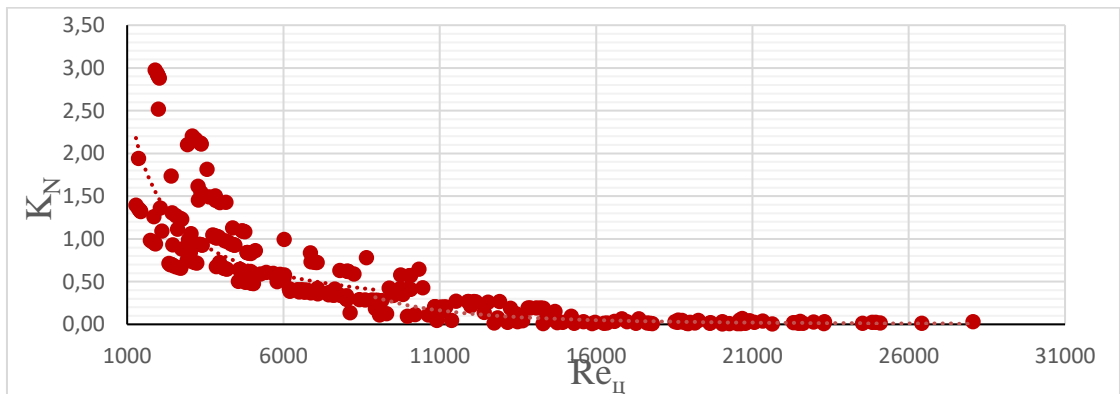


Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнта потужності  $K_N$  від відцентрового критерію  $Re_{ц}$

Як видно з графіка відцентровий критерій Рейнольдса має вагомий вплив та оцінюється як  $K_N \sim Re_{ц}^{-3,3}$  при  $Re_{ц} > 8000$  та  $K_N \sim Re_{ц}^{-0,86}$  при  $Re_{ц} < 8000$ .

Окремо було встановлено залежність коефіцієнта потужності від критерію Рейнольдса плівкового і оцінено як  $K_N \sim Re_{пл}^{0,55}$ .

Залежності визначення коефіцієнта потужності у визначених діапазонах мають вигляд:

$$K_N = 1,495 \cdot 10^{12} \cdot Re_{ц}^{-3,3} \cdot Re_{пл}^{0,55} \quad (3.17)$$

$$K_N = 1060 \cdot Re_{ц}^{-0,86} \cdot Re_{пл}^{0,55} \quad (3.18)$$

Залежність (3.17) справедлива для заданих діапазонів  $160 < Re_{пл} < 2300$  та  $8000 < Re_{ц} < 31000$ .

Залежність (3.18) справедлива для заданих діапазонів  $300 < Re_{пл} < 400$  та  $1500 < Re_{ц} < 8000$ .

А також була запропоноване узагальнююче рівняння у вигляді:

$$K_N = 1,02 \cdot 10^6 \cdot Re_{ц}^{-1,86} \cdot Re_{пл}^{0,55} \quad (3.19)$$

Коефіцієнт кореляції становить 0,923.

Залежність (3.17) справедлива для заданих діапазонів  $160 < Re_{пл} < 2300$  та  $8000 < Re_{ц} < 31000$ .

### 3.2 Методика дослідження тепловіддачі

В якості робочої рідини для проведення дослідження тепловіддачі використовувалась вода та розчини 20%, 30%, 40, 50% гліцерину у воді.

Експериментальні дослідження проводились при стаціонарному режимі теплообміну. Втрати тепла у навколишнє середовище через теплообмінну оболонь визначались розрахунком і враховувались у тепловому балансі. Втрати тепла через торцеві дільниці апарату незначні, тому ними можна знехтувати [67].

Для знаходження дослідного коефіцієнта теплопередачі необхідно врахувати основні теплові потоки в апараті та температурний режим, що дає наступне рівняння [67]:

$$K_d = \frac{q}{\Delta t_{ср}}; \quad (3.20)$$

де  $q$  – щільність теплового потоку:

$$q = \frac{Q}{F}, \text{ Вт/м}^2; \quad (3.21)$$

$\Delta t_{\text{ср}}$  – середня різниця температур в апараті, град;  $Q$  – кількість тепла переданого робочій рідині, Вт;  $F$  – поверхня теплообміну, м.

Оскільки апарат скляний, то замірити температури стінки з боку теплоносія в оболоні та теплоносія в апараті практично неможливо. Тому коефіцієнт тепловіддачі від стінки до робочої рідини  $\alpha_a$  визначався опосередковано через дослідний коефіцієнт теплопередачі  $K_d$  (3.20) та коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_p$  від теплоносія в оболоні до стінки. В свою чергу коефіцієнт  $\alpha_p$  визначався за літературними даними [2: 67] .

Через те, що відношення товщини стінки до діаметру становить 3%, то коефіцієнт теплопередачі розраховувався як для плоскої стінки:

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_p} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}}. \quad (3.22)$$

Звідки коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_a$  в апараті:

$$\alpha_a = \frac{K_d}{1 - \frac{K_d}{\alpha_p} - K_d \cdot \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}}, \text{ Вт/м}^2\text{К}; \quad (3.23)$$

де  $\delta_{\text{ст}}$  – товщина стінки, м;  $\lambda_{\text{ст}}$  – коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/м·К.

В результаті досліджень встановлено суттєвий вплив швидкості обертання ротора на величину коефіцієнта теплопередачі  $K_d$ , рисунки 3.8-3.9, що пояснюється відповідним зростанням коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_a$  [67].

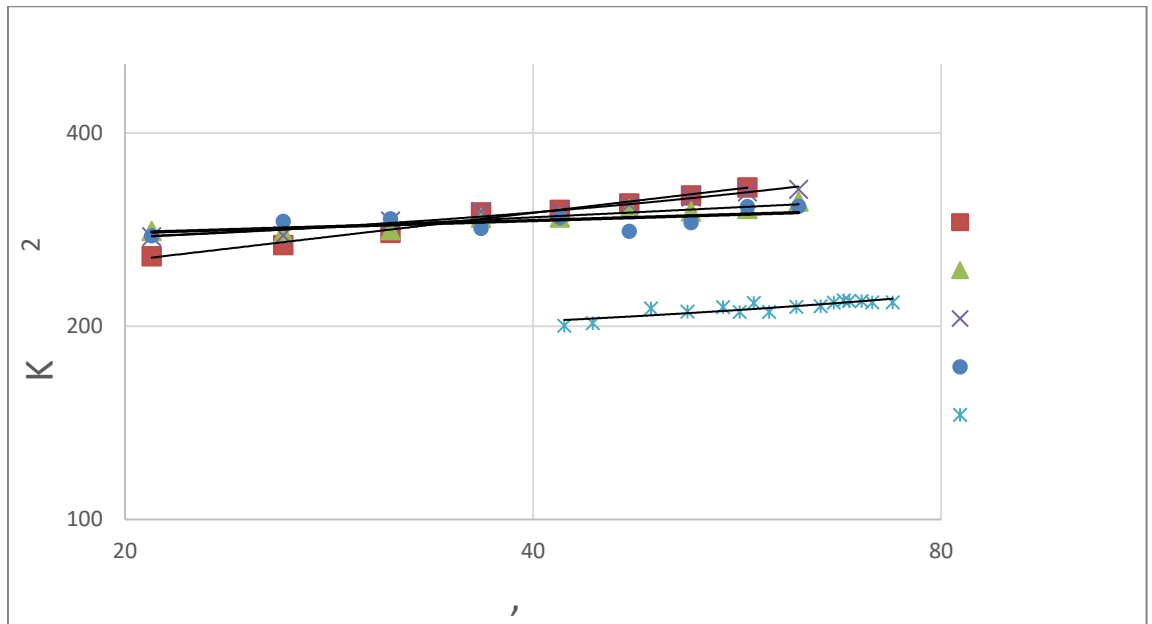


Рисунок 3.8 – Залежність коефіцієнта теплопередачі  $K_d$  від кутової швидкості для води та розчинів гліцерину у воді різних концентрацій

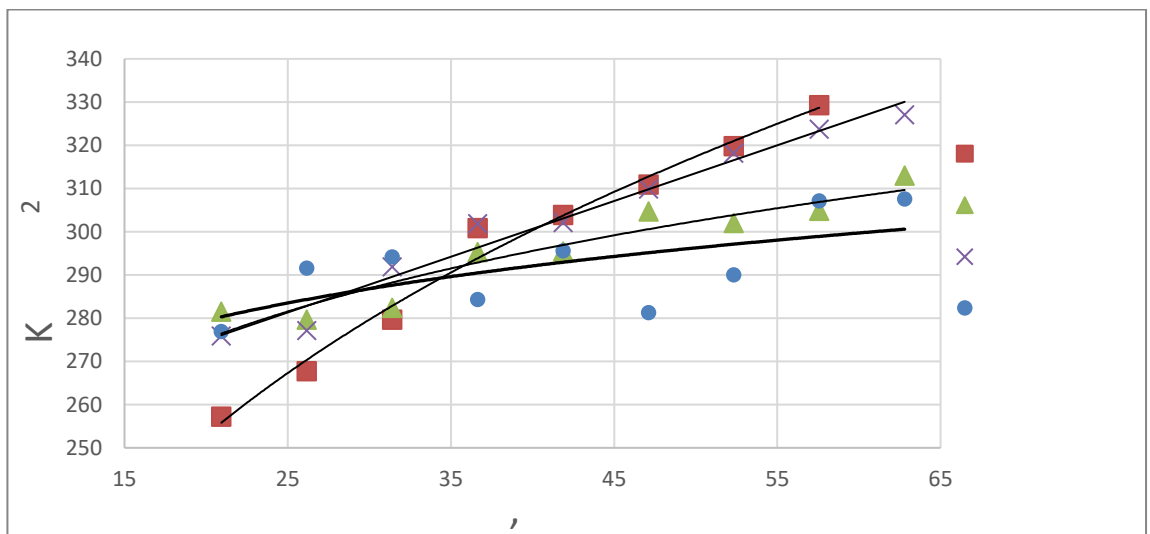


Рисунок 3.9 – Залежність коефіцієнта теплопередачі  $K_d$  від кутової швидкості для розчинів гліцерину у воді різних концентрацій

В літературі, наприклад [31-34], пропонується узагальнювати дослідні дані по тепловіддачі у вигляді залежностей критерія Нусельта  $Nu$  від критеріїв Рейнольдса плівкового  $Re_{пл}$ , відцентрового  $Re_{ц}$ , критерію Прандтля  $Pr$  та інших у вигляді залежності [67]:

$$Nu = C \cdot Re_{пл}^{\alpha} \cdot Re_{ц}^{\beta} \cdot Pr^{\gamma} \quad (3.24)$$

де  $C, \alpha, \beta, \gamma$  – константи, які визначаються по результатам дослідів.

В більшості досліджень ступінь при критерії Прандтля приймається  $\gamma = 0,33$ .

В нашому випадку критерій Нусельта дослідний розраховувався за формулою:

$$Nu_d = \frac{\alpha \cdot \left(\frac{v^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}}{\lambda}. \quad (3.25)$$

Критерій Рейнольдса відцентровий:

$$Re_{\omega} = \frac{\omega d^2}{\nu}. \quad (3.26)$$

Критерій Рейнольдса плівковий:

$$Re_{\Gamma} = \frac{4\Gamma}{\nu}. \quad (3.27)$$

Для оцінки впливу  $Re_{\omega}$  критеріальне рівняння представлено у вигляді:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = C_1 \cdot Re_{\omega}^{\beta}. \quad (3.28)$$

Обробка дослідних даних виконана методом найменших квадратів, в результаті чого отримані значення  $\beta = 0,6$ , (рисунок 3.10).

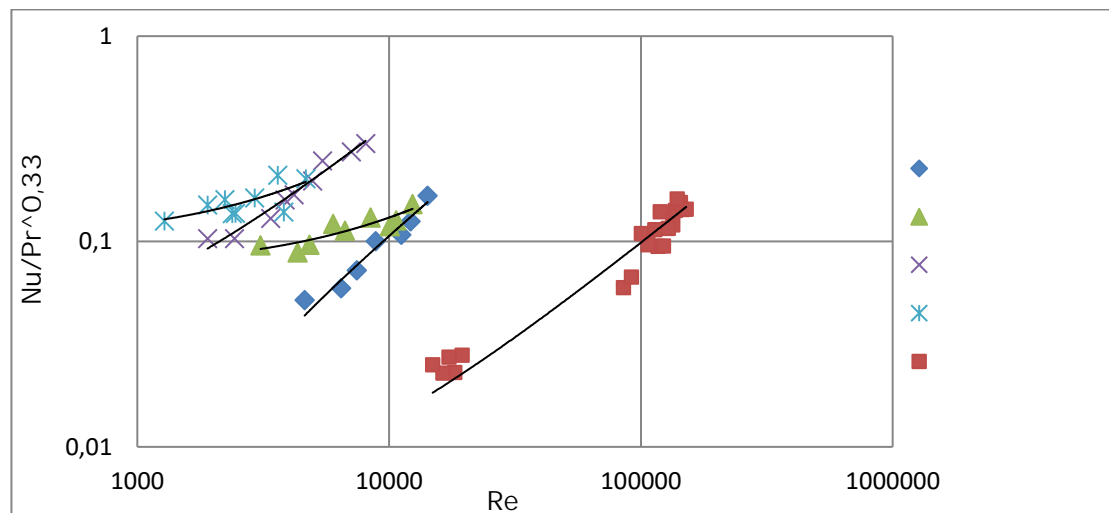


Рисунок 3.10 – Залежність  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}}$  від критерію Рейнольдса відцентрового  $Re_{\omega}$

Після чого отримаємо рівняння:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = 0,004 \cdot Re_{\text{ц}}^{0,6} \cdot Re_{\text{п}}^{\alpha} \quad (3.29)$$

Критеріальне рівняння для оцінки впливу  $Re_{\text{п}}$  представлено у вигляді:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33} \cdot Re_{\text{ц}}^{0,6}} = C_2 \cdot Re_{\text{п}}^{\alpha} \quad (3.30)$$

де  $C_2$  – постійна,  $\alpha$  – показник степеня при критерії Рейнольда плівкового. Отримана величина показника  $\alpha = -0,101$ .

В результаті чого узагальнене рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі приймає вигляд:

$$Nu_{\text{р}} = 0.0788 \cdot Re_{\text{ц}}^{0,6} \cdot Re_{\text{п}}^{-0,101} \cdot Pr^{0,33} \quad (3.31)$$

На рисунку 3.11 представлено порівняння дослідних значень критерію Нуссельта  $Nu_{\text{д}}$  з розрахунковими  $Nu_{\text{р}}$  по рівнянню (3.31).

Коефіцієнт кореляції становить 0,9628.

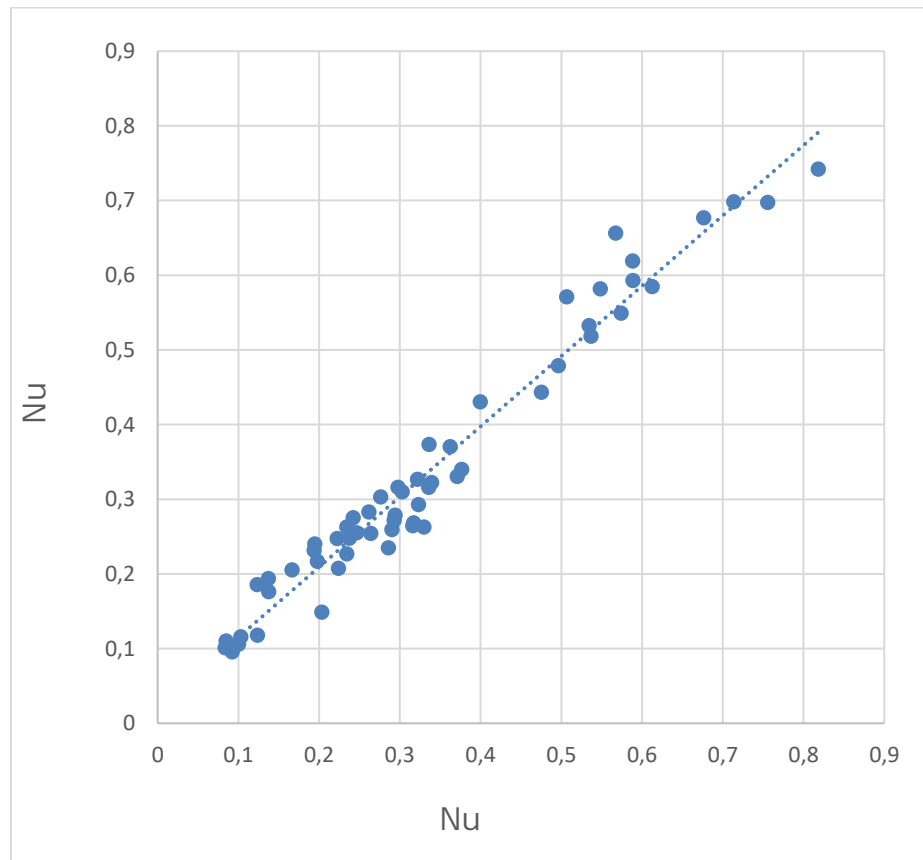


Рисунок 3.11 – Порівняння дослідних і розрахункових значень чисел критерія  $Nu$

Рівняння отримано при зміні критерія Рейнольдса відцентрового в межах  $1500 < Re_{\text{ц}} < 160000$ , критерія Прандтля  $8,5 < Pr < 65$  та критерію Рейнольдса плівкового в межах  $80 < Re_{\text{п}} < 1200$ .

### 3.3 Висновки

Експериментальне дослідження тепловіддачі та витрат потужності, що витрачається на розподілення та перемішування рідини підтверджує математичну модель та дозволяє визначити вплив швидкості обертання ротора, теплофізичних властивостей на витрати потужності та коефіцієнт тепловіддачі в заданому діапазоні роботи апарата.

Проведено узагальнення експериментальних досліджень при оцінці витрат потужності з використанням чистої води та розчинів 20%, 30%, 40%, 50% гліцерину у воді в вигляді критеріальних рівнянь. Визначено коефіцієнти  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $C$  узагальненого критеріального рівняння критерія Нуссельта в залежності від зміни  $Re_{\text{пл}}$  та  $Re_{\text{ц}}$ . Приведені межі використання отриманих результатів.

## 4 ОБҐРУНТУВАННЯ І ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

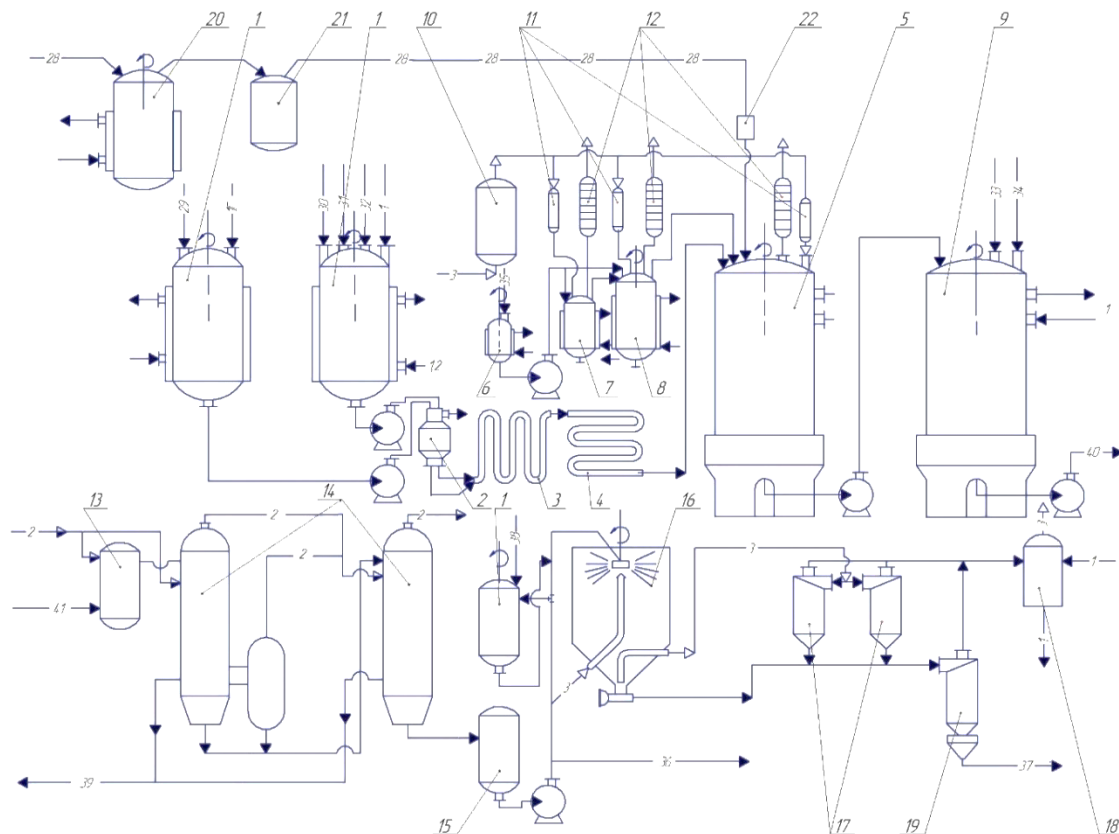
### 4.1 Опис технологічного процесу

На відміну від виробництва кормових дріжджів промислове одержання лізину та інших амінокислот здійснюється в строго асептичних умовах, на стерильних живильних середовищах з використанням чистої культури продуцента. Амінокислоти можна отримувати із кислотних та лужних гідролізатів натуральних білків а також із продуктів їх ферментативного розщеплення. Однак висока собівартість та дефіцитність початкової сировини (відходи м'ясної промисловості, яечний білок, казеїн молока, клейковина пшениці), а також багатостадійна хімічна обробка, яка пов'язана з виділенням амінокислот та їхньою очисткою, не дозволяють широко застосовувати цей метод у промисловості. В процесі кислотного гідролізу білків спостерігається руйнування більшої частини триптофану, розпадається тріонін та сірін. Деякі недоліки має і метод ферментативного гідролізу. Тому найбільш рентабельним та вигідним є мікробіологічний процес, у якому спеціально підібрані штамм-продуценти у процесі життєдіяльності здійснюють надсинтез амінокислот, тобто виробляють їх у кількостях, які набагато перевищують потреби самих клітин [65].

Принципова технологічна послідовність процесу одержання лізину наступна: готування посівного матеріалу; підготовка і стерилізація живильного середовища, всієї апаратури і комунікацій; культивування продуцента в промислових ферментаторах (ферментація); виділення цільового продукту (L-лізину) [65].

Заключним етапом в одержанні лізину є видалення із клітин мікроорганізмів більшої частини внутрішньоклітинної вологи, що дозволяє отримати стабільну при зберіганні, транспортуванні та зручну у вживанні кормову біомасу [65].

Технологічна схема для виробництва лізину представлена на рисунку 4.1 [65].



1 – змішувач; 2 – грійо́ча колонна; 3 – витриму́вач; 4 – охолоджу́ючий теплообмінник; 5 – ферментатор; 6 – стабілізатор середовища; 7 – малий інокулятор; 8 – великий інокулятор; 9 – стабілізатор; 10 – головний фільтр; 11 – індивідуальний фільтр; 12 – повітряний фільтр; 13 – теплообмінник; 14 – випарна установка з роторним плівковим апаратом; 15 – збірник; 16 – розпилююча сушарка; 17 – циклон; 18 – скрубєр; 19 – циклон – розвантажувач; 20 – збірник; 21 – проміжний збірник; 22 – дозатор.

Рисунок 4.1- Технологічна схема установки для виробництва лізину

Приготування поживного середовища для культивування продуцентів лізіна здійснюється у дві стадії. Бурякова меласа готується окремо від інших компонентів середовища. Її розігрівають та транспортують в змішувач 1 (рисунок 4.1), де при перемішуванні та розігріві вона розчиняється у гарячій воді. Поживні солі та інші компоненти та інші компонент середовища

розчинюються у змішувачі 2, але з таким урахуванням, щоб у наступному суміщенні цих розчинів отримались потрібні регламентом концентрації компонентів середовища. Потім приготовлені суміші поступають у нагрівальну колону 3, у видержувач 4, де стерилізується та на охолодження в теплообмінник 5. Стерильне охолоджене поживне середовище далі поступає у ферментатор 6, заповнює його на 70-75%. Для початку ферментації потрібно ввести в середовище посівний матеріал. Культура підготовлюється в мікробіологічній лабораторії заводу. Якщо приготування посівного матеріалу періодичне, то після вирощування в качалочних колбах культура передається на першу 8, а потім на другу 9 ступені інокуляторів, де одержують необхідні об'єми посівної культури [65].

Стерилізація поживного середовища здійснюється в самих посівних апаратах, попередня ж гомогенізація середовищ здійснюється у спеціальному посівному змішувачі 7 [65].

Для здійснення культивування продуцентів в посівних апаратах 8 та 9 і в ферментаторі 6 необхідне стерильне повітря. Для цього використовується система фільтрів та кондиціонерів. Повітря забирається з атмосфери, очищується у вісциновому фільтрі і надходить у турбокомпресор, де відбувається його стиснення, температура повітря піднімається до 150-160°C; потім повітря охолоджується, відділяється конденсат і далі повітря подається в ресивер, який забезпечує рівномірність подачі повітря у ферментатор [65].

Підготовлене таким чином повітря надходить в заповнений активованим вугіллям та скловатою фільтр 11, а потім на систему індивідуальних фільтрів. Повітря, яке виходить з ферментатора перед викидом в атмосферу знову очищується від клітин самого продуцента на повітряних фільтрах 13, для того щоб не забруднювати оточуюче середовище. В процесі культивування для піногасіння використовують стерильні піногасники. Подача їх у ферментатори здійснюється автоматично в залежності від висоти утвореної піни з апарата 12 [65].

Приблизне сумарне рівняння процесу, яке в загальному випадку має такий вигляд:



Можна отримати три продукти: рідкий концентрат лізіна (РКЛ), сухий концентрат кормового лізіну (ККЛ) та кристалічний лізін. При висушуванні або концентруванні культуральної рідини спостережуються значні втрати лізіну. Тому культуральна рідина піддається стабілізації. Цей процес здійснюється в спеціальній ємності 10, куди при перемішуванні подається спочатку 25%-вий розчин бісульфіта натрія в кількості 0,4% до об'єму культуральної рідини, а потім соляна кислота до рН 4,5-5,0 [65].

Перед випарюванням культуральна рідина підігрівається в теплообміннику 14 до температури 95-100°C і далі поступає в двокорпусну випарну установку 15 другого ступеня якою є ротаційний випарний апарат. Упарена культуральна рідина зі змістом сухої речовини близько 40% надходить у збірник 16 – це і є РКЛ. Рідкий концентрат лізіну далі насосом 40 перекачується в спеціальні складальні ємності [65].

Концентрат культуральної рідини може бути висушений в сушарці 18, тоді отримують препарат ККЛ без наповнювача. Культуральна рідина попадає на розпилювальний диск сушильної башні і розпилюється, дрібні крапельки зустрічаються з гарячим повітрям, волога в краплях миттєво випаровується, а порошок з вологістю 4-8% поступає в циклон-розгрузувач 21. З теплоносієм з сушильної башні виноситься частина препарату, тому повітря проходить через циклон 19, де відділяється основна маса препарату, який також поступає в циклон-розгрузувач 21. Повітря для додаткової очистки проходить ще через скруббер 20 і тільки після цього викидається в атмосферу [65].

Щоб зменшити витрати при сушці, а також для зниження гідроскопічності препарату ККЛ в концентрат можна внести наповнювач. Це здійснюється в змішувачі 17, а потім отримана маса подається на розпилювання, так само як в першому випадку, або ж сушарку іншої конструкції. Отриманий сухий кормовий концентрат лізіна фасується в мішок

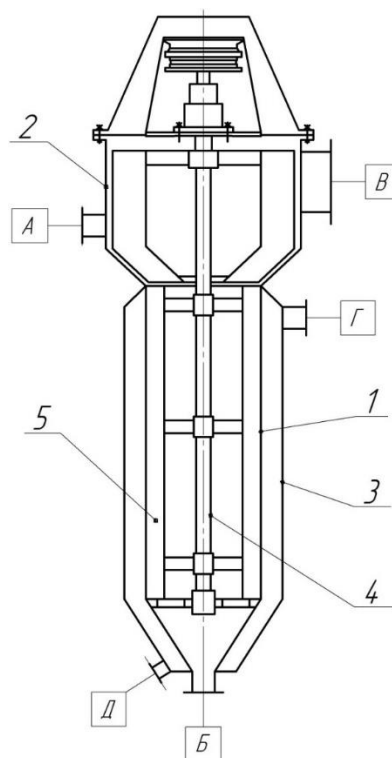
з відправляється на склад готової продукції [65].

#### 4.2 Конструктивні особливості та опис роботи апарата

Роторний плівковий апарат приведений на рисунку 4.2.

Корпус являється циліндричним з секційною оболонкою для обігріву, яка забезпечує при необхідності різний температурний режим роботи по висоті апарата. Спираючись на приведені вище умови роботи апарата, доцільно відкинути варіант секційного виконання оболонки. Верхня частина корпусу служить сепаратором для відділення крапель продукту, що виносяться з вторинною парою [65].

Верхній кінець вала ротора закріплений в підшипниковому вузлі, який змонтований на стійці привода, яка розташована на кришці апарата.



1 – корпус; 2 – сепаратор; 3 – оболонь; 4 – вал ротора; 5 – лопать; 6 -  
верхня опора; 7 – нижня опора; 8 – розподілю вальний пристрій.

Рисунок 4.2– Схема роторного плівкового апарату

Шарнірно закріплені лопаті при обертанні ротора (рисунок 4.3) під дією відцентрової сили притискаються до поверхні теплообміну та розподіляють по ній вихідний продукт у вигляді тонкої плівки, що стікає вниз. При цьому лопатки очищують поверхню теплообміну від різних відкладень та забруднень. Завдяки збільшенню кількості лопаток забезпечується повне зрощування не тільки верхнього, але й нижнього ступенів робочої поверхні, що забезпечує отримання концентрування продукту до 1:50 за один його прохід через апарат при питомому паровідборі 0,11 – 0,15 кг/(м<sup>2</sup>·с) [65].

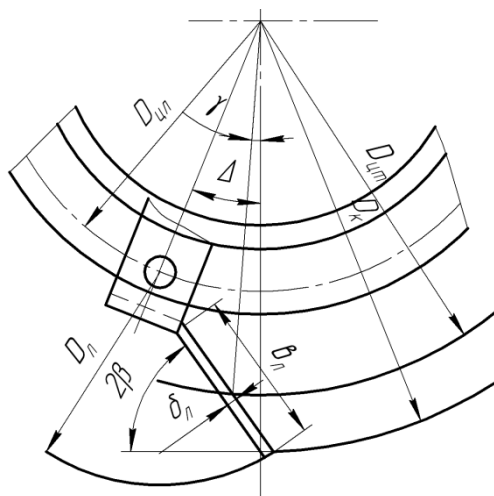


Рисунок 4.3 – Схема шарнірного кріплення лопаті  
Лопаті випарника можуть мати не лише шарнірне кріплення.

### 4.3. Методика розрахунку роторного плівкового апарату.

#### 4.3.1. Вихідні дані

- 1) Масова продуктивність апарату по вихідному продукту,  $M_i$  – 0,227 кг/с;
- 2) початкова концентрація продукту,  $a_n$  – 48%;
- 3) кінцева концентрація продукту,  $a_k$  – 65%;
- 4) робочий тиск всередині апарату,  $P_{роб}$  – 0,02 МПа;
- 5) початкова температура кипіння розчину,  $t_k^{нач}$  – 58 °С;
- а) коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\nu_{анач}$  –  $0,015 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с;

- б) коефіцієнт динамічної в'язкості,  $\mu_{нач} = 2,183 \cdot 10^{-3}$  Па·с;
- в) густина розчину,  $\rho_{нач} = 1203$  кг/м<sup>3</sup>;
- б) кінцева температура кипіння розчину,  $t_k^{кон} = 60$  °С;
- 7) температура гріючої пари,  $t_{гп} = 120$  °С;
- 8) прихована теплота пароутворення,  $r_{zn} = 2367000$  Дж/кг ;
- 9) питома теплота фазового перетворення дистилята,  $r_0 = 2238000$  Дж/кг;
- 10) щільність зрошення,  $-\ 0,15$  кг/(с·м<sup>2</sup>).

### 4.3.2 Алгоритм розрахунку роторного плівкового апарата

Запропонована методика розрахунку розроблена на основі власних досліджень і досліджень інших авторів.

Метою розрахунку є обґрунтований вибір типорозміру апарату.

Розрахунок виконується в такій послідовності [5]:

1. Попередньо знаходимо площу теплообміну  $F_n$  :

$$F_n = \frac{M_{вих}}{\Gamma} \quad (4.1)$$

де,  $M_{вих}$  – продуктивність по вихідному продукту,  $\Gamma$ - густина зрошення, яка приймається орієнтовно при чому  $\Gamma > \Gamma_{min}$

2. Мінімальна густина зрошення  $\Gamma_{min}$  :

$$\Gamma_{min} = \frac{1}{4} \nu Re_{min} \quad (4.2)$$

де, для розрахунку критерію Рейнольда плівкового можна використовувати наступну формулу якщо виконуються умови  $Re_u = 5000 - 45000$ , та  $\Delta t_{cp.} = 10^0 C - 45^0 C$  :

$$Re_{min} = 6.62 \cdot 10^8 \cdot Re_u^{-1.88} \cdot \Delta t_{cp}^{0.64} \quad (4.3)$$

а, в іншому випадку використовувати:

$$Re_{min} = 7.05 \cdot 10^6 \cdot Re_u^{-2.46} \cdot \Delta t_{cp}^{0.74} \quad (4.4)$$

По розрахованій площі, необхідно підібрати розміри апарату, та лопаток.

3. Обирається спосіб нагріву апарату ( парою, рідким теплоносієм, електро обігрів ) і параметри теплоносія. Спосіб обігріву визначається властивостями рідини, що нагрівається, її температурою.

При виборі параметрів теплоносія ( температури, тиску ) можна керуватись, крайніми значеннями температурного напору на границі стінка-рідина:

$$\Delta t = 80 \div 129^{\circ}\text{C} \text{ при } \mu = 20 \div 30 \text{ мсек/м}^2$$

$$\Delta t = 0,5 \div 6^{\circ}\text{C} \text{ при } \mu = 10^{-3} \text{ мсек/м}^2,$$

А також даними, що є в літературі про температурний напір на границі теплоносій – стінка. При виборі параметрів гарячого теплоносія потрібно враховувати тиск (  $0,4 \div 2 \text{ Мн/м}^2$  ) і температуру, на яку розраховані роторні апарати.

4. З рівнянь теплового і матеріального балансу визначається тепловий потік  $Q$  і витрата теплоносія.

5. Розраховується середня різниця температур: теплоносій – рідина, що нагрівається, для чого використовується середньо логарифмічна різниця температур.

6. Розраховується коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1$  на стороні теплоносій – стінка.

7. Знаходиться середня температура внутрішньої стінки корпусу:

$$t_{cmk} = t_{cp} + \frac{K}{\alpha_2} \Delta t_{cp} \quad (4.5)$$

де,  $\frac{K}{\alpha_2} = 0,3$  можна прийняти в першому наближенні.

8. Середня температура стікаючої плівки:

$$t_{nl} = 0.5(t_{cmk} + 0.5(t_k + t_n)) \quad (4.6)$$

По  $t_{пл}$  знаходяться фізичні властивості продукту, по яким розраховується  $\alpha_2$

Для знаходження  $\alpha_2$  користуємося формулами:

при  $Re_{пл} \leq 1600$

$$\frac{\alpha_2}{\lambda_{пл}} \left( \frac{v_{пл}^2}{g} \right) = 0.67 \left( \frac{v_{пл}^{2/3}}{L_{л} g^{1/3}} \right) \cdot Re_{пл}^{1/9} \cdot Pr^{0.33}; \quad (4.7)$$

при  $Re_{пл} > 1600$

$$\frac{\alpha_2}{\lambda_{пл}} \left( \frac{v_{пл}^2}{g} \right) = 0.01 \cdot Re_{пл}^{0.33} \cdot Pr^{0.33} . \quad (4.8)$$

10. Визначається коефіцієнт теплопередачі  $K$  і поверхня теплообміну  $f$ :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4.9)$$

$$f = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}}, \quad (4.10)$$

11. За отриманою поверхнею теплообміну  $f$  підбирається роторний плівковий апарат і визначається необхідна кількість апаратів.

12. Для оцінки часу перебування рідини в роторно плівковому апараті необхідно знати його утримуючу здатність, тобто об'єм рідини, що знаходиться в апараті в даний момент:

$$V_p = \pi D H \varepsilon \Delta + z H S_{вл} \quad (4.11)$$

де,  $H$ - висота лопаті в апараті;  $z$ - число лопатей в діаметральному перерізі апарату;  $S_{вл}$  –площа перерізу рідинного валика.

13. Визначається режим руху рідини і розраховується середня товщина плівки  $\delta = \varepsilon \cdot \Delta$ :

$$\frac{\Delta}{D} = 230 \cdot Re_u^{-1.85} \cdot Re_{пл}^{0.75} \cdot K_N^{-1.3} \cdot z^{0.85} \left( \frac{b+c}{b+2c} \right)^{1.3} \cdot (\sin 2\gamma)^{0.33} \quad (4.12)$$

де,  $K_N$ - конструктивний коефіцієнт що знаходиться за формулою:

$$K_N = 15.5 \cdot \frac{z \cdot m_{y\partial}}{\rho_p \cdot D^2} \cdot \frac{b + 2c}{b + c} \cdot \sin 2\gamma \quad (4.13)$$

де  $m_{\text{л}}$ - маса лопаті довжиною 1 м.,  $b$  і  $c$ - розміри лопаті та  $\gamma$ - кут атаки лопаті.

14. Площа перерізу рідинного валика, що формується перед лопатю визначається за формулою:

при турбулентному режимі руху рідини в валику

$$S_{\text{в.л}} = 0.95 \cdot Fr_{\text{ц}}^{0.56} \cdot Re_{\text{ц}}^{-0.76} \left( \frac{q_p}{v_p \cdot D} \right)^{0.56} \cdot \left( \frac{K_N}{z} \right)^{0.12} (\sin \gamma)^{-0.32} \quad (4.14)$$

при ламінарному режимі

$$S_{\text{в.л}} = 3.75 \cdot \left( \frac{q_{\text{в.л}} \cdot v_p}{\sin \gamma} \right)^{0.5} \quad (4.15)$$

15. Для знаходження потужності  $N$  використовується відомий вираз:

$$N = K_N \cdot \rho_p \cdot n^3 D^4 H \quad (4.16)$$

16.

16. Для термолабільних речовин визначається середній час перебування рідини в апараті  $\tau = \frac{2\pi R \delta}{V}$  сек., і співставляється з допустимим

Результати розрахунку наведені в Додатку В.

Також написана програма розрахунку на мові програмування QBasic, текст програми наведений в Додатку Г.

#### 4.4 Висновки

1. Встановлено, що отримані узагальнені критеріальні рівняння можна використовувати як модельні, для випадків з виристанням інших речовин.

2. Розроблено технологічну схему виробництва лізину з використанням роторного плівкового апарата в якості останньої стадії концентрування продукту.

3. Обґрунтовано конструкцію апарата.

4. На підставі розробленої методики вибрано апарат РП-600-6 та розраховано конструктивні розміри апарата.

Характеристики апарата:

Площа теплообміну –  $4,8 \text{ м}^2$ ;

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

Середній час перебування в апараті –  $7,4 \text{ с}$ ;

Товщина стінки апарата  $\delta_{\text{ст}} = \dots \text{ м}$ ;

Довжина робочої частини апарата  $L_a = 4,05 \text{ м}$ ;

Довжина грючої рубашки  $L_p = 1,19 \text{ м}$ ;

Діаметр корпусу апарата  $D_k = 0,6 \text{ м}$ ;

Число лопатей в ряду  $z_n = 12$ ;

Число рядів лопатей  $x_n = 13$ ;

Товщина лопаті  $\delta_n = \dots \text{ м}$ ;

Потужності привода ротора  $N = 7,5 \text{ кВт}$ .

## 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 5.1 Опис ідеї проекту

Останнім часом широкого застосування в промисловості набули плівкові апарати з ротором, що обертається. Ці апарати придатні до здійснення багатьох теплофізичних процесів. Тому постає питання у надійному та постійному їх постачанні.

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Нові конструкції РПА	Застосування у багатьох виробництвах	Підвищена ефективність
		Економічність

Пропонуються нові вискооефективні конструкції РПА, що базуються на потребах замовника, тобто виробництва.

Проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначено перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

- визначено попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проведено збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проведено порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (таблиці 5.2).

Таблиця 5.2 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	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
Вартість РПА	450000	250000	300000	375000	+	-	-
Продуктивності	900	700	850	500	-	-	+
Діаметри апарата	0,1-1	0,1-0,5	0,1-0,75	0,1-0,4	-	-	+
Довжини апарата	0,1-4	0,5-2	0,4-2,5	0,8-1,4	-	-	+

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначаємо технологічну здійсненність ідеї проекту, що передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/добробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Інтенсифікація процесів гідродинаміки та теплообміну	Модернізація конструкції ротора	На даний момент відомо багато конструкцій ротора, але завжди можна збільшити ефективність процесу гідродинаміки	Література для вивчення процесів, що відбуваються в РПА представлена декількома авторами, для підвищення конкурентоспроможності потребує подальшого вивчення
2	Підвищення енергоефективності	Додаткова модернізована конструктивних ознак, нові технологічні лінії для виробництв	Наявні, відомі конструкції модернізуються	На ринку представлено декількома основними виробниками обладнання РПА
3	Оптимізація та автоматизація процесу виробництва	Модернізована система автоматизації	Наявні, проводиться модернізація	Є доступними для купівлі, впровадження в виробничий процес
<p>Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Нові конструкції РПА для кожного окремого випадку</p>				

За результатами аналізу видно, що існують доступні шляхи технологічної реалізації проекту, яким це доцільно зробити.

### 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначено ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведено аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	925000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Кваліфікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, ГОСТ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	79

За результатами аналізу таблиці ринок являється досить привабливим для входу, але не занадто доступним – успіх в даній галузі оцінюється розумовим капіталом компанії, тобто навчаності та здібністю працівників в технічній галузі. Конкуренція не значна, але основні гравці вже мають своє ім'я в даній галузі, що може відобразитися на складності входу. Показники попиту на обрані послуги зростають.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (таблиця 5.5).

Таблиця 2.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних	Вимоги споживачів до товару
--------------------------	--	--	-----------------------------

		цільових груп клієнтів	
Потреба в обладнанні, потреба в підвищенні якості обладнання	Компанії по будівництву, компанії по виготовленню труб, харчові та хімічні компанії.	ДСТУ, ГОСТ, індивідуальні вимоги	- до продукції: бездефектна робота обладнання, ефективність, економічність - до компанії-постачальника: постачання без пошкоджень, швидкість доставки на монтаж, можливість постачання по всій Україні

Проводимо аналіз ринкового середовища: складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці №№ 5.6-5.7). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.6 Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Економічні: Криза, Інфляція, Підвищення цін на сировину	Впливає на купівлю/продаж товару, або ресурсу необхідного для товару	Підвищення/пониження ціни на продукт у залежності від цін на сировину. Прив'язка до стабільних валют.
Політико-правові: «Закон України про підприємницьку діяльність».	Впливає на працевдатність проекту, купівлю/продаж товару, або ресурсу необхідного для товару Недостатня підтримка державою нових підприємців.	Зміна напрямків імпорту/експорту. Відповідність вимогам законодавства України та країн з якими ведеться співпраця.
«Закони України про ліцензування певних видів господарської діяльності».	Дорого вартісні ліцензії, заборона на діяльність без ліцензії	Відповідність вимогам законодавства України та країн з якими ведеться співпраця.
Природні: повені, дефіцит ресурсу	Зростання ціни на ресурс	Розробка нових технологій з використанням інших матеріалів

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Демографічні: Збільшення населення	Збільшення попиту на продукцію, що виготовляється в РПА	Збільшення числа потенційних клієнтів в майбутньому.
Науково-технічні: Зміна технології виготовлення обладнання	З'явиться необхідність у модернізуванні існуючого обладнання відповідно до нових технологій.	Відслідковувати зміни впроваджених технологій. Впровадити нові технології у себе. Змінити вартість товару
Соціально-культурні: Консервативність поглядів споживачів	Небажання споживачів купувати нове обладнання	Пропонувати споживачам замість купівлі нового обладнання модернізацію їх виробництва за допомогою наших послуг

Надалі проводимо аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (таблиця 5.7).

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Олігополія	Невелика кількість конкуруючих фірм, при цьому хоча б одна або дві з них, виробляють значну долю продукції даної галузі	Пропозиція унікального обладнання на ринку, який дозволить знизити бар'єр входу на ринок
2. За рівнем конкурентної боротьби: національний	Забезпечення конкурентоспроможності на світовому ринку	Пропозиція продукту з урахуванням вимог суспільства
3. За галузевою ознакою: міжгалузева	Конкуренція за більш вигідні умови виробництва, за розширення ринків збуту своїх товарів, за одержання найбільшого прибутку між конкурентами в усіх галузях	Підвищення ефективності всієї галузі, її технічний рівень та конкурентоспроможність, удосконалення структури виробництва відповідно до нових потреб
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова	Зосередження конкурентоспроможності на якості товару	Постійний моніторинг ринку щодо появи продуктів( технологій) замінників

5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Технічні переваги, впровадження нововведень, найефективніші методи збуту товару	Здійснення гнучкої цінової політики з урахуванням особливостей ринку та його обсягів пропонованої взаємодії
6. За інтенсивністю: не марочна	Репутація проекту	Створення високого рівня ділової репутації, що сприятиме впізнаваності стартапу

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера).

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Підприємства що виробництвом РПА: «Luwa», «Alfa Laval»	Конкурентом може стати підприємство яке почне співпрацювати з технічними вузами.	Напрямок по постачанні сировини, (бажано купувати сировину в Українських виробників)	- не конкурентоспроможне обладнання; -високі ціни на товари ; -не якісні послуги; - без інноваційне.	Інші матеріали (метал, деревина, кераміка та інші композиційні матеріали)
Висновки:	На даний момент більшість конкурентів не створює нових провідних шляхів модернізації обладнання для їх переробки.	- Вхід на ринок можливий, внаслідок того, що промисловість потребує велику кількість конструктивних матеріалів - нових конкурентів не знайдено.	Час, ціна та якість сировини для переробки і поставки комплектуючих та його мінімальна вартість.	Клієнту завжди не обхідне: Конкурентно спроможне обладнання за низькою ціною; якісне та інноваційне	Вибір конструктивних матеріалів для виготовлення РПА досить поширений, та має незначні вимоги.

На основі аналізу конкуренції (таблиця 5.19), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, вимог споживачів до товару та факторів

маркетингового середовища (таблиці № 5.6-5.7) визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за таблиця 5.10

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
Швидкість	Через нову конструкцію процес проходить швидше
Якість кінцевої продукції	Нова конструкція забезпечує потрібну якість товару
Енерговитрата менша	Так як енергії витрачається менше, ціна на товар також менша

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Низька ціна	5		△			□		
2.	Якість кінцевої продукції	10			□		△		
3.	Швидкість надання послуг	10			□	△			
4.	Асортимент	8	△	□					
5.	Рівень концентрації	0				□		△	
		Сильні сторони			Слабкі сторони				
		Низька ціна			Якість кінцевої продукції, Швидкість надання послуг, Асортимент				
		* □ – «Luwa»							

Якість кінцевої продукції, Рівень концентрації	Асортимент, Висока ціна
--	-------------------------

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (таблиця 5.10) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12 – формулювання управлінської проблеми SWOT-аналіз.

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Унікальність</li> <li>2. Висока швидкість надання послуг</li> <li>3. Якість кінцевого продукту</li> <li>4. Асортимент</li> </ol>	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ресурсозалежність</li> <li>2. Невідомість</li> </ol>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Збільшення попиту на продукцію, що виготовляється в РПА через зростання населення</li> <li>2. Попит на модернізацію обладнання.</li> </ol>	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Руйнування інфраструктури та падіння поставок, та зростання ціни на ресурс</li> <li>2. Криза, Інфляція, Підвищення цін на сировину. Вплив на купівлю/продаж товару, або ресурсу необхідного для товару</li> <li>3. Недостатня підтримка державою нових підприємців. Дорого вартісні ліцензії, заборона на діяльність без ліцензії</li> </ol>

За даним дослідженням в нас посилення сильних сторін за рахунок можливостей.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Загарбник	Суттєві	Максимум рік
Наступник	Значні	Максимум рік

Після аналізу обираємо альтернативу Загарбник.

#### 5.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.14).

Таблиця 5.14 – вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Будівельні компанії, Харчова та Хімічна промисловості	Визначатиметься готовністю підприємства до попиту та до впровадження нових техонлогій	Залежатиме від рівня і темпу економічного розвитку взагалі і галузей- споживачів зокрема, а також характеризації конкурентів з боку держави	Низька	Високі бар'єри входу на ринок

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо Хімічну та Харчову промисловості, і використовуємо стратегію диференційованого маркетингу

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (таблиця 5.15).

Таблиця 5.15 – визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
Загарбник	Ексклюзивний розподіл	Суттєва (наслідування дій лідера, захисні дії)	Диференційованого маркетинг

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.18).

Таблиця 5.16 – визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні, не буде. Буде утворено унікальну продукцію	Наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (таблиця 5.15) та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування (таблиця 5.17), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 5.17 – 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 (три ключових)
- до продукції: якість, продуктивність. - до компанії-постачальника: якість постачання, швидкість, доступність	Диференційовано о маркетинг	Буде утворено унікальну продукцію	Виробництво асортименту, чистота

## 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування *маркетингової концепції товару*, який отримає споживач. Для цього у таблиці 20 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Потреба в обладнанні потреба в підвищенні кінцевої продукції	Харчові та хімічні компанії.	Швидкість, ціна, підтримання потрібних характеристик

Далі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Таблиця 5.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди:		
	Розробка та модернізація адаптивних конструкцій відповідно до потреб споживача та нових технологічних процесів.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Технічні: в залежності від вимог споживача; 3. Економічність: зниження затрат на ремонт, зменшення бракованих виробів та зменшення простоїв виробництва; 4. Ергономічність: доступ до всіх елементів конструкції; 5. Безпека: відповідність нормативам; 6. Екологічність: вміст шкідливих домішок нижче допустимих.	+/+	-/+/+/-/-
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування міжнародні та вітчизняні стандарти ДСТУ, ISO, DIN та інші.		
	Пакування– без пакування		

	Марка: назва організації-розробника + назва товару
III. Товар із підкріпленням	До продажу : Роз'яснення клієнтові питань з технологією переробки
	Після продажу: Гарантія якості продукції
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Використання власних запатентованих розробок та методів оптимізації, консультування та шляхів розв'язку проблеми.	

Далі визначаються цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 5.20 Визначення меж встановлення ціни

п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
.	500000 грн/1 замовлення	250000 грн – ціни невисокі	Підприємства великі, середні та малі(цехи)	250000-450000.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (таблиця 5.21):

Таблиця 5.21 Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Поштучно	Якість товару, потрібні характеристики,	Досить глибока	Власні сили

При визначенні оптимальної системи збуту було вирішено, що ми будемо проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту)

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.22).

Таблиця 5.22 Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування
Орієнтована на використання вузькоспеціальної комунікації, що визначається особливістю галузевих приналежностей	Інтернет, виставки, семінари, друкована продукція	<p>Спеціалізовані виставки:</p> <p>Міжнародна спеціалізована виставка ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ/ПОЖТЕХ;</p> <p>Міжнародний авіакосмічний салон АВІАСВІТ;</p> <p>Галузева експозиція ПЕК УКРАЇНИ;</p> <p>Міжнародна спеціалізована виставка гірничодобувної промисловості MINING INDUSTRY EXPO;</p> <p>Міжнародна спеціалізована виставка НАФТОГАЗЕКСПО;</p> <p>Міжнародний водний форум AQUA UKRAINE;</p> <p>Міжнародна агропромислова виставка АГРОФОРУМ;</p> <p>МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ;</p> <p>Міжнародна спеціалізована виставка PLAST EXPO UA.</p> <p>На виставках буде розповсюджуватися друкована продукція.</p>

Результатом пункту 5.5 створено ринкову програму, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

## 5.6 Висновки

В процесі розробки стартап проекту, що базується на ідеї розробки та постачання РПА будь-якої складності, та для будь-якої галузі виробництва було розроблено висновки, що можлива ринкова комерціалізація проекту. На користь цього свідчить наявність попиту серед широкого різноманіття

виробництв, що виражена потребою у розробці принципіально нових конструкцій РПА. Маркетингові дослідження обраного сегменту ринку, динаміки ринку, рівня конкуренції в базових та споріднених галузях та обґрунтовані фактори конкуренції продемонстрували можливість у подальшому провадженні стартап-проекту і його конкурентоспроможності. Це відкриває можливість стверджувати про перспективи створення та розвитку стартапу.

## ВИСНОВКИ

1. За результатами критичного огляду джерел літератури сформульовано мету та задачі дослідження.
2. Запропоновано та обгрунтовано фізичну модель гідродинаміки та теплообміну у роторному апараті з шарнірним кріпленням лопатей.
3. Сформульовано та представлено математичну модель процесу гідродинаміки та теплообміну у роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей.
4. Розроблено та обгрунтовано методику експериментальних досліджень потужності та коефіцієнту тепловіддачі.
5. Проведено експериментальні дослідження витрат потужності на розподілення та перемішування рідини. Встановлено вплив потужності та теплофізичних властивостей на коефіцієнт тепловіддачі. Отримано узагальнені критеріальні рівняння коефіцієнта потужності.
6. Перевірено адекватність запропонованої методики та математичної моделі.
7. Розроблено методику, алгоритм та програму розрахунку апарата.
8. За результатами розрахунку розроблено складальне креслення роторного плівкового апарата.
9. Матеріали магістерської дисертації опубліковані в фахових виданнях та представленні у двох наукових статтях, чотирьох збірках тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях та одному патенті України на корисну модель.
10. Магистерская диссертация выполнена в соответствии с тематическим планом кафедры МАХНВ НТУУ «КПІ» и в соответствии с госбюджетом по теме «Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в роторно-пленочных аппаратах» № 03/15 ИХФ, номер государственной регистрации 0115U004770

## ВЫВОДЫ

1. По результатам критического обзора источников литературы сформулированы цель и задачи исследования.
2. Предложены и обоснованы физическую модель гидродинамики и теплообмена в роторном аппарате с шарнирным креплением лопастей.
3. Сформулированы и представлены математическая модель процесса гидродинамики и теплообмена в роторном пленочном аппарате с шарнирным креплением лопастей.
4. Разработан и обоснована методика экспериментальных исследований мощности и коэффициента теплоотдачи.
5. Проведены экспериментальные исследования затрат мощности на распределения и перемешивания жидкости. Установлено влияние мощности и теплофизических свойств на коэффициент теплоотдачи. Получены обобщенные критериальные уравнения коэффициента мощности.
6. Проверено адекватность предложенной методики и математической модели.
7. Разработана методика, алгоритм а также компьютерная программа расчета аппарата.
8. По результатам расчета разработан сборочный чертеж роторного пленочного аппарата.
9. Материалы магистерской диссертации опубликованы в профессиональных изданиях и представлены в двух научных статьях, четырех сборниках тезисов докладов на международных научно-практических конференциях и одном патенте Украины на полезную модель и одной заявке на полезную модель.
10. Контрольная диссертация выполнена в согласовании с тематическим планом кафедры МАХНВ НТУУ «КПИ» и в согласовании с госбюджета по теме «Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в

роторно-пленочных аппаратах» № 03/15 ИХФ, номер государственной регистрации 0115U004770

## CONCLUSIONS

1. According to the results of the critical review of sources of literature, the purpose and objectives of the research are formulated.

2. The physical model of hydrodynamics and heat exchange in a rotary machine with hinged fastening of blades is proposed and substantiated.

3. The mathematical model of the process of hydrodynamics and heat transfer in a rotary film apparatus with hinged forks of blades is formulated and presented.

4. The method of experimental research of power and coefficient of heat transfer is developed and substantiated.

5. Experimental studies of power consumption on the distribution and mixing of liquid have been carried out, the influence of viscosity has been established. Generalized criterial equations are obtained.

6. Experimental research of heat exchange in a rotary film apparatus was carried out and the influence of viscosity on heat transfer was established. Generalized criterial equations are obtained.

7. The adequacy of the proposed methodology and the validity of the model is verified.

8. The methodology, algorithm and program of calculation of the device are developed.

9. On the basis of the calculation results, an assembly drawing of a rotary film machine was developed.

10. The materials of the master's dissertation are published in professional journals and presented in two scientific articles, four collections of theses of reports at international scientific-practical conferences and one patent of Ukraine on a useful model.

11. The master's dissertation is executed in accordance with the thematic plan of the Department of MAHNV NTUU "KPI" and in accordance with the state budget on the topic "Experimental study of hydrodynamics and heat transfer in rotary-film apparatus" № 03/15 ICF, state registration number 0115U004770.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Антипов, С. Т. Машины и аппараты пищевых производств, учеб. для вузов. В 2 кн. / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Острикови др.; под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2009. - Кн. 1610 с.
2. Марцеюк А.С., Стабников В.Н. Плёночные тепло и массообменные аппараты в химической промышленности.-М.: Тяжёлая промышленность, 1981.-160с.
3. Тепло- и массообменные процессы в химической промышленности: Темат. сб. науч. тр. \Под ред. П.С.Циганкова – К., 1990. – 220с.
4. Debert, W.G. [Text] / W. G. Debert, I.G.Moore [Text] // Ind. Eng. Chem., 1963, v.55, № 6.
5. Film Evaporation Technology/ Sulzer Chemtech 28.66.06.40 - IX.12 - 20 - Printed in Switzerland. 2007. – 12 p.
6. Haley, F. C. (to E. I. duPont de Nemours & Co., Inc.), U. S. Patent 2866499.
7. Process Solutions Handbook. Artisan Industries Inc, 2011.
8. Научное обеспечение процесса влагоудаления из фосфолипидных эмульсий подсолнечных масел в ротационно-пленочных аппаратах / Алтайулы Сагымбек // Авторефер. дис. на соиск. уч. степени док. тех. наук. Воронеж.- 2012. - 24с.
9. Bachman, R. / R. Bachman. - Verfahrenstechnik. - 6 (1972), № 8, P.269-274.
10. Чернобыльский Й.І., Тананайко Ю.М., Воронцов Є.Г. Вимірювання товщини плівки стічної рідини. – У зб.: «Хімічна промисловість». Інститут технічної інформації. Київ, 1964, № 4, (20), с. 37-39.

11. ВасиLINEц, И. М. Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности / И. М. ВасиLINEц, А. Г. Сабуров. -М.: Агропромиздат. 1989. - 136 с.
12. Bachman, R. Scraped—surface, Thin—film Dryer Bachman/ R. Bachman, F. Widmer, P. Hadley. // Chemikal and Process Engineering. March, 1971. - № 3.
13. Сергеев, А. Г. Ротационный пленочный аппарат для сушки фосфатидов/ А. Г. Сергеев, И. М. ВасиLINEц, В. Н. Жиревский// Масложировая промышленность, 1966. - №5. - С. 40.
14. Hayschild, W. Thin-film Evaporator Dryers / W. Hayschild//Chemical and Process Engineering - 1969, 50, № 10, P. 83 - 84.
15. Кафаров, В. В. Основы массопередачи. / В. В. Кафаров. - М: Высш. школа, 1979. - 439 с.
16. JP 2004160298 A (Tamagawa machinery co LTD) 10.06.2004.
17. USPatent/1978/4199398Rotary film apparatus Ivan F. Evkin 01.27.1978/04.22.1980-7 p.
18. Алтайулы, С. Удаление влаги из фосфолипидной эмульсии растительных масел в коническом ротационно-пленочном аппарате/ С. Алтайулы // В мире научных открытий. - 2011. - ч . 3 -№ 12 (24), (Математика, Механика, Информатика). - С. 189-193.
19. Бухман, Н. Д. Фосфатиды и их значение для использования веществ в организме / Н. Д. Бухман. - Тр. первой научной сессии по вопросу "Проблема жира в питании". - Л.: 1959, С. 124 - 134.
20. Сабуров, А. Г. Исследование процесса десорбции в пленочном аппарате с жестким ротором при рекуперации растворителя на масло-экстракционных заводах.: Автореф. дис... канд. /А. Г. Сабуров. - Л.: ЛТИХН, 1978 г. - 24 с.
21. ВасиLINEц, И. М. Исследование работы ротационного пленочного аппарата применительно к процессу сушки гидратационного осадка: Автореф. дис. канд. техн. наук / И. М. ВасиLINEц. - Л.: ЛТИХП, 1968.

22. Стабников В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств/ В. Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов. - М: Агропромиздат, 1985. - 503 с.
23. ВасиLINEц, И. М. Ротационный пленочный аппарат для сушки гидратационного осадка/ И. М. ВасиLINEц, А. Г. Сергеев //Масло-жировая промышленность, 1967. - №2, С. 36 - 38.
24. А. С. 611633 (СССР). Аппарат для проведения массообменных процессов / Б. А. Дехтерман, Н. Э. Кушнир, Ю. А. Бездетко -опублик. в Б.И. 1978, № 23.-3 с.
25. А. С. 814379 (СССР), МКИ 3 В 01 D 3/30. Пленочный ротационный аппарат/ Г. С. Федоров, В. В. Леляев, А. В. Буланов, А.В., Акулич (СССР).- № 2705169/23-26; заявл. 26.12.78; опубл. 23.03.81, Бюл. № 11.-3 с.
26. Пат. 2194747 РФ, МПК7 СПВ3/14 Роторный тонкопленочный аппарат для выпаривания высоковязких продуктов / Петрик А.А.; Корнена Е.П.; Герасименко Е.О.; Бутина Е.А.; Бабушкин А.Ф.; Черкасов В.Н.; Ипполитов С.А.; 2001113897/13-№2001113897/13; заявл. 21.05.2001; опубл. 20.12.2002, Бюл. № 26. - 9 с.
27. US Patent № 3962028/ June 8, 1986/ SWEEP SURFACE EVAPORATOR/ John C. Walsh, Winchester, Mass/ The De Laval Separator Company/ B01D 1/22.
28. Заяв. U 2014 04338 Україна МПК (2014) B01D 1/22 Роторно-плівковий апарат з вихідною плівкою/ Давидов А.С., Зубрій О. Г., Бірюк Д. О. 22.04.2014.
29. Заяв. U 2014 04337 Україна МПК (2014) B01D 1/22 Роторно-плівковий апарат з вихідною плівкою/ Давидов А.С., Зубрій О. Г., Бірюк Д. О. 22.04.2014.
30. Артисов С. Н. Стационарный цилиндрический вихрь в вязкой жидкости. – Доклады академии наук, Мехника, 2001, том 377, № 4, с. 477-480.
31. Преображенский Е.И. Исследование гидродинамики и процесса осушки воздуха растворами серной кислоты. Автореферат кандидатской диссертации. М., Изд. МИХМ, 1973, 24 с.

32. Чернобыльский И.И., Тананайко Ю.М., Зубрий О.Г. Минимальная плотность орошения в роторном пленочном аппарате. – «Вестник КПИ. Серия химического машиностроения и технологии». Киев, Изд-во КГУ, 1973, № 10, с. 57-59.
33. Чернобыльский И.И., Тананайко Ю.М., Воронцов Є.Г. Вимірювання товщини плівки стічної рідини. – У зб.: «Хімічна промисловість». Інститут технічної інформації. Київ, 1964, № 4, (20), с. 37-39.
34. Чернобыльский И.И., Тананайко Ю.М., Мерзликин В.Г. Исследование гидродинамики при пленочном течении жидкости на гладких и навитых трубах. 3-я республиканская конференция «Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств». Тезисы докладов. Львов, Изд. ЛПИ, 1973, с.108-109.
35. Гидродинамическое течение тонких пленок полимерных полупроводников под действием поверхностных сил / Заболотный М.А., Загородний А.Г., Кувшинский Н.Г., Якименко И.П. // К.- АН УССР, ИТФ, 1990. - 24с.
36. Boott T. R., Azoory S.: Scraped surface heat transfer with Knitmesch srapers. Brit. Chem. Eng.”, 1969, T-3, 372-374.
37. Boot T. R., Romero J. J. B.: Heat transfer across a scraped surface. “Canad. J. Chem. Eng.”, 1963, 41, №5, 213-219.
38. Марченко А. Н., Исследование эффективности некоторых конструкций тонкопленочных аппаратов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Харьков, 1968.
39. Авдонькин А. Ф. Исследнование гидродинамики и теплообмена в вертикальном пленочном аппарате с жестко закрепленными лопастями. Автореферат на соискание ученой степени канд. Технических наук., ЛТИ им Ленсовета, Ленинград, 1971.

40. Norman W. S., Binns D. T.: The effect of surface tension changes on the minimum wetting rates in a wettingrod distillation column. "Trans. Instn.Chem. Engrs.", 38, 1960, 6, 301-307.
41. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Машгиз. 1962.
42. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1956.
43. Reay W. N.: Recent advance in thin-film evaporation. "Industrial Chemist.", 1963, 39, №6, 281, 293-297.
44. Gudheim A. R., Donovan J.: Heat transfer in thin-film centrifugal processing Units. "Chem. Eng. Progr.", 53, 1957, 476 – 482.
45. Hauschild W.: Leistung von Dunnschichtverdampfern mit gwangelaufig ausgebildeten Filmen. "Chem. Ing. Techn", 25, 1953, 573-574.
46. Boot T. R. , Azoory S.: Heat transfer in scraped heat exchangers. "Chem. andProceseEng.", 1969, 50, №1, 85-90.
47. Марченко А. Н., Соляник О. Н. Исследование гидродинамики тонко-пленочного роторно дистилляционного аппарата. Массообменные процессы химической технологии. 1967, №2.
48. Тананайко Ю.М. Експериментальна установка для дослідження тепловіддачі під час кипіння рідини в тонкому шарі. - «Хімічна промисловість». Київ, Інститут технічної інформації, 1965, № 4 (24), с. 50-52.
49. Тананайко Ю.М., Зубрій О.Г. Вимірювання товщини плівки та профіля температур у відцентровому плівковому апараті з жорстко закріпленими лопастями. – «Вісник КПІ. Серія хімічного машинобудування та технології». Київ, вид. КДУ, 1966, № 3, с. 18-20.
50. Тананайко Ю.М., Зубрій О.Г. Вимірювання товщини плівки та профіля температур у відцентровому плівковому апараті з жорстко закріпленими лопастями. – «Вісник КПІ. Серія хімічного машинобудування та технології». Київ, вид. КДУ, 1966, № 3, с. 18-20.
51. Мигай В. К., Современные теплообменные аппараты. Ленинград: Энергоиздат, 1980. – 143 с.

52. Щукин В. К., Халатов А. А., Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982, - 200 с.

53. Соколов В. Н., Доманкий И. В. Газожидкостные реакторы Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. 21

54. Соколов В. Н., Яблокова М. А. Аппаратура микробиологической промышленности. – Л.: Машиностроение. Ленингрд. отд-ние, 1988. – 278 с.: ил.

55. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгис, 1959. 699 с.

56. Аристов С. Н., Князев Д. В., Полянин А. Д., Точные решения уравнений Навье-Стокса с линейной зависимостью компонент скорости от двух пространственных переменных. Теоретические основы химической технологии, том 43, №5, Москва, Наука, - 2009 г, с. 547-566.

57. Тананайко Ю. М., Воронцов Е. Г., Шевчук Ю.В., Методические указания к применению вычислительной техники в курсе «Машины и аппараты химических производств». – Киев: КПИ, 1988. – 48с.

58. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні ре-комендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

59. Форсайт економіки України: середньостроковий (2015–2020 роки) і довгостроковий (2020–2030 роки) часові горизонти / наук. керівник проекту акад. НАН України М. З. Згуровський // Міжнародна рада з науки (ICSU); Комітет із системного аналізу при Президії НАН України; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; Інститут прикладного системного аналізу НАН України і МОН України; Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 136 с. ISBN 978-966-622-716-7.

60. 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 Access mode : <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.

61. Юдіна Н.В. Міждисциплінарні платформи стартап-проектів [Електронний ресурс] // Міждисциплінарні дискусії : Матеріали науково-теоретичного семінару «Міждисциплінарні дослідження: теоретико-методологічні виміри», 5 грудня 2017 р. – Київ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка Інститут міжнародних відносин Навчально-науковий центр «Синтез». – 2017. – С. 20-24. - Режим доступу [http://mail.iir.edu.ua/uploads/files/tezi%20ceminar%20synthesis%205%2012%202017%20final%20\(1\).pdf](http://mail.iir.edu.ua/uploads/files/tezi%20ceminar%20synthesis%205%2012%202017%20final%20(1).pdf).

62. Юдіна Н. В. Визначення циклічних залежностей в економіці України на основі аналізу окремих макроекономічних показників. Економічний Вісник НТУУ «КПІ». №13(2016). <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/80084/75643>

63. Юдина Н. В. Антикризисные маркетинговые инструменты инновационного развития предприятий / Н.В. Юдина // Маркетинг и финансы. – 2014. – Т. 1. – С. 60– 72.

64. Юдіна Н.В. Управління майбутнім на основі концепції інноваційного розвитку // Антикризове управління економікою України: нові виклики. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, КНЕУ ім. В.Гетьмана, 15-17 грудня 2015 року). – 2015. - С. 124-127. – Режим доступу : [http://futuolog.com.ua/blog\\_konferencia\\_kneu\\_2015\\_12\\_15.phtml](http://futuolog.com.ua/blog_konferencia_kneu_2015_12_15.phtml).

65. Поліщук М.С. Дослідження процесів, що відбуваються у РПА// Наукове видання Молодий вчений -2015. – с 56-78.

66. Бишко М. А., Зубрій О. Г. Дослідження потужності у роторному плівковому апараті // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №5.

67. Бишко М. А., Зубрій О. Г. Дослідження процесу теплообміну у роторному плівковому апараті // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №7.

**Додаток А**  
**Розрахунок критерія Фішера**

Програма розрахунку коефіцієнта Фішера для перевірки адекватності математичної моделі розрахунку

В стовпчику під назвою «кв1» рахуємо різницю  $(\bar{y} - y_i)^2$

В стовпчику під назвою «qv2» рахуємо різницю  $(y_i - y_i^0)^2$

В комірках H30 і I30 визначаємо суми отриманих різниць

10      fx      =СУММ(H23:H29)

A	B	C	D	E	F	G	H	I
<b>Розрахунок коефіцієнта Фішера</b>							кв1	qv2
35,58212952	0,0001	1		179,555	70,4135		4897,08	1213,22
92,15118078	0,0005	2		178,764	128,072		151,794	1290,32
147,5722776	0,0012	3		176,92	165,15		612,915	308,969
170,5870614	0,0018	4		173,168	173,168		1074,19	6,65866
177,4827054	0,0025	5		165,15	176,92		1334,24	0,31675
179,44234	0,0032	6		128,072	178,764		1472,35	0,46028
179,9309986	0,003544	7		70,4135	179,555		1533,7	0,1413
140,3926705							11076,3	2820,09
							Fisher	tabl
							3,27302	4,95

130      fx      =СУММ(I123:I29)

A	B	C	D	E	F	G	H	I
<b>Розрахунок коефіцієнта Фішера</b>							кв1	qv2
35,58212952	0,0001	1		179,555	70,4135		4897,08	1213,22
92,15118078	0,0005	2		178,764	128,072		151,794	1290,32
147,5722776	0,0012	3		176,92	165,15		612,915	308,969
170,5870614	0,0018	4		173,168	173,168		1074,19	6,65866
177,4827054	0,0025	5		165,15	176,92		1334,24	0,31675
179,44234	0,0032	6		128,072	178,764		1472,35	0,46028
179,9309986	0,003544	7		70,4135	179,555		1533,7	0,1413
140,3926705							11076,3	2820,09
							Fisher	tabl
							3,27302	4,95

В комірці H32 розраховуємо розрахунковий коефіцієнт Фішера.

ер обмена      Шрифт      Выравнивание      Число      Стили      Ячейки

H32      fx      =H30/(7-1)\*(7-2)/I30

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	<b>Розрахунок коефіцієнта Фішера</b>							кв1	qv2
3	35,58212952	0,0001	1		179,555	70,4135		4897,08	1213,22
4	92,15118078	0,0005	2		178,764	128,072		151,794	1290,32
5	147,5722776	0,0012	3		176,92	165,15		612,915	308,969
6	170,5870614	0,0018	4		173,168	173,168		1074,19	6,65866
7	177,4827054	0,0025	5		165,15	176,92		1334,24	0,31675
8	179,44234	0,0032	6		128,072	178,764		1472,35	0,46028
9	179,9309986	0,003544	7		70,4135	179,555		1533,7	0,1413
0	140,3926705							11076,3	2820,09
1								Fisher	tabl
2								3,27302	4,95
3									

**Додаток Б**  
**Розрахунок похибок вимірювань**

## Б.1 Визначення похибок вимірювань під час проведення експериментів

Хай деяка випадкова величина  $x$  вимірюється  $n$  разів в однакових умовах з однаковою точністю. У відповідності із теорією похибок найбільш близьким до істинного значення  $x_0$  вимірюваної величини  $x$  є середньоарифметичне значення  $\bar{x}$ .

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Б1})$$

Як було показано раніше, чим більше число вимірювань, тим ближче середнє значення наближається до істинного. Результати окремих вимірювань в загальному випадку відрізняються від істинного значення. Абсолютні похибки  $i$ -того вимірювання

$$\Delta x_i = x_0 - x_i. \quad (\text{Б2})$$

Середня арифметична похибка визначається згідно із співвідношенням:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|. \quad (\text{Б3})$$

Вона визначає межі в яких лежить більше половини вимірювань (в теорії похибок доведено, що це число рівне 57% від всіх вимірювань). Отже значення  $x_0$  з 57% ймовірністю потрапляє в інтервал від  $\bar{x} - \eta$  до  $\bar{x} + \eta$ . Тоді результати вимірювань величини  $x$  записуються у виді :

$$x_0 = \bar{x} \pm \eta.$$

1. Обчислюється середньоарифметичне значення серії з  $n$  вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

2. Знаходимо похибки окремих вимірювань  $\Delta x = x_i - \bar{x}$ .
3. Обчислюються квадрати похибок окремих вимірювань  $x^2$ .
4. Якщо одне з вимірювань різко відрізняється за своїм значенням від решти вимірювань, то слід перевірити чи не є воно промахом.
5. Визначається середньоквадратична похибка середнього значення

прямих вимірювань:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Б4})$$

Таким чином, для скінченої вибірки дисперсію середнього значення (середньоквадратичним відхиленням середнього значення) розраховують за формулою:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Б5})$$

6. Задаємо значення коефіцієнта надійності  $\alpha=0,95$ . За допомогою відповідних таблиць для даного значення величини  $\alpha$  і  $n$  визначають величину коефіцієнта Стюдента  $t_\alpha(n)$ . Згідно таблиці для  $\alpha = 0,95$  і  $n=7$  величина коефіцієнта Стюдента  $t_\alpha(n)=2,45$  для обох експериментів Знаходять похибку вимірювань  $\Delta x$ , яка визначається межею довірчого інтервалу:  $\Delta x = t_\alpha(n) \cdot S_{\bar{x}}$ .

7. Якщо величина похибки вимірювань, визначена в п.6, виявиться порівнянною з величиною похибки приладу, то

$$\Delta x = \sqrt{(t_\alpha \cdot S_{\bar{x}})^2 + \left(\frac{t_\alpha(\infty)}{3}\right) \cdot (\Delta x_{np})^2} \quad (\text{Б6})$$

Для  $\alpha=0,95$   $t_\alpha(\infty)=1,96$ .

8. Обчислюється відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (\text{Б7})$$

9. Остаточний результат записується у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \varepsilon (\%). \quad (\text{Б8})$$

### Похибки прямих вимірювань

Середньоарифметичне значення серії з  $n$  вимірювань та записується до таблиць 1 та 2:

для 1-го досліджу:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i = 20,8957$$

Для 2-го досліджу:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i = 26,5208$$

Дисперсія середнього значення розраховують за формулою (Б5):

Для 1-го дослідю:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,03483.$$

Для 2-го дослідю:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,0885.$$

де  $n$  –кількість дослідів в кожному експерименті.

Похибку вимірювань:

Для 1-го дослідю:

$$\Delta x = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\bar{x}} = 2,45 \cdot 0,03483 = 0,0853.$$

Для 2-го дослідю:

$$\Delta x = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\bar{x}} = 2,45 \cdot 0,0885 = 0,2168.$$

Відносна похибка:

Для 1-го дослідю:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{0,0853}{20,89} \cdot 100\% = 0,408\%.$$

Для 2-го дослідю:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{0,2168}{25,52} \cdot 100\% = 0,817\%.$$

Отримано такі результати вимірювань для 1-го дослідю  $x=20,89 \pm 0,0853$ ,  $\varepsilon=0,408\%$ , для 2-го дослідю  $x=26,52 \pm 0,2168$ ,  $\varepsilon=0,817\%$ .

### Похибки непрямих вимірювань

1.Для кожної серії вимірювань проводиться обробка. При цьому для всіх вимірюваних величин задають одне і те ж значення надійності.

2. Обчислюється середнє значення шуканої величини:  $A = f(x, y, z, \dots)$ .

3. Обчислюються часткові похідні:

$$\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \quad (9)$$

4. Обчислюється похибка непрямих вимірювань:

$$\Delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot (\Delta z)^2} \quad (10)$$

5. Остаточний результат записується у вигляді, %:

$$A = \bar{A} \pm \Delta A \varepsilon, \quad (11)$$

де  $\varepsilon(\%) = \frac{\Delta A}{\bar{A}}$  – відносна похибка непрямих вимірювань.

Розрахунок похибки при визначенні відцентрового критерія Рейнольдса:

$$Re_{\text{ц}} = \frac{\omega \cdot D^2}{\nu},$$

де  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $D$  – діаметр апарата

1. Обчислюємо середнє значення критерія Рейнольдса відцентрового, кінематичної в'язкості, та колової швидкості:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i = 20,8957;$$

$$\overline{Re_{\text{ц}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Re_{\text{ц}i} = 4676,1;$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i = 1,78 \cdot 10^{-6}$$

де  $n = 7$  – кількість дослідів.

2. Знаходимо абсолютну похибку непрямих вимірювань:

$$\Delta Re_{\text{ц}} = \sqrt{\left(\frac{\partial Re_{\text{ц}}}{\partial \nu} \cdot \Delta \nu\right)^2 + \left(\frac{\partial Re_{\text{ц}}}{\partial \omega} \cdot \Delta \omega\right)^2};$$

Похибка непрямого вимірювання

$$\Delta Re_{\text{ц}} = \sqrt{\left(-\frac{\bar{\omega} \cdot 0,595^2}{\bar{\nu}^2} \cdot \Delta \nu\right)^2 + \left(\frac{\bar{\omega} \cdot 0,595^2}{\bar{\nu}} \cdot \Delta \omega\right)^2} = 86,37;$$

Похибки вимірювань беремо з прямих вимірювань кожного параметру:

$$\Delta v = 3,58 \cdot 10^{-11};$$

$$\Delta \omega = 0,0853.$$

Відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta Re_{ц}}{Re_{ц}} \cdot 100\% = \frac{86,37}{4676,1} \cdot 100\% = 1,84\%$$

Підставивши всі параметри в формулу (Б8) отримуємо величину відносної похибки для першого досліджуваного параметру  $= 1,84\%$ ,

**Додаток В**  
**Приклад розрахунку роторного плівкового апарата**

Приклад розрахунку роторного плівкового апарата.

Розрахунки, які підтверджують працездатність та надійність конструкції проведені за запропонованою методикою.

Мета розрахунку — визначити масові витрати початкового та кінцевого розчину, масову витрату випарюваної води, тепловий потік, необхідний для нагріву розчину та випарювання розчинника, витрату грючої пари, середня масова витрата рідини, середня об'ємна витрата рідини.

Схему до матеріального та теплового балансу роторного випарного апарата представлено на рисунку В.1.

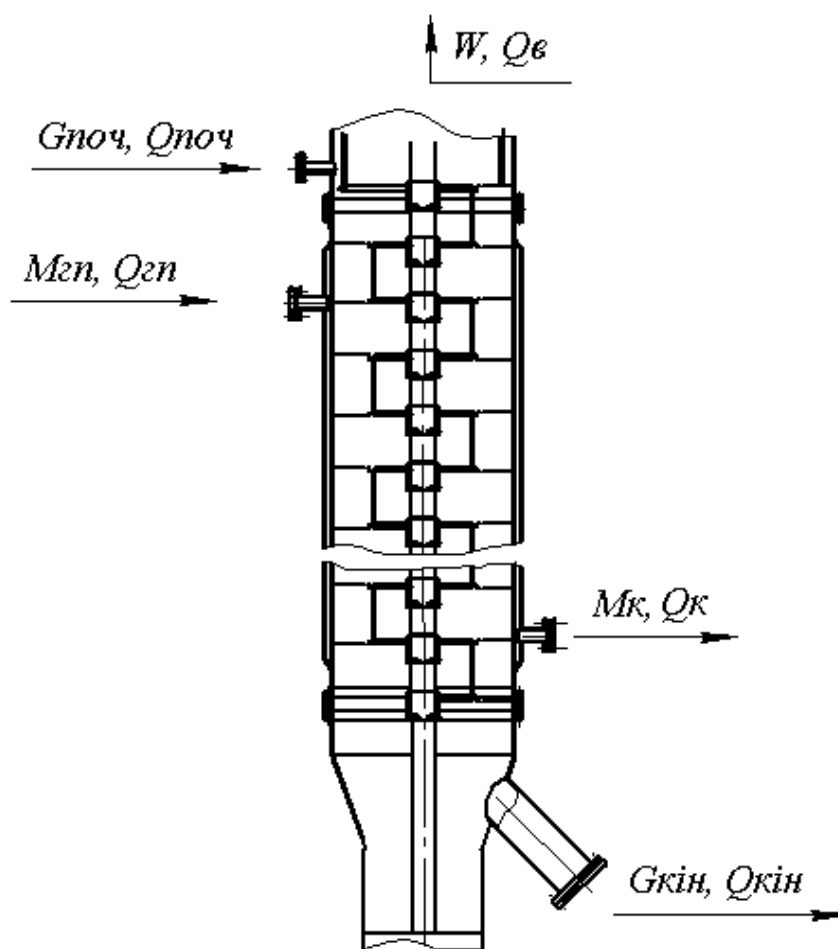


Рисунок В.1 - Схема матеріального та теплового балансу роторного апарата

Вихідні дані:

масова продуктивність апарата по вихідному продукту, $G_{\text{поч}}$ , кг/с	0,227
початкова концентрація продукту, $a_n$ , %	48
кінцева концентрація продукту, $a_k$ , %	65
робочий тиск всередині апарата, $p_{\text{роб}}$ , МПа	0,02
початкова температура кипіння розчину, $t_k^{\text{нач}}$ , °С	60
кінцева температура кипіння розчину, $t_k^{\text{кін}}$ , °С	60
температура гріючої пари, $t_{\text{гп}}$ , °С	120
теплота пароутворення, $r_{\text{гп}}$ , Дж/кг	2367000
теплота фазового перетворення дистилята, $r_d$ , Дж/кг	2238000
щільність зрошення, $\Gamma_{\text{п}}$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	0,15

Попередній вибір площі поверхні нагрівання:

$$F_n = \frac{G_{\text{поч}}}{\Gamma_{\text{п}}} = \frac{2,9}{0,15} = 19,3 \text{ м}^2.$$

Для уточнюючого розрахунку вибираємо стандартну площу поверхні нагрівання [57]  $F = 6,3 \text{ м}^2$ , їй відповідає тип апарата РП-600-6. Для обраного апарату вибираємо по [57] такі величини: частота обертання ротора  $n = 1,1 \text{ с}^{-1}$ , товщина стінки апарата  $\delta_{\text{ст}}$  м, довжина робочої частини апарата  $L_a = 4,05 \text{ м}$ , довжина гріючої рубашки  $L_p = 1,19 \text{ м}$ , довжина лопатки  $L_{\text{л}} = 0,3 \text{ м}$ , діаметр корпусу апарата  $D_k = 0,6 \text{ м}$ , число лопатей в ряду  $z_{\text{л}} = 12$ , число рядів лопатей  $x_{\text{л}} = 13$ , товщина лопаті  $\delta_{\text{л}} =$  м, витрати потужності привода ротора  $N = 7,5 \text{ Вт}$ .

Уточнюючий розрахунок роторно-плівкового апарата.

Тепловий потік, який підводиться до продукту при постійній температурі кипіння розчину, Вт:

$$Q_{\text{поч}} = G_{\text{поч}} r_d \left(1 - \frac{a_n}{a_k}\right) = 0,227 \cdot 2358 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{48}{65}\right) = 139992,$$

де  $r_d = 2358000$  Дж/кг - питома теплота фазового перетворення дистилляту,;

$a_H$  - початкова концентрація продукту,  $a_H = 48\%$ ;

$a_K$  - кінцева концентрація продукту,  $a_K = 65\%$ .

Тепловий потік при змінній температурі кипіння, Вт:

$$Q_{\text{поч}} = G_{\text{поч}} r_d \left(1 - \frac{a_H}{a_K}\right) + 0,5 c_p G_{\text{поч}} \left(1 - \frac{a_H}{a_K}\right) (t_K^{\text{KOH}} - t_K^{\text{HAc}}) =$$
$$= 0,227 \cdot 2358 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{48}{65}\right) + 0,227 \cdot 4180 \cdot \left(1 - \frac{48}{65}\right) \cdot (60 - 60) = 139992$$

де  $c_p = 4180$  Дж/(кг·К) - питома теплоємність розчину при середній температурі,

$$t_k = 0,5(t_k^{\text{поч}} + t_k^{\text{кін}}) = 0,5 \cdot (60 + 60) = 60$$

Середня питома теплоємність розчину, Дж/(кг·К):

$$c_p = 0,5(C_{\text{поч}} + C_{\text{кін}}) = 0,5 \cdot (4180 + 4180) = 4180.$$

Тепловий потік, що підводиться з гріючою парою, Вт:

$$Q_{\text{гп}} = \frac{Q_{\text{поч}}}{\eta} = \frac{139992}{0,965} = 145070.$$

Тут  $\eta = 0,965$ , зважаючи, що ізоляція апарата зі скловолкна або з мінеральної вати.

Масова витрата гріючої пари, кг/с:

$$G_{\text{гп}} = \frac{Q_{\text{гп}}}{r_{\text{гп}}} = \frac{145070}{2207000} = 0,066$$

Коефіцієнт тепловіддачі від пари до стінки  $\alpha_1$ .

Середня різниця температур між парою, яка конденсується, та продуктом, °С:

$$\Delta t = \frac{Wr_d (t_{\Gamma\Pi} - t_K)}{Wr_d + c_p (G_{\text{кин}} + 0,5W)(t_K^{\text{кин}} - t_K^{\text{поч}})} + \frac{c_p (G_{\text{кин}} + 0,5W)(t_K^{\text{кин}} - t_K^{\text{поч}})(\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}})}{Wr_d + c_p (G_{\text{кин}} + 0,5W)(t_K^{\text{кин}} - t_K^{\text{поч}}) \ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} =$$

$$= \frac{0,0159 \cdot 2358000 \cdot (120 - 60)}{0,0159 \cdot 2358000 + 4180 \cdot (0,168 - 0,059) \cdot (60 - 60)} +$$

$$+ \frac{4180 \cdot (0,168 + 0,5 \cdot 0,0159) \cdot (60 - 60) \cdot (60 - 60)}{0,0159 \cdot 2358000 + 4180 \cdot (0,168 + 0,5 \cdot 0,0159) \cdot (60 - 60) \cdot \ln \frac{60}{60}} = 60$$

де  $G_{\text{кин}}$  - масова витрата кубового залишку,  $G_{\text{кин}} = 0,168 \text{ кг/с}$ .

Маємо:

$$W = G_{\text{поч}} \left( 1 - \frac{a_{\text{п}}}{a_{\text{к}}} \right) = 0,027 \cdot \left( 1 - \frac{48}{65} \right) = 0,059, (\text{кг/с})$$

$$G_{\text{кин}} = G_{\text{поч}} - W = 0,027 - 0,059 = 0,168, (\text{кг/с})$$

$$\Delta t_{\text{б}} = t_{\Gamma\Pi} - t_K^{\text{поч}} = 120 - 60 = 60, (^\circ\text{C})$$

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{\Gamma\Pi} - t_K^{\text{кин}} = 120 - 60 = 60, (^\circ\text{C})$$

Середня температура стінки зі сторони пари,  $^\circ\text{C}$ :

$$t_{\text{СТ}} = t_{\Gamma\Pi} - \frac{\text{K}}{1} \Delta t = 120 - 0,3 \cdot 60 = 102$$

Приймаємо  $\frac{\text{K}}{\alpha_1}$  в першому наближенні 0,3, а потім уточнюємо після

розрахунку коефіцієнтів теплопередачі  $K$  та тепловіддачі  $\alpha_2$ .

При випарюванні при постійній температурі кипіння,  $^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t = t_{\Gamma\Pi} - t_K = 120 - 60 = 60,$$

Перевірка умов руху конденсату

Якщо:

$$L_p (t_{\Gamma\Pi} - t_{\text{СТ}}) \leq L_p (t_{\Gamma\Pi} - t_{\text{СТ}})_{\text{КР}},$$

де  $L_p (t_{\Gamma\Pi} - t_{\text{СТ}})_{\text{КР}}$  вибираємо за таблицею [57], то  $\alpha_1$  розраховується за формулою,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ :

$$\alpha_1 = \frac{A \cdot B}{[L_p(t_{\text{ГП}} - t_{\text{СТ}})]^{0,25}}$$

де  $A, B$  - розрахункові коефіцієнти, [57];

$L_p$  - довжина гріючої рубашки, м;

$t_{\text{СТ}}$  - середня температура стінки зі сторони пари, °С.,

Якщо ця умова не виконується, то  $\alpha_1$  розраховується за формулою, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_1 = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \frac{L_p(t_{\text{ГП}} - t_{\text{СТ}}) \cdot \lambda_{\text{конд}}^3 \cdot \lambda_{\text{конд}}^2 \cdot g}{r_{\text{ГП}} \cdot \lambda_{\text{конд}}^3} \right]^{0,5} =$$

$$= 3 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \frac{1,19 \cdot (120 - 102) \cdot 0,686^3 \cdot 950,2^2 \cdot 9,81}{2207000 \cdot 2,535 \cdot 10^{-4}} \right]^{0,5} = 3914$$

Фізичні константи конденсата гріючої пари беруться з довідника по середній температурі плівки конденсата, °С:

$$t_{\text{пл}} = 0,5(t_{\text{ГП}} + t_{\text{СТ}}) = 0,5 \cdot (120 + 102) = 111$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до продукту, який нагрівається,  $\alpha_2$ .

Масова витрата рідини, що транспортується в плівці, кг/с:

$$G_{\text{ПЛ}} = 0,2 \cdot G_{\text{поч}} = 0,2 \cdot 0,227 = 0,045$$

Масова витрата рідини перед однією лопаткою (верх), кг/с:

$$G_z^{\text{верх}} = \frac{G_{\text{поч}} - G_{\text{ПЛ}}}{Z_{\text{Л}}} = \frac{0,227 - 0,045}{12} = 0,015.$$

Допоміжне число Рейнольдса для стікаючої хвилі (верх):

$$\text{Re}_{\text{хв}}^{\text{верх}} = \frac{2 \cdot G_z^{\text{верх}} \cdot \cos \beta}{S_{\text{В}}^{\text{верх}} \cdot \lambda_{\text{ПР}}^{\text{верх}}} = \frac{2 \cdot 0,015 \cdot \cos(30)}{0,004 \cdot 0,0001} = 218.$$

де  $S_{\text{хв}}^{\text{верх}}$  - орієнтовний поперечний розмір хвилі в верхній частині апарата,  $S_{\text{хв}}^{\text{верх}} = 0,004$  м [57];

$\lambda_{\text{ПР}}^{\text{верх}}$  - коеф. динамічної в'язкості розчину припочатковій температурі кипіння розчину,  $\lambda_{\text{ПР}}^{\text{верх}} = 0,0001$  Па с, [57].

Тут кут  $\beta=30^\circ$  [57], приймаємо  $S_{xв}$  за графіком [57].

Поперечний розмір хвилі у верхній частині апарата, м:

$$S_{xв}^{верх} = \left( 3,65 \cdot 10^{-3} \frac{G_z^2}{\rho_{ПР}^2} \right)^{0,22} = \left( 3,65 \cdot 10^{-3} \frac{0,015^2}{2} \right)^{0,2} = 3,577 \cdot 10^{-3}, \quad \text{при}$$

$$Re_{xв}' > 1600;$$

$$S_{xв}^{верх} = \left( 3,25 \frac{G_z^2 \cdot \rho_{ПР}}{\rho_{ПР}^2} \right)^{0,25} = \left( 3,25 \frac{0,015^2 \cdot 0,03}{2} \right)^{0,25} = 5,67 \cdot 10^{-3}, \quad \text{при}$$

$$Re_{xв}' < 1600.$$

Критерій Рейнольдса хвилі рідини (верх):

$$Re_{xв}^{верх} = \frac{2 \cdot G_z^{верх} \cdot \cos \beta}{S_{xв}^{верх} \cdot \rho_{ПР}^{верх}} = \frac{2 \cdot 0,015 \cdot \cos(30)}{3 \cdot 10^{-3}} = 154,107.$$

Критерій Рейнольдса відцентрової хвилі (верх):

$$Re_{xв}^{верх} = \frac{D_k \cdot S_{xв}^{верх} \cdot \rho_{ПР}^{верх} \cdot n}{\rho_{ПР}^{верх}} = \frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-3} \cdot 1195 \cdot 1,1}{1} = 149,053,$$

де  $D_k$  - діаметр корпусу апарата,  $D_k = 0,6$  м.

За  $Re_{xв}^{верх}$  та  $Re_{xв}^{верх}$  з графіків [57] знаходимо безрозмірнісну експериментальну товщину плівки  $\delta_1^{верх}$  та відцентровий експериментальний критерій Фруда  $Fr_{ц}$ .

Числове значення відцентрового експериментального критерія Фруда  $Fr_{ц}$  визначається за допомогою допоміжних кривих на графіках [57]. Числове значення знаходиться за [57] у відповідності з порядковим номером відповідної точки. Проміжне значення критерія Фруда  $Fr$  визначається інтерполяцією.

Критерій Фруда відцентровий:

$$Fr_{ц} = \frac{n^2 D_k}{g} = \frac{1,1^2 \cdot 0,6}{9,81} = 0,074,$$

де  $n$  - частота обертання ротора,  $n=1,1$ .

Притискаюче зусилля лопатки, Н/м:

$$P_{\text{ПЛ}} = \frac{B_{\text{л}} / l_{\text{л}} W^2 D_{\text{ЦГ}} (\Delta \mu) Q}{\sin \Delta} =$$

$$= \frac{0,04 \cdot 0,004 \cdot 7800 \cdot 6,912^2 \cdot 0,5 \cdot 0,565 \cdot \sin(11-3)}{\sin(11)} = 11,783$$

де основні розміри, що входять беруться з рис.3.2 та таблиці 2 [57].

Товщина плівки продукту у верхній частині апарата в початковий момент без урахування випарювання, м:

$$\delta_{\text{ПЛ}}^{\text{верх.пoch}} = \sqrt[1]{\left( \frac{\rho_{\text{пр}}}{\rho_{\text{пр}}^{\text{верх}}} g \right)^{0,33} \left( \frac{P_{\text{ПЛ}}}{\rho_{\text{пр}}} \right)^{-0,84} \left( \frac{Fr_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}^{\text{верх}}} \right)^{1,2}} =$$

$$= 2,8 \cdot \left( \frac{0,03}{1195^2 \cdot 9,81} \right)^{0,33} \left( \frac{11,783}{8,35} \right)^{-0,84} \left( \frac{0,074}{0,44} \right)^{1,2} = 3,724 \cdot 10^{-4}$$

Середня товщина плівки у верхньому перетині, м:

$$\delta_{\text{ПЛ}}^{\text{верх}} \cdot \dots^{-4} ( + \dots ) = \dots^{-4}.$$

$$\text{Приймаємо } y = \frac{a_{\text{п}}}{a_{\text{к}}} = \frac{48}{65} = 0,738.$$

Масова витрата рідини, що транспортується в хвилі перед лопаткою у нижній частині апарата, кг/с:

$$G_z^{\text{ниж}} = G_z^{\text{верх}} \frac{a_{\text{п}}}{a_{\text{к}}} = 0,015 \cdot \frac{48}{65} = 0,011.$$

Поперечний розмір хвилі у нижній частині апарата.

Допоміжне число Рейнольдса:

$$Re_{\text{хв}}^{\text{ниж}'} = \frac{2G_z^{\text{ниж}} \cos \beta}{S_{\text{хв}}^{\text{ниж}} \rho_{\text{пр}}^{\text{ниж}}} = \frac{2 \cdot 0,011 \cos(30)}{\dots^{-3}} = 30,724$$

Критерій Рейнольдса відцентрової хвилі рідини у нижній частині апарата:

$$Re_{\text{ц}}^{\text{ниж}} = \frac{D_{\text{к}} S_{\text{в}}^{\text{ниж}} \rho_{\text{пр}}^{\text{ниж}} n}{\dots^{-3}} = \dots = 42,331$$

За графіками [57] по  $Re_{\text{ХВ}}^{\text{ниж}}$  та  $Re_{\text{Ц}}^{\text{ниж}}$  знаходиться безрозмірна експериментальна товщина плівки  $\delta_{\text{ПЛ}}^{\text{ниж}}$  та критерій Фруда  $Fr_{\text{Ц}}^{\text{ниж}}$ .

Середня товщина плівки на поверхні теплообміну, м:

$$\delta_{\text{ПЛ}} = \left( \frac{\delta_{\text{ПЛ}}^{\text{верх}}}{\delta_{\text{ПЛ}}^{\text{ниж}}} \right)^{1/3} \cdot \delta_{\text{ПЛ}}^{\text{ниж}} = \dots \cdot 10^{-4} = \dots \cdot 10^{-4}.$$

Критична товщина плівки, що визначає режим течії, м:

$$\delta_{\text{ПЛ.КР}} = \left( \frac{3 \cdot \nu_{\text{ПР}}^2}{4g} \right)^{1/3} \quad Fr_{\text{ПЛ.КР}} = \left( \frac{\dots \cdot 10^{-4} \cdot 2}{4 \cdot 9,81} \right)^{1/3} = \dots, \quad \text{де}$$

$$Re_{\text{ПЛ.КР}} = 1600.$$

Визначаємо середньоарифметичне значення коефіцієнта кінематичної в'язкості продукту,  $\text{м}^2/\text{с}$ :

$$\nu_{\text{ПР}} = \frac{\nu_{\text{поч}} + \nu_{\text{кін}}}{2} = \frac{1,196 \cdot 10^{-4} + 2,51 \cdot 10^{-5}}{2} = \dots \cdot 10^{-4}.$$

Критерій Рейнольдса плівки:

$$Re_{\text{ПЛ}} = \frac{\delta_{\text{ПЛ}} \cdot g}{0,0625 \left( \frac{1,2 \cdot \nu_{\text{ПР}}}{g} \right)^{2/3}} = \frac{0,014^2}{0,0625 \cdot \left( \frac{1,2 \cdot (1,447 \cdot 10^{-4})^2}{9,81} \right)^{2/3}} = 3,373 \text{ якщо}$$

$$\delta_{\text{ПЛ}} > \delta_{\text{ПЛ.КР}}.$$

$$6,282 \cdot 10^{-4} > 0,014$$

$$Re_{\text{ПЛ}} = \frac{4 \cdot \delta_{\text{ПЛ}} \cdot g}{3 \cdot \nu_{\text{ПР}}^2} = \frac{4 \cdot (6,282 \cdot 10^{-4})^3 \cdot 9,81}{3 \cdot (1,447 \cdot 10^{-5})^2} = 0,155,$$

якщо  $\delta_{\text{ПЛ}} < \delta_{\text{ПЛ.КР}}$ ;

$$6,282 \cdot 10^{-4} > 0,014$$

Середня швидкість течії плівки:

$$w_{\text{ПЛ}} = \left( \frac{\nu_{\text{ПР}} \cdot g}{1,2} \right)^{1/3} \cdot Re^{2/3} = \left( \frac{(1,447 \cdot 10^{-5}) \cdot 9,81}{1,2} \right)^{1/3} \cdot 0,155^{2/3} = 0,042,$$

при  $Re_{\text{ПЛ}} > 1600$ ;

$$0,155 > 1600$$

$$w_{\text{ПЛ}} = \left( \frac{\text{ПР} \cdot g}{48} \right)^{1/3} \text{Re}_{\text{ПЛ}}^{2/3} = \left( \frac{(1,447 \cdot 10^{-5}) \cdot 9,81}{48} \right)^{2/3} \cdot 0,155^{2/3} = 8,917 \cdot 10^{-3} \quad \text{при}$$

$$\text{Re}_{\text{ПЛ}} < 1600;$$

$$0,155 < 1600$$

Масова витрата рідини у плівці вздовж апарата (розрахункова), кг/с:

$$G_{\text{ПЛ}}^{\text{P}} = D_{\text{К}} \cdot \lambda_{\text{ПЛ}} \cdot w_{\text{ПЛ}} \cdot \text{ПР} = \dots \cdot \dots \cdot \dots^{-4} =$$

Перевіряється достовірність прийнятого раніше співвідношення

$$\frac{G_{\text{ПЛ}}}{G_{\text{поч}}} = 0,2 \text{ Розраховуємо } \frac{G_{\text{ПЛ}}^{\text{P}}}{G_{\text{поч}}} = \frac{0,013}{0,227} = 0,057.$$

Точність наближення 3...5%.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до продукту, який випаровується, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_{\text{ПЛ}} = \frac{\text{ПР}}{\lambda_{\text{ПЛ}}} \left( \frac{\text{ПР}}{\lambda_{\text{ПЛ}}} \right)^{0,856} 5 \text{ Н}^{0,344} \quad \text{при } \text{Re}_{\text{ПЛ}} > 1600 \text{ та } q < 8000;$$

$$\alpha_{\text{ПЛ}} = \frac{\text{ПР}}{\lambda_{\text{ПЛ}}} \left( \frac{\text{ПР}}{\lambda_{\text{ПЛ}}} \right)^{0,856} 5 \text{ Н}^{0,344} \quad \text{при } \text{Re}_{\text{ПЛ}} > 1600 \text{ та } q > 800$$

$$\alpha_{\text{ПЛ}} = \frac{\text{ПР}}{\lambda_{\text{ПЛ}}} = \dots^{-4} = \dots, \quad \text{при } \text{Re}_{\text{ПЛ}} < 1600 \text{ та } q \leq 150000;$$

$$0,155 < 1600 \text{ та } 22220 \leq 150000$$

При цьому визначаємо щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \frac{G_{\text{поч}}}{F_{\text{а}}} = \frac{139992}{6,3} = 22220.$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda_{\text{СТ}}}{\alpha_{\text{СТ}}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{3914} + \frac{1}{17,5} + \frac{1}{891}} = 484.$$

Для вуглецевих сталей  $\lambda_{\text{СТ}} = 46,5$ , Вт/(мК); для кислотійких — 17,5 Вт/(мК).

Розрахункова довжина апарата  $L_{\text{розр}}$ , м:

$$L_{\text{а.р}} = \frac{A_2 r_d z}{D_K K \Delta t} (F_B^{5/4\text{верх}} - F_B^{5/4\text{ниж}}) \text{ при } \text{Re}_{\text{хв}} > 1600 \cdot 149 > 1600$$

$$L_{\text{а.р}} = \frac{A_1 r_d z}{D_K K \Delta t} (F_B^{2\text{верх}} - F_B^{2\text{ниж}}) = \frac{1,471 \cdot 10^7 \cdot 2358 \cdot 10^3 \cdot 12}{3,414 \cdot 10^{-5} [(1,864 \cdot 10^{-5})^2 - (3,414 \cdot 10^{-5})^2]} = 6,209$$

при  $\text{Re}_{\text{хв}} < 1600 \cdot 149 < 1600$

$$\text{Тут } A_1 = 0,09 \frac{\rho g}{\text{пр}} = 0,09 \frac{2}{\text{пр}} = 1,471 \cdot 10^7;$$

$$A = 10,465 \text{ г}^{1/2} = \dots^{1/2} = \dots;$$

$$F_B^{\text{верх}} = 0,58 \cdot S_{\text{хв}}^{2\text{верх}} = 0,58 \cdot (5,67 \cdot 10^{-3})^2 = 1,864 \cdot 10^{-5};$$

$$F_B^{\text{ниж}} = 0,58 \cdot S_{\text{хв}}^{2\text{ниж}} = 0,58 \cdot (7,672 \cdot 10^{-3})^2 = 3,414 \cdot 10^{-5}.$$

Перевірочне значення поверхні теплообміну,  $\text{м}^2$ :

$$F_{\text{а.викон}} = \frac{G_{\text{поч}}}{K \Delta t} = \frac{139992}{484 \cdot 60} = 4,82$$

При запасі поверхні теплообміну слід мати на увазі, що остання прийнята у розрахунку умовно чистою.

Розрахунок витрат потужності привода ротора

Витрати потужності на тертя лопаток по сухому корпусу, Вт:

$$N_1 = P_{\text{л}} L_{\text{л}} \delta_{\text{л тр}} D_K n z_{\text{л}} x_{\text{л}} = \dots =$$

Коефіцієнт тертя  $\delta_{\text{л тр}} = 0,15 \dots 0,20$  (сталь-сталь);  $0,1 \dots 0,15$  (сталь-бронза);  $0,03 \dots 0,034$  (фторопласт-сталь).

Тиск лопатки на корпус,  $\text{Н/м}^2$ :

$$P_{\text{л}} = \frac{P_{\text{лг}}}{l_{\text{л}}} = \frac{11,783}{\dots} = 2946$$

не повинен перевищувати  $(9,81 \dots 14,8) \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  — сталь по сталі та бронза по сталі;  $3,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  — фторопласт по сталі при  $100^\circ\text{C}$  та  $18 \cdot 10^{15}$  — при  $200^\circ\text{C}$ .

Витрата потужності на тертя в торцевих ущільненнях, Вт:

$$N_2 = a \cdot N_y = 1 \cdot 450 = 450,$$

де  $a$  - кількість ущільнень,  $a=1$ ;

$N_y$  вибирається за графіком рис.8 [57] в залежності від типу ущільнення, кількості ущільнень та діаметра вала.

Потужність, яка витрачається на тертя в підшипниках, Вт:

$$N_3 = 0,05(N_1 + N_2) = 0,05 \cdot (205,8 + 450) = 32,78$$

$$N_{заг} = N_1 + N_2 + N_3 = 205,8 + 450 + 32,78 = 689$$

де  $N_1$  – затрати потужності на тертя лопатей по сухому корпусу,

$N_2$  – витрати потужності привода на тертя в торцевих ущільненнях,

Середній час перебування продукту в апараті, с:

$$\begin{aligned} & \approx \frac{L_a \cdot \rho_{пр} (0,58 \cdot S_B^2 \cdot z_{л} + D_k \cdot \delta_{пл})}{G_{поч}} = \\ & = \frac{4,05 \cdot 1224 \cdot [0,58 \cdot (6,671 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 12 + 3,14 \cdot 0,6 \cdot 6,282 \cdot 10^{-4}]}{0,227} = 7,409 \end{aligned}$$

де  $S_B$  — середній поперечний розмір хвилі, м:

$$S_B = 0,5(S_B^{верх} + S_B^{ниж}) = 0,5 \cdot (5,67 \cdot 10^{-3} + 7,672 \cdot 10^{-3}) = 6,671 \cdot 10^{-3}$$

Перевірка граничного навантаження апарата по вторинній парі:

$$W \cdot \frac{0,5}{\pi} < 5$$

$$0,059 \cdot 950,2^{0,5} < 5$$

$$1,819 < 5$$

Швидкість вторинної пари, м/с:

$$W_{\Pi} = \frac{4 \cdot G_{поч} \cdot \left(1 - \frac{a_{\Pi}}{a_k}\right)}{D_k^2 \cdot \rho_{\Pi}} = \frac{4 \cdot 0,227 \cdot \left(1 - \frac{48}{65}\right)}{0,2^2} = 2,21 \cdot 10^{-4}$$

Діаметр штуцера вихідного продукту, м:

$$\left[ \frac{4 \cdot G_{поч}}{D_k^2 \cdot W_{пр}} \right]^{0,5} < D_{шт.в}$$

$$\left[ \frac{4 \cdot 0,227}{2} \right]^{0,5} < D_{ш.в}$$

$$0,015 < 0,04$$

Діаметр штуцера кубового залишку, м:

$$\left[ \frac{4 \cdot (G_{поч} - W)}{\rho_{кр} \cdot W_{кр}} \right]^{0,5} < D_{к.о}$$

$$\left[ \frac{4 \cdot (0,227 - 0,059)}{3,14 \cdot 950,2 \cdot 1} \right]^{0,5} < D_{к.о}$$

$$2,246 \cdot 10^{-4} < 0,15$$

Діаметр штуцера вторинного пару, м:

$$\left[ \frac{4 \cdot W}{\rho_{п} \cdot W_{пар}} \right]^{0,5} < D_{пар}$$

$$\left[ \frac{4 \cdot 0,059}{3,14 \cdot 1,052 \cdot 10} \right]^{0,5} < D_{пар}$$

$$0,085 < 0,5$$

Запас поверхні теплообміну:

$$\frac{F - F_{а.викон}}{F} \cdot 100\% = \frac{6,3 - 4,813}{6,3} \cdot 100\% = 23,6\%.$$

Висновок:

В результаті цього розрахунку було проведені обчислення за результатами яких було знайдено площу поверхні теплообміну 4,813 м<sup>2</sup> та були обчислені габаритні розміри апарата.

Визначення витрат потужності при сухому терті за результатами експериментальних досліджень

Вихідні дані:

маса лопаті  $m_l$ , кг – 0,2826;

кількість лопатей  $z$  – 156;

кутова швидкість  $\omega$ , рад/с – 7;

радіус центра мас лопаті  $R_{ц.м.}$ , м – 0,2825;

радіус підвісу лопаті  $R_{ц.п.}$ , м – 0,2495;

коефіцієнт тертя  $f$  – 0,2;

радіус корпусу апарата  $R_K$ , м – 0,3.

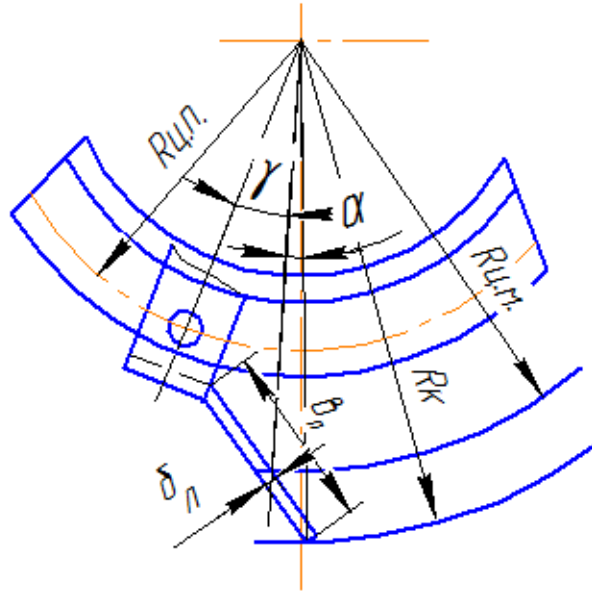


Рисунок Д.3 – Схема шарнірної лопаті

Для визначення витрат потужності при сухому терті для роторно-плівкового апарата скористаємося отриманою раніше формулою (3.6):

$$N = \frac{m_l \cdot \omega^3 \cdot r \cdot z \cdot r_1 \cdot \sin \gamma \cdot f \cdot R}{r_1 \cdot \sin(\alpha + \gamma) + f(R - r_1 \cdot \cos(\alpha + \gamma))}$$

для лопаті даного типу ця формула буде мати вигляд:

$$N = \frac{m_l \cdot \omega^3 \cdot R_{ц.м.} \cdot z \cdot R_{ц.п.} \cdot \sin \gamma \cdot f \cdot R_K}{R_{ц.п.} \cdot \sin(\alpha + \gamma) + f(R_K - R_{ц.п.} \cdot \cos(\alpha + \gamma))}$$

де  $R_{ц.м.}$  – радіус центра мас лопаті, м;  $R_{ц.п.}$  – радіус підвісу лопаті, м;  $R_K$  – радіус корпусу апарата, м;  $\omega$  – кутова швидкість, рад/с;  $z$  – кількість лопатей;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $\gamma$  – кут між точкою підвісу та центром мас лопаті;  $\alpha$  – кут між центром мас лопаті та нормальною силою.

Отже, підставивши значення отримаємо:

$$N = \frac{0,2826 \cdot 7^3 \cdot 0,2825 \cdot 156 \cdot 0,2495 \cdot \sin 0,315744 \cdot 0,2 \cdot 0,3}{0,2495 \cdot \sin(0,315744 + 0,074313) + 0,2(0,3 - 0,2495 \cdot \cos(0,315744 + 0,074313))}$$

$$= 175,54 \text{ Вт.}$$

При порівнянні отриманих значень витрат потужності отримали, що за розрахунковою формулою, яка наводиться в методичних вказівках [57] потужність при сухому терті становить 205,8 Вт, а при розрахунку за формулою (3.6) потужність становить 175,54 Вт. Відхилення становить 15%. Запропонована методика для розрахунку потужності при сухому терті дає адекватні результати і може бути запропонована для розрахунку роторно-плівкових апаратів.

Визначення витрат потужності на розподілення та перемішування рідини за результатами експериментальних досліджень

Вихідні дані:

діаметр корпусу апарата  $D$ , м – 0,6;

висота робочої поверхні апарата  $h$ , м – 4,05;

густина рідини  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – 1195;

коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu$ , м<sup>3</sup>/с –  $1,447 \cdot 10^{-4}$ .

Потужність, яка витрачається на розподілення та перемішування рідини визначимо за відомою формулою:

$$N = K_N \cdot \omega^3 \cdot \rho \cdot D^4 \cdot h,$$

де  $K_N$  – коефіцієнт потужності;  $\omega$  – кутова швидкість;  $\rho$  – густина рідини;  $D$  – діаметр апарата;  $h$  – висота робочої поверхні апарата.

Для визначення коефіцієнта потужності скористаємося формулою (3.18), яка була встановлена за допомогою проведення експериментальних досліджень

$$K_N = 95360 \cdot Re_{\text{ц}}^{-1,86} \cdot Re_{\text{п}}^{0,55}.$$

Визначаємо критерій Рейнольдса відцентровий:

$$Re_{\text{ц}} = \frac{\omega D^2}{\nu} = \frac{7 \cdot 0,6^2}{1,447 \cdot 10^{-4}} = 21186,$$

де  $D$  – діаметр апарата, м;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості продукту, м<sup>2</sup>/с.

Плівковий критерій Рейнольдса:

$$Re_{пл} = \frac{4 \cdot \Gamma}{\nu},$$

де  $\Gamma$  – густина зрошення поверхні апарата:

$$\Gamma = \frac{V}{\pi D} = \frac{1,87}{3,14 \cdot 0,6} = 0,995,$$

де  $V$  – витрати рідини.

Отже, плівковий критерій Рейнольдса:

$$Re_{пл} = \frac{4 \cdot 0,995}{1,447 \cdot 10^{-4}} = 27506.$$

Тоді коефіцієнт потужності:

$$K_N = 1,02 \cdot 10^6 \cdot 21186^{-1,86} \cdot 27506^{0,55} = 0,05012.$$

Підставивши всі значення в рівняння потужності, отримаємо:

$$\begin{aligned} N &= K_N \cdot \omega^3 \cdot \rho \cdot D^4 \cdot h = \\ &= 0,05012 \cdot 7^3 \cdot 1195 \cdot 0,6^4 \cdot 4,05 = 9936 \text{ Вт} = 9,9 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Та проводимо розрахунок для різних швидкостей обертання.

Таблиця Г1 – Результати розрахунку

$\omega$ , рад/с	$Re_{ц}$	$\Gamma$	$Re_{пл}$	$K_N$	$N$ , кВт
1	7487,906	0,982643	27163,6	0,021992869	0,013795
2	9975,812	0,982643	27163,6	0,025751659	0,129218
3	12463,72	0,982643	27163,6	0,029106492	0,492926
4	14951,62	0,982643	27163,6	0,032170831	1,291428
5	17439,53	0,982643	27163,6	0,035012878	2,745148
6	19927,44	0,982643	27163,6	0,03767749	5,104623
7	22415,34	0,982643	27163,6	0,040196073	8,647801
8	24903,25	0,982643	27163,6	0,042591651	13,67799
9	27391,15	0,982643	27163,6	0,044881706	20,52224
10	29879,06	0,982643	27163,6	0,047079895	29,53

Отже, потужність на розподілення та перемішування рідини за методикою [57] становить 7,5 кВт, а потужність, яка розрахована за даними результатів дослідження становить 8,64 кВт. Відхилення становить 13%. Запропонована методика для розрахунку потужності на розподілення та перемішування рідини дає адекватні результати і може бути запропонована для розрахунку роторно-плівкових апаратів.

**Додаток Г**  
**Програма розрахунку роторного плівкового апарата**

## Проектний розрахунок РПА

5 CLS

10 REM\*\*\*\*\*

15 CLS

20 REM\*\*\* Проектний розрахунок \*\*\*

30 REM\*\*\* РПА в якості випарника \*\*\*

40 REM\*\*\*\*\*

50 PRINT TAB(15); "Введ. исх. данные": PRINT

60 INPUT "М-производ. по исх. прод.,кг/с"; m

70 INPUT "an-нач. конц.,масс.%"; an

80 INPUT "ak-кон. конц.,масс.%"; ak

90 INPUT "pd-раб. давление в аппарате,МПа"; pd

100 INPUT "tn-нач. тем-ра кипения раствора, град.С"; tn

110 INPUT "v3-коэф. кинем. вязкости раствора при tn,м<sup>2</sup>/с"; v3

120 INPUT "vr-коэф. динам. вязкости раствора при tn,Па\*с"; vr

130 INPUT "rr-плотность раствора при tn,кг/м<sup>3</sup>"; rr

140 INPUT "tk-кон. тем-ра кипения раствора,град.С"; tk

150 INPUT "v4-коэф. кинемат. вязкости раствора при tk,м<sup>2</sup>/с"; v4

160 INPUT "vp-коэф. динам. вязкости раствора при tk,Па\*с"; vp

170 INPUT "rp-плотность раствора при tk,кг/м<sup>3</sup>"; rp

180 INPUT "tp-тем-ра греющего пара,град.С"; tp

190 INPUT "gr-скрытая теплота парообразования,Дж/кг"; gr

200 INPUT "rd-удельная теплота фазового превращения дестилята,Дж/кг"; rd

210 INPUT "po-плотность орошения,кг/(с\*м<sup>2</sup>)"; po

220 h = .2: y = an / ak: fp = m / po: PRINT : PRINT

230 PRINT "Предварительная поверхность нагрева равна "; fp; "м<sup>2</sup>"

240 PRINT "по таблицам1 и 2 выбрать основные размеры"

250 PRINT "и пар-ры аппарата и лопасти": PRINT

260 INPUT "fs,dk,dp,la,lp,l1,pk-"; fs, dk, dp, la, lp, l1, pk

270 PRINT "fs="; fs, "dk="; dk, "dp="; dp, "la="; la, "lp="; lp, "l1="; l1, "pk="; pk

```

280 INPUT "Если есть ошибка при вводе данных, нажмите 1, нет-2"; kk
290 IF kk = 2 THEN 300 ELSE 260
300 INPUT "d1,d2,d3,xl,zl,n,dz-"; d1, d2, d3, xl, zl, n, dz
310 PRINT "d1="; d1, "d2="; d2, "d3="; d3, "xl="; xl, "zl="; zl, "n="; n, "dz="; dz
320 INPUT "Если есть ошибка при вводе данных, нажмите 1, нет-2"; kk
330 IF kk = 2 THEN 340 ELSE 300
340 INPUT "da,bl,pq,b7,g1,g2, (b7,g1,g2-вград.)-"; da, bl, pq, b7, g1, g2
350 PRINT "da="; da, "bl="; bl, "pq="; pq, "b7="; b7, "g1="; g1, "g2="; g2
360 INPUT "Если есть ошибка при вводе данных, нажмите 1, нет-2"; kk
370 IF kk = 2 THEN 380 ELSE 340
380 b7 = 3.14 * b7 / 180: g1 = 3.14 * g1 / 180: g2 = 3.14 * g2 / 180
390 PRINT "Задайте плотность материала лопасти (rl),кг/м^3"
400 INPUT "rl="; rl
410 PRINT "задаем коэф. трения лопастей по сухому корпусу"
420 PRINT "для пары /сталь-сталь/ kt=0.15-0.2"
430 PRINT TAB(9); "/бронза-сталь/ kt=0.1-0.15"
440 PRINT TAB(9); "/фторопласт-сталь/ kt=0.32-0.34"
450 INPUT "kt="; kt
460 PRINT "введите коэф. теплопроводности материала стенки (ls) (см. 2.6),
вт/(м*град)"
470 INPUT "ls="; ls
480 t = .5 * (tn + tk)
490 PRINT "Выберите нач. (cn) икон. (ck)"
500 PRINT "теплоемкость продукта в соответствии с его концентрацией
Дж/(кг*град)"
510 INPUT "cn="; cn
520 INPUT "ck="; ck
530 PRINT "средняя тем-ра продукта"; t; "град.с"
540 INPUT "для этой тем-ры коэф. теплопроводности продукта (l2),
вт/(м*град)"; l2

```

```

550 cs = .5 * (cn + ck)
560 q = m * rd * (1 - an / ak) + .5 * cs * m * (1 - an / ak) * (tk - tn)
570 qp = q / .965: mp = qp / rp
580 mc = m * (1 - an / ak): mk = m - mc
590 tb = tp - tn: tm = tp - tk
600 j1 = mc * rd * (tp - t) / (mc * rd + cs * (mk + .5 * mc) * (tk - tn))
610 j2 = cs * (mk + .5 * mc) * (tk - tn) / (mc * rd + cs * (mk + .5 * mc) * (tk - tn))
620 j3 = (tb - tm) / LOG(tb / tm)
630 td = j1 + j2 * j3
640 j0 = .3
650 ts = tp - j0 * td: e = lp * (tp - ts)
660 DATA 100,150,200,250
670 DATA 52,25,15,11
680 FOR i = 1 TO 4: READ tp(i): NEXT i
690 FOR j = 1 TO 4: READ e1(j): NEXT j
700 FOR i = 1 TO 4
710 IF tp(i) <= tp THEN 720 ELSE 730
720 NEXT i
730 e1 = e1(i) - (e1(i) - e1(i - 1)) / (tp(i) - tp(i - 1)) * (tp(i) - tp)
740 t1 = .5 * (tp + ts): PRINT : PRINT
750 PRINT "тем-рапленкиконденсатаравнат1="; t1; "град.с"
760 PRINT "для этой тем-ры вводим физ. константы конденсата": PRINT
770 INPUT "v1-коэф. кинемат. вязкости ,м^2/с  v1="; v1
780 INPUT "vk-коэф. динам. вязкости ,Па*с  vk="; vk
790 INPUT "rk-плотность ,кг/м^3  rk="; rk
800 INPUT "lk-коэф. теплопроводности ,вт/(м*град) lk"; lk
810 a = rp ^ .25: b = (9.81 * rk * lk ^ 3 / v1) ^ .25
820 IF e < e1 THEN a1 = 1.13 * a * b / (lp * (tp - ts)) ^ .25: GOTO 840
830 a1 = .803 * (lp * (tp - ts) * lk ^ 3 * rk ^ 2 * 9.81 / (rp * vk ^ 3)) ^ .5
840 m1 = h * m: m2 = (m - m1) / zl: PRINT "m2="; m2

```

```

850 INPUT "s1-выбираем по графику рисунок3  s1="; s1
860 r1 = 2 * m2 * COS(b7) / (s1 * rr)
870 p = b1 * pq * r1 * (2 * 3.14 * n) ^ 2 * .5 * dz * SIN(g2 - g1) / SIN(g2)
880 IF r1 > 1600 THEN s3 = (.00365 * m2 ^ 2 / rr ^ 2) ^ .2: GOTO 900
890 s3 = (3.25 * m2 * vp / rr ^ 2) ^ .25
900 r3 = 2 * m2 * COS(b7) / (s3 * vp): r5 = dk * s3 * rr * n / vp
910 PRINT :PRINT "r5="; r5: PRINT "r3="; r3
920 PRINT "по r3 и r5 задаем безразмерную экспериментальную толщину"
930 PRINT "пленки (p3) и центробежный критерий Фруда (f4) по 2.5.7"
940 INPUT "p3,f4-"; p3, f4
950 f5 = n ^ 2 * dk / 9.81
960 p1 = p3 * (vp ^ 2 / (rr ^ 2 * 9.81)) ^ .33 * (p / 8.33) ^ -.84 * (f5 / f4) ^ 1.2
970 pv = .5 * p1 * (1 + y): mn = m2 * y: PRINT "mn="; mn
980 INPUT "s2-выбираем по графику рисунок3  s2="; s2
990 r2 = 2 * mn * COS(b7) / (s2 * vn)
1000 IF r2 > 1600 THEN s4 = (.00365 * mn ^ 2 / pp ^ 2) ^ .2: GOTO 1020
1010 s4 = (3.25 * mn * vp / pp ^ 2) ^ .25
1020 r4 = 2 * mn * COS(b7) / (s4 * vn): r6 = dk * s4 * pp * n / vn
1030 PRINT "r4="; r4, "r6="; r6
1040 PRINT "по (r4) и r(6) по графикам 4-7 и таблице 4 задаем (p4)и (f6)"
1050 INPUT "p4,f6-"; p4, f6
1060 pn = p4 * (vn ^ 2 / (pp ^ 2 * 9.81)) ^ .33 * (p / 8.35) ^ -.84 * (f5 / f6) ^ 1.2
1070 ps = .5 * (pv + pn): v2 = (v3 + v4) / 2: re = 1600
1080 pr = (3 * v2 ^ 2 / (4 * 9.81)) ^ .33 * re ^ .33
1090 IF ps < pr THEN r7 = 4 * ps ^ 3 * 9.81 / (3 * v2 ^ 2): GOTO 1110
1100 r7 = ps ^ 2 / (.0625 * (1.2 * v2 ^ 2 / 9.81) ^ (2 / 3))
1110 IF r7 < 1600 THEN wp = (v2 * 9.81 / 48) ^ .33 * r7 ^ (2 / 3): GOTO 1130
1120 wp = (v2 * 9.81 / 1.2) ^ .33 * r7 ^ .5
1130 m2 = 3.14 * dk * ps * wp * (rr + pp) / 2: h1 = m2 / m
1135 PRINT "h1="; h1: PRINT "m2="; m2

```

```

1140 IF (ABS(h - h1) / h1 * 100) < 5 THEN : GOTO 1160
1150 h = h1: GOTO 840
1160 qu = q / fs
1170 IF qu < 150000! AND r7 < 1600 THEN a2 = l2 / ps: GOTO 1200
1180 IF qu < 8000 AND r7 >= 1600 THEN a2 = .00554 * l2 * (.25 * r7) ^ .856 *
p5 ^ .344 / ps: GOTO 1200
1190 IF qu > 8000 AND r7 >= 1600 THEN a2 = .023 * l2 * (v2 ^ 2 / 9.81) ^ .33 *
r7 ^ .25 * p5 ^ .5
1200 k = 1 / ((1 / a1) + pk / ls + (1 / a2))
1210 y1 = 1 - (k * td / (rd * zl * .5 * (pp + rr) * n * p1))
1220 IF ABS(y - y1) / y1 * 100 < 5 THEN 1240
1230 y = y1: GOTO 970
1240 j1 = k / a1
1250 IF ABS(j0 - j1) / j1 * 100 < 5 THEN 1290
1260 j0 = j1
1270 RESTORE 660
1280 GOTO 650
1290 a9 = .09 * rp ^ 2 * 9.81 / vp: a8 = 10.465 * rp * 9.81 ^ .5
1300 fv = .58 * s3 ^ 2: ff = .58 * s4 ^ 2
1310 IF r4 <= 1600 THEN lr = a9 * rd * zl * (fv ^ 2 - ff ^ 2) / (3.14 * dk * k * td):
GOTO 1330
1320 lr = a8 * rd * zl * (fv ^ (5 / 4) - ff ^ (5 / 4)) / (3.14 * dk * k * td)
1330 f1 = q / (k * td): pl = p / pq
1340 PRINT : PRINT : PRINT "давлениелопастинакорпусаппаратаpl="; pl;
"H/м^2"
1350 PRINT " сравниваем с данными , приведенными в 2.10.1"
1360 PRINT "если pl больше , чем в 2.10.1 , нажмите 1, если меньше-2 "; kk
1370 IF kk = 1 THEN 1380 ELSE 1410
1380 PRINT "необходимо изменить материал лопасти или ее толщину"
1390 INPUT "изменяйте материал лопатки(r1) или ее размеры (q)"; kk

```

```

1400 IF kk = rl THEN 390 ELSE 360
1410 n1 = 3.14 * pl * l1 * pq * kt * dk * n * zl * xl
1420 PRINT "затрата мощн. на трение в торцевых уплотнениях (n2)"
1430 PRINT "определяется в зависимости от типа уплотнения , их количества
и диаметра вала"
1440 INPUT "по рисунок8 задаем мощность на трение в одном уплотнении ,
вт"; nn
1450 INPUT "задайте количество уплотнений"; ky
1460 n2 = ky * nn: n3 = .05 * (n1 + n2): n0 = n1 + n2 + n3: s5 = .5 * (s3 + s4)
1470 bp = la * rp * (.58 * s5 ^ 2 * zl + 3.14 * dk * ps) / m
1480 INPUT " по давлению вторичного пара определите по справочнику
плотность пара ,(ru),кг/м^3"; ru
1490 w3 = 4 * m * (1 - (an / ak)) / (3.14 * dk ^ 2 * ru)
1500 IF w3 * ru ^ .5 > 5 THEN 1530 ELSE 1540
1510 PRINT "не выполняется условие проверки предельной нагрузки"
1520 PRINT "аппарата по вторичному пару"
1530 PRINT "измените производительность аппарата (m) и кон.
концентрацию (ak) и повторить расчет ": GOTO 60
1540 INPUT "задайте w1-скорость подвода исходного продукта (см 2.13), м/с
w1="; w1
1550 IF (4 * m / (3.14 * rr * w1)) ^ .5 < d1 THEN : GOTO 1560 ELSE : GOTO
1540
1560 IF (4 * (m - mg) / (3.14 * pp * w1)) ^ .5 < d3 THEN : GOTO 1570 ELSE :
GOTO 1540
1570 INPUT "Задайте w4 - скорость в патрубке вторичного пара (w4=10-15
м/с) w4="; w4
1580 IF (4 * mg / (3.14 * ru * w4)) ^ .5 < d2 THEN : GOTO 1610 ELSE : GOTO
1600
1590 PRINT "Штуцер вторичного пара имеет малую пропускную
способность"

```

```

1600 PRINT "Измените производительность аппарата и повторите расчет":
GOTO 60
1610 PRINT "Выбранный аппарат соответствует исходным данным"
1620 PRINT "Если результаты расчета выводите на печать, нажмите"
1630 INPUT "клавишу(z), иначе они будут выведены на дисплей"; t$
1640 IF t$ = "z" THEN aa$ = ": lp: " ELSE aa$ = ":c0:"
1650 OPEN "c:/Qb45/1.txt" FOR OUTPUT ACCESS READ WRITE SHARED
AS #1
1655 PRINT #1, TAB(30); "Результаты расчета": PRINT #1,
1660 PRINT #1, USING "Произв. аппарата по исходному продукту, кг/с
#.#####"; m
1670 PRINT #1, USING "Длина аппарата , м   ##.###"; la
1680 PRINT #1, USING "Длина греющей рубашки, м   ##.###"; lp
1690 PRINT #1, USING "Диаметр корпуса аппарата, м   #.###"; dk
1700 PRINT #1, USING "Диаметр греющей рубашки, м   #.###"; dp
1710 PRINT #1, USING "Диаметр штуцера подвода исходного продукта, м
#.###"; d1
1720 PRINT #1, USING "Диаметр штуцера отвода кубового остатка, м #.###";
d3
1730 PRINT #1, USING "Диам. штуцера отвода вторичного пара, м   #.###";
d2
1740 PRINT #1, USING "Число рядов лопастей   #"; xl
1750 PRINT #1, USING "Число лопастей в ряду   #"; zl
1760 PRINT #1, USING "Тепловой поток, подводимый с греющим паром ,
кВт   ###"; qp / 1000
1770 PRINT #1, USING "Массов. расход греющего пара, кг/с #.###"; mp
1780 PRINT #1, USING " Коэф. теплоотдачи от пара к стенке, Вт/(м^2*град)
#####"; a1
1790 PRINT #1, USING "Коэф. теплоотдачи от стенки к продукту,
Вт/(м^2*град)   #####"; a2

```

```

1800 PRINT #1, USING "Коэф. теплопередачи, Вт/(м^2*град) ###";k
1810 PRINT #1, USING "Общая мощность привода ротора, кВт #.#"; n0 /
1000
1820 CLOSE
1830 INPUT "Повторить вывод (y)"; t$
1840 IF t$ = "y" THEN : GOTO 1620
1850 INPUT "Закончить работу (y)"; t$
1860 IF t$ = "y" THEN END ELSE : GOTO 1620
END

```

Позначення в програмі	Умовні позначення за ГОСТ 14249-89	Термін
1	2	3
M	$M_i$	Масова продуктивність апарата по вих. продукту
AN	$a_n$	Початкова концентрація продукта
AK	$a_k$	Кінц. концентрація продукта
PD	$P_{раб}$	Рабочий тиск в апараті
TN	$t_k^{нач}$	Початкова температура кипіння розчину
TK	$t_k^{кон}$	Кінцева температура кипіння розчину
V3	$\nu_{анач}$	Коеф. кінематичної вязкості при початковій температурі кипіння розчину
V4	$\nu_{акон}$	Коеф. кінематичної вязкості при кінцевій

VP	$\mu_{\text{пр}}^{\text{верх}}$	температурі кипіння розчину Коеф. динамічної вязкості при початковій температурі кипіння розчину
VN	$\mu_{\text{пр}}^{\text{ниж}}$	Коеф. динамічної вязкості при кін. тем-рі кипіння розчину
RR	$\rho_{\text{пр}}^{\text{верх}}$	Густина розчину при поч. тем-рі кипіння
PP	$\rho_{\text{пр}}^{\text{ниж}}$	Густина розчину при кінц. тем-рі кипіння
TP	$t_{\text{гп}}$	Температура граючої пари в сорочці апарата
RP	$r_{\text{гп}}$	Прихов. теплота пароутвор.
RD	$r_g$	Питома теплота фазового перетворення дистилляту
PO	$\Gamma_{\text{п}}$	Масова густина зрошення
FP	$F_{\text{п}}$	Поверхня нагріву
FS	$F_{\text{ст}}$	Стандартна поверхня теплообміну
DK	$D_k$	Діаметр корпусу апарата
DP	$D_p$	Діаметр граючої сорочки
LA	$L_a$	Довжина робочої частини апарата
LP	$L_p$	Довжина граючої сорочки
L1	$L_l$	Довжина лопоті
PK	$\delta_{\text{ст}}$	Товщина стінки апарата
D1	$D_{\text{шв}}$	Діаметр штуцера підводу нехідного продукту

D2	$D_{\text{пар}}$	Діаметр штуцера відводу вторинної пари
D3	$D_{\text{ко}}$	Діаметр штуцера відводу кубового залишку
XL	$X_{\text{л}}$	Число рядів лопатей
ZL	$Z_{\text{л}}$	Число лопатей в ряду
N	$n$	Частота обертання ротора
BL	$b_{\text{л}}$	Довжина лопаті
PQ	$\delta_{\text{л}}$	Товщина лопаті
RL	$\rho_{\text{л}}$	Густина матеріала лопаті
KT	$\eta_{\text{тр}}$	Коеф. тертя лопаті по сухому корпусу
CS	$C_{\text{пр}}$	Середня питома теплоємність розчину
Q	$Q_{\text{пр}}$	Тепловий потік, що підвод. до продукту
QP	$Q_{\text{уг}}$	Тепловий потік, що підвод. з гріючою парою
MP	$M_{\text{уг}}$	Масові витр. гріючої пари
MG	$M_{\text{г}}$	Масові витр. втор. пари
T1	$t_{\text{гк}}$	Середня температура плівки конденсату
M1	$M_{\text{гк}}$	Масові витрати рідини, що транспорт. в плівці
P	$P_{\text{лм}}$	Притискне зусилля лопаті
PV	$\delta_{\text{пл}}^{\text{верх}}$	Середня товщина плівки у верхньому перерізі
K2	$Re_{\text{во}}^{\text{ниж}}$	Допоміжне число Рейнольдса в нижній част.

Б4	$S_B^{\text{ниж}}$	Поперечний розмір хвилі в нижній частині
К4	$Re_B^{\text{ниж}}$	Критерій Рейнольдса хвилі рідини в ниж. част
К6	$Re_{\text{ц}}^{\text{ниж}}$	Відц. кр. Рейн. хвилі рідини
ЗБ	$\delta_{\text{пл}}$	Середня товщ. плівки на поверхні теплообміну
КУ	$Re_{\text{пл.кр}}$	Кр. Рейнольдса для критичного режиму
ЗК	$\delta_{\text{пл.кр}}$	Критична товщина плівки
К7	$Re_{\text{п}}$	Кр. Рейнольдса плівки
ЦЗ	$W_{\text{пл}}$	Середня швидкість току плівки
ЙМ	$q$	Густина теплового потоку
Ф2	$\alpha_2$	Коеф. теплодачі
Л	$K$	Коеф. теплопередачі
ДЗ	$L_{\text{ар}}$	Розр. довжина апарата
А1	$F_{\text{а исп}}$	Перевірочне значення поверхні теплообміну
ЗД	$P_{\text{л}}$	Тиск лопаті на корпус
Т1	$N_1$	Затрати потужності на тертя лопатей по корп.
Т2	$N_2$	Витр. потуж. привода на тертя в торц. ущільненнях
Т3	$N_3$	Витрата потуж. на тертя у підшипниках
Т0	$N$	Заг. витр. потужн. приводу
Б5	$S_B$	Сер. попер. розмір хвилі
ИЗ	$\tau$	Сер. час перебування

**Додаток Д**  
**Публікації автора відповідно до магістерської дисертації**

## Перелік опублікованих праць за темою дисертації

### *Статті у наукових журналах:*

1) Дослідження потужності у роторному плівковому апараті/ Бишко М.А., Зубрій О. Г. // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». - №5(45) – 2018., с. 39-42.;

2) Дослідження процесу теплообміну у роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей/ Бишко М.А., Зубрій О. Г. // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». - №7(45) – 2018. с. 37-40;

*Особистий внесок здобувача: підготовка експерименту, проведення досліджень та участь в аналізі результатів, підготовка до опублікування.*

### *Патент на корисну модель та винаходи:*

1) Патент України UA106607U, МПК В01D 1/22 (2006.01) Роторний плівковий апарат/ Бишко М.А., Зубрій О. Г. заявл 01.11.2017, опубл. 26.03.2016. Бюл. № 6.

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до патентування.*

### *Тези і матеріали наукових конференцій:*

1) Дослідження гідродинаміки та теплообміну в роторно-плівковому апараті/ Бишко М.А., Зубрій О. Г.// Збірник тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсозберігаючі технології та обладнання”. – 2016 р., с.36-37.

2) Експериментальне дослідження потужності у роторному плівковому апараті/ Бишко М.А., Зубрій О. Г.// Збірник тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсозберігаючі технології та обладнання”. – 2017 р., с.11-12.

3) Роторно-плівковий апарат/ Бишко М.А., Зубрій О. Г.// Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції студентів,

аспірантів і молодих вчених “Ресурсозберігаючі технології та обладнання”. – 2017 р., с. 9-10.

4) Роторно-плівковий апарат/ Бишко М.А., Зубрій О. Г.// Збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсозберігаючі технології та обладнання”. – 2017 р. С. 9-10.

**Додаток Е**  
**Копії опублікованих праць**



**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”**

**Інститут технічної теплофізики НАН України**

**Інститут Газу НАН України**

**ІТМО ім. А. В. Ликова АН РБ**

**Московський державний агроінженерний  
університет ім. В.П. Горячкіна**

**Грузинський технічний університет**

**Тверський державний технічний університет**

**Збірник тез доповідей XI міжнародної  
науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ  
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ”**

06-07 грудня

Київ 2016

УДК 536.423

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ У

### РОТОРНОМУ ПЛІВКОВОМУ АПАРАТІ

магістрант Бишко М.А., к.т.н., доц. Зубрій О.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Широкого поширення в промисловості набули роторні плівкові апарати. Ці апарати придатні для здійснення багатьох теплофізичних процесів: випарювання, дистиляції, ректифікації, десорбції, сушки та інших процесів, які широко поширені в хімічній, біотехнологічній та харчовій промисловості [1].

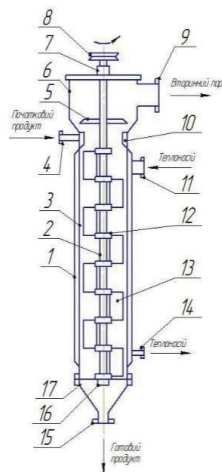
Застосування роторно-плівкового апарата для вищеназваних процесів обробки харчових продуктів дозволяє у багатьох випадках досягти радикального поліпшення техніко-економічних показників виробництва.

При проведенні вказаних процесів роторні плівкові апарати мають ряд істотних переваг перед багатьма апаратами іншого типу:

- менша тривалість процесу;
- більш висока інтенсивність термообробки продуктів;
- відсутність застійних зон;
- значно менші габаритні розміри;
- можливість поєднання декількох процесів в одному апараті;
- можливість висушування за один прохід;
- відсутність гідростатичного тиску.

Існують різні конструкції роторів і корпусів апаратів [2]. Вибір типу апарату визначається технологічним призначенням і властивостями оброблюваних рідин. У роторно-плівкових апаратах рідка фаза розподіляється ротором по твердій поверхні, що обігривається і турбулізується ротором. Це призводить до значної інтенсифікації процесів тепло- і масопереносу.

На рисунку 1 зображена принципова схема роторно-плівкового апарата з шарнірним кріпленням лопатей.



- 1 – оболонь; 2 – вал ротора; 3 – корпус; 4, 9, 11, 14, 15 – патрубки;  
5 – каплевідбійник; 6 – сепаратор; 7 – підшипниковий вузол;  
8 – пасова передача; 10 – розподільувач; 12 – хрестовина; 13 – лопать;  
16 – підшипниковий вузол; 17 – камера розвантаження.

Рисунок 1 – Принципова схема роторно-плівкового апарата з шарнірним кріпленням лопатей.

Метою даної роботи є дослідження гідродинаміки та теплообміну в роторно-плівковому апараті і через те, що данні процеси мають складний характер, що обумовлено, конструкцією ротора і технологічними параметрами роботи, аналітичне рішення відсутнє і необхідно проводити експериментальні дослідження.

#### Перелік посилань

1. Сидоров Ю. І., Влязло Р.Й., Новіков В.П. Процеси і апарати мікробіологічної та фармацевтичної промисловості. – Л.: "Інтелект-Захід", 2008, -736 с.
2. Соколов В.Н., Яблокова М.А. Аппаратура микробиологической промышленности. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988-278с.: ил.



**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут технічної теплофізики НАН України  
Інститут Газу НАН України  
Грузинський технічний університет**

*Присвячено 75 річчю зі дня народження  
професора Радченка Леоніда Борисовича*

**Збірник тез доповідей XII міжнародної  
науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА ОБЛАДНАННЯ”**

26-27 квітня  
Київ 2017

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТУЖНОСТІ  
В РОТОРНОМУ ПЛІВКОВОМУ АПАРАТІ**

магістрант Бишко М.А., к.т.н., доц. Зубрій О.Г.

**Національний технічний університет України**

**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Потужність є важливою характеристикою роторно-плівкового апарата і, крім того, може бути використана для розрахунку процесів перенесення [1].

Внаслідок складного характеру течії рідини в РПА широко використовуються експериментальні дослідження процесів.

$$N = N_{\text{кін}} + N_{\text{вт}}$$

де  $N_{\text{кін}}$  – потужність, що витрачається на передачу кінетичної енергії рідині яка подається в апарат та на перемішування плівки рідини;

$N_{\text{вт}}$  – втрати потужності.

В свою чергу:

$$N_{\text{вт}} = N_{\text{сух}} + N_{\text{оп}}$$

де  $N_{\text{сух}}$  – потужність, що витрачається на сухе тертя лопатей ротора об внутрішні стінки РПА;

$N_{\text{оп}}$  – потужність, що витрачається на подолання опору ущільненнях вала.

Щоб експериментально визначити  $N_{\text{оп}}$  необхідно мінімізувати  $N_{\text{сух}}$ , для чого поверхня змащується мильним розчином.

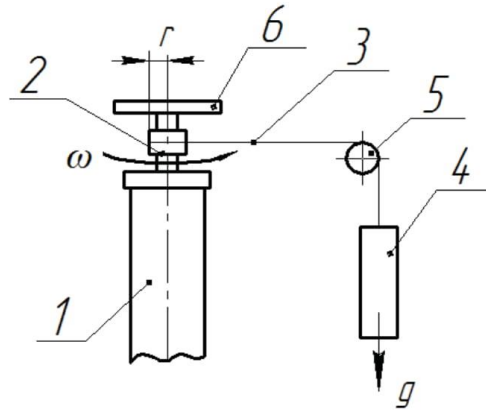
Тобто:

$$N_{\text{сух}} \rightarrow 0;$$

$$N_{\text{вт}} = N_{\text{оп}}. \quad (1)$$

Оскільки потужність в досліді виміряється за допомогою електроприладів, то виникає необхідність оцінити  $N_{\text{оп}}$  виміром величини крутного моменту (рис. 1).

На рисунку 1 зображена принципова схема дослідження крутного моменту механічним способом в роторному плівковому апараті.



1 – корпус РПА; 2 – опора; 3 – шнур; 4 – гиря; 5 – ролик; 6 – шків.

Рисунок 1 – Принципова схема дослідження витрат крутного моменту в роторному плівковому апараті.

Що описується рівняннями:

$$\begin{aligned} G &= m \cdot g; \\ M_{\text{кр}} &= G \cdot r; \\ N_{\text{оп}} &= M_{\text{кр}} \cdot \omega. \end{aligned} \quad (2)$$

Порівняння результатів за формулою (1) та (2), показує, що розбіжність не перевищує 10%.

Результати експериментальних досліджень пропонується узагальнити відомою залежністю [2]:

$$K_n = \frac{N}{\rho_p \cdot n^3 \cdot D^5};$$

який для роторних плівкових апаратів використовується у вигляді:

$$K_n = \frac{N}{\rho_p \cdot n^3 \cdot D^4 \cdot H}.$$

#### Перелік посилань:

1. Соколов В. Н., Яблокова М. А. Апаратура микробиологической промышленности. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1988.– 278 с.: ил.

2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии; Изд.2-е. Часть 1. Теоретическое основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995.- 400 с.



**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут технічної теплофізики НАН України  
Інститут Газу НАН України  
Грузинський технічний університет**

**Збірник тез доповідей XIII міжнародної  
науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА ОБЛАДНАННЯ”**

29-30 листопада  
Київ 2017

## РОТОРНО-ПЛІВКОВИЙ ВИПАРНИЙ АПАРАТ

магістрант Бишко М.А., к.т.н. доц. Зубрій О.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В основу винаходу поставлена задача забезпечити рівномірність формування плівкової поверхні продукту за рахунок почергової зміни типу закріплення лопаті.

Поставлена задача вирішується у роторно-плівковому апараті, що включає вертикальний циліндричний корпус, теплообмінну оболонку, штуцери введення, виведення теплоносія, краплевідбійник, штуцери введення та виведення продукту, штуцер виходу вторинної пари, вал ротора, на якому шарнірно та жорстко закріплені лопаті у вигляді пластин, одна із лопатей є притискною, крайки якої контактують із внутрішньою поверхнею плівки, за рахунок «непарного-парного» монтажу лопаток, та зміни кута фіксації жорстко закріплених лопатей.

Поставлена задача вирішується також за рахунок того, що режим формування плівки дозволяє впливати на її розподіл по поверхні теплообміну, виключаючи можливість зростання товщини плівкового покриття в результаті зміни властивостей рідини (густини) у процесі випаровування.

Зміна режиму роботи лопатей, та зміна кута фіксації жорстко закріплених лопатей с деяким зазором  $\delta$  дозволяє досягти ефективного перемішування продукту по всій висоті апарата, що прискорює паровиділення з внутрішньої поверхні шару рідини. Тобто, забезпечує врахування зміни властивостей рідкого продукту під час випарювання по висоті теплообмінної оболонки.

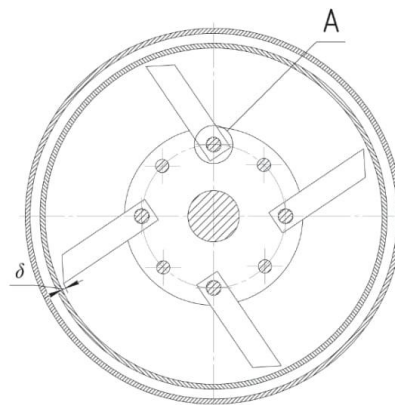
На фіг. 1 наведена схема поперечного перерізу ротора роторно-плівкового апарата.

На фіг. 2 зображений спосіб закріплення жорстких лопатей.

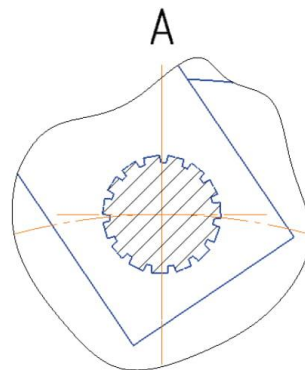
Новизною технічного рішення є зміна режиму роботи лопатей, що дозволяє впливати на параметри процесу теплообміну і течії речовини за рахунок

**Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"**  
можливості зміни кута фіксації жорстко закріпленої лопаті, враховуючи параметри зміни її характеристик в процесі упарювання та вимоги до кінцевого продукту.

Запропоноване технічне рішення забезпечує отримання якісного продукту без суттєвих матеріальних втрат, при цьому можлива модернізація вже впроваджених випарних апаратів і, що важливо, пристрій може застосовуватись для широкої гами продукції, адже виведення на оптимальні експлуатаційні параметри можливий за рахунок визначення відповідної швидкості обертання.



Фіг. 1



Фіг. 2

Рисунок 1 – Схема роторно-плівкового випарного апарату

**Перелік посилань:**

1. Заявка на патент України. МПК В01D 1/22 Роторно-плівковий випарний апарат/ Бишко М. А.; Зубрій О.Г., № u201710350; заявл.01.11.17.



**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут технічної теплофізики НАН України  
Інститут Газу НАН України  
Грузинський технічний університет**

**Збірник тез доповідей XIV міжнародної  
науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА ОБЛАДНАННЯ”**

23-25 квітня  
Київ 2018

## ПОТУЖНІСТЬ У РОТОРНОМУ ПЛІВКОВОМУ АПАРАТІ

магістрант Бишко М.А., к.т.н., доц. Зубрій О.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Через складність течії рідини в роторному плівковому апараті складно створити теоретичну модель яка б адекватно описувала гідродинаміку, тепло та масообмін та інші процеси, що не дозволяє провести достатньо точний розрахунок роторного апарата. Однією з гідродинамічних величин РПА є потужність, яка витрачається на розподілення, перемішування рідини лопатями ротора, подолання сил тертя в ущільненнях, опорах на ін. [1]. Потужність є важливою характеристикою роторного плівкового апарата для вибору приводу і крім того може бути використана для опису процесів переносу в плівці рідини [2].

Дослідження потужності проводилися на експериментальній скляній установці роторного плівкового апарата з шарнірним кріпленням фторопластових лопатей.

Результати дослідження показано у вигляді залежності потужності від кутової швидкості на рис. 1.

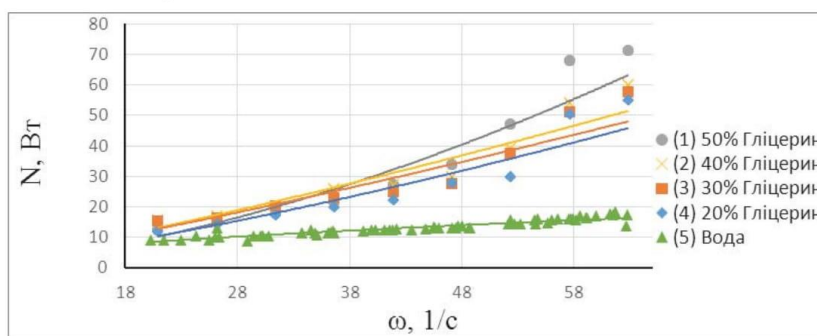


Рисунок. 1 - Залежність потужності  $N$  від кутової швидкості  $\omega$  для 50% гліцерину (1), 40% гліцерину (2), 30% гліцерину (3), 20% гліцерину (4) та води (5)

Як видно з рис. 1 кутова швидкість показує значний вплив на величину потужності. Також був оцінений вплив витрат рідини на потужність.

На основі отриманих результатів експерименту була встановлена залежність коефіцієнта потужності від відцентрового критерію Рейнольдса при постійних величинах  $Re_{пл}$  (рис. 2).

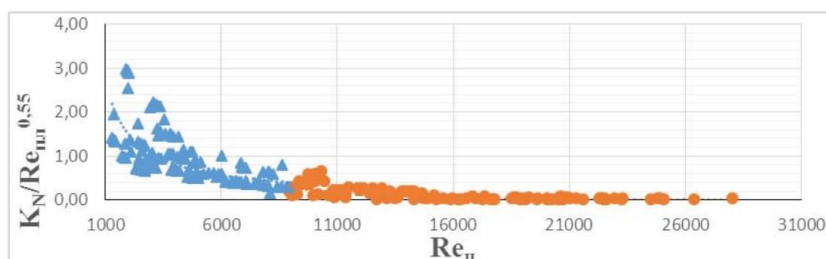


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта потужності  $K_N$  від відцентрового критерію  $Re_{ц}$

На основі дослідних даних було запропоноване узагальнююче рівняння у вигляді:

$$K_N = 1,02 \cdot 10^6 \cdot Re_{ц}^{-1,86} \cdot Re_{пл}^{0,55};$$

де  $K_N = \frac{N}{\omega^2 \cdot \rho \cdot D^4 \cdot h}$  - коефіцієнт потужності;

$Re_{ц} = \frac{\omega D^2}{\nu}$  - відцентровий критерій Рейнольдса;

$Re_{пл} = \frac{4\Gamma}{\nu}$  - плівковий критерій Рейнольдса;

$N$  – потужність на переміщення рідини в апараті,  $\omega$  – кутова швидкість,  $\rho$  – густина рідини,  $D$  – діаметр апарата,  $h$  – висота робочої поверхні апарата,  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\Gamma = \frac{V}{\pi D}$  – густина зрошення поверхні апарата,  $V$  – витрати рідини.

#### Перелік посилань:

1. Антипов С. Т. Машины и аппараты пищевых производств, учеб. для вузов. В 2 кн. / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков др.; под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2009. Кн. 1610 с.
2. Василюк И.М., Сабуров А.Г. Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности.- М.: Агропромиздат, 1989. -136 с.



**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ  
«ІНТЕРНАУКА»**

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL  
«INTERNAUKA»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«ИНТЕРНАУКА»**

*Свидетельство  
о государственной регистрации  
печатного средства массовой информации  
КВ № 22444-12344ПР*

*Сборник научных трудов*

№ 5(45)

Киев 2018

**Бишко Микита Андрійович**

*студент*

*Національного технічного університету України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Бышко Никита Андреевич**

*студент*

*Национального технического университета Украины*

*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

**Byshko Mykita**

*Student of the*

*National Technical University of Ukraine*

*«Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnic Institute»*

**Зубрій Олег Григорович**

*кандидат технічних наук,*

*доцент кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Зубрий Олег Григорьевич**

*кандидат технических наук,*

*доцент кафедры машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств*

*Национальный технический университет Украины*

*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

**Zubriy Oleg**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machines and*

*Apparatus for Chemical and Oil Refining Production*

*National Technical University of Ukraine*

*«Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnic Institute»*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТУЖНОСТІ У РОТОРНОМУ ПЛІВКОВОМУ АПАРАТІ

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ В РОТОРНОМ ПЛЁНОЧНОМ АППАРАТЕ

## RESEARCH WORK OF POWER IN ROTARY FILM APPARATUS

**Анотація.** Розглянуто вплив зміни фізичних властивостей речовин на потужність, що витрачається на перемішування та розподіл рідини. У роботі представлено результати експериментальних досліджень, що проводились у роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей. У якості оброблюваних речовин використовувались вода та розчини 20%, 30%, 40%, 50% гліцерину у воді. На основі експериментальних даних отримано узагальнену розрахункову залежність коефіцієнта потужності  $K_N$  в залежності від відцентрового критерія Рейнольдса  $Re_d$  та плівкового критерію Рейнольдса  $Re_n$ .

**Ключові слова:** роторний плівковий апарат, гідродинаміка, гліцерин, вода, потужність, коефіцієнт потужності.

**Аннотация.** Рассмотрено влияние изменения физических свойств жидкостей на мощность, которая тратится на перемешивание и распределение жидкости. В работе представлено результаты экспериментальных исследований, которые проводились в роторном пленочном аппарате с шарнирным креплением лопастей. В качестве обрабатываемых жидкостей использовались вода и растворы 20%, 30%, 40%, 50% глицерина в воде. На основании экспериментальных данных получено обобщенную расчетную зависимость коэффициента мощности  $K_N$  в зависимости от центробежного критерия Рейнольдса  $Re_d$  и пленочного критерия Рейнольдса  $Re_n$ .

**Ключевые слова:** роторный пленочный аппарат, гидродинамика, глицерин, вода, мощность, коэффициент мощности.

**Summary.** The influence of fluid physical properties on the power that is spent on mixing and distribution of liquid is considered. The paper presents the results of experimental studies, which were carried out in a rotary film apparatus with hinged blades. As the treated liquids, water and solutions of 20%, 30%, 40%, 50% glycerol in water were used. On the basis of the obtained experimental data, the power factor was calculated depending on the centrifugal and film Reynolds criterias.

**Key words:** rotary film apparatus, hydrodynamics, glycerin, water, power, power factor.

**Постановка проблеми.** Через складність течії рідини в роторному плівковому апараті складно створити теоретичну модель яка б адекватно описувала гідродинаміку, тепло та масообмін та інші процеси, що не дозволяє провести достатньо точний розрахунок роторного апарата. Використовуються спрощені моделі [7], значним досягненням є розгляд явищ переносу в уявленнях напівемпіричної теорії турбулентного переносу [5], але в більшості випадків пропонується експериментально визначати окремі величини, наприклад коефіцієнт тепловіддачі [6]. Однією з гідродинамічних величин РПА є потужність, яка витрачається на розподілення, перемішування рідини лопатями ротора, подолання сил тертя в ущільненнях, опорах на ін. [1]. Потужність є важливою характеристикою роторного плівкового апарата для вибору приводу і крім того може бути використана для опису процесів переносу в плівці рідини [2].

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є експериментальне дослідження витрат потужності із врахуванням впливу швидкості обертання, витрат рідини та її фізичних властивостей в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей та узагальнення результатів дослідів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження потужності проводилися на експериментальній скляній установці роторного плівкового апарата з шарнірним кріпленням фторопластових лопатей (рис. 1).

Установка складається з наступних основних вузлів: скляного роторного плівкового апарата 1 з оболонню 2, ротора 3 з приводом 4 і торцевим ущільненням 5. На роторі 3 шарнірно прикріплені фторопластові лопаті.

Початковий розчин подається в ємність 6 і далі в роторний плівковий апарат 1, де лопатями ротора 3 розподіляється по внутрішній поверхні та переміщується в тонкому шарі. Температурний режим регулюється за допомогою термостата. Оброблений розчин стікає в приймальну і зливну ємності 7 і 8.

В якості робочої рідини для проведення дослідження на лабораторній установці використовувалась вода та розчини 20%, 30%, 40% та 50% гліцерину у воді.

У попередніх роботах були визначені витрати енергії на подолання тертя в ущільненнях та опорах валу.

В наступному викладенні аналізується потужність, яка витрачається лише на розподілення та перемішування рідини.

Результати дослідження показано у вигляді залежності потужності від кутової швидкості на рис. 2.

Як видно з рис. 2 кутова швидкість показує значний вплив на величину потужності. Також був оцінений вплив витрат рідини на потужність.

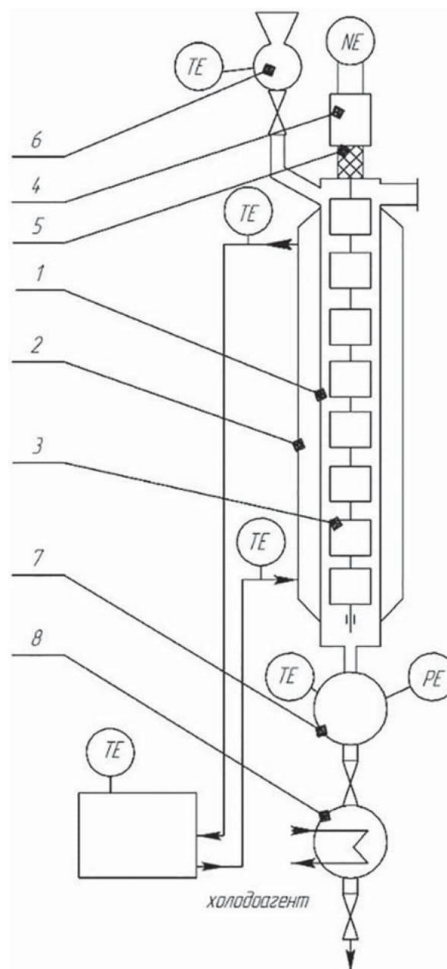


Рис. 1. Схема дослідної установки:

- 1 — роторний плівковий апарат; 2 — теплообмінна оболоня; 3 — шарнірний ротор; 4 — привід;
- 5 — ущільнення; 6 — напірний бак; 7 — приймальна ємність; 8 — зливна ємність

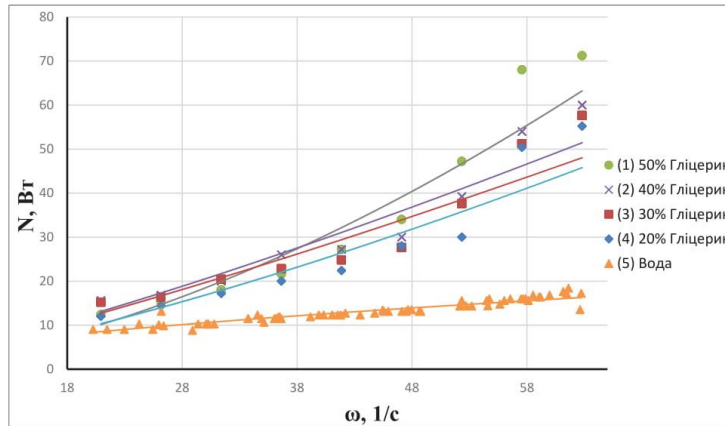


Рис. 2. Залежність потужності  $N$  від кутової швидкості  $\omega$  для 50% гліцерину (1), 40% гліцерину (2), 30% гліцерину (3), 20% гліцерину (4) та води (5)

За результатами проведених досліджень та за літературними даними [3], запропоновано узагальнююче рівняння у вигляді:

$$K_N = A \cdot Re_{\omega}^{\alpha} \cdot Re_{пл}^{\beta}, \quad (1)$$

де  $K_N = \frac{N}{\omega^3 \cdot \rho \cdot D^4 \cdot h}$  — коефіцієнт потужності [5],

$$Re_{\omega} = \frac{\omega D^2}{\nu} \text{ — відцентровий критерій Рейнольдса,}$$

$$Re_{пл} = \frac{4\Gamma}{\nu} \text{ — плівковий критерій Рейнольдса.}$$

Внаведених формулах:  $N$  — потужність на перемишування рідини в апараті,  $\omega$  — кутова швидкість,  $\rho$  — густина рідини,  $D$  — діаметр апарата,  $h$  — висота робочої поверхні апарата,  $\nu$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\Gamma = \frac{V}{\pi D}$  — густина зрошення поверхні апарата [4],  $V$  — витрати рідини.

Використовуючи логарифмічну систему координат, рис. 3, було знайдено область зміни виду залежності величини  $K_N$  від критерію  $Re_{\omega} = 8000$ . В літературі ця область зазвичай оцінюється як критична і характеризує зміну режиму течії рідини (перехід до турбулентного режиму течії). За [8]  $Re_{\omega} = 4000 - 5000$  для апарата з жорстким кріпленням лопатей).

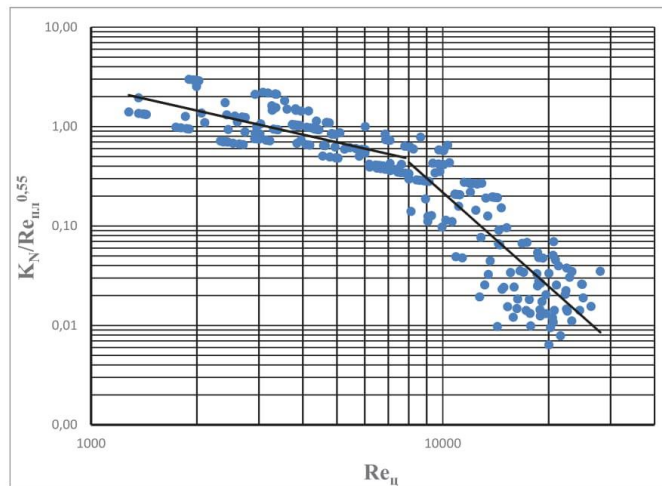
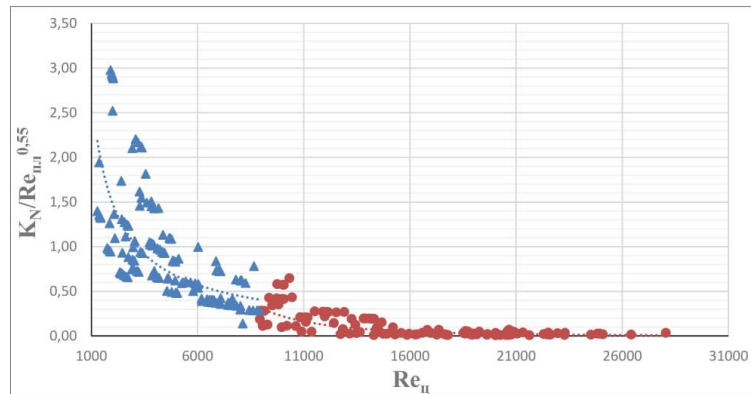


Рис. 3. Залежність коефіцієнта потужності  $K_N$  від відцентрового критерію  $Re_{\omega}$  в логарифмічній системі координат

Рис. 4. Залежність коефіцієнта потужності  $K_N$  від відцентрового критерію  $Re_{ц}$ 

На основі отриманих результатів експерименту була встановлена залежність коефіцієнта потужності від відцентрового критерію Рейнольдса при постійних величинах  $Re_{пл}$  (рис. 4).

Як видно з графіка відцентровий критерій Рейнольдса має значний вплив і оцінюється як  $K_N \sim Re_{ц}^{-3,3}$  при  $Re_{ц} > 8000$  та  $K_N \sim Re_{ц}^{-0,86}$  при  $Re_{ц} < 8000$ .

Окремо була встановлена залежність коефіцієнта потужності від критерію Рейнольдса плівкового і оцінено як  $K_N \sim Re_{пл}^{0,55}$ .

Залежності визначення коефіцієнта потужності у визначених діапазонах мають вигляд:

$$K_N = 1,495 \cdot 10^{12} \cdot Re_{ц}^{-3,3} \cdot Re_{пл}^{0,55} \quad (2)$$

$$K_N = 1060 \cdot Re_{ц}^{-0,86} \cdot Re_{пл}^{0,55} \quad (3)$$

Залежність (2) справедлива для заданих діапазонів  $160 < Re_{пл} < 2300$  та  $8000 < Re_{ц} < 31000$ .

Залежність (3) справедлива для в заданих діапазонів  $300 < Re_{пл} < 400$  та  $1500 < Re_{ц} < 8000$ .

А також була запропоноване узагальнююче рівняння у вигляді:

$$K_N = 1,02 \cdot 10^6 \cdot Re_{ц}^{-1,86} \cdot Re_{пл}^{0,55}.$$

**Висновки і пропозиції.** Проведені експериментальні дослідження витрат потужності в роторно-плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей. За результатами досліджень встановлена залежність коефіцієнта потужності від критерію Рейнольдса відцентрового. Отримані результати можуть бути використанні для подальшого дослідження роторно-плівкових апаратів з шарнірним кріпленням лопатей.

#### Література

1. Антипов С. Т. Машины и аппараты пищевых производств, учеб. для вузов. В 2 кн. / С. Т. Антипов, И. Т. Крегов, А. Н. Остриков др.; под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: КолосС, 2009. — Кн. 1610 с.
2. Василюк И. М., Сабуров А. Г. Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности. — М.: Агропромиздат, 1989. — 136 с.
3. Олевский, В. М. Роторные пленочные тепло- и массообменные аппараты / В. М. Олевский, В. Р. Ручинский. — М.: Химия, 1977.
4. Воронцов Е. Г. Теплообмен в жидкостных пленках / Е. Г. Воронцов, Ю. М. Тананайко. — К.: Техника, 1972. — 196 с.
5. Соколов В. Н. Аппаратура микробиологической промышленности / В. Н. Соколов, М. А. Яблокова. — Л.: Машиностроение, 1988. — 278 с.
6. Рябовол Е. Н., Юдина А. А., Зинченко М. Г., Анохин Г. А. Исследование процесса теплопередачи в роторно-пленочном аппарате при концентрировании томатного сока. ХФ ПАТ «Укрнефтехимпроект», Харьков ISSN2079–0821. Вісник НТУ «ХП». — 2014. — № 27.
7. Ащелов А. С., Исследование кинетики потоков в роторно-пленочном выпарном аппарате. ФГБОУ ВО, ISSN2074–9414. Техника и технология пищевых производств. — 2016. — Т. 42. — № 3.
8. Марченко А. Н., Соляник О. Н. Расход мощности на привод ротора тонкопленочного роторного аппарата / Химическая промышленность Украины № 6, 1967. — С. 26.

# МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ «ІНТЕРНАУКА»

ISSN 2520-2057

INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC JOURNAL  
«INTERNAUKA»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«ИНТЕРНАУКА»

№ 7 (47) / 2018  
1 том



**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ  
«ІНТЕРНАУКА»**

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL  
«INTERNAUKA»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«ИНТЕРНАУКА»**

*Свидетельство  
о государственной регистрации  
печатного средства массовой информации  
КВ № 22444-12344ПР*

*Сборник научных трудов*

№ 7 (47)

1 том

Киев 2018

**Бишко Микита Андрійович**

*магістрант*

*Національного технічного університету України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Бышко Никита Андреевич**

*магистрант*

*Национального технического университета Украины*

*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

**Byshko Mykita**

*Master Degree Student of the*

*National Technical University of Ukraine*

*«Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnic Institute»*

**Зубрій Олег Григорович**

*кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Зубрий Олег Григорьевич**

*кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств*

*Национальный технический университет Украины*

*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

**Zubriy Oleg**

*Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of*

*Machines and Apparatus for Chemical and Oil Refining Production*

*National Technical University of Ukraine*

*«Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnic Institute»*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОБМІНУ У РОТОРНОМУ ПЛІВКОВОМУ АПАРАТІ**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОБМЕНА В РОТОРНОМ ПЛЁНОЧНОМ АППАРАТЕ**

## **RESEARCH WORK OF HEAT TRANSFER PROCESS IN ROTARY FILM APPARATUS**

**Анотація.** У роботі представлено результати експериментальних досліджень впливу швидкості обертання ротора, витрат рідини та її фізичних властивостей на інтенсивність процесу теплообміну при нагріві. Досліди проводились у скляному роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей. У якості оброблюваних речовин використовувались вода та розчини 20%, 30%, 40%, 50% гліцерину у воді. Отримано узагальнену розрахункову залежність.

**Ключові слова:** роторний плівковий апарат, теплообмін, гліцерин, вода, коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт тепловіддачі.

**Аннотация.** В работе представлено результаты экспериментальных исследований влияния скорости вращения ротора, расходов жидкости и её физических свойств на интенсивность процесса теплообмена при нагреве. Исследования проводились в роторном пленочном аппарате с шарнирным креплением лопастей. В качестве обрабатываемых жидкостей использовались вода и растворы 20%, 30%, 40%, 50% глицерина в воде. Получено обобщенную расчетную зависимость.

**Ключевые слова:** роторный пленочный аппарат, теплообмен, глицерин, вода, коэффициент теплопередачи, коэффициент теплоотдачи.

**Summary.** The paper presents the results of experimental studies of the effect of rotor speed, fluid flow and its physical properties on the intensity of heat transfer during heating. Studies were carried out in a rotary film apparatus with pivot attachment of blades. As the treated liquids, water and solutions of 20%, 30%, 40%, 50% glycerol in water were used. A generalized calculated dependence is obtained.

**Key words:** rotary film apparatus, heat exchange, glycerin, water, heat transfer coefficient.

**Постановка проблеми.** Теплопередача являється одним з найважливіших процесів у роторному плівковому апараті (РПА). Через складність течії рідини в роторному плівковому апараті складно створити теоретичну модель яка б адекватно описувала гідродинаміку, тепло та масообмін та інші процеси, що не дозволяє провести достатньо точний розрахунок апарата. В більшості випадків пропонується експериментально визначати окремі величини, наприклад коефіцієнт тепловіддачі [1].

**Мета статті.** Головною метою роботи є експериментальне дослідження впливу швидкості обертання ротора, витрат рідини та її фізичних властивостей на інтенсивність процесу теплообміну при нагріві в роторному плівковому апараті та узагальнення отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження теплообміну проводилися на експериментальній скляній установці роторного плівкового апарата з шарнірним кріпленням фторопластових лопатей (рис. 1).

Установка складається з наступних основних вузлів: скляного роторного плівкового апарата 1 з оболонню 2, ротора 3 з приводом 4 і торцевим ущільненням 5. На роторі 3 шарнірно прикріплені фторопластові лопаті.

Початковий розчин подається в ємність 6 і далі в роторний плівковий апарат 1, де лопатями ротора 3 розподіляється по внутрішній поверхні та переміщується в тонкому шарі. Температурний режим регулюється за допомогою термостата. Оброблений розчин стікає в приймальну ємність 7 та зливну ємність 8.

В якості робочої рідини для проведення дослідження на лабораторній установці використовувалась вода та розчини 20%, 30%, 40, 50% гліцерину у воді.

Експериментальні дослідження проводились при стаціонарному режимі теплообміну. Втрати тепла у навколишнє середовище через теплообмінну оболонь визначались розрахунком і враховувались у тепловому балансі. Втрати тепла через торцеві ділянки апарату незначні, тому ними можна знехтувати.

Для знаходження дослідного коефіцієнта теплопередачі необхідно врахувати основні теплові потоки в апараті та температурний режим, що дає наступне рівняння:

$$K_d = \frac{q}{\Delta t_{cp}}; \tag{1}$$

де  $q$  — щільність теплового потоку:

$$q = \frac{Q}{F}, \text{ Вт/м}^2 \tag{2}$$

$\Delta t_{cp}$  — середня різниця температур в апараті, град;  $Q$  — кількість тепла переданого робочій рідині, Вт;  $F$  — поверхня теплообміну, м.

Оскільки апарат скляний, то замірити температуру стінки з боку теплоносія в оболоні та теплоносія в апараті практично неможливо. Тому коефіцієнт тепловіддачі від стінки до робочої рідини  $\alpha_a$  визначався опосередковано через дослідний коефіцієнт теплопередачі  $K_d$  (1) та коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_p$

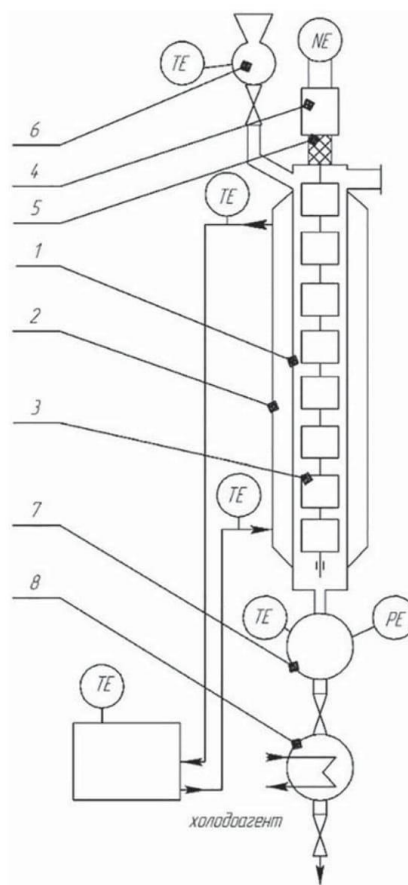


Рис. 1. Схема дослідної установки:  
1 — роторний плівковий апарат; 2 — теплообмінна оболонь; 3 — шарнірний ротор; 4 — привід; 5 — ущільнення; 6 — напірний бак; 7 — приймальна ємність; 8 — зливна ємність

від теплоносія в оболоні до стінки. В свою чергу коефіцієнт  $\alpha_p$  визначався за літературними даними [2].

Через те, що відношення товщини стінки до діаметру становить 3%, то коефіцієнт теплопередачі розраховувався як для плоскої стінки:

$$K_{\theta} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_p} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}}} \quad (3)$$

Звідки коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_a$  в апараті:

$$\alpha_a = \frac{K_{\theta}}{1 - \frac{K_{\theta}}{\alpha_p} - \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}}}, \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}; \quad (4)$$

де  $\delta_{cm}$  — товщина стінки, м;  $\lambda_{cm}$  — коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/м·К.

В результаті досліджень встановлено суттєвий вплив швидкості обертання ротора на величину коефіцієнта теплопередачі  $K_{\theta}$ , рис. 2, 3, що пояснюється відповідним зростанням коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_a$ .

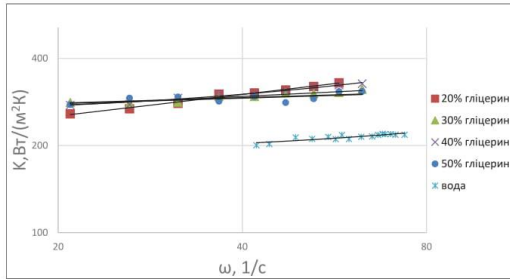


Рис. 2. Залежність коефіцієнта теплопередачі  $K_{\theta}$  від кутової швидкості для гліцерину та води

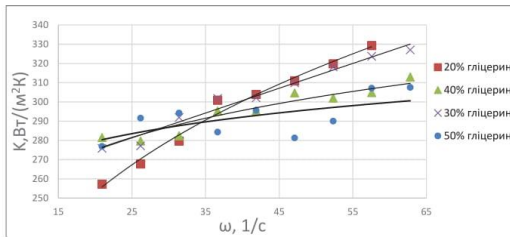


Рис. 3. Залежність коефіцієнта теплопередачі  $K_{\theta}$  від кутової швидкості для гліцерину

В літературі, наприклад [3–5], пропонується узагальнювати дослідні дані по тепловіддачі у вигляді залежностей критерія Нусельта  $Nu$  від критеріїв Рейнольдса плівкового  $Re_n$ , відцентрового  $Re_u$ , критерію Прандтля  $Pr$  та інших у вигляді залежності:

$$Nu = C \cdot Re_n^{\alpha} \cdot Re_u^{\beta} \cdot Pr^{\gamma} \quad (5)$$

де  $C$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — константи, які визначаються по результатам дослідів.

В більшості досліджень ступінь при критерії Прандтля приймається  $\gamma = 0,33$ .

В нашому випадку критерій Нусельта дослідний розраховувався за формулою:

$$Nu_{\theta} = \frac{\alpha \cdot \left(\frac{v^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}}{\lambda} \quad (6)$$

Критерій Рейнольдса відцентровий:

$$Re_u = \frac{\omega d^2}{\nu} \quad (7)$$

Критерій Рейнольдса плівковий:

$$Re_{n,l} = \frac{4\Gamma}{\nu} \quad (8)$$

Для оцінки впливу  $Re_u$  критеріальне рівняння представлено у вигляді:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = C_1 \cdot Re_u^{\beta} \quad (9)$$

Обробка дослідних даних виконана методом найменших квадратів, в результаті чого отримані значення  $\beta = 0,6$ , (рис. 4).

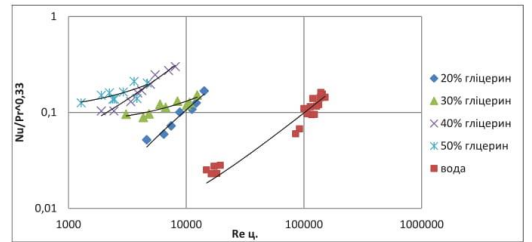


Рис. 4. Залежність  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}}$  від критерію Рейнольдса відцентрового  $Re_u$

Після чого отримаємо рівняння:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = 0,004 \cdot Re_u^{0,6} \cdot Re_n^{\alpha} \quad (10)$$

Критеріальне рівняння для оцінки впливу  $Re_n$  представлено у вигляді:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33} \cdot Re_u^{0,6}} = C_2 \cdot Re_n^{\alpha} \quad (11)$$

де  $C_2$  — постійна,  $\alpha$  — показник степеня при критерії Рейнольдса плівкового. Отримана величина показника  $\alpha = -0,101$ .

В результаті чого узагальнене рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі приймає вигляд:

$$Nu_p = 0,0788 \cdot Re_u^{0,6} \cdot Re_n^{-0,101} \cdot Pr^{0,33} \quad (12)$$

На рис. 5 представлено порівняння дослідних значень критерію Нусельта  $Nu_d$  з розрахунковими  $Nu_p$  по рівнянню (12).

Достовірність апроксимації склала 0,9628.

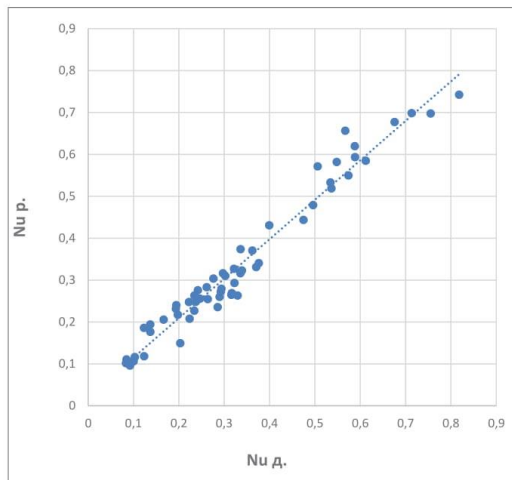


Рис. 5. Порівняння дослідних і розрахункових значень чисел критерія Nu

Рівняння отримано при зміні критерія Рейнольдса відцентрового в межах  $1500 < Re_u < 160000$ , критерія Прандтля  $8,5 < Pr < 65$  та критерію Рейнольдса плівкового в межах  $80 < Re_n < 1200$ .

**Висновки і пропозиції.** Проведені експериментальні дослідження процесу теплообміну в роторному плівковому апараті з шарнірним кріпленням лопатей. За результатами досліджень отримано узагальнене рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі при нагріві рідини. Отримані результати можуть бути використанні для розрахунку роторних плівкових апаратів з шарнірним кріпленням лопатей.

#### Література

1. Антипов С. Т. Машины и аппараты пищевых производств, учеб. для вузов. В 2 кн. / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков др.; под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: КолосС, 2009. — Кн. 1610 с.
2. Петухов Е. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении в трубах. / Петухов Е. С. — М.: Энергия, 1967. — 411 с.
3. Исаченко В. П. Теплопередача. Книга для студентов / Исаченко В. П., Осипова В. А., Сухомел А. С. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
4. Корнієнко Я. М. Процеси та обладнання хімічної технології. Ч1. / Корнієнко Я. М., Лукач Ю. Ю., Мікульнок І. О. — К.: НТУУ «КПІ», 2011. — 299 с.
5. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Теоретические основы процессов химической технологии. / Дытнерский Ю. И. — М.: Химия, 1995. — 400 с.
6. Рябовол Е. Н., Юдина А. А., Зинченко М. Г., Анохин Г. А. Исследование процесса теплопередачи в роторно-плёночном аппарате при концентрировании томатного сока. ХФ ПАТ «Укрнефтехимпроект», Харьков ISSN2079-0821. Вісник НТУ «ХПІ». — 2014. — № 27.



**Додаток Ж**  
**Специфікація до складального креслення**