

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Інститут (факультет) Механічної інженерії і транспорту  
Кафедра Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування  
Освітня програма Машини і обладнання для технологічних процесів

До захисту допускаю  
Завідувач кафедри  
Андрій РОГОВИЙ  
(ініціали та прізвище)

\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Тема роботи Вплив напрямного лопатевого апарата в осьовому каналі  
вихорокамерного нагнітача на його характеристики

Шифр роботи МІТ-422зів.02  
(група, номер теми за наказом)

Виконавець Маммадов Ельчін  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник проф. Роговий Андрій Сергійович  
(посада, прізвище, ім'я, по-батькові)

Харків 2026



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Інститут (факультет) Механічної інженерії і транспорту  
Кафедра Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування  
Освітня програма Машини і обладнання для технологічних процесів

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

Андрій РОГОВИЙ

03.03.2026 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Маммадову Ельчіну

1 Тема роботи Вплив напрямного лопатевого апарату в осьовому каналі вихорокамерного нагнітача на його характеристики

Керівник роботи Роговий Андрій Сергійович, докт. техн. наук

затвержені наказом закладу вищої освіти від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р. № \_\_\_\_\_

2 Термін подання здобувачем роботи 12.06.2026 р.

3 Вихідні дані до роботи: Тип машини – вихорокамерний нагнітач із напрямним лопатевим апаратом. Робоче середовище – рідина. Режим роботи – номінальний. Задані основні енергетичні та витратні параметри, а також геометрія осьового каналу і вихрової камери. Досліджується вплив закручення потоку. Розрахунки виконано з використанням CFD-методів.

4 Перелік питань, які потрібно розробити в кваліфікаційній роботі. Аналіз сучасного стану вихорокамерних нагнітачів. Теоретичні передумови застосування напрямного лопатевого апарату. Розрахунок течії у вихорокамерному нагнітачі. Вплив лопатевого напрямного апарату на характеристики вихорокамерного нагнітача.

5 Перелік графічного матеріалу: струминні нагнітачі; попереднє закручення потоку, що перекачується; теоретичні передумови застосування напрямного лопатевого апарату; вихорокамерний нагнітач з напрямним апаратом; результати експерименту CFD; вплив лопатевого направляючого апарату на характеристики ВКЕ; лінії течії потоку, що всмоктується у вихрову камеру.

#### 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічне обґрунтування			
Охорона праці та навколишнього середовища			

7 Дата видачі завдання 05.03.2026 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Вибір і обґрунтування теми, постановка проблем і завдань	05.03.2026	
2	Добір і опрацювання джерел інформації	11.03.2026	
3	Виконання пояснювальної записки	14.05.2026	
4	Виконання графічної частини	26.05.2026	
5	Складання відомості документів	02.06.2026	
6	Подання роботи на рецензію	05.06.2026	
7	Подання роботи на допуск до захисту	12.06.2026	
8	Захист роботи	19.06.2026	

**Здобувач**

Ельчін МАММАДОВ

**Керівник роботи**

Андрій РОГОВИЙ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Інститут (факультет) Механічної інженерії і транспорту

Кафедра Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Освітня програма Машини і обладнання для технологічних процесів

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**до кваліфікаційної роботи**

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему «Вплив напрямного лопатевого апарату в осьовому каналі  
вихорокамерного нагнітача на його характеристики»

Виконав здобувач 4 курсу, групи МІТ-422зів

Ельчін МАММАДОВ

Керівник

Андрій РОГОВИЙ

Рецензент

Ірина ТИНЬЯНОВА

Нормоконтроль

Надія ФАТЄЄВА

Харків 2026

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до ДР: 60 с., 19 рис., 8 табл., 28 джерел інформації, 1 додаток.

*Ключові слова:* ВИХОРОКАМЕРНИЙ НАГНІТАЧ, СТРУМИННИЙ АПАРАТ, НАПРЯМНИЙ ЛОПАТЕВИЙ АПАРАТ, ЗАКРУЧЕННЯ ПОТОКУ, МОДЕЛЮВАННЯ, КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

*Метою* роботи є: дослідження впливу попереднього закручення потоку на енергетичні та напірні характеристики вихорокамерного нагнітача, а також підвищення його ефективності шляхом застосування напрямного лопатевого апарата в осьовому каналі.

Виходячи з поставленої мети, *задачами* роботи є:

- проаналізувати принцип роботи, конструктивні особливості та характеристики струминних і вихорокамерних нагнітачів;
- дослідити теоретичні основи формування закрученого потоку та процеси змішування у вихровій камері;
- розробити конструктивну схему вихорокамерного нагнітача з напрямним лопатевим апаратом;
- виконати чисельне моделювання течії робочого середовища та визначити вплив закручення потоку на коефіцієнт корисної дії та тиск;
- провести аналіз ефективності застосування напрямного апарата залежно від режимів роботи нагнітача.

*Методи дослідження* – у роботі використано методи чисельної гідродинаміки, що базуються на розв'язанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності. Моделювання виконано із застосуванням CFD-підходів

*Об'єктом дослідження* дипломної роботи є вихорокамерний нагнітач.

*Предметом дослідження* є закономірності формування закрученого потоку, процеси енергообміну та вплив ступеня закручення на енергетичні та напірні характеристики нагнітача.

## THE ABSTRACT

*Explanatory note* to Dr: 60 P., 19 fig., 8 tables., 28 sources of Information, 1 appendix.

*Keywords:* VORTEX CHAMBER PUMP, JET DEVICE, GUIDE VANE APPARATUS, FLOW SWIRL, CFD MODELING, EFFICIENCY, VORTEX CHAMBER, ENERGY EFFICIENCY.

*The aim* of the work is: to study the effect of preliminary flow swirl on the energy and pressure characteristics of a vortex chamber pump, as well as to improve its efficiency through the use of a guide vane apparatus in the axial channel.

Based on this goal, *the tasks* of the work are:

- to analyze the operating principle, design features, and characteristics of jet and vortex chamber pumps;
- to investigate the theoretical foundations of swirl flow formation and mixing processes in the vortex chamber;
- to develop a design scheme of a vortex chamber pump with a guide vane apparatus;
- to perform numerical simulation of the flow and determine the influence of flow swirl on efficiency and pressure;
- to analyze the effectiveness of the guide vane apparatus depending on operating conditions.

*Research methods:* the study employs computational fluid dynamics (CFD) methods based on solving Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the continuity equation. The simulations were carried out using CFD approaches.

*The object* of study of the thesis is a vortex chamber pump.

*The subject* of the study is the formation of swirling flow, energy exchange processes, and the influence of swirl intensity on the energy and pressure characteristics of the pump.

## ЗМІСТ

Вступ.....		4
1	Аналіз сучасного стану вихорокамерних нагнітачів .....	6
1.1	Огляд струминних та вихорокамерних нагнітачів.....	6
1.2	Основні енергетичні та витратно-напірні характеристики вихорокамерних нагнітачів .....	8
1.3	Шляхи підвищення ефективності вихорокамерних нагнітачів .....	11
1.4	Закручення потоку в осьових каналах як метод покращення характеристик.....	12
2	Теоретичні передумови застосування напрямного лопатевого апарату.....	15
2.1	Формування закрученого потоку в осьовому каналі.....	15
2.2	Гідродинамічні процеси при змішуванні потоків у вихровій камері .....	16
2.3	Закручування потоку в лопатевих насосах і роль напрямного апарата .....	18
2.4	Критерії оцінки ступеня закручення потоку .....	21
3	Розрахунок течії у вихорокамерному нагнітачі .....	24
3.1	Конструктивна схема вихорокамерного нагнітача з напрямним лопатевим апаратом .....	24
3.2	Чисельне моделювання течії у вихорокамерному нагнітачі з напрямним лопатевим апаратом.....	26
3.2.1	Математична модель течії. ....	26
3.2.2	Модель турбулентності. ....	27
3.2.3	Граничні умови та параметр закручення.....	28
3.3	Вплив штучного закручення без напрямного апарату .....	28
4	Вплив лопатевого напрямного апарату на характеристики вихорокамерного нагнітача.....	32
4.1	Вплив лопатевого напрямного апарата на коефіцієнт корисної дії.....	32
4.2	Вплив ступеня закручення на тиск у вихровій камері .....	34
4.3	Аналіз впливу лопатевого напрямного апарату на характеристики вихорокамерного нагнітача .....	36
4.4	Аналіз ліній течії .....	38
5	Економічна частина.....	41
5.1	Розрахунок собівартості НДР. ....	41
5.2	Розрахунок матеріальних витрат на НДР .....	42
5.3	Розрахунок загальновиробничих витрат .....	45
5.4	Калькуляція собівартості НДР.....	46
5.5	Висновки.....	47
6	Охорона праці і навколишнього середовища.....	48

6.1	Загальні питання охорони праці.....	48
6.2	Організація управління охороною праці на підприємстві.....	49
6.3	Організація безпечних умов праці на робочих місцях при проектуванні насосів.....	51
6.4	Метеорологічні умови.....	51
6.5	Освітлення.....	51
6.6	Електробезпека.....	52
6.7	Пожежна безпека.....	53
6.8	Охорона навколишнього середовища.....	54
6.9	Висновок.....	55
	Висновки.....	56
	Список джерел інформації.....	58

## ВСТУП

Вихорокамерні нагнітачі належать до класу безлопатевих гідро- та газодинамічних машин, у яких передавання енергії від робочого потоку до нагнітального середовища відбувається за рахунок інтенсивних вихрових процесів. Завдяки простоті конструкції, відсутності обертових елементів та здатності працювати з агресивними або забрудненими середовищами, такі апарати знаходять застосування у хімічній, енергетичній та переробній промисловості. Водночас їх істотним недоліком залишається порівняно низька енергетична ефективність, що обмежує сферу практичного використання.

Одним із перспективних напрямів підвищення характеристик вихорокамерних нагнітачів є цілеспрямоване керування структурою потоку на етапі підведення робочого середовища до вихрової камери. Особливу роль у цьому процесі відіграє осьовий канал, у якому формуються початкові умови руху потоку та його кутового моменту. Встановлення напрямного лопатевого апарату в осьовому каналі дозволяє надати потоку попереднього закручення, змінити співвідношення між осьовою та тангенціальною складовими швидкості й, відповідно, вплинути на гідродинамічні процеси в камері.

Незважаючи на наявність наукових публікацій і ґрунтовних досліджень, присвячених теорії та практиці вихорокамерних нагнітачів, питання впливу напрямного лопатевого апарату саме в осьовому каналі на інтегральні характеристики нагнітача потребує подальшого узагальнення. Більшість наявних робіт зосереджені або на загальних закономірностях закручених течій, або на окремих конструктивних рішеннях, що ускладнює використання отриманих результатів у навчальному та інженерному проєктуванні.

У зв'язку з цим актуальним є виконання роботи, спрямованої на систематизацію та аналітичне оцінювання впливу напрямного лопатевого

апарату в осьовому каналі вихорокамерного нагнітача на його напірні та енергетичні характеристики.

Метою даної роботи є дослідження впливу напрямного лопатевого апарату, розташованого в осьовому каналі вихорокамерного нагнітача, на основні експлуатаційні характеристики агрегату. Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено аналіз конструктивних особливостей вихорокамерних нагнітачів, розгляд фізичних механізмів формування закрученого потоку, а також порівняльну оцінку характеристик нагнітача з напрямним лопатевим апаратом і без нього на основі опублікованих експериментальних та розрахункових даних.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИХОРОКАМЕРНИХ НАГНІТАЧІВ

### 1.1. Огляд струминних та вихорокамерних нагнітачів

Струминні нагнітачі становлять окрему групу гідро- та газодинамічних пристроїв, у яких передавання енергії здійснюється без використання обертових робочих органів [1]. Робота таких апаратів ґрунтується на використанні кінетичної енергії робочого струменя, який, витікаючи з сопла з великою швидкістю, захоплює та прискорює навколишнє середовище. У результаті процесу змішування в камері нагнітача відбувається підвищення тиску сумарного потоку, що і забезпечує нагнітальну дію [2].

До основних переваг струминних нагнітачів належать простота конструкції, надійність у роботі, відсутність точних зазорів та можливість роботи в умовах високих температур, агресивних або забруднених середовищ. Саме ці властивості зумовлюють їх використання в системах вентиляції, вакуумній техніці, хімічних установках та допоміжних енергетичних системах. Водночас істотним недоліком класичних струминних нагнітачів (Рис. 1.1) є невисокий коефіцієнт корисної дії, що обмежує їх застосування в енергетично чутливих установках [3].

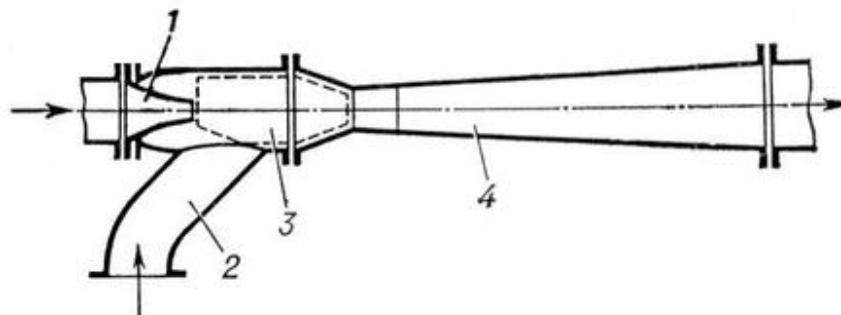


Рисунок 1.1 – Принципова схема роботи струминного апарату прямої дії

Вихорокамерні нагнітачі є різновидом струминних пристроїв, у яких підсилення процесу енергообміну між потоками досягається за рахунок закручування течії [4]. Конструктивно такий нагнітач містить вихрову камеру, у якій формується обертальний рух змішаного потоку, а також систему каналів для підведення робочого та нагнітального середовищ. Наявність кутового моменту потоку призводить до виникнення складної просторової течії з розвинуеною тангенціальною складовою швидкості [5] (рис. 1.2).

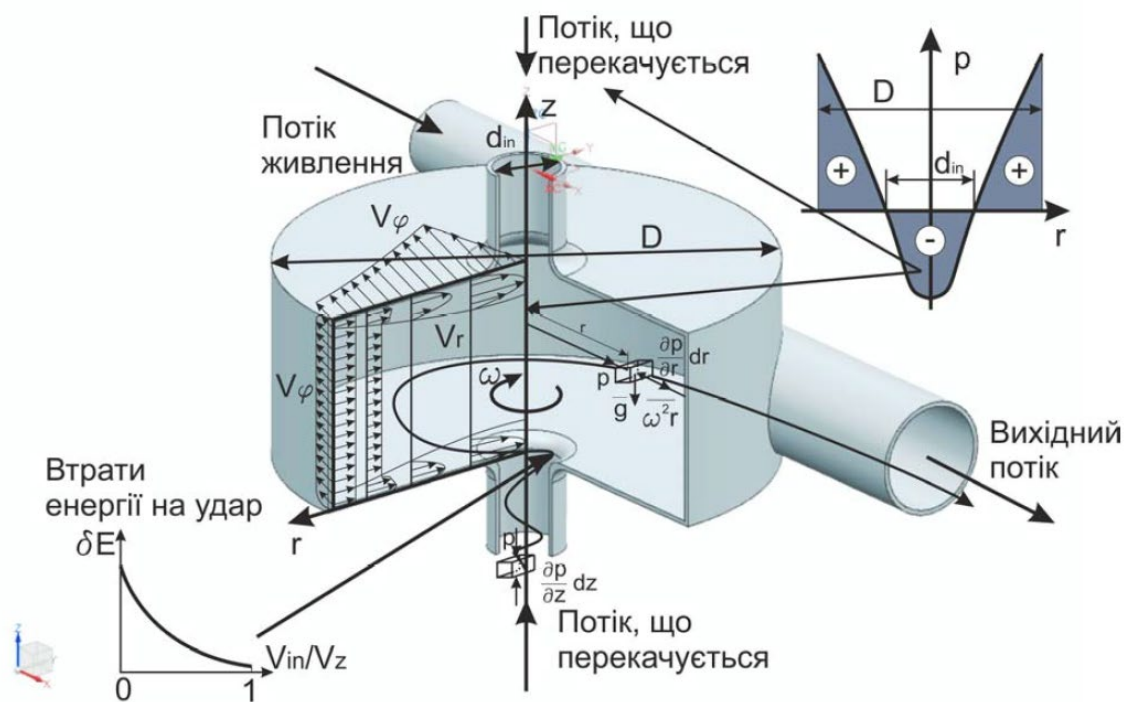


Рисунок 1.1 – Принципова схема роботи вихорокамерного струминного апарату [6]

Закручування потоку у вихорокамерному нагнітачі дозволяє інтенсифікувати процеси перенесення імпульсу та зменшити енергетичні втрати, пов'язані з неузгодженістю швидкісних полів. У порівнянні з прямоточними струминними апаратами, вихорокамерні нагнітачі демонструють вищі напірні характеристики за однакових витрат робочого струменя, що робить їх більш привабливими з погляду інженерної ефективності [7].

Важливою особливістю вихорокамерних нагнітачів є чутливість їх характеристик до геометрії проточних елементів і структури вхідного потоку [7]. Зокрема, суттєвий вплив на робочі параметри має спосіб формування закрученого руху: він може здійснюватися як за рахунок тангенціального підведення робочого струменя, так і шляхом попереднього закручування потоку в осьових або кільцевих каналах. Саме на цьому етапі задається співвідношення між осьовою та тангенціальною складовими швидкості, яке визначає інтенсивність вихрових процесів у камері.

Осьовий канал вихорокамерного нагнітача виконує подвійну функцію: з одного боку, він забезпечує підведення потоку до вихрової камери, а з іншого – формує початкові гідродинамічні умови для розвитку обертальної течії [9]. Зміна конструкції цього елемента може суттєво вплинути на характер руху суміші та кінцеві експлуатаційні характеристики нагнітача. У цьому контексті особливий інтерес становить застосування напрямних лопатевих апаратів, які дозволяють керовано змінювати кут закручування та енергетичний стан потоку ще до входу у вихрову камеру.

Таким чином, струминні та вихорокамерні нагнітачі являють собою перспективний клас безлопатевих машин, подальший розвиток яких пов'язаний із вдосконаленням методів керування потоками. Аналіз сучасного стану цих апаратів свідчить про доцільність детального дослідження конструктивних рішень, спрямованих на підвищення їх ефективності, серед яких використання напрямних лопатевих апаратів в осьовому каналі займає одне з ключових місць.

## **1.2. Основні енергетичні та витратно-напірні характеристики вихорокамерних нагнітачів**

Експлуатаційні властивості вихорокамерних нагнітачів, як і інших типів струминних апаратів, оцінюються за сукупністю гідродинамічних та енергетичних характеристик, що відображають здатність пристрою

підвищувати тиск і забезпечувати необхідну витрату нагнітального середовища. На відміну від обертових машин, параметри вихорокамерних нагнітачів визначаються не роботою робочого колеса, а ефективністю процесів обміну імпульсом між потоками та інтенсивністю вихрової течії [10].

Однією з основних характеристик є витратна характеристика, що встановлює залежність між витратою нагнітального потоку та режимом подачі робочого середовища. Зазвичай вона подається у вигляді безрозмірних коефіцієнтів або відношення витрат нагнітального та робочого потоків. Для вихорокамерних нагнітачів характерним є нелінійний характер цієї залежності, що пояснюється складною структурою течії у вихровій камері та впливом вторинних обертальних рухів.

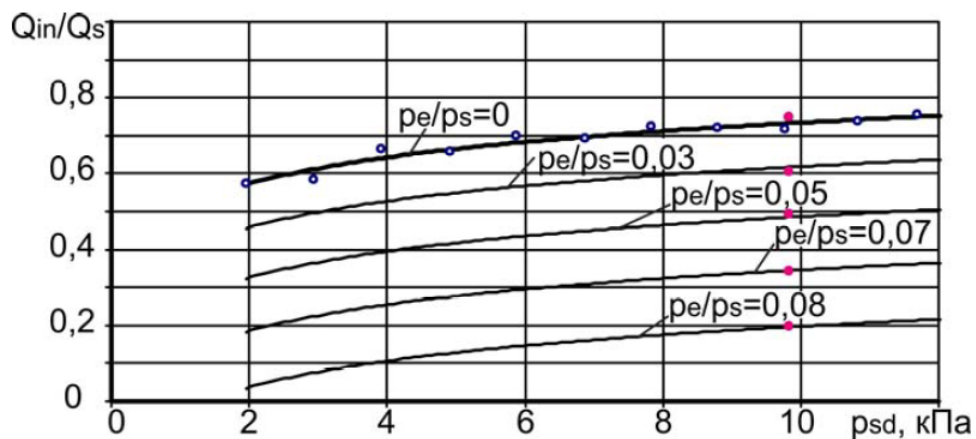


Рисунок 1.3 – Витратна характеристика, що встановлює залежність між витратою нагнітального потоку та режимом подачі робочого середовища у нагнітачі [6]

Другим важливим показником є напірна характеристика, яка відображає зміну приросту тиску між виходом і входом нагнітача залежно від робочого режиму. У вихорокамерних нагнітачах напір формується внаслідок перетворення частини кінетичної енергії закрученого потоку в енергію тиску. Інтенсивність цього процесу значною мірою визначається величиною тангенціальної складової швидкості та геометрією вихрової камери [11].

Особливістю напірних характеристик вихорокамерних нагнітачів є їх підвищена чутливість до передумов формування потоку. Зміна умов на вході, зокрема ступеня попереднього закручування, може призводити як до зростання максимального напору, так і до його зниження за інших режимів. Це зумовлює необхідність узгодження конструкції вхідних елементів із параметрами камери.

Для оцінювання енергоефективності використовується коефіцієнт корисної дії, який характеризує відношення корисної гідравлічної потужності нагнітального потоку до енергії, що надходить із робочим струменем. У вихорокамерних нагнітачах ККД, як правило, нижчий, ніж у відцентрових або осьових насосів, однак застосування вихрових ефектів дозволяє досягати вищих значень порівняно з класичними прямоточними струминними апаратами [12].

З практичного погляду важливе значення має узагальнення характеристик у безрозмірній формі, що дозволяє порівнювати різні конструктивні варіанти незалежно від абсолютних розмірів і режимів роботи. До таких параметрів належать коефіцієнти напору, витрати та енергетичної ефективності, сформовані на основі характерних швидкостей і геометричних розмірів апарата. Безрозмірний підхід є особливо доцільним для аналізу впливу конструктивних змін, зокрема застосування напрямних лопатевих апаратів.

Таким чином, витратно-напірні та енергетичні характеристики вихорокамерних нагнітачів формуються внаслідок складної взаємодії потоків у вихровій камері та значною мірою залежать від умов на вході в апарат. Це обґрунтовує доцільність детального дослідження конструктивних рішень, що дозволяють керувати структурою потоку, зокрема шляхом встановлення напрямного лопатевого апарата в осьовому каналі, що розглядається в наступних підрозділах.

### 1.3. Шляхи підвищення ефективності вихорокамерних нагнітачів

Підвищення ефективності вихорокамерних нагнітачів є одним із ключових завдань їх подальшого розвитку та практичного застосування. Обмежені значення коефіцієнта корисної дії, характерні для струминних і вихрових апаратів, зумовлені складною структурою течії, наявністю інтенсивних турбулентних пульсацій [13] та додаткових гідравлічних втрат [14]. У зв'язку з цим у наукових і прикладних дослідженнях запропоновано низку конструктивних і режимних заходів, спрямованих на покращення експлуатаційних характеристик таких нагнітачів.

Одним із традиційних шляхів підвищення ефективності є оптимізація геометрії вихрової камери. Зміна її діаметра, висоти та відносних розмірів каналів підведення і відведення потоку дозволяє впливати на інтенсивність вихрового руху та розподіл швидкостей у камері [15]. Невдало вибрані геометричні параметри можуть призводити до зон застійної течії або надмірних втрат енергії, тоді як раціональна форма камери сприяє стабілізації потоку та більш повному використанню його кутового моменту.

Іншим важливим напрямом є вдосконалення системи підведення робочого струменя. Кут входу струменя, форма сопла та місце його розташування суттєво впливають на характер формування вихору. Забезпечення плавного входу потоку у вихрову камеру зменшує локальні втрати енергії та покращує умови для обміну імпульсом між робочим і нагнітальним середовищами.

Значний інтерес становить застосування елементів керування потоком, до яких належать різноманітні напрямні, завихрювачі та лопатеві апарати. Їх використання дозволяє цілеспрямовано формувати початкову структуру потоку, змінюючи співвідношення між осьовою та тангенціальною складовими швидкості. Кероване закручування потоку ще до його входу у вихрову камеру створює передумови для підвищення напірних характеристик без суттєвого зростання енергетичних витрат [16].

Окремим шляхом підвищення ефективності є оптимізація режимів роботи нагнітача. Для вихорокамерних апаратів характерною є наявність діапазону режимів, у яких досягається відносно високий коефіцієнт корисної дії. Відхилення від цих режимів може спричинити різке зростання втрат, навіть за незначної зміни витрати або опору на виході. Тому узгодження параметрів нагнітача з умовами експлуатації є важливим фактором підвищення його ефективності.

Таким чином, аналіз наявних шляхів удосконалення вихорокамерних нагнітачів свідчить, що найбільш перспективним є підхід, заснований на керуванні структурою потоку. Зокрема, застосування напрямного лопатевого апарату в осьовому каналі дозволяє поєднати конструктивну простоту з можливістю впливу на енергетичні та витратно-напірні характеристики нагнітача, що робить цей напрям доцільним для подальшого дослідження.

#### **1.4. Закручення потоку в осьових каналах як метод покращення характеристик**

Закручення потоку в осьових каналах є одним із ефективних методів керування гідродинамічними процесами у струминних і вихорокамерних нагнітачах. Його сутність полягає у наданні потоку кутового моменту ще до входу у вихрову камеру, що дозволяє цілеспрямовано формувати структуру течії [17] та створювати сприятливі умови для подальшого енергообміну між потоками (рис. 1.4).

В осьових каналах закручений рух характеризується наявністю двох основних складових швидкості – осьової та тангенційної. Співвідношення між ними визначає інтенсивність вихрової течії та ступінь розвитку вторинних потоків. При раціональному виборі цього співвідношення досягається більш рівномірний розподіл швидкостей і тиску на вході у вихрову камеру, що зменшує локальні втрати енергії та сприяє стабілізації режиму роботи нагнітача.

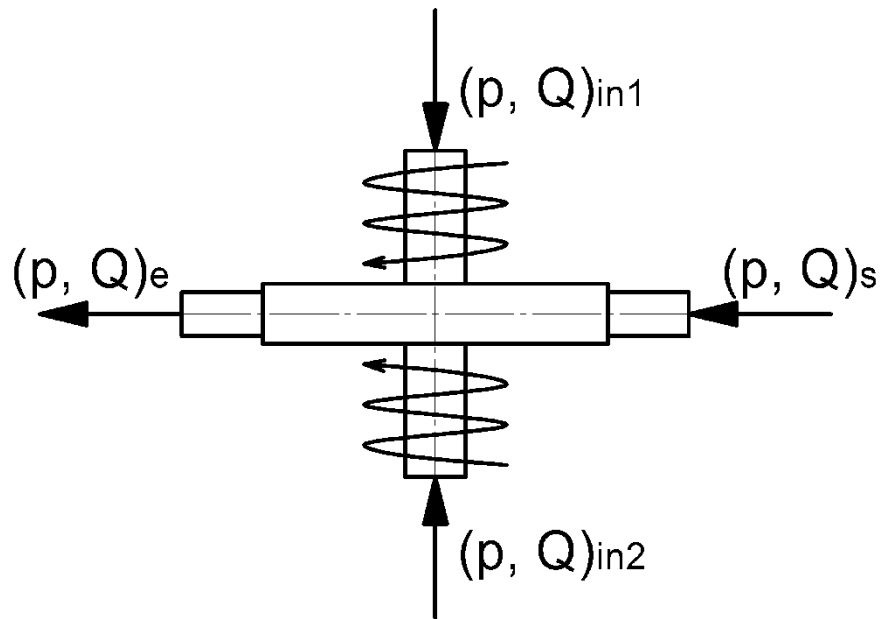


Рисунок 1.4 – Попереднє закручення потоку у вихорокамерному нагнітачі

Однією з важливих переваг закручення потоку в осьовому каналі є можливість відокремлення процесу формування вихору від процесу енергетичної взаємодії в камері. На відміну від випадку, коли закручування відбувається безпосередньо у вихровій камері, попереднє формування вихрової структури дозволяє зменшити зони інтенсивної турбулентності та некеровані вихрові розпади. Це позитивно відбивається на напірних характеристиках та коефіцієнті корисної дії нагнітача.

Закручення потоку в осьових каналах може здійснюватися різними способами, серед яких найбільш поширеним є застосування напрямних елементів – лопатевих апаратів або стаціонарних завихрювачів (Рис. 1.5). Такі пристрої змінюють напрям руху потоку, забезпечуючи плавний перехід від прямолінійної до гвинтової траєкторії. Важливою умовою при цьому є уникнення різких змін напрямку руху, які можуть спричинити додаткові гідравлічні втрати.

З погляду впливу на характеристики нагнітача, закручення потоку в осьовому каналі здатне призводити до зростання максимального напору та розширення робочого діапазону витрат. Водночас надмірне закручування може викликати негативні ефекти, зокрема збільшення втрат на тертя та

зниження енергетичної ефективності. Це зумовлює необхідність раціонального вибору параметрів закручування з урахуванням геометрії вихрової камери та умов експлуатації.

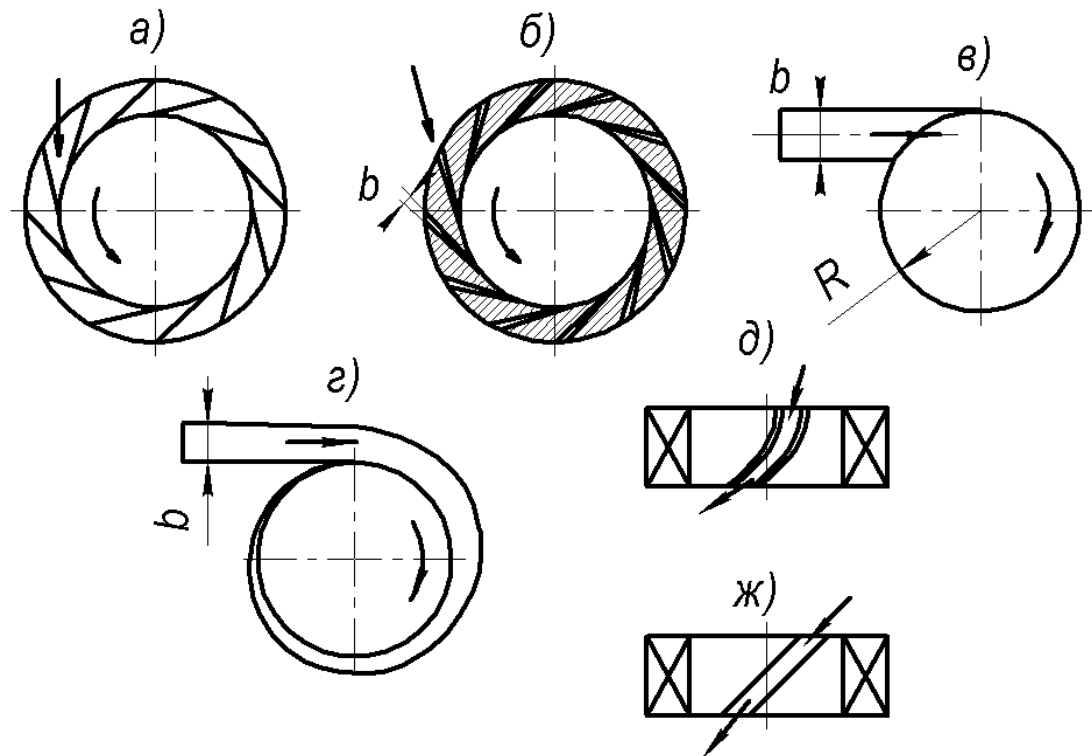


Рисунок 1.5 – Стационарні завихрювачі: а) лопатний; б) щілинний; в) із тангенціальним патрубком; г) завитковий; д, ж) торцеві лопатні

Таким чином, закручення потоку в осьових каналах слід розглядати як ефективний, але чутливий до конструктивних параметрів метод підвищення характеристик вихорокамерних нагнітачів. Найбільш перспективним технічним рішенням для реалізації цього підходу є використання прямого лопатевого апарата, вплив якого на робочі характеристики нагнітача є предметом подальшого детального аналізу в наступних розділах роботи.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ НАПРЯМНОГО ЛОПАТЕВОГО АПАРАТУ

#### 2.1. Формування закрученого потоку в осьовому каналі

Формування закрученого потоку в осьовому каналі є важливим етапом у роботі вихорокамерного нагнітача, оскільки саме на цій ділянці закладаються початкові умови руху потоку перед його входом у вихрову камеру. Характер розподілу швидкостей, тиску та кутового моменту, сформований в осьовому каналі, значною мірою визначає інтенсивність вихрових процесів і, відповідно, експлуатаційні характеристики нагнітача.

Закручений потік в осьовому каналі характеризується гвинтовою траєкторією руху частинок, при якій одночасно існують осьова та тангенційна складові швидкості [18]. Осьова складова забезпечує транспортування середовища вздовж каналу, тоді як тангенційна відповідає за обертальний рух потоку навколо осі. Співвідношення між цими складовими є визначальним параметром закрученого руху й залежить від способу його формування та геометрії каналу.

У випадку відсутності спеціальних напрямних елементів потік в осьовому каналі має переважно прямолінійний характер, а закручування формується вже у вихровій камері внаслідок взаємодії з тангенціальними струменями або стінками. Такий підхід призводить до різкого перерозподілу швидкостей і підвищених локальних втрат енергії. На відміну від цього, попереднє закручування потоку в осьовому каналі дозволяє сформувати більш узгоджену структуру течії ще до входу у вихрову камеру.

Процес формування закрученого потоку супроводжується виникненням радіального градієнта тиску, зумовленого відцентровими силами. Тиск зростає від осі каналу до його стінок, що призводить до нерівномірного розподілу швидкостей за радіусом. За раціональних умов це сприяє стабілізації потоку,

однак надмірне закручування може викликати появу застійних зон поблизу осі або інтенсифікацію втрат на тертя.

В осьових каналах кінцевої довжини важливу роль відіграє процес розвитку закрученої течії вздовж довжини каналу. На початковій ділянці відбувається формування гвинтового руху, далі можливий перерозподіл енергії між складовими швидкості внаслідок в'язких ефектів і взаємодії зі стінками. Тому параметри каналу, зокрема його довжина та відношення діаметра до довжини, впливають на ступінь збереження закрутки до моменту входу потоку у вихрову камеру [19].

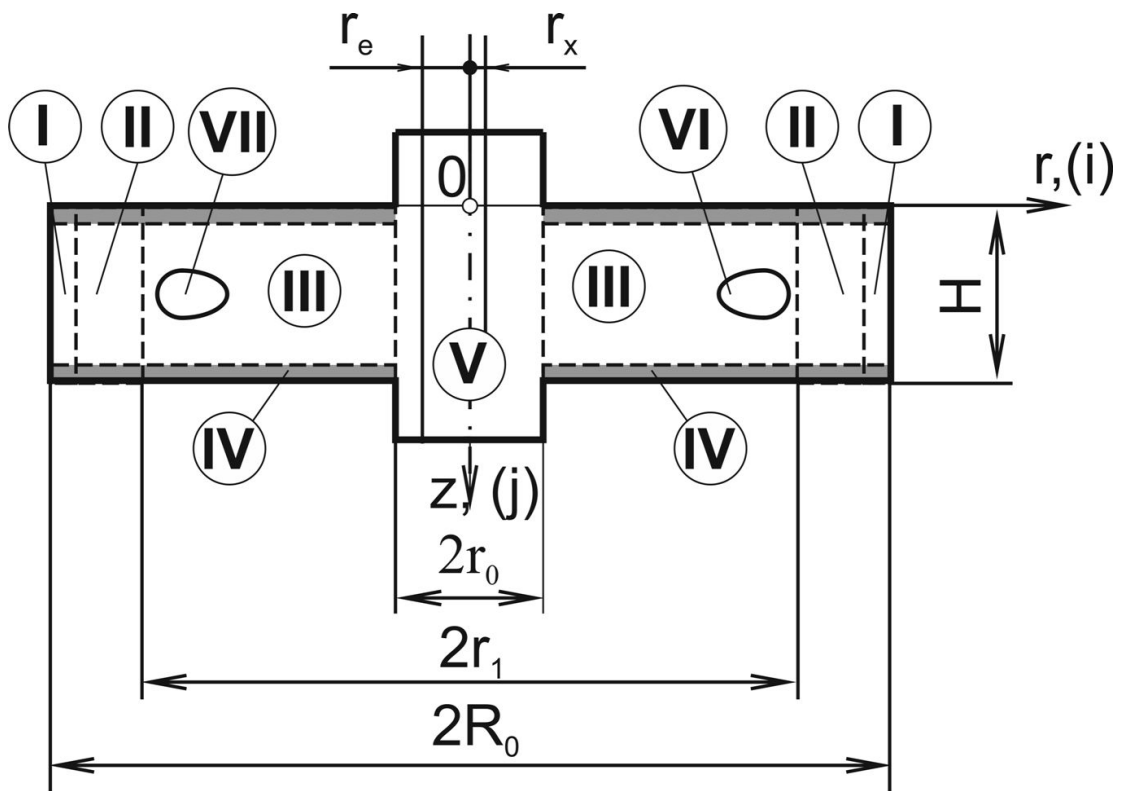
Таким чином, формування закрученого потоку в осьовому каналі є складним гідродинамічним процесом, що поєднує ефекти обертального руху, осьового транспорту та в'язкісних втрат. Керування цим процесом відкриває можливість цілеспрямованого впливу на характеристики вихорокамерного нагнітача. Найбільш ефективним і конструктивно реалізованим способом такого керування є застосування напрямного лопатевого апарата, принцип дії якого розглядається в наступному підрозділі.

## **2.2. Гідродинамічні процеси при змішуванні потоків у вихровій камері**

Гідродинамічні процеси, що відбуваються у вихровій камері нагнітача, є визначальними для формування його напірних та енергетичних характеристик. Саме в цій зоні здійснюється інтенсивне змішування робочого та нагнітального потоків, супроводжуване складною просторовою течією, значними градієнтами швидкості і тиску, а також розвитком вихрових структур різних масштабів.

Змішування потоків у вихровій камері відбувається в умовах суттєвого закручування, що приводить до формування обертального руху зі змінними параметрами вздовж радіуса та осі камери. Робочий потік, надходячи з високою швидкістю, передає частину свого імпульсу нагнітальному середовищу, унаслідок чого відбувається прискорення останнього та

зростання тиску суміші. При цьому ефективність такого обміну визначається ступенем узгодженості швидкісних полів взаємодіючих потоків.



- I - зона примезових шарів на боковій стінці вихрової камери;
- II - зона формування течії;
- III - центральна зона;
- IV - зона примезових шарів на торцевих кришках;
- V - зона витікання;
- VI - зона змішування із потоком живлення;
- VII - зона прийомного каналу

Рисунок 2.1 – Узагальнена розрахункова схема вихорокамерного нагнітача

Однією з характерних особливостей течії у вихровій камері є наявність радіального розподілу тиску, зумовленого відцентровими силами. Зі зростанням тангенціальної складової швидкості тиск поблизу периферії камери підвищується, тоді як у приосьовій зоні він залишається зниженим (рис. 2.1). Такий розподіл сприяє перерозподілу маси потоку та впливає на місце й інтенсивність процесу змішування.

Процес змішування у вихровій камері супроводжується розвитком турбулентності, інтенсивність якої залежить від відносних швидкостей потоків і ступеня їх закручування. Турбулентні пульсації відіграють подвійну роль: з одного боку, вони прискорюють обмін імпульсом і енергією між потоками, а з іншого – є джерелом додаткових гідравлічних втрат. Тому для досягнення високої ефективності нагнітача необхідний компроміс між інтенсивністю змішування та рівнем втрат енергії.

Важливим аспектом гідродинамічних процесів у вихровій камері є стабільність вихрової структури. За сприятливих умов обертальний рух зберігається на значній частині об'єму камери, забезпечуючи поступове та кероване змішування потоків. У разі ж невдалого поєднання геометричних параметрів і режимів роботи можливе виникнення вторинних вихорів, асиметрії течії або локальних зон рециркуляції, що негативно позначається на напірних характеристиках.

Таким чином, гідродинамічні процеси при змішуванні потоків у вихровій камері мають складний багатофакторний характер і чутливі до умов на вході в камеру. Попереднє формування закрученого потоку в осьовому каналі дає змогу впливати на структуру змішування, зменшуючи неузгодженість швидкостей і втрати енергії. Це визначає доцільність детального розгляду конструктивних засобів формування потоку, зокрема напрямного лопатевого апарата, вплив якого аналізується в наступних підрозділах.

### **2.3. Закручування потоку в лопатевих насосах і роль напрямного апарата**

У лопатевих насосах закручування потоку є невід'ємним елементом процесу передавання енергії від робочого органа до рідини (Рис. 2.2). Обертання робочого колеса формує потік зі значною тангенціальною складовою швидкості, унаслідок чого рідина набуває кутового моменту.

Подальше перетворення кінетичної енергії закрученого потоку в енергію тиску визначає напірні та енергетичні характеристики насоса.

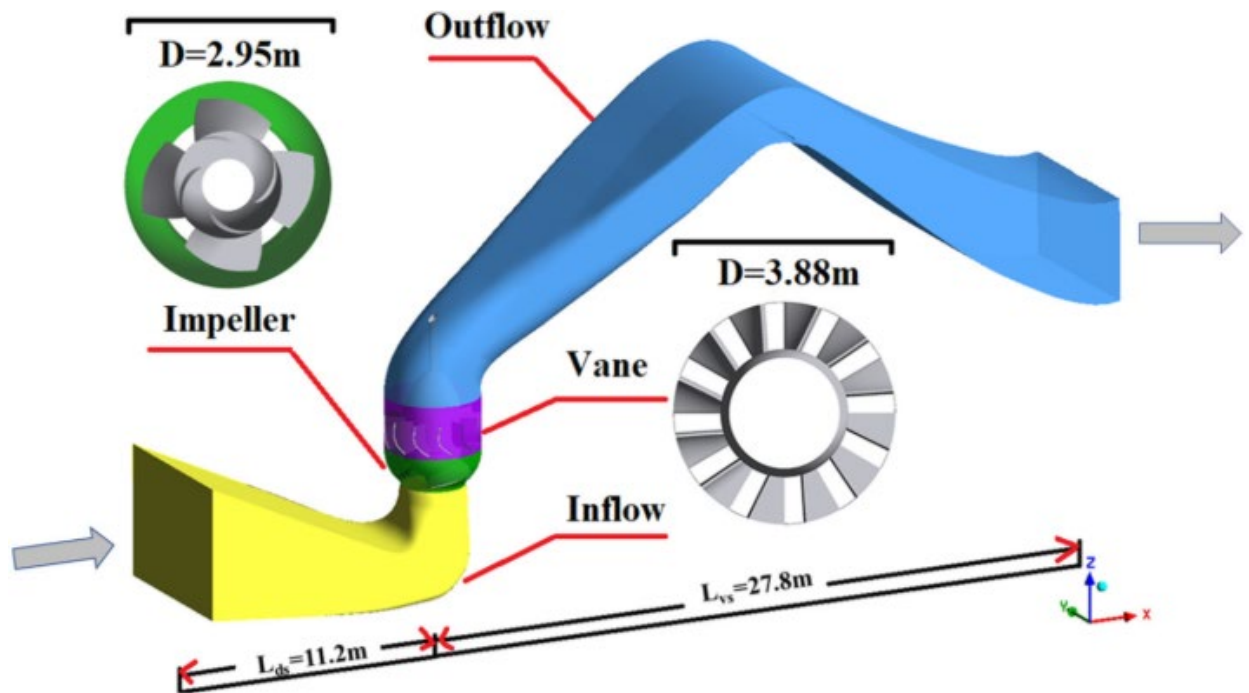


Рисунок 2.2 – Робоче колесо та напрямний апарат відцентрового насоса [20]

Після виходу з робочого колеса потік, як правило, має нерівномірний розподіл швидкостей і підвищений рівень турбулентності. Надмірна закрутка на цьому етапі може призводити до додаткових гідравлічних втрат і зниження коефіцієнта корисної дії. Для керування цими процесами в конструкції лопатевих насосів широко застосовуються напрямні апарати, розташовані за робочим колесом.

Напрямний апарат являє собою систему стаціонарних лопаток, основним призначенням яких є зміна напрямку руху потоку та зменшення його тангенціальної складової. У результаті відбувається часткове або повне вирівнювання швидкісного поля, а кінетична енергія обертального руху перетворюється в тиск. Таким чином, напрямний апарат відіграє ключову роль у підвищенні енергетичної ефективності лопатевих насосів.

Суттєвим ефектом застосування напрямного апарата є зменшення втрат у проточній частині. Плавна зміна напрямку потоку знижує інтенсивність вторинних течій і локальних відривів, що позитивно впливає на напірну характеристику насоса. Крім того, напрямний апарат сприяє стабілізації режиму роботи та розширенню робочого діапазону за витратою (Рис. 2.3).

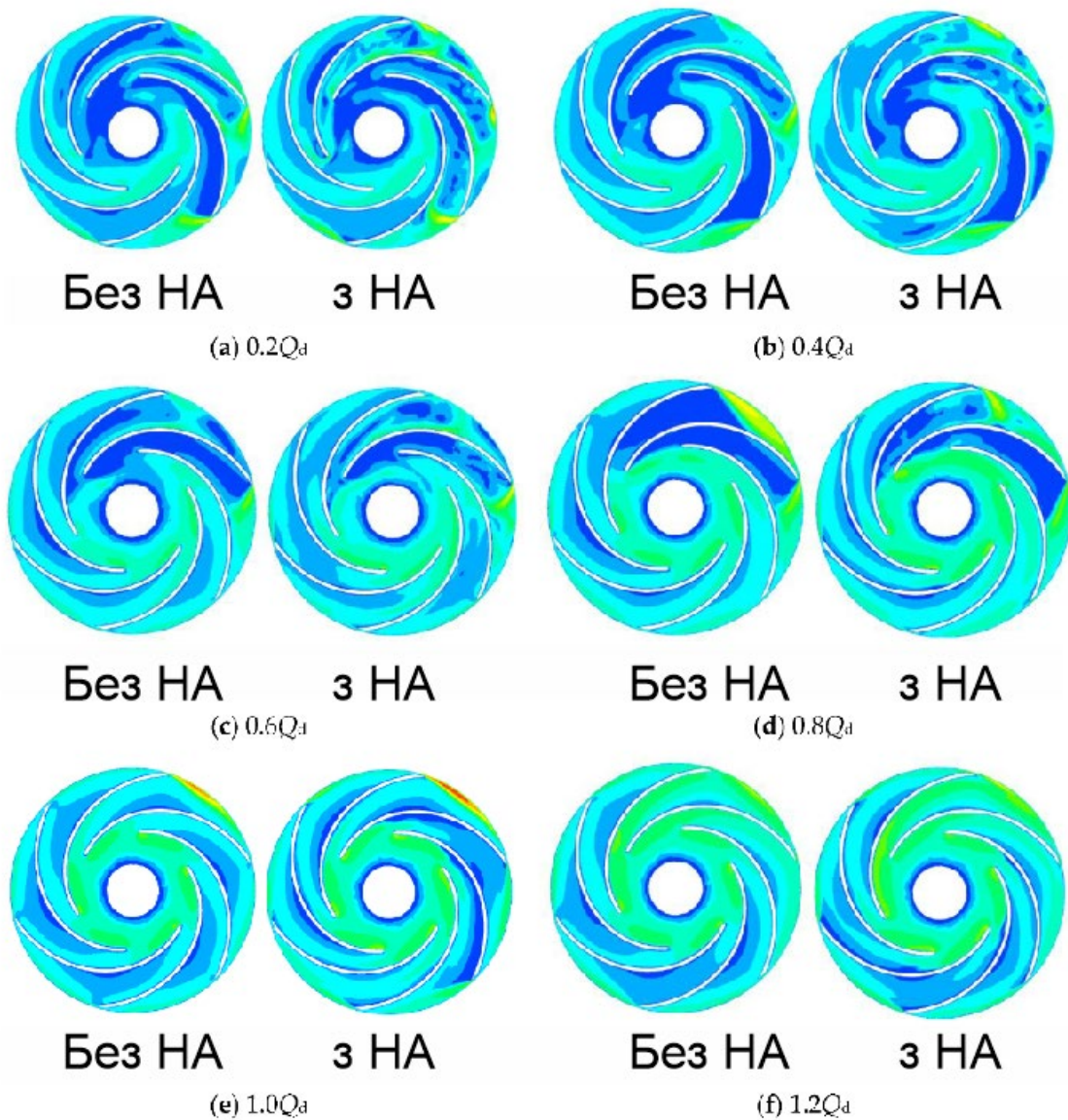


Рисунок 2.3 – Вплив напрямного апарату на розподіли швидкості у робочому колесі [21]

Досвід проектування лопатевих насосів свідчить, що ефективність напрямного апарата значною мірою залежить від кута установки лопаток та їх геометрії. Надмірне «гальмування» потоку може викликати зростання втрат, тоді як недостатнє – збереження значної закрутки на виході. Тому параметри напрямного апарата зазвичай узгоджуються з характеристиками робочого колеса та розрахунковим режимом роботи насоса.

Принципи, реалізовані в лопатевих насосах, мають важливе методичне значення і для інших класів гідродинамічних машин. Зокрема, ідея керованого формування та подальшого перетворення закрученого потоку може бути адаптована до вихорокамерних нагнітачів, у яких роль напрямного апарата полягає не в зменшенні закрутки, а в її раціональному формуванні ще до входу у робочу камеру. Це свідчить про універсальний характер підходу, заснованого на керуванні кутовим моментом потоку.

Таким чином, досвід використання напрямних апаратів у лопатевих насосах підтверджує доцільність застосування аналогічних елементів і в інших типах нагнітальних пристроїв. Аналіз цих принципів створює теоретичне підґрунтя для розгляду впливу напрямного лопатевого апарата в осьовому каналі вихорокамерного нагнітача.

#### 2.4. Критерії оцінки ступеня закручення потоку

Для аналізу впливу закручування потоку на робочі характеристики вихорокамерного нагнітача необхідно мати кількісні критерії, які дозволяють оцінювати інтенсивність обертального руху та порівнювати різні режими роботи й конструктивні варіанти. Такі критерії базуються на співвідношенні між осьовою та тангенційною складовими швидкості, а також на характеристиках кутового моменту потоку.

$$\vec{v} = v_z \vec{e}_z + v_\theta \vec{e}_\theta,$$

де  $v_z$  – осьова складова швидкості;  $v_\theta$  – тангенційна складова.

Найпростішим і водночас наочним показником є відношення тангенціальної та осьової складових середньої швидкості в перерізі осьового каналу або на вході у вихрову камеру. Це відношення відображає характер траєкторії руху частинок потоку: за малих значень переважає прямолінійний рух, тоді як зі зростанням тангенційної складової траєкторія наближається до гвинтової. Такий показник зручний для якісного порівняння течій, однак не враховує радіальний розподіл швидкостей.

$$S_v = \frac{v_\theta}{v_z} = \operatorname{tg} \alpha .$$

Більш узагальненим критерієм є інтегральна характеристика кутового моменту потоку, яка враховує внесок усіх елементарних струменів у поперечному перерізі каналу. Фізично цей параметр відображає здатність потоку підтримувати обертальний рух і визначає інтенсивність відцентрових сил у вихровій камері. Зі зростанням кутового моменту збільшується радіальний градієнт тиску, що безпосередньо впливає на напірні характеристики нагнітача. Інтегральний момент імпульсу потоку:

$$L = \int \rho v_\theta r dA; \quad \Delta p \sim \rho \frac{v_\theta^2}{2}$$

У практичних розрахунках і експериментальних дослідженнях часто застосовують безрозмірні критерії закручування, які дозволяють порівнювати апарати різних розмірів і режимів роботи. Використання безрозмірних параметрів особливо доцільне для аналізу впливу напрямного лопатевого апарата, оскільки такий підхід дає змогу відокремити ефект геометрії від впливу витрати або швидкості потоку.

Важливим аспектом оцінки ступеня закручення є врахування радіальної нерівномірності потоку. У реальних умовах тангенційна швидкість, як правило, змінюється від осі каналу до його стінки, що може призводити до неоднорідного розподілу енергії та локальних втрат. Тому для коректного аналізу доцільно використовувати усереднені по перерізу значення або інтегральні критерії, які характеризують потік у цілому.

З погляду впливу на характеристики вихорокамерного нагнітача важливою є наявність оптимального ступеня закручення. Недостатнє закручування не забезпечує повного використання вихрових ефектів і призводить до зниження напору, тоді як надмірне – спричиняє зростання втрат на тертя та турбулентність. Отже, критерії оцінки ступеня закручення повинні розглядатися не ізольовано, а у зв'язку з напірними та енергетичними показниками нагнітача.

Таким чином, застосування кількісних критеріїв оцінки ступеня закручення потоку створює необхідну основу для аналізу впливу напрямного лопатевого апарата на характеристики вихорокамерного нагнітача. Використання цих критеріїв дозволяє перейти від якісного опису течії до порівняльної оцінки різних конструктивних і режимних рішень, що буде використано в подальших розділах роботи.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРАХУНОК ТЕЧІЇ У ВИХРОКАМЕРНОМУ НАГНІТАЧІ

#### 3.1. Конструктивна схема вихорокамерного нагнітача з напрямним лопатевим апаратом

Вихорокамерний нагнітач з напрямним лопатевим апаратом являє собою струминний пристрій, у якому керування структурою потоку здійснюється за рахунок формування закрученого руху ще в осьовому каналі до входу у вихрову камеру. Таке конструктивне рішення дозволяє цілеспрямовано впливати на початкові гідродинамічні умови процесу змішування потоків і, відповідно, на напірні та енергетичні характеристики нагнітача.

Типова конструктивна схема нагнітача (Рис. 3.1) включає сопло робочого струменя, осьовий канал, напрямний лопатевий апарат, вихрову камеру та вихідний патрубок. Робоче середовище надходить через сопло з підвищеною швидкістю, створюючи умови для захоплення і прискорення нагнітального потоку. Наявність осьового каналу забезпечує стабільне підведення потоку до вихрової камери, а встановлений у ньому напрямний лопатевий апарат формує необхідний ступінь закручення.

Лопатки напрямного апарата розташовуються таким чином, щоб змінювати напрям руху потоку, надаючи йому тангенційної складової швидкості. У результаті на виході з осьового каналу формується закручений потік із гвинтовою траєкторією руху, який надходить у вихрову камеру з уже сформованим кутовим моментом. Це дозволяє зменшити різкі перетворення течії у камері та знизити локальні гідравлічні втрати.

Швидкісний вектор закрученого потоку після проходження напрямного апарата може бути поданий у вигляді суми складових -  $\vec{v} = v_z \vec{e}_z + v_\theta \vec{e}_\theta$ .

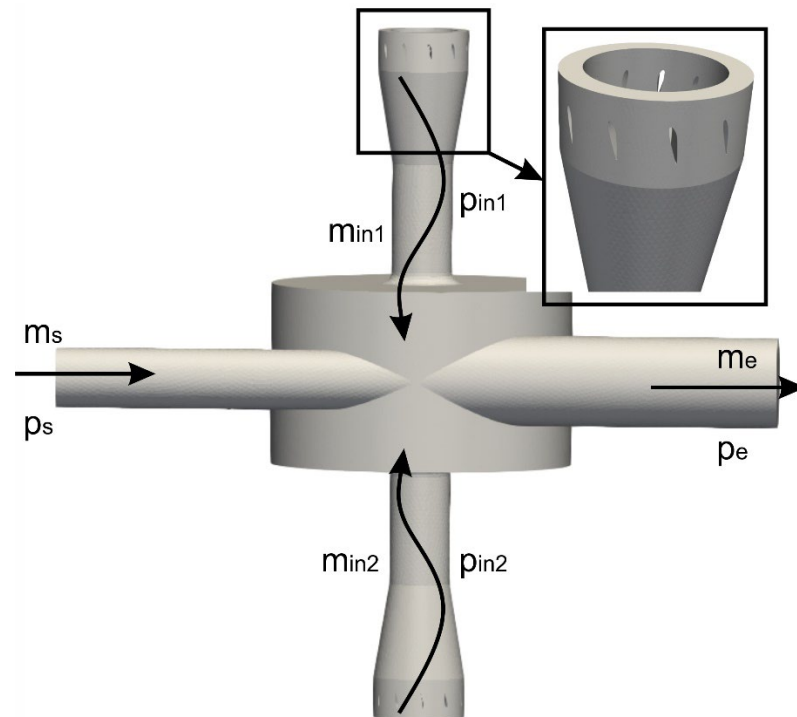


Рисунок 3.1 – Схематична будова вихорокамерного нагнітача з напрямним лопатевим апаратом в осьовому каналі

Саме співвідношення цих складових визначає інтенсивність закручування, що формується напрямним апаратом. Витрата потоку в осьовому каналі визначається рівнянням неперервності:

$$Q = \int_A v_z dA.$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу каналу.

Таким чином, геометричні параметри осьового каналу та напрямного апарата безпосередньо впливають на значення осьової швидкості і, відповідно, на структуру потоку перед входом у вихрову камеру.

Закручений потік, сформований у осьовому каналі, надходить у вихрову камеру з певним кутовим моментом, який може бути охарактеризований інтегральною залежністю

$$L = \int_A \rho v_\theta r dA.$$

де  $r$  – радіус відносно осі каналу. Наявність кутового моменту зумовлює розвиток відцентрових сил у вихровій камері та появу радіального градієнта тиску.

Якісно вплив закручування потоку на зростання тиску у вихровій камері може бути оцінений залежністю  $\Delta p \sim \rho \frac{v_\theta^2}{2}$ , з якої випливає, що збільшення тангенціальної складової швидкості, сформованої напрямним лопатевим апаратом, приводить до зростання тиску в периферійних зонах потоку.

### **3.2. Чисельне моделювання течії у вихорокамерному нагнітачі з напрямним лопатевим апаратом**

Для аналізу впливу напрямного лопатевого апарата на характеристики вихорокамерного нагнітача в межах даної роботи використано чисельне моделювання (CFD – Computational Fluid Dynamics) течії робочого середовища. Метою CFD-аналізу було визначення особливостей формування закрученого потоку, розподілу тиску у вихровій камері та оцінка впливу ступеня закручення на напірні характеристики нагнітача. Чисельне дослідження виконувалось у квазістаціонарній постановці.

**3.2.1. Математична модель течії.** Течія у вихорокамерному нагнітачі є тривимірною та турбулентною. У зв'язку з цим математичний опис виконувався на основі осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини.

Рівняння нерозривності має вигляд

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0;$$

Осереднене рівняння імпульсу записується у формі

$$\rho \left( u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}).$$

Останній член описує рейнольдсові напруження, які враховують вплив турбулентних пульсацій швидкості на середній рух потоку та потребують моделювання.

**3.2.2. Модель турбулентності.** Для замикання системи осереднених рівнянь використовувалася двопараметрична модель турбулентності  $k - \varepsilon$ , яка широко застосовується для течій із закрученням, рециркуляцією та інтенсивним перемішуванням. Турбулентна в'язкість визначається співвідношенням

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

де  $k$  – турбулентна кінетична енергія,  $\varepsilon$  – швидкість її дисипації.

Рівняння для турбулентної кінетичної енергії має вигляд

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon.$$

Рівняння для швидкості дисипації турбулентної енергії

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

де  $G_k$  – член генерації турбулентної енергії, зумовлений градієнтами середньої швидкості.

**3.2.3. Граничні умови та параметр закручення.** На вході в осьовий канал задавалось штучне закручення тангенціальною компонентою швидкості для розрахунку без лопатевого напрямного апарату. Тангенціальна складова швидкості формувалась у результаті взаємодії потоку з напрямним лопатевим апаратом. Для моделювання закручення та границя Opening для випадку використання лопатевого напрямного апарату. На вході вказувався загальний тиск живлення, на виході – статичний нульовий тиск.

### 3.3. Вплив штучного закручення без напрямного апарату

Коефіцієнт корисної дії вихорокамерного нагнітача визначався на основі співвідношення між корисною гідравлічною потужністю та потужністю робочого потоку. Для подальшого аналізу використовувалась відносна величина коефіцієнта корисної дії, що дозволяє оцінити ефективність застосування напрямного лопатевого апарату незалежно від абсолютних значень параметрів режиму роботи.

$$\eta = \frac{p_e Q_{in}}{p_s Q_s} = \frac{\left( p_e - p_{in} + \frac{\rho(V_e^2 - V_{in}^2)}{2} \right) Q_{in}}{\left( p_s - p_e + \frac{\rho(V_s^2 - V_e^2)}{2} \right) Q_s}; \quad \bar{\eta} = \eta / \eta_0,$$

Результати розрахунку залежності відносного коефіцієнта корисної дії від ступеня закручення потоку наведені на рис. 3.2. Як параметр, що характеризує інтенсивність закручення, використано відношення тангенціальної та осьової складових швидкості на вході у вихрову камеру.

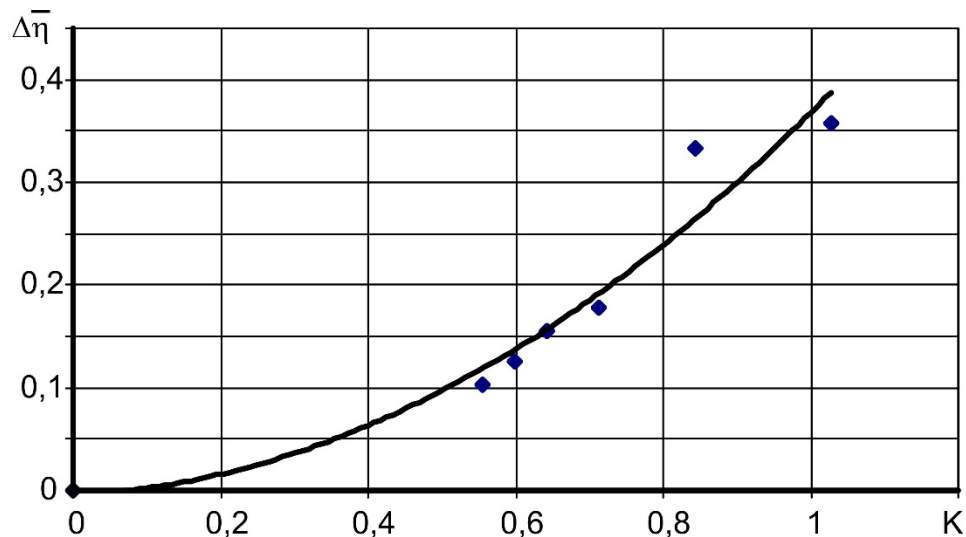


Рисунок 3.2 – Залежність відносної зміни коефіцієнта корисної дії вихорокамерного нагнітача від ступеня закручення потоку

Аналіз наведених даних показує, що зі зростанням ступеня закручення потоку відносний коефіцієнт корисної дії монотонно збільшується. Це свідчить про підвищення ефективності процесу передачі енергії від робочого потоку до потоку, що перекачується, при застосуванні попереднього закручення. Отримана тенденція узгоджується з фізичною моделлю роботи вихорокамерного нагнітача. Попереднє закручення потоку зменшує втрати енергії на удар у процесі змішування взаємодіючих потоків, а також знижує витрати енергії основного потоку на розкручування потоку, що перекачується. У сукупності це призводить до зростання енергетичної ефективності нагнітача. За результатами розрахунків встановлено, що відносне зростання коефіцієнта корисної дії може досягати близько 35 %.

Додатково було проаналізовано вплив ступеня закручення на розподіл тиску у центральній частині вихрової камери. Відповідні результати наведено на рис. 3.3.

З наведених результатів видно, що зі збільшенням закручення потоку спостерігається зменшення середнього вакуумметричного тиску в приосьовій області вихрової камери. Це пояснюється перерозподілом кінетичної енергії

між осьовою та тангенціальною складовими швидкості та зростанням ролі відцентрових сил.

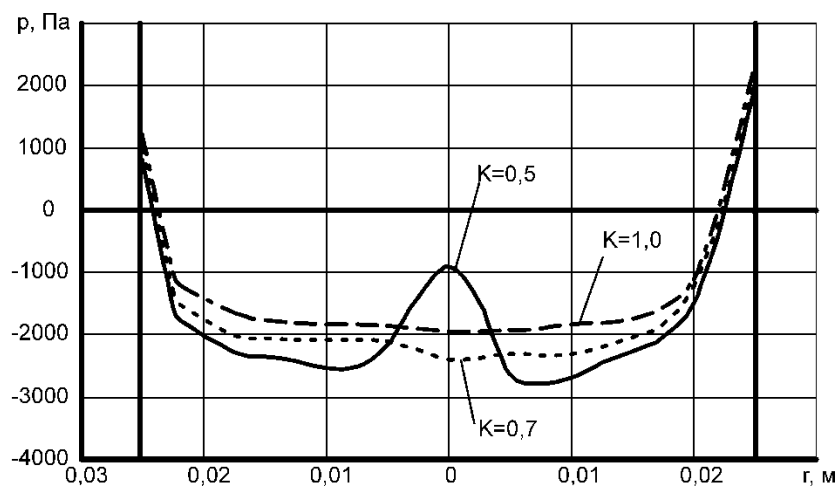


Рисунок 3.3 – Зміна тиску в центральній зоні вихрової камери залежно від ступеня закручення потоку

Разом із цим було досліджено вплив попереднього закручення на розподіл тангенціальної складової швидкості у вихровій камері. Відповідні результати подано на рис. 3.4.

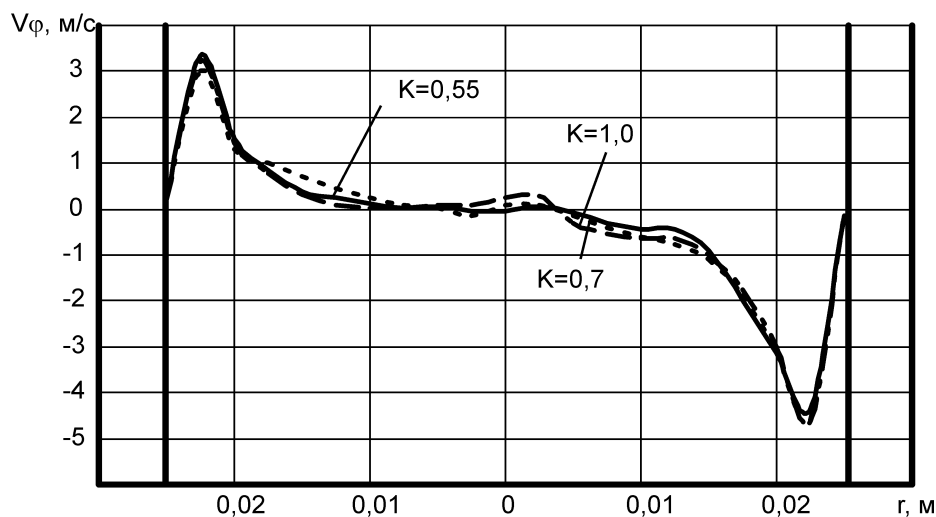


Рисунок 3.4 – Розподіл тангенціальної складової швидкості у вихровій камері при різних ступенях закручення вхідного потоку

З аналізу отриманих залежностей випливає, що попереднє закручення потоку практично не впливає на розподіл тангенційної складової швидкості безпосередньо у вихровій камері. Аналогічний висновок отримано й для осьової складової швидкості, яка в області горла нагнітача залишається практично сталою та не залежить від величини закручення.

Таким чином, зростання коефіцієнта корисної дії при використанні напрямного лопатевого апарата обумовлене не зміною швидкісної структури потоку у вихровій камері, а зменшенням енергетичних втрат на стадії входу та змішування потоків.

## РОЗДІЛ 4

### ВПЛИВ ЛОПАТЕВОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХОРОКАМЕРНОГО НАГНІТАЧА

#### 4.1. Вплив лопатевого напрямного апарата на коефіцієнт корисної дії

На рис. 4.1 наведено залежність відносної зміни коефіцієнта корисної дії вихорокамерного нагнітача від ступеня закручення потоку, що перекачується. Як базовий прийнято режим роботи нагнітача без попереднього закручення потоку, відносно якого оцінюється зміна енергетичної ефективності при застосуванні напрямного лопатевого апарата.

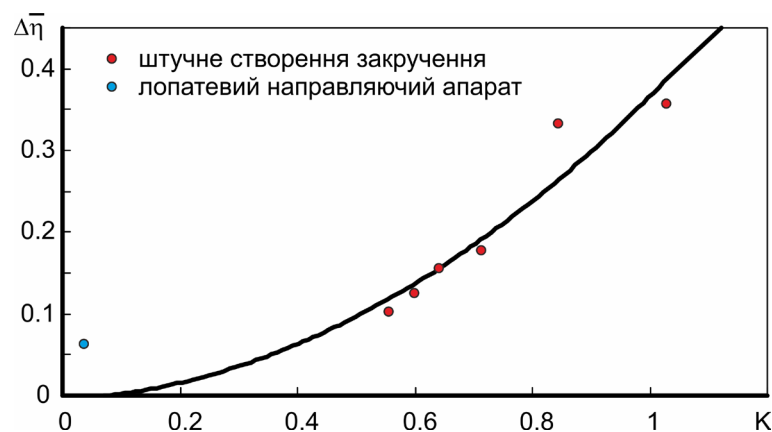


Рисунок 4.1 – Залежність відносної зміни ККД ВКН від ступеня закручення потоку, що перекачується

Аналіз наведеної залежності показує, що зі зростанням ступеня закручення потоку спостерігається стійке зростання відносного коефіцієнта корисної дії нагнітача. При малих значеннях закручення приріст ККД є незначним, що свідчить про недостатній вплив закручування на процес взаємодії робочого та перекачуваного потоків. У цьому режимі основна частина енергії робочого струменя витрачається на формування обертального руху без істотного підвищення ефективності переносу імпульсу.

Подальше збільшення ступеня закручення приводить до помітного зростання відносного ККД. Це вказує на те, що попереднє закручення потоку створює більш сприятливі умови для процесу змішування потоків у вихровій камері, зменшуючи втрати енергії на неузгоджену взаємодію швидкісних полів. У даному діапазоні закручення напрямний лопатевий апарат виконує свою основну функцію – забезпечує узгодження структури перекачуваного потоку з характером руху робочого струменя.

З наведеного графіка випливає, що в області найбільших значень ступеня закручення досягається максимальний приріст відносного коефіцієнта корисної дії, який може сягати приблизно 30–35 % порівняно з базовим варіантом без закручення. При цьому характер кривої свідчить про поступове насичення ефекту: подальше збільшення закручення не призводить до різкого зростання ККД, що вказує на наближення до оптимального режиму роботи нагнітача.

Отримана залежність підтверджує доцільність застосування напрямного лопатевого апарата для підвищення енергетичної ефективності вихорокамерного нагнітача. Водночас результати свідчать, що ефект від закручення має оптимальний характер і визначається раціональним вибором параметрів напрямного апарата та режимів роботи нагнітача. Таким чином, аналіз залежності відносної зміни коефіцієнта корисної дії від ступеня закручення потоку дозволяє зробити висновок, що попереднє закручення потоку є ефективним засобом підвищення ККД вихорокамерного нагнітача, однак потребує узгодження з іншими елементами проточної частини та робочими режимами.

Зростання коефіцієнта корисної дії ВКН зі збільшенням ступеня закручення потоку має чітке фізичне пояснення. У базовому режимі роботи без попереднього закручення потік, що перекачується, надходить у вихрову камеру з переважно осьовим напрямком швидкості. У цьому випадку значна частина енергії робочого струменя витрачається на формування обертального руху та подолання неузгодженості між напрямками руху взаємодіючих

потоків. Такий характер взаємодії супроводжується підвищеними втратами енергії і, відповідно, зниженим коефіцієнтом корисної дії.

При попередньому закручуванні перекачуваного потоку в осьовому каналі структура його руху стає більш узгодженою з характером течії у вихровій камері. Потік надходить у камеру вже з наявною тангенціальною складовою швидкості, що зменшує необхідність додаткових енергетичних витрат робочого струменя на розкручування середовища. У результаті підвищується частка енергії, що безпосередньо використовується на створення напору.

Важливу роль відіграє також зміна умов процесу змішування потоків. За наявності попереднього закручення зменшується інтенсивність локальних ударних взаємодій між потоками і вирівнюється розподіл швидкостей у зоні змішування. Це призводить до зниження турбулентних втрат, які в базовому режимі є однією з основних причин зменшення енергетичної ефективності вихорокамерних нагнітачів. Зі зростанням ступеня закручення покращується процес передачі імпульсу від робочого потоку до перекачуваного. Завдяки цьому збільшується гідравлічна складова корисної потужності при практично незмінних витратах енергії робочого струменя. Саме цей механізм зумовлює зростання відносного коефіцієнта корисної дії, показане на рис. 4.1.

Таким чином, зростання енергетичної ефективності ВКН при закручуванні потоку обумовлене сукупністю факторів: зменшенням втрат на формування вихору, покращенням умов змішування потоків і більш ефективною передачею імпульсу. Отримані результати підтверджують, що застосування ЛНП є доцільним, однак ефективність цього технічного рішення визначається раціональним вибором ступеня закручення потоку.

#### **4.2. Вплив ступеня закручення на тиск у вихровій камері**

Одним із важливих наслідків закручування потоку, що перекачується, є зміна розподілу тиску у вихровій камері ВКН. Аналіз впливу ступеня

закручення на тиск у центральній частині камери дозволяє більш глибоко пояснити причини зростання енергетичної ефективності. На рис. 4.2 наведено залежність тиску у вихровій камері від ступеня закручення потоку, що перекачується. Значення тиску наведено у відносному вигляді, що дає змогу порівнювати режими роботи незалежно від абсолютних параметрів нагнітача.

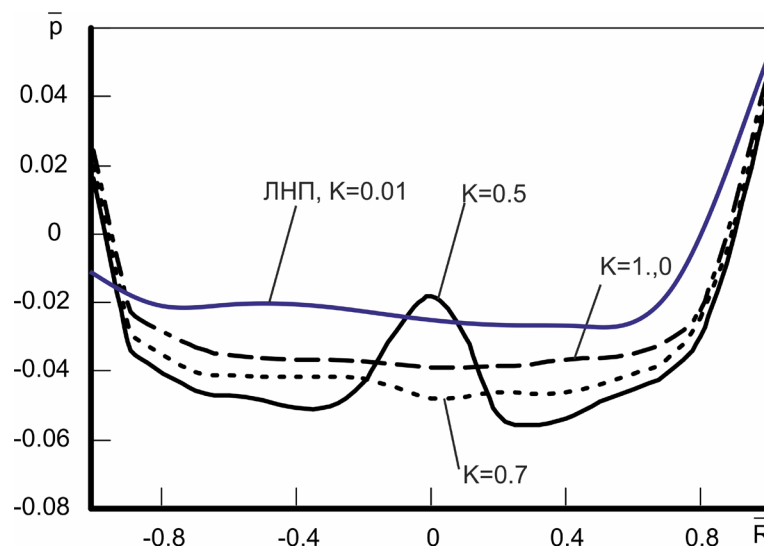


Рисунок 4.2 – Розподіл відносного тиску в центрі вихрової камери в залежності від ступеня закручення вхідного потоку (тиск віднесено до повного тиску в каналі живлення)

З аналізу наведених даних випливає, що зі зростанням ступеня закручення потоку спостерігається зменшення тиску в приосьовій зоні вихрової камери. Така тенденція пов'язана з посиленням обертального руху середовища, внаслідок чого збільшується роль відцентрових сил і відбувається перерозподіл тиску в радіальному напрямку. Зниження тиску в центральній частині вихрової камери супроводжується відповідним підвищенням тиску поблизу периферійних зон. Це створює сприятливі умови для більш ефективного перетворення кінетичної енергії закрученого потоку в енергію тиску, що безпосередньо впливає на напірні характеристики нагнітача.

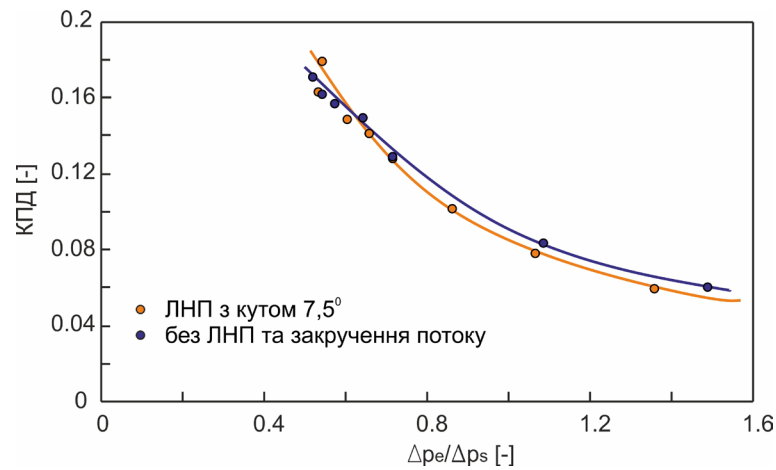
Характер зміни тиску при збільшенні ступеня закручення узгоджується з отриманими раніше результатами щодо зростання коефіцієнта корисної дії.

Поліпшення енергетичної ефективності в цьому випадку обумовлене не стільки зростанням швидкостей у вихровій камері, скільки більш раціональним їх перерозподілом і зменшенням втрат на внутрішнє гальмування потоку. Разом з тим, наведена залежність свідчить про наявність обмежень щодо подальшого збільшення ступеня закручення. Надмірне зниження тиску в центральній зоні може призводити до небажаних гідродинамічних явищ, зокрема до інтенсифікації рециркуляційних зон або нестійкості течії. Це підтверджує необхідність вибору оптимального діапазону закручення, який забезпечує підвищення ефективності без погіршення умов течії у вихровій камері.

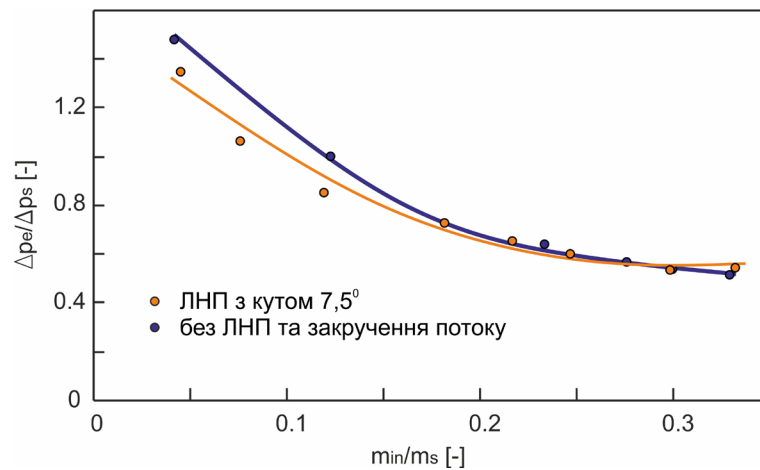
Таким чином, аналіз впливу ступеня закручення потоку на тиск у вихровій камері показує, що попереднє закручування є ефективним механізмом керування напірними властивостями ВКН.

#### **4.3. Аналіз впливу лопатевого напрямного апарату на характеристики вихорокамерного нагнітача**

На рис. 4.3а наведено залежність ККД ВКН від співвідношення тисків на виході з нагнітача. Як параметр режиму використано відношення тисків, яке характеризує ступінь навантаження нагнітача при заданих умовах роботи. У конструкції без напрямного апарату зі збільшенням співвідношення тисків спостерігається більш різке зниження коефіцієнта корисної дії. Це свідчить про зростання енергетичних втрат при роботі нагнітача в умовах підвищеного навантаження, що обумовлено неузгодженим формуванням вихрової течії у вихровій камері. З наведеного графіка видно, що коефіцієнт корисної дії суттєво залежить від співвідношення тисків на виході з нагнітача. У межах дослідженого діапазону зміна навантаження супроводжується помітною зміною значень ККД, що свідчить про виражений режимний характер роботи вихорокамерного нагнітача.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Вплив лопатевого направляючого апарату на характеристики ВКН: а) залежність КПД від співвідношення тисків на виході з насоса; б) характеристика ВКН

При зростанні співвідношення тисків спостерігається зміна коефіцієнта корисної дії, причому крива має чітко виражену нерівномірну форму. Це вказує на існування області режимів, за яких енергетична ефективність нагнітача є більшою, а також областей, у яких спостерігається її зниження. Таким чином, робота нагнітача характеризується наявністю діапазону найбільш доцільних режимів з точки зору енергетичних показників. Подальше збільшення співвідношення тисків не приводить до монотонного зростання коефіцієнта корисної дії.

На рис. 4.3б наведена характеристика, що відображає зміну робочих параметрів нагнітача у залежності від умов роботи та дозволяє оцінити вплив напрямного апарату на поведінку нагнітача. Форма наведеної характеристики узгоджується з результатами аналізу коефіцієнта корисної дії і підтверджує, що застосування ЛНА є доцільним насамперед у режимах з малим вихідним спротивом. У цих умовах напрямний апарат забезпечує попереднє закручення потоку без додаткових витрат енергії, а гідравлічні втрати в ньому не перевищують отриманого позитивного ефекту. Таким чином, результати, наведені на рис. 4.3, свідчать про те, що ефективність використання ЛНА у ВКН суттєво залежить від режиму роботи і визначається співвідношенням між гідравлічними втратами в апараті та зменшенням енергетичних витрат на формування закрученого потоку.

#### 4.4 Аналіз ліній течії

Як було показано раніше, застосування ЛНА забезпечує приріст ККД ВКН приблизно на 5,9 %, однак цей ефект проявляється лише за малих значень спротиву на виході з нагнітача. Із зростанням вихідного спротиву позитивний вплив ЛНА на роботу нагнітача поступово зменшується і врешті практично нівелюється. Пояснення отриманого ефекту ґрунтується на зміні характеру течії у вихровій камері при використанні лопатевого напрямного апарату. На рис. 4.4 наведено просторову структуру ліній течії в вихорокамерному нагнітачі для випадків без ЛНА та з ЛНА. У разі відсутності напрямного апарату потрапляння частинок рідини до вихрової камери супроводжується їх закручуванням за спіральною траєкторією. Такий характер руху сприяє інтенсивній взаємодії потоку з центральними зонами камери та супроводжується підвищеними втратами енергії.

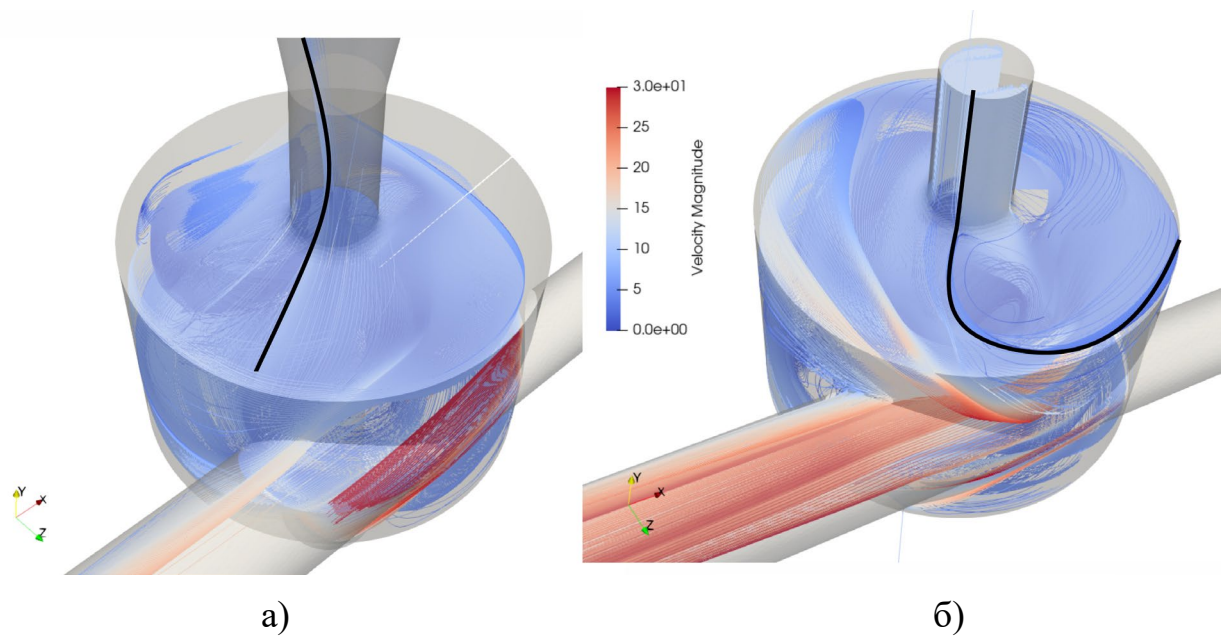


Рисунок 4.4 – Лінії течії потоку, що всмоктується у вихрову камеру: а) з ЛНА; б) без ЛНА

Наявність ЛНА істотно змінює траєкторію руху частинок. Після проходження ЛНА потік набуває гвинтоподібного характеру руху, при цьому в межах вихрової камери частинки рідини переважно переміщуються в області примежового шару. Така особливість течії добре простежується на рис. 4.5, де показано розподіл швидкостей та напрямків руху потоку в поперечному перерізі вихрової камери.

Переміщення основної маси потоку поблизу стінок камери приводить до зміни характеру взаємодії робочого і перекачуваного потоків. У результаті зменшуються втрати, пов'язані з неузгодженим входом потоку до вихрової камери, і підвищується ефективність передачі енергії від робочого струменя. Саме цей механізм обумовлює зростання ККД при використанні ЛНА в умовах малих вихідних спротивів.

Зі збільшенням спротиву на виході з ВКН вплив зміни структури течії поступово зменшується. Зростаючі гідравлічні втрати в проточній частині нагнітача та у самому напрямному апараті компенсують позитивний ефект від попереднього закручення потоку.

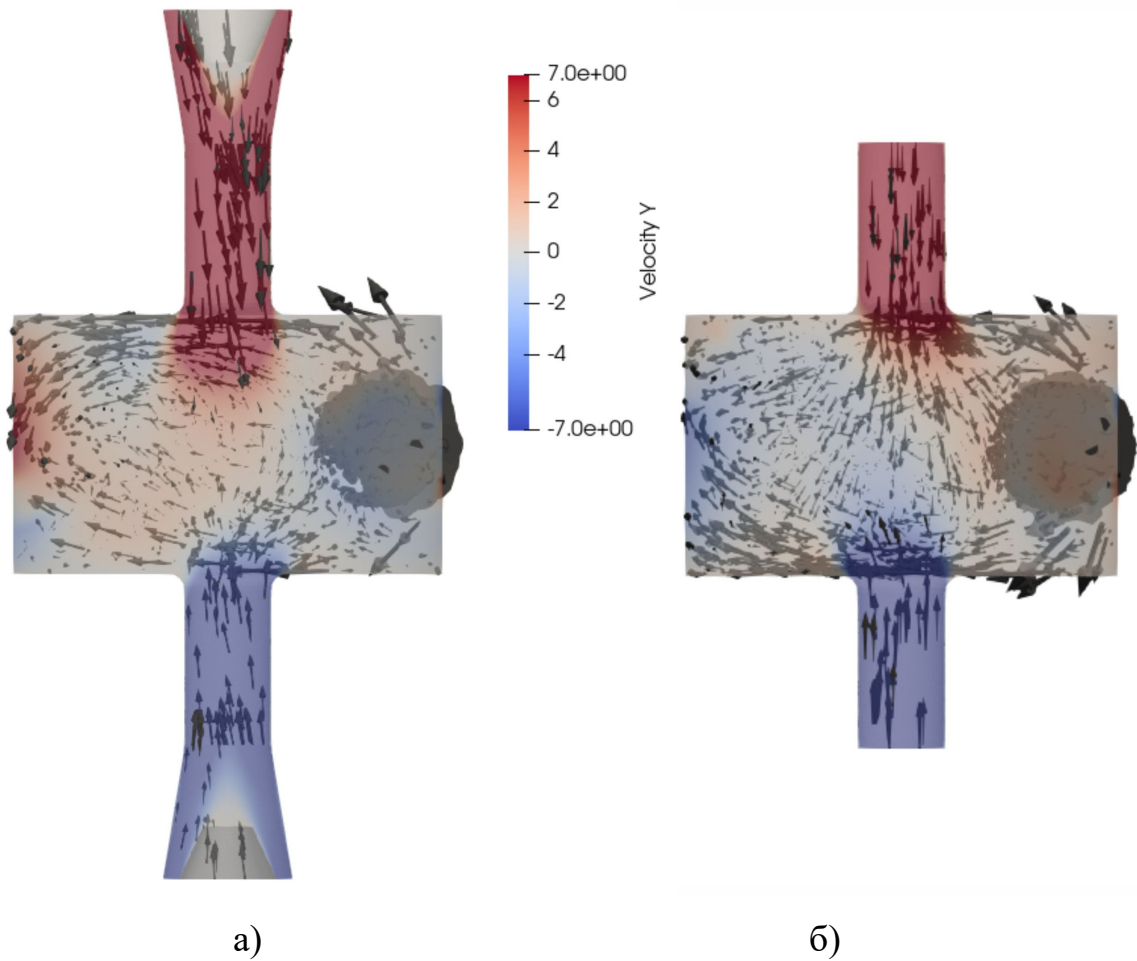


Рисунок 4.5 – Картини течії у ВКН: а) з ЛНА; б) без ЛНА

Таким чином, результати, наведені на рис. 4.4 і рис. 4.5, показують, що ефективність застосування лопатевого напрямного апарату визначається насамперед зміною просторової структури течії у вихровій камері. Закручення потоку за допомогою ЛНА є доцільним у режимах із малим вихідним спротивом, коли позитивний вплив модифікації ліній току перевищує додаткові гідравлічні втрати в напрямному апараті.

## РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Об'єктом дослідження у даній дипломній роботі є вихорокамерний нагнітач з напрямним лопатевим апаратом в осьовому каналі.

Ціллю дослідження є аналіз впливу попереднього закручення потоку, що перекачується, на енергетичні та напірні характеристики вихорокамерного нагнітача, а також обґрунтування доцільності застосування напрямного лопатевого апарата.

У дипломній роботі розглянуті питання формування закрученого потоку в осьовому каналі та його вплив на структуру течії у вихровій камері. Особливу увагу приділено зміні гідродинамічних характеристик потоку при використанні різних способів закручення.

У ході виконання роботи проведено чисельне моделювання течії у вихорокамерному нагнітачі для різних значень ступеня закручення потоку. На основі отриманих результатів визначено залежності коефіцієнта корисної дії та напору від параметрів потоку, а також виконано аналіз структури течії у вихровій камері.

Окрім цього, досліджено вплив застосування лопатевого напрямного апарата на характеристики нагнітача. Проведено порівняння енергетичних показників для випадків із попереднім закрученням потоку та без нього, встановлено області ефективних режимів роботи та визначено умови, за яких використання напрямного апарата є доцільним.

Опис устаткування, що було використане у бакалаврській роботі - персональний комп'ютер з використанням пакетів програм Microsoft Office, Ansys.

### 5.1 Розрахунок собівартості НДР

Собівартість - виражені в грошовій формі поточні витрати на виробництво та реалізацію продукції (робіт, послуг).

Витрати, що включаються в собівартість НДР:

- матеріальні витрати;
- витрати на організацію робочого місця дослідника;
- транспортно-заготівельні;
- витрати на оплату праці;
- відрахування на соціальні заходи;
- амортизація основного обладнання;
- загальновиробничі витрати.

## 5.2 Розрахунок матеріальних витрат на НДР

Визначення потреби в матеріальних ресурсах. До матеріальних ресурсів відносяться папір та фарба для принтера. Розрахунок матеріальних витрат ведеться по формулі:

$$Z_{mat} = \sum_{i=1}^m H_{p_i} \cdot C_i$$

де  $Z_{mat}$  – матеріальні витрати на виконання НДР;

$H_{p_i}$  – норма витрат паперу та фарби для принтера;

$C_i$  – ціна одного листа паперу та фарби для принтера;

$m$  – кількість видів матеріалу.

Розрахунки вартості витрачених матеріалів зазначено в таблиці 5.1.

Визначення транспортно-заготівельних витрат. В даній роботі приймаємо ТЗВ = 15% від вартості матеріалів та розраховуємо їх за формулою:

$$\text{ТЗВ} = 0,15 \cdot \text{Змат}$$

$$\text{ТЗВ} = 0,15 \cdot 303 = 45,4 \text{ грн}$$

Витрати на оплату праці. Розрахунок витрат на основну заробітну плату наукових співробітників ведеться по формулі:

$$Зосн = Зміс \cdot К$$

де Зосн – основна заробітна плата наукових співробітників;

Зміс – заробітна плата співробітника за місяць (тарифний оклад), грн;

К – дольова участь співробітника у виконанні проекту, визначається за кількістю відпрацьованих годин.

Розрахунки заробітної плати наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.1 – Розрахунки вартості витрачених матеріалів

Матеріали	Кількість, шт.	Вартість, грн	Загальна вартість, грн	Призначення
Папір А4	40	2	80	Друк тексту та розрахунків
Папір А2	3	7	21	Друк робочих креслень
Папір А1	1	16	16	Друк складальних креслень
Тонер для принтера	1	186	186	Роздруківка Документації
Сумарна вартість, грн			303	

Додаткова заробітна плата (Здод) включає доплати, надбавки, гарантійні і компенсаційні виплати, передбачені законодавством.

Додаткову заробітну плату приймаємо 10% від Зосн та розраховуємо по формулі:

$$Здод = 48400 \cdot 0.1 = 4840 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.2 – розрахунки заробітної плати

Посада	Оклад з надбавками, грн	Число місяців	Кількість людей	Участь, %	Сума, грн
Керівник теми	38400	4	1	25	18400
Інженер	24000	4	1	75	30000
Разом					48400

Відрахування на соціальні заходи. Відрахування на соціальні заходи передбачені (Зсз) законодавством та складають 40% від суми Зосн та Здод та розраховуються за формулою:

$$Зсз = (48400 + 4840) \cdot 0.4 = 21296 \text{ грн}$$

Розрахунок амортизації основного обладнання. До основного обладнання відносимо персональний ноутбук. Окрім ноутбуку для виконання НДР застосовувалися пакети програм Microsoft Office, Ansys.

Вартість обладнання та прикладних програм наведено у табл. 5.3.

При розрахунку амортизації приймаємо до уваги, що термін експлуатації персонального комп'ютера та принтера складає 5 років. Застосовуємо лінійний метод нарахування амортизації обладнання за формулою:

$$A = (\Phi_{п} + \Phi_{л}) / T = 26000 / 5 = 5200 \text{ грн/рік}$$

де  $A$  – амортизація основного обладнання;  $\Phi_{п}$  – початкова вартість обладнання;  $\Phi_{л}$  – ліквідаційна вартість обладнання (приймаємо  $\Phi_{л}=0$ );

$T$  – прийнятий термін експлуатації 5 років.

Таблиця 5.3 – Вартість обладнання та прикладних програм

Найменування устаткування	Первісна вартість, грн	К-ть, шт.	Залишкова вартість, грн	Призначення
Пакет програм Microsoft Office	5000	1	1000	Для оформлення документації
Персональний ноутбук	20000	1	14000	Для оформлення документації, креслень
Програма Ansys	безкоштовна версія для навчання	1	-	Для Розрахунків та створення геометрії
Принтер	6000	1	2000	Роздрукування
Разом	31000	4	17000	

### 5.3 Розрахунок загальновиробничих витрат

Загальновиробничі витрати (Ззаг.вир.) розраховуються пропорційно витратам на оплату праці в розмірі 50% від суми основної та додаткової заробітної плати (20% - адміністративні, 30% - загальновиробничі витрати).

Загальновиробничі витрати визначаються за формулою:

$$\text{Ззаг.вир.} = 0.3 \cdot (\text{Зосн} + \text{Здод})$$

$$\text{Ззаг.вир.} = 0.3 \cdot (48400 + 4840) = 15972 \text{ грн.}$$

Адміністративні витрати визначаються за формулою:

$$\text{Задм} = 0.2 \cdot (\text{Зосн} + \text{Здод})$$

$$\text{Задм} = 0.2 \cdot (48400 + 5800) = 10648 \text{ грн.}$$

### 5.4 Калькуляція собівартості НДР

На підставі проведених розрахунків складаємо калькуляцію собівартості НДР. На діаграмі 5.1 наведено структуру собівартості

Таблиця 5.4 – Калькуляція собівартості НДР

№п/п	Найменування статті витрат	Сума, грн
1	Вартість розхідних матеріалів та прикладних програм	303
2	Транспортно – заготівельні витрати	45,4
3	Основна заробітна плата	48400
4	Додаткова заробітна плата	4840
5	Відрахування на соціальні заходи	21360
6	Амортизаційні відрахування	5200
7	Загальновиробничі витрати	15972
8	Виробнича собівартість	97302,6
9	Адміністративні витрати	10648
10	Рентабельність	10795
11	Повна собівартість	107950



Рисунок 5.1 – Структура собівартості НДР

## 5.5 Висновки

У результаті розрахунків можна зробити висновок, що найбільшу частину собівартості НДР займає основна заробітна плата (46,1%). Трохи меншу частину займають відрахування на соціальні заходи (19,2%) та загальновиробничі витрати (15,3%). Найменшу частину собівартості НДР займають транспортно-заготівельні витрати(0,03%). Доля усіх інших витрат набувають середніх значень.

## РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ І НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 6.1 Загальні питання охорони праці

Охорона праці – це система правових, організаційних, технічних і соціально-економічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки та збереження здоров'я працівників у процесі трудової діяльності. У проектуванні нафтопроводу охорона праці відіграє важливу роль, оскільки працівники стикаються з низкою небезпек і шкідливих чинників, що можуть призвести до травм, захворювань або аварійних ситуацій.

Значимість охорони праці в проектуванні нафтопроводу полягає в такому:

- Запобігання травматичним подіям і захворюванням серед працівників, що сприяє збереженню їхнього здоров'я і підвищенню продуктивності праці.
- Зниження ризику виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з експлуатацією нафтопроводу, що сприяє захисту довкілля та громадської безпеки.
- Дотримання вимог законодавства та нормативних документів з охорони праці, що дає змогу уникнути правових наслідків і штрафних санкцій.

В Україні охорона праці регулюється низкою законодавчих актів і нормативних документів, які встановлюють вимоги і правила щодо забезпечення безпеки та захисту здоров'я працівників. Деякі з основних законодавчих актів і нормативних документів у галузі охорони праці в Україні включають: [24]

Закон України "Про охорону праці" - основний законодавчий акт, що визначає загальні принципи і правила охорони праці, права та обов'язки працівників і роботодавців, порядок проведення інспекцій і контролю за дотриманням норм охорони праці.

Закон України "Про державний нагляд у сфері технічної безпеки" - встановлює засади організації державного нагляду за додержанням вимог технічної безпеки та охорони праці на підприємствах [24].

Нормативно-правові акти Державної служби з нагляду за охороною праці – включають у себе накази, інструкції, методичні рекомендації та нормативи, які уточнюють і конкретизують вимоги до охорони праці в різних галузях економіки. Державні стандарти безпеки праці - встановлюють вимоги до безпеки праці на конкретних робочих місцях, обладнанні та виробничих процесах. Колективні договори та угоди – передбачають конкретні заходи з охорони праці на конкретних підприємствах і в галузях, їх розроблення та укладення здійснюються між роботодавцем і профспівковою організацією. Методичні матеріали та керівництва з охорони праці, розроблені Міністерством соціальної політики України та спеціалізованими органами з охорони праці.

## **6.2 Організація управління охороною праці на підприємстві**

Роль і функції служби охорони праці. Служба охорони праці (СОП) відіграє вирішальну роль в організації управління охороною праці на підприємстві. До основних функцій СОП належать:

Розробка та впровадження системи охорони праці, яка відповідає законодавчим вимогам та нормативним документам.

Ідентифікація та оцінка шкідливих і небезпечних факторів, які можуть впливати на працівників під час проектування.

Розробка та контроль за виконанням заходів щодо запобігання та усунення шкідливих і небезпечних факторів.

Проведення навчання та інструктажу працівників з питань безпеки, включаючи специфічні ризики, пов'язані з проектуванням насосів.

Контроль за дотриманням вимог охорони праці, проведення перевірок та аналіз стану охорони праці на підприємстві.

Процес управління охороною праці на підприємстві. Процес управління охороною праці на підприємстві складається з декількох етапів:

**Планування:** постановка цілей і завдань з охорони праці, розробка програм і планів дій з урахуванням специфіки проектування насосів і пов'язаних з ними ризиків.

**Організація:** створення структури управління охороною праці, призначення відповідальних осіб, формування СОП, забезпечення необхідними ресурсами та обладнанням.

**Реалізація:** проведення заходів, спрямованих на забезпечення безпеки та захисту здоров'я працівників під час проектування нафтопроводу. Це включає проведення оцінки ризиків, впровадження превентивних заходів, забезпечення працівників необхідним захисним обладнанням та інструкціями.

**Моніторинг та контроль:** регулярна оцінка ефективності заходів з охорони праці, проведення перевірок, аналіз звітів про нещасні випадки та внесення необхідних удосконалень до системи охорони праці.

Нижче приведена схема управління охороною праці на підприємстві:

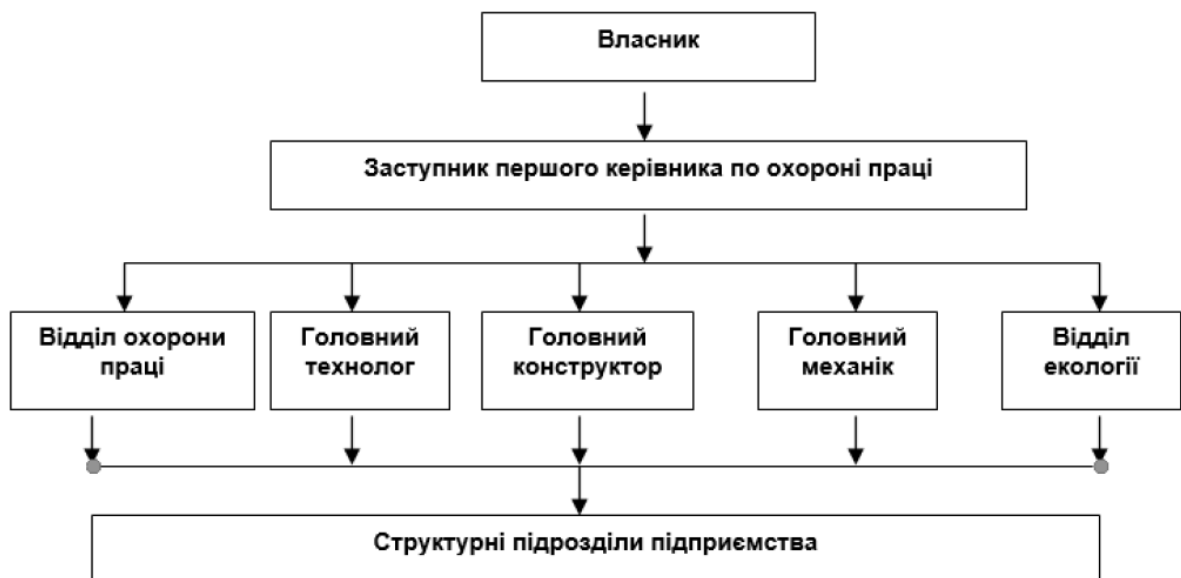


Рисунок 6.1 – Схема управління охороною праці на підприємстві

### 6.3 Організація безпечних умов праці на робочих місцях при проектуванні насосів

Фактори, що впливають на працівника під час проектування насосів. Під час проектування насосів можливий вплив різних фізичних факторів, які можуть вплинути на здоров'я та безпеку. У таблиці 6.1 приведені найпоширеніші фактори.

Таблиця 6.1 - Перелік шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Шкідливі і небезпечні виробничі фактори	Джерела їх виникнення
Шум	Машини, обладнання, довкілля.
Вібрація	Робота важкої техніки або інструментів
Температура	Пряме попадання сонячних променів. Відсутня вентиляція.
Освітлення	Недостатнє освітлення.
Динамічні навантаження	Установка, закріплення і знімання великогабаритних деталей
Статичні навантаження	Виконання однотипних операцій

### 6.4 Метеорологічні умови

Метрорологічні умови у виробничих приміщеннях вибрані відповідно до вимог ДСН 3.3.6. 042-99 [26] з урахуванням енерговитрат організму на виконання робіт і періоду року. Вибираємо допустимі параметри мікроклімату, що наведені у табл. 6.2

### 6.5 Освітлення

Під час роботи у світлий час доби використовується природне освітлення у темний час штучне. Природне освітлення – бокове, двостороннє.

Для штучного місцевого освітлення застосовується світильники ЛСПО 1В на дві люмінесцентні лампи ЛХБ-40. Відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2018 [25] залежно від розряду зорової роботи, який визначається найменшим розміром об'єкту розрізнення у мм, обираємо нормативне значення коефіцієнта природної освітленості.

Таблиця 6.2 – Значення параметрів метеорологічних умов

Період року	Категорія робіт з енерговитрат	Температура, С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Середньої важкості - Па	допустимі		
		17-23	75	0,3
		Оптимальні		
18-20		40-60	0,2	
Теплий		Допустимі		
		18-27	65	0,3
	Оптимальні			
		21-23	40-60	0,2-0,4

Таблиця 6.3 – Характеристика освітлення

Найменування приміщення	Площа підлоги, м <sup>2</sup>	Розряд та підрозряд зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Освітлення			
				Природне або суміщене		Штучне	
				Вид освітлення (бокове, Верхнє)	КПО, %	Вид освітлення (загальне, Місцеве)	Нормована освітленість, E, лк
Робоче приміщення	70	IVб	Більше 0,5 до 1,0	Бокове	1,5	Місцеве	200

## 6.6 Електробезпека

Приміщення де відбуваються роботи відноситься до приміщення із підвищеною небезпекою відповідно до ПУЕ-2017 від 21.07.2017 [24]

характеризуються наявністю в них: струмопровідної половини (металеві, земляні, залізобетонні, цегляні та ін.).

## 6.7 Пожежна безпека

Аналіз можливих джерел пожежі під час проектування насосів. Під час проектування необхідно провести аналіз можливих джерел пожежі, щоб запобігти їхньому виникненню і вжити відповідних заходів з пожежної безпеки. Неконтрольовані пожежі можуть призвести до серйозних наслідків, включно зі шкодою для довкілля, матеріальними втратами та загрозою життю і здоров'ю.

Для забезпечення пожежної безпеки під час проектування насосів необхідно застосовувати відповідні засоби пожежогасіння та вміти їх використовувати. Важливо передбачити такі аспекти:

Встановлення та обслуговування вогнегасників: Розміщення вогнегасників у зручних і доступних місцях, регулярна перевірка та обслуговування для забезпечення їхньої працездатності.

Встановлення систем пожежної сигналізації: Встановлення сигналізаційних систем, які автоматично сигналізують про загоряння, щоб швидко сповістити працівників і дозволити їм вжити необхідних заходів.

План евакуації: Розроблення плану евакуації, який визначає маршрути евакуації.

Згідно з документом ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [28] робоче приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою відносяться до категорії В, а ступінь вогнестійкості будівлі II.

Відповідно до ДСТУ 8828:2019 [28] пожежна безпека забезпечується системами запобігання пожежі і протипожежної безпеки, а також організаційно-технічними заходами.

Перелік обов'язкових засобів пожежогасіння надані у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Перелік обов’язкових засобів пожежогасіння

Приміщення	Площа, м <sup>2</sup>	Первинні засоби пожежогасіння (тип, найменування)	Кількість, шт.
Робоче	70	Аерозольні: ВА-1 Вуглекислотно-брометілові: ВУБ-3	2
		Повітряно-пінні: ВПП-5	2

### 6.8 Охорона навколишнього середовища

Вплив проектування насосів на навколишнє середовище Проектування насосів може мати значний вплив на навколишнє середовище. Можливі негативні наслідки включають забруднення ґрунту та водних ресурсів, викиди шкідливих речовин в атмосферу, загрозу біологічному розмаїттю та зміну екосистем. Тому необхідно провести аналіз та оцінку можливих впливів проекту на навколишнє середовище.

Заходи щодо зниження впливу на довкілля та запобігання аварійним ситуаціям:

Для зниження впливу на навколишнє середовище під час проектування насосів слід застосовувати такі заходи:

Використання сучасних технологій: Застосування передових технологій та інженерних рішень для зниження викидів і витоків нафтопродуктів, поліпшення енергоефективності та скорочення негативного впливу на навколишнє середовище.

Планування маршруту: Ретельне планування маршруту нафтопроводу з урахуванням мінімізації впливу на природні ресурси, захисту водойм, заповідних територій та інших вразливих екосистем.

Регулярне обслуговування та інспекції: Проведення регулярного обслуговування, інспекцій та моніторингу нафтопроводу для виявлення потенційних витоків, несправностей і проблем, які можуть вплинути на навколишнє середовище.

Необхідно організувати систему контролю та моніторингу забруднень і викидів, пов'язаних із проектуванням та експлуатацією нафтопроводу. Це включає встановлення стандартів і нормативів для якості води, повітря і ґрунту, регулярний аналіз проб, моніторинг викидів шкідливих речовин і вжиття заходів щодо запобігання та усунення забруднень.

## **6.9 Висновок**

Під час проектування насосів слід враховувати низку важливих аспектів, пов'язаних з охороною праці, безпекою, охороною довкілля і зниженням ризиків виникнення аварійних ситуацій. Деякі загальні висновки, які можна зробити з цієї роботи, включають:

Дотримання законодавчої бази та нормативних документів з охорони праці є обов'язковим. Роботодавець і працівник несуть відповідальність за дотримання вимог з охорони праці.

Організація управління охороною праці на підприємстві включає визначення ролі та функцій служби охорони праці, розробку процесу управління охороною праці та проведення навчання та інструктажів для працівників.

Створення безпечних умов праці на робочому місці потребує аналізу і класифікації робочих місць за умовами праці, врахування фізичних і психофізіологічних чинників та застосування відповідних заходів щодо забезпечення безпеки.

## ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження вихорокамерного нагнітача з напрямним лопатевим апаратом, що включає аналіз сучасного стану, теоретичне обґрунтування, чисельне моделювання та оцінку впливу конструктивних рішень на енергетичні характеристики.

1. Проведено аналіз сучасного стану струминних і вихорокамерних нагнітачів, розглянуто принципи їх роботи, конструктивні особливості та області застосування. Показано, що застосування закручування потоку є ефективним засобом підвищення напірних характеристик, а використання напрямного лопатевого апарата дозволяє цілеспрямовано керувати структурою течії.

2. Розглянуто теоретичні передумови формування закрученого потоку в осьовому каналі та гідродинамічні процеси у вихровій камері. Встановлено, що попереднє закручення потоку забезпечує більш узгоджену взаємодію потоків, зменшує втрати енергії при змішуванні та покращує умови передачі імпульсу.

3. Розроблено конструктивну схему вихорокамерного нагнітача з напрямним лопатевим апаратом в осьовому каналі. Виконано чисельне моделювання течії у вихорокамерному нагнітачі з використанням CFD-методів на основі рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням турбулентності. Отримано розподіли швидкостей і тиску, що дозволило проаналізувати вплив ступеня закручення на характеристики нагнітача.

5. Встановлено, що попереднє закручення потоку призводить до зростання коефіцієнта корисної дії нагнітача. За результатами моделювання відносний приріст ККД може досягати приблизно 30–35 %, що пояснюється зменшенням втрат енергії на вході до вихрової камери та підвищенням ефективності процесу змішування потоків.

6. Загалом результати дослідження підтверджують доцільність застосування напрямного лопатевого апарата для підвищення енергоефективності вихорокамерних нагнітачів. Отримані висновки можуть бути використані при подальшому вдосконаленні конструкцій нагнітачів, оптимізації їх робочих режимів та підвищенні експлуатаційних характеристик.

7. За результатами економічного та охоронного аналізу встановлено, що розробка вихорокамерного нагнітача є економічно обґрунтованою, оскільки структура витрат має раціональний характер із переважанням витрат на оплату праці, а загальна собівартість НДР є прийнятною для реалізації. Одночасно показано, що забезпечення безпечних умов праці та дотримання екологічних вимог є необхідною складовою проєктування, що передбачає впровадження організаційних і технічних заходів для зниження виробничих ризиків та негативного впливу на довкілля. У комплексі це підтверджує доцільність реалізації проєкту з точки зору економічної ефективності, безпеки та екологічної відповідальності.

### Список джерел інформації

1. Zhang, H., Zou, D., Yang, X., Mou, J., Zhou, Q., & Xu, M. (2022). Liquid–gas jet pump: A review. *Energies*, 15(19), 6978.
2. Fan, J., Eves, J., Thompson, H. M., Toropov, V. V., Kapur, N., Copley, D., & Mincher, A. (2011). Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps. *Computers & Fluids*, 46(1), 212-217.
3. Flack, R. D. (2005). *Fundamentals of jet propulsion with applications* (Vol. 17). Cambridge University Press.
4. Rogovyi, A., Korohodskiy, V., & Medvediev, Y. (2021). Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*, 218, 119432.
5. Rogovyi, A. (2018). Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*, 163, 52-60.
6. Роговий А.С. Розробка теорії та методів розрахункувихорокамерних нагнітачів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.17. Харків, 2017. 364с
7. Rogovyi, A., Korohodskiy, V., Khovanskyi, S., Hrechka, I., & Medvediev, Y. (2021, January). Optimal design of vortex chamber pump. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1741, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
8. Syomin, D., & Rogovyi, A. (2012). Features of a working process and characteristics of irrotational centrifugal pumps. *Procedia Engineering*, 39, 231-237.
9. Rogovyi, A., Korohodskiy, V., Neskorozenyi, A., Hrechka, I., & Khovanskyi, S. (2022). Reduction of granular material losses in a vortex chamber supercharger drainage channel. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (pp. 218-226). Cham: Springer International Publishing.
10. Rogovyi, A., Khovanskyi, S., Hrechka, I., & Gaydamaka, A. (2020). Studies of the swirling submerged flow through a confuser. In *Design, Simulation,*

- Manufacturing: The Innovation Exchange (pp. 85-94). Cham: Springer International Publishing.
11. Rogovyi, A., & Khovanskyu, S. (2017, August). Application of the similarity theory for vortex chamber superchargers. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 233, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
  12. Rogovyi, A., Neskorozenyi, A., Krasnikov, S., Tynyanova, I., & Khovanskyi, S. (2022, September). Improvement of vortex chamber supercharger performances using slotted rectangular channel. In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (pp. 552-561). Cham: Springer International Publishing.
  13. Lancaster, O. E. (2015). Jet propulsion engines. Princeton University Press.
  14. Nesbitt, B. (2006). Handbook of pumps and pumping: Pumping manual international. Elsevier.
  15. Сьомін Д.О., Роговий А.С. Вихорокамерні нагнітачі: монографія. Харків, 2017. 204 с.
  16. Сьомін, Д. О., Роговий, А. С., & Левашов, А. М. (2016). Вплив закручення потоку, що перекачується, на енергетичні характеристики вихрекамерних насосів. Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати, (20), 68-71.
  17. Syomin, D., Pavljuchenko, V., Maltsev, Y., Rogovoy, A., & Dmitrienko, D. (2010). Vortex mechanical devices in control systems of fluid mediums. TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 10.
  18. Роговий, А. С. (2017). Концепція створення вихорокамерних нагнітачів та принципи побудови систем на їх основі. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, (3), 168-173.
  19. Syomin, D., & Rogovoy, A. (2010). Power characteristics of superchargers with vortex work chamber. TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 10.

20. Su, C., Zhang, Z., Zhu, D., & Tao, R. (2025). Enhancing the Operating Efficiency of Mixed-Flow Pumps Through Adjustable Guide Vanes. *Water*, 17(3), 423.
21. Lin, P., Li, Y., Xu, W., Chen, H., & Zhu, Z. (2020). Numerical study on the influence of inlet guide vanes on the internal flow characteristics of centrifugal pump. *Processes*, 8(1), 122.
22. Економіка підприємства : текст лекцій для студентів усіх форм навчання спец. 051 "Економіка" та 075 "Маркетинг" [Електронний ресурс] / уклад.: О. О. Гаврись [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків : НТУ, 2019. – 134 с.
23. Методичні вказівки до виконання економічної частини бакалаврської роботи [Електронний ресурс] : для студ. спец. 6.05060102 "Енергетичний менеджмент" та 6.05060103 "Теплоенергетика" / уклад.: О. О. Гаврись, В. П. Філіпов ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків, 2012. – 15 с.
24. Основи професійної безпеки та здоров'я людини : підручник / В. В. Березуцький [та ін.] ; ред. В. В. Березуцький ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХП", 2018. – 553 с.
25. Інженерне обладнання будівель та споруд. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5-28:2018. – К. : МінбудУкр., 2018. – 137с.
26. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6. 042-99 – Київ, 2000.
27. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : ДСН 3.3.6.037-99. – Київ, 1999. [Чинний від 01.12.1999].
28. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : ДСТУ Б В.1.1-36:2016 наказ Мінрегіонбуду України № 158 з 01.01.2017 р. від 15.06.2016 р.