

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

Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри
_____Олександр ЛУГОВСЬКИЙ

“ ____ ” _____ 2021 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані
механічні системи»
спеціальності 131 Прикладна механіка**

**на тему: Стенд для обробки ньютонівських рідин гідродинамічною
кавітацією**

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи МА-71

Жицька Яна Сергіївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____доцент, к.т.н., Ночніченко І.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з охорони праці _____ст.викладач Ковтун А.І.
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант з технології машинобудування _____к.т.н., доц. Кореньков В.М.
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Олександр ЛУГОВСЬКИЙ
(підпис)

“ ____ ” _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Жицька

Яна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Стенд для обробки ньютонівських рідин гідродинамічною кавітацією
Тема проєкту _____

керівник проєкту _____ Ночніченко Ігор Вікторович, доцент, к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по університету від “ ____ ” _____ 2021 року №

2. Термін подання студентом проєкту
Розробити стенд для обробки ньютонівських рідин

3. Вихідні дані до проєкту
гідродинамічною кавітацією. В системі тиск 1...4,5 Bar, температура -10...40 °С, робоча рідина бензин, густина робочої рідини 720...750 кг/м³, оптимальна витрата робочої рідини 4...6 л/с .Розрахувати гідравлічні втрати та підібрати обладнання для системи.

4. Зміст пояснювальної записки Розділ 1. Аналіз існуючих конструкцій та технологій для кавітаційної обробки рідких середовищ. Розділ 2. Проектування та розрахунок гідралічного стенду для обробки кавітацією ньютонівських рідин. Розділ 3. Розробка технології для виготовлення корпусу кавітатора. Розділ 4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо)

5 креслень формату А1 (перший лист – 4 схеми гідравлічних принципових експериментального стенда, другий лист – креслення ежектора, третій лист – складальне креслення гідродинамічного кавітатора, четвертий лист – деталювання гідродинамічного кавітатора, п'ятий лист - стенд для обробки рідини гідродинамічною кавітацією вигляд загальний), 1 плакат формату А1, презентація.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Охорона праці	ст.викл. Ковтун А.І.		
2. Технологія машинобудування	доц. Кореньков В.М.		

7. Дата видачі завдання 08.02.2021

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз факторів, що впливають на кавітацію	05.04.2021	
2	Аналіз кавітаторів, що представлені сьогодні на ринку	16.04.2021	
3	Розробка принципових гідравлічних схем для стенду для обробки рідин гідродинамічною кавітацією	03.05.2021	
4	Розробка гідродинамічного кавітатора	10.05.2021	
5	Розробка ежектора	21.05.2021	
6	Гідравлічний розрахунок системи	24.05.2021	
7	Технологія машинобудування	28.05.2021	
8	Охорона праці	31.05.2021	
9	Схема стенду для обробки рідин гідродинамічною кавітацією вигляд загальний	02.06.2021	
10	Деталювання до гідродинамічного кавітатора	03.06.2021	

Студент

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Анотація

У даному дипломному проекті розробляється стенд для обробки ньютонівських рідин гідродинамічною кавітацією. У дипломній роботі було досліджено фактори, що впливають на кавітацію, такі як в'язкість, швидкість руху рідини, температура і т.д. Після цього було проаналізовано різні типи насадків для створення гідродинамічної кавітації, а також виявлено найефективніший тип насадки. Також було проаналізовано різні типи кавітаторів, що є на ринку. Виявлено їх переваги та недоліки. Згодом ми прийшли до висновка, що сучасні кавітатори є мало вивчені та працюють досить нестабільно. Через це існує потреба розробки кавітатора, що буде працювати при різних умовах навколишнього середовища та з різними рідинами. Так з'явилася ідея розробки стенду для обробки рідини гідродинамічною кавітацією. Таким чином можна досліджувати різні типи кавітаторів. Розробляти різні модифікації і одразу ж дивитися, як це впливає на процес кавітації.

У другому розділі було розроблено 4 схеми стенду для обробки рідини гідродинамічною кавітацією та вибрана найефективніша. Ми додали допоміжний пристрій, ежектор, який полегшить умови отримання кавітації. Було проведено необхідні гідрравлічні розрахунки, а також підібрано обладнання для стенду.

Ключові слова: гідродинамічний кавітатор, експериментальний лабораторний стенд, гідродинамічна кавітація, ежектор.

Annotation

In this project the stand for processing of Newtonian liquids by hydrodynamic cavitation is developed. Factors influencing cavitation, such as viscosity, fluid velocity, temperature, etc., were investigated in the thesis. After that, different types of nozzles were analyzed to create hydrodynamic cavitation, and the most effective type of nozzle was identified. Different types of cavitators

available on the market were also analyzed. Their advantages and disadvantages are revealed. We later came to the conclusion that modern cavitators are poorly studied and operate rather unstable. Because of this, there is a need to develop a cavitator that will work under different environmental conditions and with different liquids. This is how the idea of developing a stand for liquid treatment with hydrodynamic cavitation came about. Thus, you can explore different types of cavitators. Develop various modifications and immediately see how it affects the cavitation process.

In the second section, 4 schemes of the stand for liquid treatment by hydrodynamic cavitation were developed and the most efficient one was selected. We have added an auxiliary device, an ejector, which will facilitate the conditions for obtaining cavitation. The necessary hydraulic calculations were performed, as well as the equipment for the stand was selected.

Key words: hydrodynamic cavitator, experimental laboratory stand, hydrodynamic cavitation, ejector.

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Стенд для обробки ньютонівських рідин гідродинамічною
кавітацією

Київ – 2021 року

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. Аналіз існуючих конструкцій та технологій для кавітаційної обробки рідких середовищ	10
1.1 Механізм виникнення кавітації у технологічних процесах	10
1.2 Чинники кавітації	14
1.2.1 Кавітаційне число	14
1.2.2 Вплив в'язкості і поверхневого натягу в стисливій рідині	16
1.3 Основні типи насадків для отримання гідродинамічної кавітації	17
1.4 Огляд кавітаторів	19
1.4.1 Магнітостриктори	20
1.4.2 Кавітатори типу Фьюсонік	21
1.4.3 Лопаткові кавітатори	22
1.4.3 Гідродинамічні сирени	23
1.5 Теоретичне обґрунтування можливостей кавітатора палива	25
1.5.1 Забезпечення економії палива	25
1.5.2 Підвищення потужності двигуна	25
1.5.3 Зменшена кількість незгорівшого палива	26
1.5.4 Скорочення шкідливих викидів	26
1.5.5 Легкий пуск при низьких температурах	26
1.5.6 Досліди кавітаторів	27
МЕТА ТА ЗАДАЧІ	28
Розділ 2. Проектування та розрахунок гідролічного стенду для обробки кавітацією ньютонівських рідин	29
2.1 Проектування стенду для обробки кавітацією рідких середовищ	29
2.1.1 Вимоги до стенду для обробки кавітацією рідких середовищ	29
2.1.2 Розробка принципової гідролічної схеми	29

					<i>ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Експериментальний стенд для обробки ньютонівських рідин гідродинамічною кавітацією		
Розроб.		Жицька Я.С.					
Перевір.		Начинченко І.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Гришко І.А.					
Затверд.					КПІ ім. Ігоря Сікорського		
					Літ.	Арк.	Акрушів
						7	66

2.2 Гідравлічний розрахунок	34
2.2.1 Розрахунок трубопроводу	34
2.2.2 Розрахунок втрат тиску в трубопроводі	36
2.3 Підбір гідравлічного обладнання в систему	40
2.4 Конструювання та розрахунок дроселя для кавітаційного пристроя	42
Висновки до розділу 2:	43
РОЗДІЛ 3.Розробка технології для виготовлення корпусу кавітатора.....	44
3.1 Технологічний контроль креслення	44
3.2. Аналіз технологічності деталі та вибір заготовки	45
3.3 Вибір типового технологічного процесу і типових схем обробки поверхонь.....	45
3.4 Креслення деталі	51
Висновки до розділу 3	53
РОЗДІЛ 4. Охорона праці	54
4.1.Характеристика об'єкту	54
4.2. Мікроклімат	55
4.3. Освітлення	57
4.4 Електробезпека	59
4.5 Пожежна безпека.....	60
4.6 Рекомендації по організації роботи при дії небезпечних і шкідливих чинників в лабораторії з ПК	61
Висновки до розділу 4	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

ВСТУП

Відомо, що на сьогодні проблема нестачі природних ресурсів стоїть дуже гостро. Щодня використовують тисячі літрів пального, викидаючи при цьому тони вуглекислого газу в атмосферу. Хорошим рішенням цієї проблеми є обробка пального гідродинамічною кавітацією. Така обробка покращує спалювання пального, а тому ми отримуємо не тільки більше енергії, а ще й менше викидів з обробленого пального.

На сьогодні на ринку існує достатньо велика кількість різних модифікацій кавітаторів, але всі вони мало досліджені, а їхня робота часто не стабільна через зміну температури навколишнього середовища чи тиску.

Тому у нас виникла ідея детальніше дослідити гідродинамічну кавітацію, процеси, що відбуваються в середині бульбашки, а також фактори, що можуть повпливати на перебіг цього явища. Крім цього, ми вирішили розробити лабораторний стенд, за допомогою якого можна буде випробувати кавітатори різної модифікації з різними насадками при різних температурах. Також будуть встановлюватися додаткові пристрої, за допомогою яких можна отримати гідродинамічну кавітацію швидше та більш стабільну.

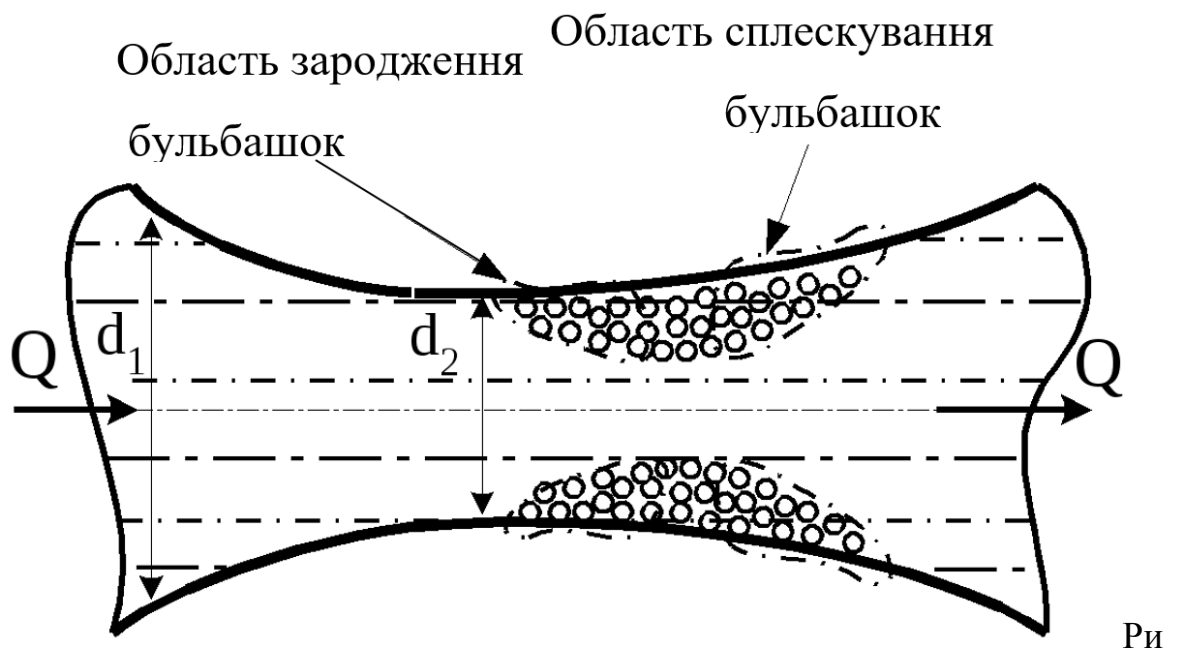
					ДПО1.МА7204.00.00.00 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підпис	Д		9

РОЗДІЛ 1. Аналіз існуючих конструкцій та технологій для кавітаційної обробки рідких середовищ

1.1 Механізм виникнення кавітації у технологічних процесах

Кавітація - явище розриву крапельної рідини під дією напружень, що розтягують. Напруження виникає при розрідженні в даній точці рідини. При розриві крапельної рідини утворюються порожнини - кавітаційні бульбашки, заповнені паром, газом або їх сумішшю. Отже, розрив рідини обумовлений зміною характеристик поля швидкостей і тисків. [1-3]

На рисунку 1.1 зображено схематично явище гідродинамічної кавітації.



с.1.1 Схема гідродинамічної кавітації в трубі

Бульбашки кавітації утворюються в тих місцях, де тиск в рідині p стає нижче деякого критичного $p_{кр}$.

Якщо тиск знижується внаслідок зростання місцевих швидкостей потоку крапельної рідини, то кавітація називається гідродинамічною, якщо зниження тиску викликано проходженням акустичних хвиль, то кавітація називається акустичною.[6]

Критичний тиск, при якому виникає розрив рідини, залежить від багатьох чинників. Наприклад: від чистоти рідини, від вмісту повітря, стану поверхні, на якій виникає кавітація [2-5].

В процесі кавітації сплескування бульбашки триває всього декілька мілі - або навіть мікросекунд. На рисунку 1.2 можна побачити як утворюються та сплескують бульбашки. Вчений Гаррісон виявив, при сплескуванні можуть виникати ударні хвилі, які призводять до високого перепаду тиску (до 4000 бар) навколо бульбашки. Взагалі в кавітації розрізняють дві фази зміни бульбашки: розширення і звуження. Ці фази утворюють термодинамічний цикл. Як правило, в більшості задач дозволяється не враховувати зміни температури в бульбашці та навколо неї. Але поблизу критичних точок цей параметр може бути достатньо важливим. Наприклад, якщо порівнювати рідини з різними термодинамічними властивостями.[4-6]

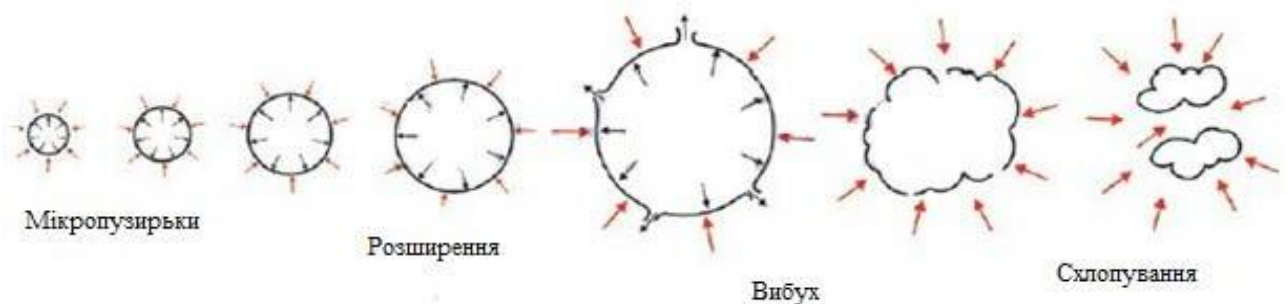


Рис.1.2 Схема зародження та сплескування бульбашки в процесі кавітації

Початкові стадії кавітації, що з'явилися на тілі, яке обертається, зображені на рисунку 1.3. Тут: а – бульбашкова кавітація, б – плівкова у вигляді пояски, в – плівкова у вигляді плям [3-5].

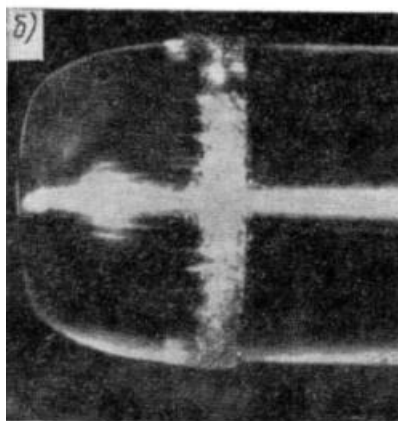
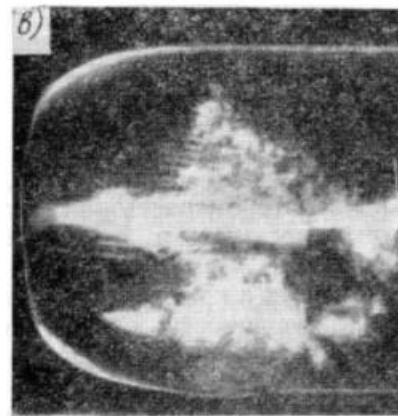
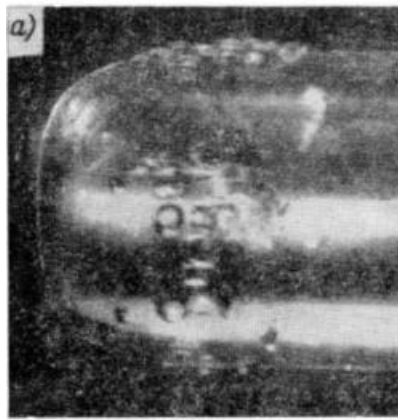


Рис.1.3 – Початкові стадії кавітації

Як правило, кавітацію вважають небажаним явищем, так як у зоні сплескування бульбашок локально підвищується тиск. Це може призвести до гідроударів та процесів корозії. В наслідок чого трубопровід та обладнання може вийти з ладу. На рис. 1.3 показано як кавітація може роз’їсти гребний гвинт.[8]

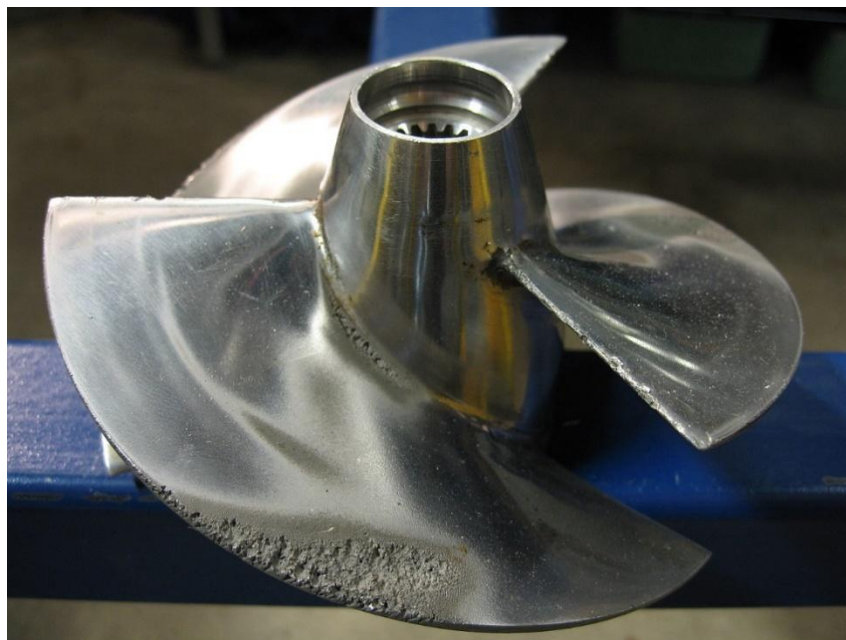


Рис.1.4 Корозія гребного гвинта в наслідок кавітації

Проте сьогодні кавітація широко застосовується у різних сферах. Ось декілька прикладів:

- очищення різних рідких речовин. Особливо важливу роль цей процес відіграє в очищенні палива. Використання кавітації дозволяє значно скоротити кількість смолу;
- за допомогою кавітації виготовляють водно-мазутні та водно-паливні емульсії;
- можливо знизити в'язкість вуглецевого палива, так ми зменшуємо температуру нагріву і збільшуємо дисперсність розпилення;
- навіть у воєнній промисловості кавітація знайшла застосування. Використовуючи кавітацію можливо створити унікальні гострі види пуль та надшвидкі торпеди;
- також можливо збільшити ефективність горіння палива. В результаті чого можливо економніше його використовувати (отримати більше енергії та менше викидів у навколишнє середовище).

Ці всі факти про кавітацію мотивували мене почати її досліджувати. Особливо можливість підняття ефективності деструкції речовини. В багатьох джерелах я знаходила інформацію про те, що, обробивши бензин кавітацією

можливо підвищити його октанове число, за рахунок цього властивості бензину покращаться в рази. А крім цього, кавітація може також розбити довгі молекулярні з'єднання на коротші, чим також збільшить кількість бензину, що відпрацюється і на виході дасть менше токсичних відходів. Це явище я би хотіла дослідити в середині гідродинамічного кавітатора [5-8].

1.2 Чинники кавітації

1.2.1 Кавітаційне число

Як я вже згадувала раніше, на кавітацію впливає достатньо багато факторів. Для того, щоб отримати стійку та інтенсивну кавітацію потрібно на кожен з них зважати. Тому я хочу в цьому пункті детальніше розповісти про найголовніші фактори, що можуть вплинути на явище кавітації.[5-7]

Основні чинники, що впливають на кавітацію показав Бернуллі у своїй формулі, вивівши безрозмірне кавітаційне число. За допомогою цього числа можна визначити характер кавітаційної течії.

$$\chi = \frac{2 \cdot (p_1 - p_{н.п.})}{\rho \cdot V^2},$$

Де V , p_1 – швидкість та гідростатичний тиск рідини перед звуженням потоку, Па;

$p_{н.п.}$ - тиск насичених парів для даної речовини, Па;

ρ – густина даної рідини, кг/м³.

Таким чином, в залежності від значення χ можна визначити вид течії:

Якщо $\chi > 1$, то течія докавітаційна – суцільна (однофазна) ;

якщо $\chi \approx 1$, то течія кавітаційна – двофазна;

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	14
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

якщо $\chi < 1$, то течія плівкова – порожнина кавітації відділена від суцільної течії;

якщо $\chi \ll 1$, то течія суперкавітаційна.

Так можна вичислити чи отримаємо ми кавітацію в певних умовах і яка в неї буде інтенсивність.[8-10]

Таку кавітацію, що я описала вище, називають природною, тому що вона виникає при розриві рідини через зміну характеристик поля швидкостей та тисків.[6]

Якщо ж в будь-яку розріджену область рідини додавати повітря чи інший газ, то виникає явище штучної кавітації (вентиляції). Штучну кавітацію можна створювати на тілах різних форм: на крилах, тілах обертання, гребних гвинтах. Внаслідок утворення штучних каверн (повітряних порожнин) змінюються поле тиску на тілі і гідродинамічні сили, що діють на тіло. Якщо, наприклад, вдувати повітря на поверхню крила буде змінюватися його підйомна сила, момент, лобовий опір. [12-15]

Для створення на тілі області розрідження використовують різні місцеві конструктивні зміни форми тіла, наприклад: виступи або кавітатори. Вдування повітря використовують в лабораторних умовах для дослідження фізичних процесів, що характеризують кавітацію, так як для отримання природної кавітації необхідні дуже великі швидкості потоку рідини, оточуючої тіло, а штучну кавітацію можна отримати при відносно малих швидкостях потоку. При розвиненій штучній кавітації каверна має вигляд прозорої плівки, яка в хвостовій частині або згортається в дві вихрові трубки, або закінчується зворотної цівкою рідини. [13-15]

1.2.2 Вплив в'язкості і поверхневого натягу в стисливій рідині

В роботі Айвені враховується вплив в'язкості і поверхневого натягу, а також стисливості при сплескуванні порожніх каверн і каверн, заповнених газом. Його результати показують, що в'язкість та поверхневий натяг не впливають на загальний характер поведінки каверн при сплескуванні. Його дослідження виявили цікаву аномалію, що при збільшенні в'язкості рідини збільшується і швидкість переміщення стінки бульбашки, в той момент, коли його радіус зменшується. [14-16]

На рисунку 1.5 зображено графіки, які показують як радіус бульбашки (а) та швидкість руху границі бульбашки (б) залежать від в'язкості та сил поверхневого натягу.[8-11]

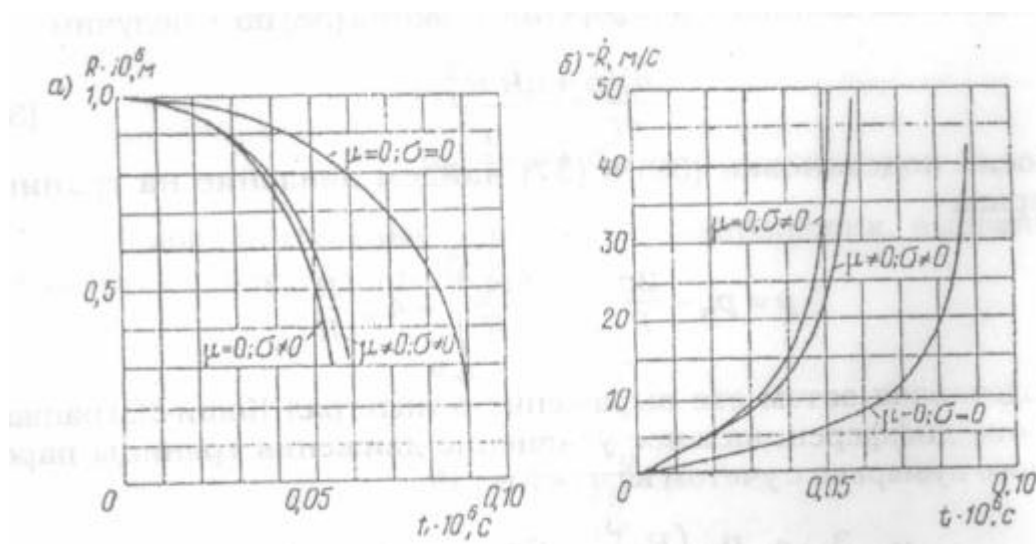


Рис.1.5 – Графіки залежності радіусу бульбашки (а) та швидкості руху границі бульбашки (б) від в'язкості та сил поверхневого натягу

1.3 Основні типи насадків для отримання гідродинамічної кавітації

Для отримання кавітації використовують різні типи насадків. На практиці використовують наступні насадки, їх конструкція зображена на рис.1.6.

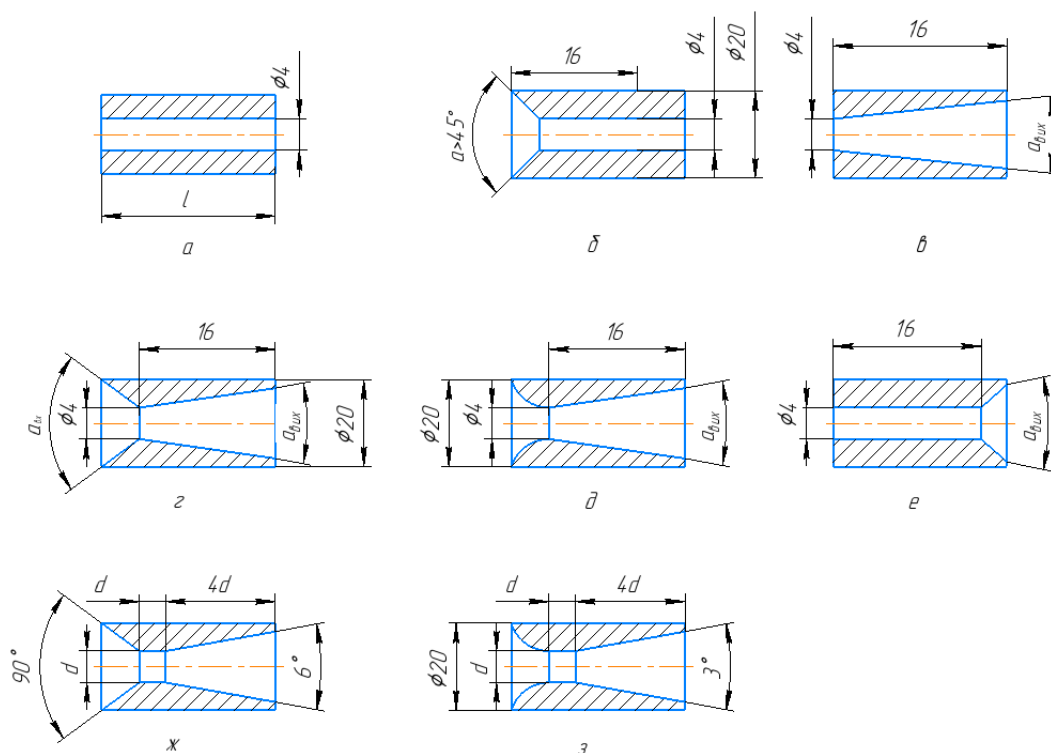


Рис.1.6 Конструкція основних типів насадків

а – циліндричний насадок; б – циліндричний насадок з конічним входом; в – конічний насадок, що розширюється; г – конічний насадок, що звужується та розширюється; д – коноїдально-конічний насадок; е – циліндричний насадок з конічним виходом; ж – конічний насадок, що звужується та розширюється з проміжною циліндричною частиною; з – коноїдально-конічний насадок з проміжною циліндричною частиною. [7]

За допомогою енергетичних витратно-перепадних характеристик дросельних пристроїв можна оцінити їх ефективність. Вони визначаються за формулою:

$$(\vec{Q})^2 = f(\vec{p}, \vec{\Delta p}),$$

де $(\vec{Q})^2 = \left(\frac{Q}{Q_{розр}}\right)^2$ - квадрат безрозмірної витрати рідини, що проходить через дросель; $\vec{\Delta p}$ - відносний перепад тиску на дроселі.[4-9]

На рисунку 1.3.2 показано графік енергетичних витратно-перепадних характеристик дроселя в залежності від типу насадка.

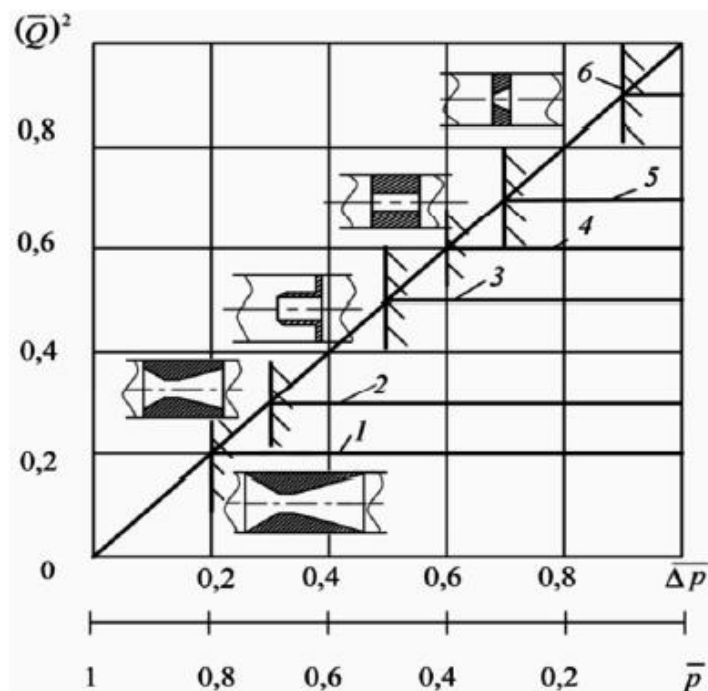


Рис. 1.7 Енергетичні витратно перепадні характеристики дросельних пристроїв [9]

На цьому графіку зображені:

1. насадок конфузотно-дифузотного типу;
2. насадок конфузотно-дифузотного типу укорочений;
3. насадок Борда;
4. циліндричний насадок;

5. насадок із прямокутним каналом;
6. діафрагма.

Проаналізувавши даний графік можна зробити висновок, що у насадку конфузотно-дифузотного типу кавітація почнеться швидше всього, друге місце насадок Борда, а потім всі інші. А з цього випливає, що насадок конфузотно-дифузотного може перетворити енергію потоку у кавітаційні коливання тиску найефективніше. Найменша ефективність у діафрагми, тому що кавітація в ній починається при найвищих $\overline{\Delta p}$. [5-9]

1.4 Огляд кавітаторів

На сьогодні існує велика кількість пристроїв, що допоможуть отримати в рідині кавітацію. Дослідження доводять, що від величини кавітаційної порожнини залежить швидкість сплескування бульбашки. Це означає, що це впливає також і на ступінь обробки рідини в зоні сплескування.

Всього розрізняють чотири способи отримання кавітації:

- Використовуючи ультразвукові коливання мембрани магнітостріктора. В зоні розрідження хвилі, що утворюється від коливання мембрани, можуть теж утворюватися кавітаційні процеси.
- Використовуючи проточні труби зі змінним перерізом або спеціальними камерами завихрення (фьюсонік). Процес відбувається за рахунок різкого падіння тиску на межі переходу будуть утворюватися кавітаційні порожнини.
- Також кавітацію можна отримати за допомогою обертання рідини, що протікає в потоці ротора (крильчатки) певного профілю.
- Розірвавши потік рідини механічним шляхом.

В наступних підпунктах розгляну кожен спосіб трохи ближче. [11-17]

1.4.1 Магнітостриктори

Ці пристрої є найдорожчими і при цьому найменш ефективними. Головною причиною для цього є дуже дорога електро-силова частина збудливої мембрани. Використовуються ці пристрої здебільшого у Японії та Швейцарії у фармацевтичному і парфумерно-косметичному виробництві. Такі пристрої коштують до двох мільйонів Євро, при цьому мають продуктивність $0,5 \text{ м}^3/\text{год}$. Крім цього, ці прилади є також малонадійними та дорогі в обслуговуванні й ремонті. Схема конструкції цього кавітатора зображена на рисунку 1.8. [12-16]

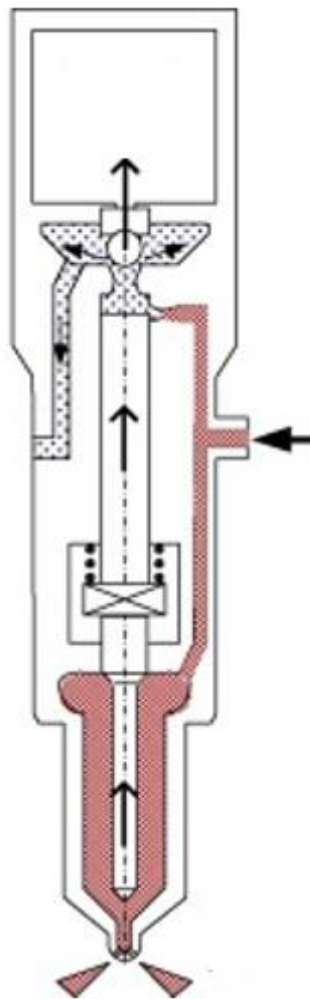


Рис.1.8 Схематичне зображення магнітостриктора

1.4.2 Кавітатори типу Фьюсонік

Цей пристрій є трубою змінного перерізу без рухомих частин, двигуна чи електроніки. Ці пристрої найменше впливають на рідину, що обробляється. На це є наступні причини:

- кавітація з'являється не в усьому об'ємі рідини;
- неможлива підтримка постійного оптимального режиму роботи , через перепади температури, тиску, в'язкості та інших фізико-хімічних параметрів оброблюваної рідини
- майже неможливо досягти найбільш повного розрідження потоку;
- також іноді виникає налипання мазуту, це різко погіршує якість та продуктивність;
- необхідно багато разів обробити один і той же об'єм, для того, щоб отримати приблизно однорідну емульсію.

Нажаль, ці недоліки не компенсуються навіть такими перевагами як:

- в конструкцію не входять деталі, що швидко зношуються, сальники, вузли обертання, а отже і не потребує обслуговування;
- не вибагливі до температур та витримують високі тиски мазута до 20 атмосфер та високу температуру до 150°C;
- відносно дешеві у виготовленні.

На рисунку 1.9 зображено приклад схеми кавітатора типу Фьюсонік.[15--17]

поток над лопаткою. Кавітація більш інтенсивна в порівнянні з кавітатором типу «ФЬЮСОНІК», так як кавітація виникає багаторазово в одиниці об'єму. Проте все ж неможливо отримати повне розрідження потоку. Схема роботи цього типу кавітаторів зображена на рисунку 1.11.[14-16]

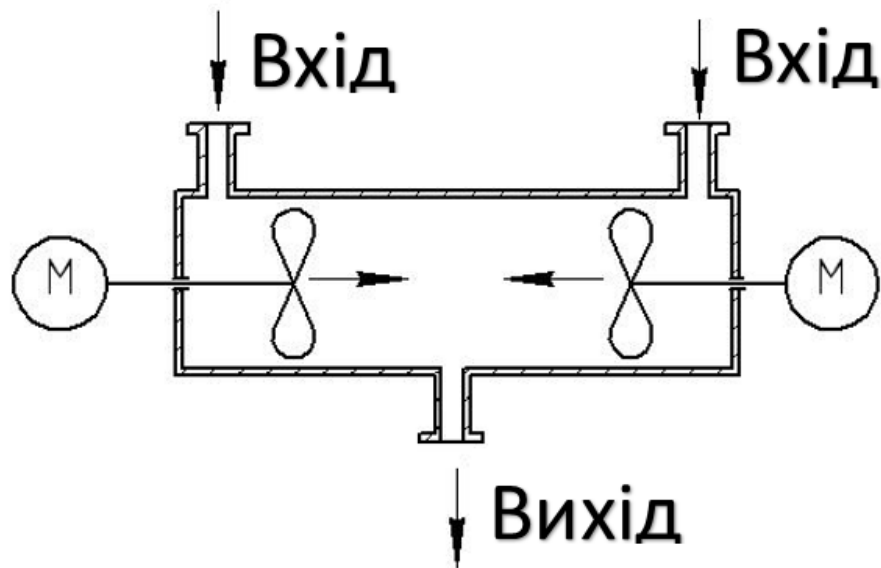


Рис. 1.11 – Схема лопаткового кавітатора

1.4.3 Гідродинамічні сирени

Це корпус, в який встановлено вхідний та вихідний патрубки. Також тут є концентричний ротор і статор з виконаними в них вікнами. Так як, вікна в статорі періодично відкриваються і закриваються відбувається періодичне переривання всього потоку рідини. Тут кількість і розмір вікон підібрані таким чином, що відбувається обробка всієї рідини. Приклад конструкції такого кавітатора зображено на рис.1.12.[12-14]

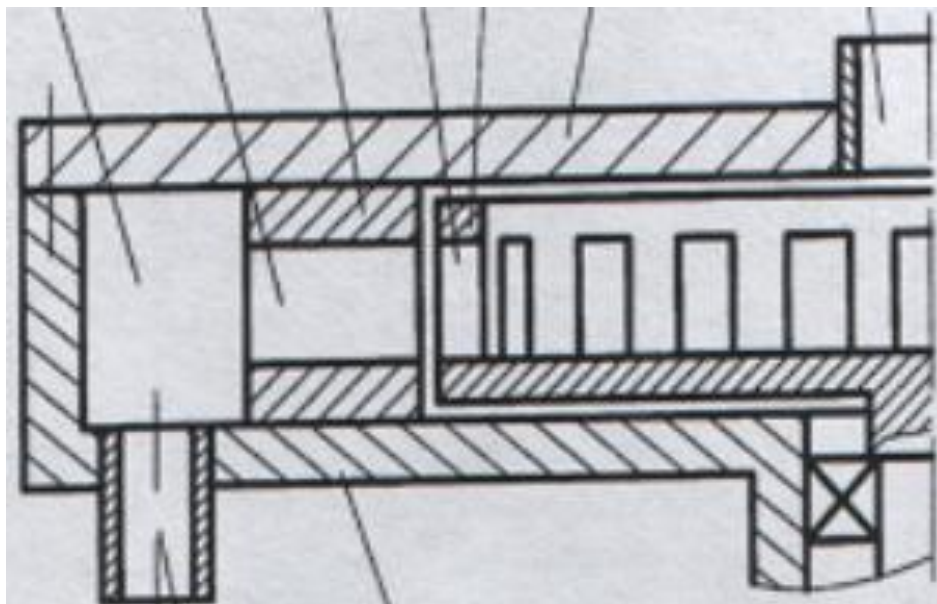


Рис. 1.12 – Конструкція гідродинамічної сирени

Але є також наступні недоліки:

- абразивний знос робочих поверхонь ротора і статора, в результаті чого потрібно їх періодично замінювати;
- неможливо технологічно виконати зазор між ротором і статором менше 0,1 мм. [7-9]

1.5 Гідродинамічні кавітатори в автомобілях

Проблема обмежених ресурсів стоїть дуже гостро сьогодні. Виробники автомобілів постійно шукають нові рішення, які допоможуть збільшити продуктивність автомобіля і при цьому зменшити витрату палива та зменшити кількість шкідливих викидів в атмосферу. Одним із таких рішень є гідродинамічна кавітація палива. В процесі кавітації структура рідини змінюється на деяких ділянках в пар, не змінюючи при цьому структуру по всьому об'єму.[10-13]

Основні функції кавітатора топлива:

- забезпечення економії палива;
- зменшення кількості палива, що не згоріло;
- зменшення шкідливих викидів в атмосферу;
- легкий пуск в умовах низьких температур;
- покращення потужності мотора внутрішнього згорання.

Одним із головних мінусів є те, що на кавітацію може повливати багато явищ. Так, наприклад, для різних моделей автомобілів мають бути різні модифікації кавітатора. Також для моторів з різними об'ємами теж потрібні різні кавітатори. Теоретично на процес може вплинути навіть характер водіння власника автомобіля. І під кожен стиль водіння має підбиратися певна модифікація кавітатора. [16]

1.5 Теоретичне обґрунтування можливостей кавітатора палива

1.5.1 Забезпечення економії палива

Відомо, що паливо з довгими вуглецевими ланцюгами молекул має низькі показники горіння. Частина цього палива взагалі перетікає в кратер двигуна, втрачаючи свої початкові характеристики. Крім цього, паливо може вилітати в вихлопну трубу, там в процес горіння вже вмішується каталізатор. Проте використовуючи кавітатор можливо розбити довгі молекулярні ланцюги. Так ми отримаємо швидке і ефективне горіння палива. На рисунку 1.13 зображена схема встановлення кавітатора в паливну магістраль автомобіля.[5]

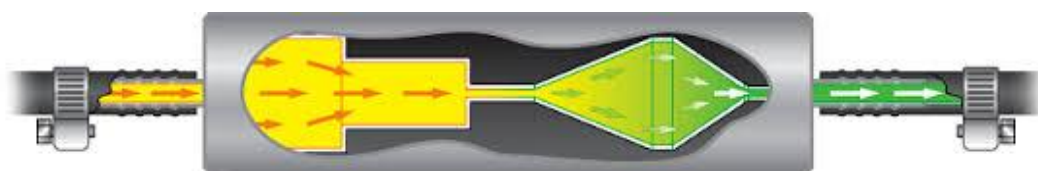


Рис.1.13 – Схема кавітатора в паливній магістралі автомобіля

1.5.2 Підвищення потужності двигуна

Ефективність згорання палива першочергово впливає на потужність. Так як при однаковій кількості отриманого палива показник потужності буде вищим там, де буде отримано найбільш повне спалювання горючої суміші.

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	25
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

Чим краще паливо горить, тим більше енергії ми отримуємо. Так власники авто економлять на паливі просто за рахунок встановлення кавітатора в паливну магістраль. Так вони збережуть звичайну динаміку автомобіля, але витратять значно меншу кількість палива.[2-4]

1.5.3 Зменшена кількість незгорівшого палива

Після обробки кавітатором палива у вихлопну частину потрапляє лише мала частина палива, що не піддалося горінню. Перш за все це позитивно впливає на динаміку каталітичного нейтралізатора. Тоді у атмосферу викидається достатньо мала частина токсичних сполук, ступінь зносу двигуна при цьому не має особливого значення. Масло при стікання в циліндри розріджується, що призводить до втрати його початкових характеристик. За допомогою кавітатора і від цієї проблеми вдається позбутися. [2-4]

1.5.4 Скорочення шкідливих викидів

Якісне згоряння палива є запорукою безпеки навколишнього середовища. Низький вміст палива в вихлопних газах не вимагає додаткового використання каталізаторів, а це означає, що не відбувається утворення токсичних сполук. [2-4]

1.5.5 Легкий пуск при низьких температурах

Завдяки процесу кавітації відбувається особливе розрідження палива. Це необхідно для того, щоб навіть при холодному циліндрі відбувалося ідеально точне, рівне розпилення топлива. Якщо зруйнувати довгі молекулярні зв'язки можливо гарантувати оптимальне розрідження палива, що підходить для

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	26
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

якнайшвидшого згоряння. Цей процес відбувається з урахуванням допустимих показників, які не впливають на якість масла. [2-4]

1.5.6 Досліди кавітаторів

Розробники кавітаторів провели певні досліді і показали, як можна зекономити паливо в залежності від марки автомобіля. На рисунку 1.14 показана ця статистика.

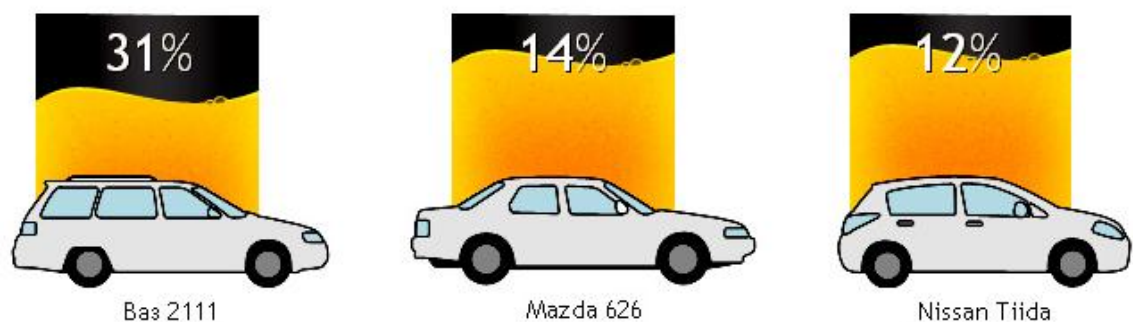


Рис1.14 Діаграма економії палива в залежності від марки автомобіля

Так можна зробити висновок, що найкращий результат показало використання кавітатора в марці автомобіля Vaz 2111 – 31%, а найменший Nissan Tiida – 12%. На мою думку ці цифри є дійсно вражаючими і вже через декілька місяців використання дадуть можливість автовласнику зекономити не малу кількість ресурсів.[12-15]

1.6 Актуальність створення випробувального стенда для кавітаційної обробки ньютонівських рідин

Не дивлячись на велику кількість кавітаційних пристроїв, що можна знайти сьогодні на ринку, всі ці кавітатори ще досить мало вивчені, а їхня робота часто нестабільна в широкому діапазоні. Основною проблемою є залежність роботи кавітатора від умов навколишнього середовища. Наприклад, зміна пори року вплине на температуру навколишнього середовища, чим може порушити процес стабільної кавітації. Саме через це необхідно створити стенд та технічне рішення, за допомогою якого ми зможемо спостерігати за кавітацією при різних умовах та використовуючи різні насадки кавітатора. Так як кавітатор виготовлений зі скла, у нас буде можливість візуалізувати всі процеси із подальшою фотофіксацією. [14-16]

МЕТА ТА ЗАДАЧІ

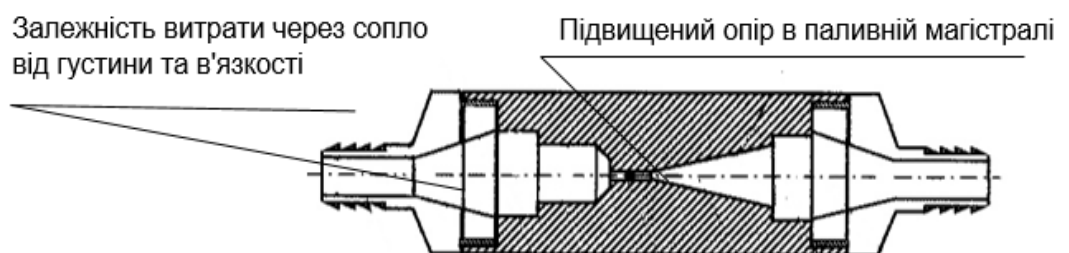
Метою роботи є розробка кавітатора, який буде функціонувати в широкому діапазоні умов експлуатації.

Задачі:

- Спроекувати стенд для обробки рідини гідродинамічною кавітацією з візуалізацією явища кавітації.
- Провести гідравлічний розрахунок втрат в системі та підібрати гідравлічне обладнання.
- Сконструювати кавітаційний пристрій та ежектор в систему.
- Розробити технологію виготовлення корпусу кавітатора.

Основні проблеми кавітаційних пристроїв(рис.1.15):

- Обмежені умови експлуатації (через зміну температури навколишнього середовища кавітація може не відбутися).
- Кавітатори не універсальні. Для різних рідин і систем потрібні різні типи кавітаторів.
- Неможливість регулювання пропускної здатності перерізу дроселя.
- Складність забезпечення кавітації в деяких умовах (наприклад, при високій густині чи в'язкості).



Відсутнє регулювання пропускної здатності через зміну густини та в'язкості

Рис.1.15 Основні проблеми сучасних кавітаторів

Розділ 2. Проектування та розрахунок гідравлічного стенду для обробки кавітацією ньютонівських рідин

2.1 Проектування стенду для обробки кавітацією рідких середовищ

2.1.1 Вимоги до стенду для обробки кавітацією рідких середовищ

Для того, щоб умови стенду відповідали умовам паливної магістралі автомобіля, стенд має відповідати наступним критеріям:

- тиск рідини має бути від 0.1 до 0.45 МПА;
- оптимальна витрата робочої рідини 4...6 л/с;
- в'язкість ГОСТ 2084-77 0,65 сСт;
- густина робочої рідини 720...750 кг/м³;
- діапазон температур -10...40 °С;
- відносна похибка вимірювання для температури, тиску та витрати не повинна перевищувати $\pm 2\%$;
- робоча рідина – бензин. [3]

2.1.2 Розробка принципової гідравлічної схеми

Для якісної кавітаційної обробки рідини було розроблено 4 принципових гідравлічних схеми. На рис.2.1 зображено перший варіант схеми випробувального стенду для обробки гідродинамічною кавітацією ньютонівських рідин.

Стенд один складається з гідравлічної частини (насосної станції НС, апарата кавітаційного АК, витратоміра В, клапана тиску КТ, баку Б) та з електронної (2 датчика тиску ДТ1 і ДТ2, датчика витрати ДВ, датчика температури Т, контролера К та крокового двигуна КД).

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	29
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

В системі є клапан КД, який створить в кавітаторі таке ж зусилля, як і зусилля, що буде потім в реальній системі, де використовується кавітатор. Датчики тиску ДТ1 і ДТ2 вимірюють тиск на вході та на виході з гідродинамічного кавітатора. Цю інформацію вони передають на контролер К, який в свою чергу вимірює перепад тиску та контролює його. Контролер К надсилає сигнал до крокового двигуна, який в свою чергу змінює поперечний переріз кавітаційного пристрою, щоб відрегулювати необхідний перепад тиску. Датчик витрати ДВ, буде вимірювати витрату після кавітаційного пристрою. Так ми зможемо підібрати оптимальний перепад тиску під необхідну витрату, а також в разі засмічення кавітатора можна буде одразу це побачити та виправити до того, як це призведе до поломки.

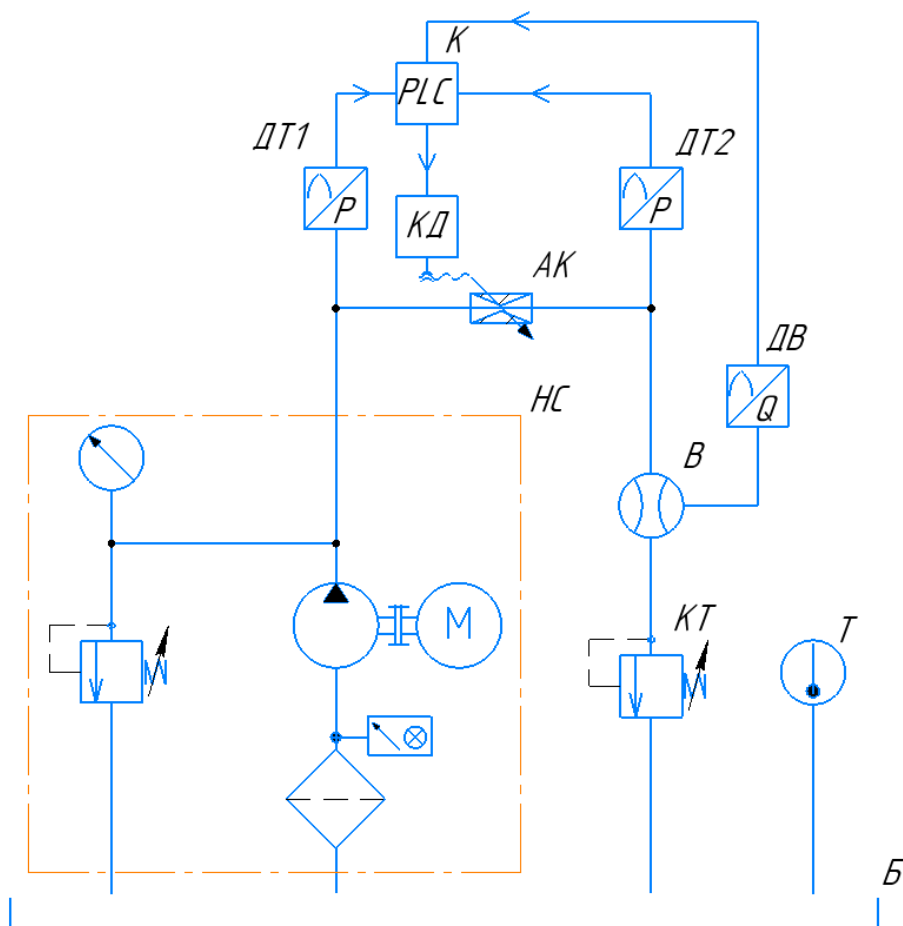


Рис 2.1 – Схема 1. Схема гідравлічна принципова випробувального стенду для обробки ГДК з кроковим двигуном

Очевидно, що запропонований варіант має багато переваг. Але є достатньо значний недолік. І це складність поєднання електроніки з гідравлікою, небезпека коротких замикань.

Тому були запропоновані схема 2 та 3 – рисунок 2.2 та 2.3.

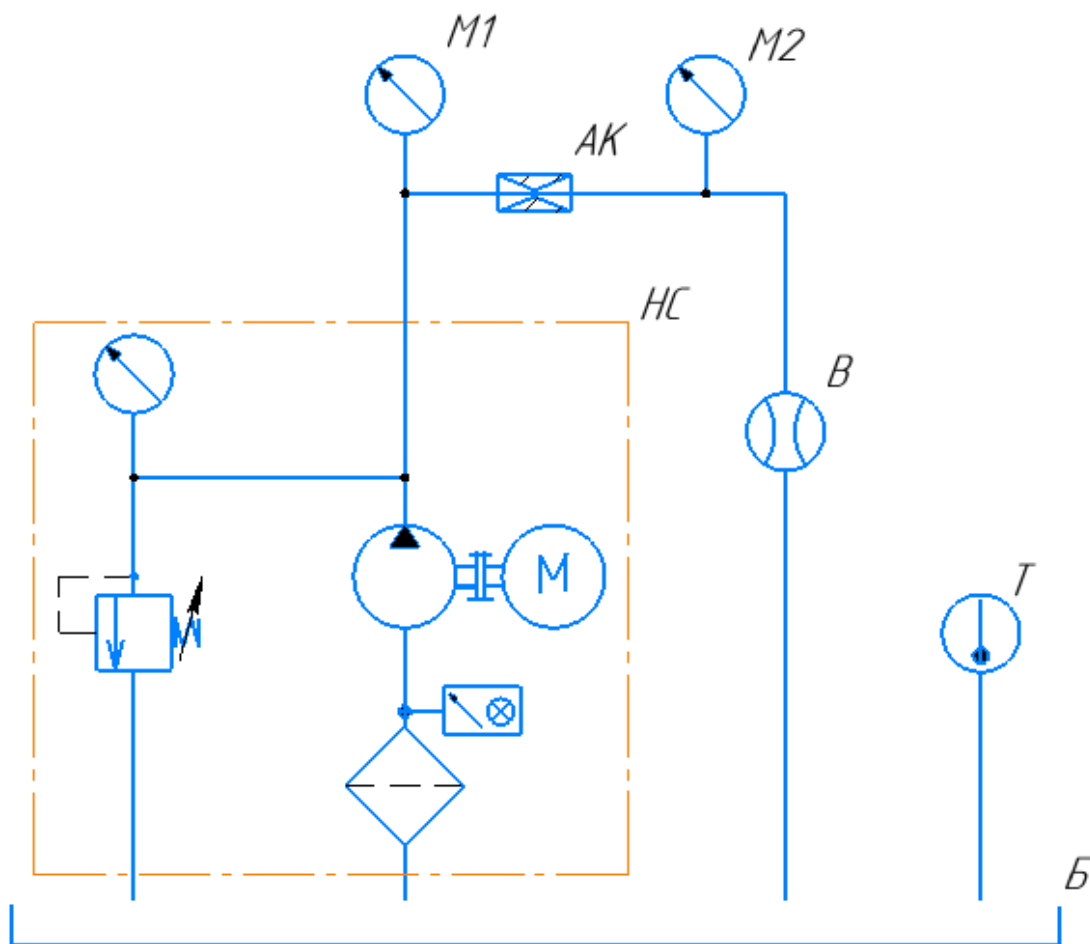


Рис 2.2 – Схема 2. Схема гідравлічна принципова випробувального стенду для обробки ГДК зі зворотним проточним зливом палива в бак

В схемі 2 головною ідеєю є не вбудовувати кавітатор в трубопровід системи, а створити додатковий трубопровід паралельно. Рідина після обробки буде повертатися назад в бак. Насос працює на витраті 5,6 л/хв з цією швидкістю він теоретично встигатиме опрацьовувати більшу частину рідини, що потрібно обробити кавітацією. За допомогою манометрів M1 і M2 можна

слідкувати за перепадом тиску в кавітаторі, а витратомір В показуватиме, яка витрата проходить через наш гідродинамічний кавітатор.

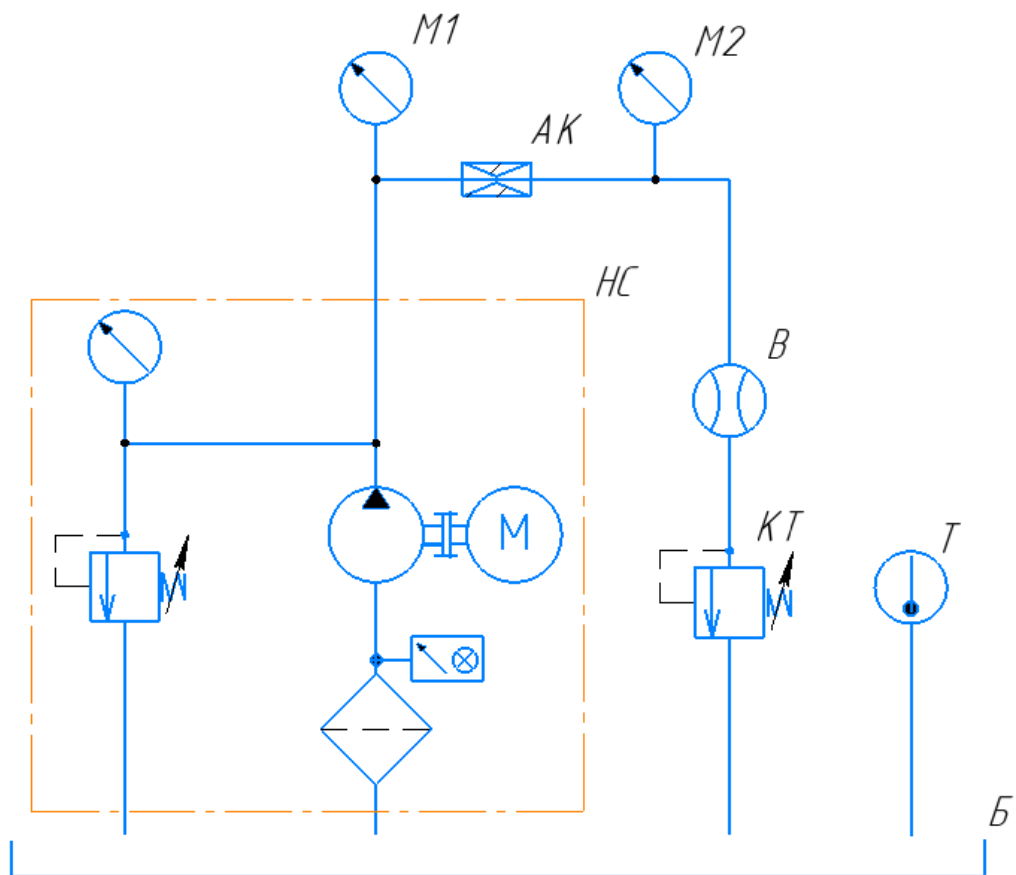


Рис 2.3 – Схема 3. Схема гідравлічна принципова випробувального стенду для обробки ГДК з клапаном тиску, що створює навантаження

Схема 3 майже повністю дублює схему 2. Принципово вона відрізняється тим, що вбудовується в систему. Клапан КТ буде створювати навантаження, яке створює система в реальних умовах. Кавітатор було вирішено встановити в схему так, як хоч в схемі 2 насос і качає достатньо швидко і обробляє майже все паливо. Все ж є ризик, що частина палива залишиться неопрацьованою, а нашою метою є покращити якість на максимум, на скільки це в принципі можливо нашим кавітатором.

Все ж так як кавітатор дуже чутливий до змін по реології рідини чи до змін тиску, в стендах, що показані вище, кавітація може бути не дуже стабільною через, наприклад, зміну температури рідини і в'язкості. Тому

з'явилася ідея додати в схему ще один елемент, а саме ежектор. На рисунку 2.4 показана принципова схема випробувального стенду з ежектором. Ідея полягає в тому, щоб за допомогою ежектора наповнювати рідину додатково повітрям або іншим, до того як вона потрапить до кавітатора. Так в рідині буде більша кількість повітряних каверн, і, внаслідок цього, кавітація почнеться набагато раніше і буде більш інтенсивною. Також є ідеї за допомогою ежектора додавати від 2 до 10 % води в паливо. Така обробка може покращити ефективність згорання палива. І тоді, можна буде, наприклад, використовувати бензин з меншим октановим числом. [7]

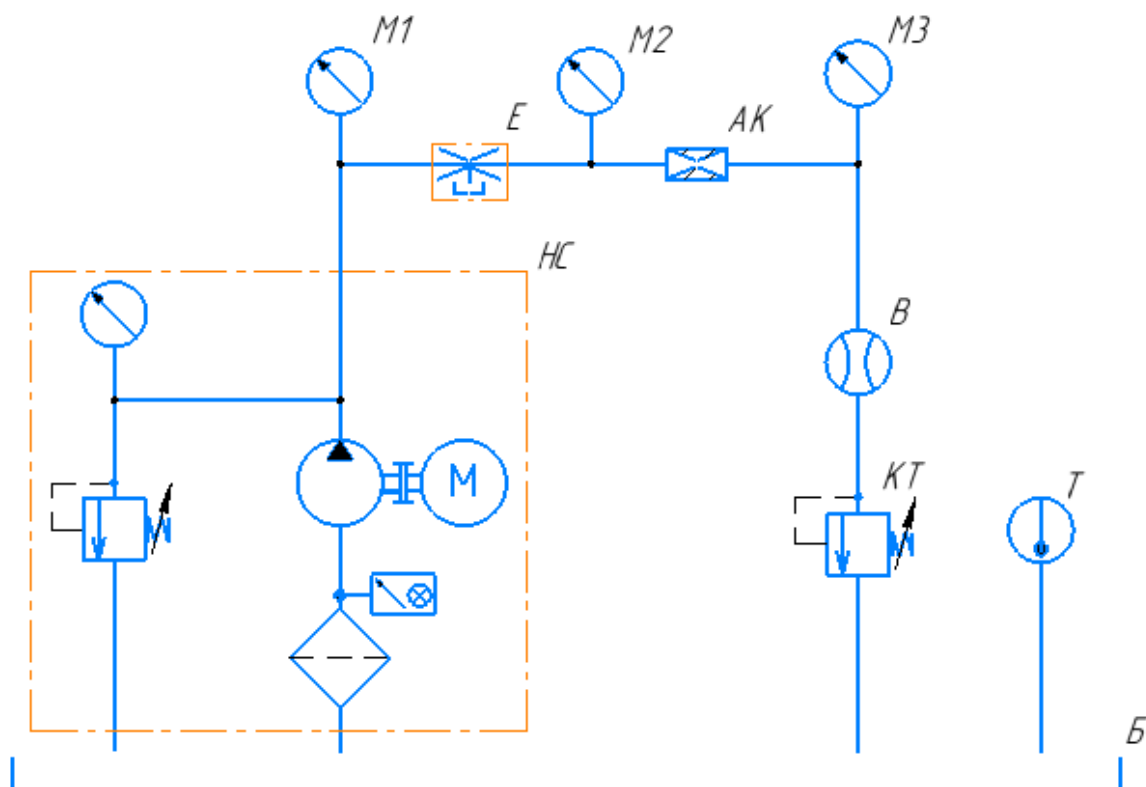


Рис 2.3 – Схема 4. Схема гідравлічна принципова випробувального стенду для обробки ГДК з ежектором

На схемі 4 з рисунка 2.3 зображена станція насосна НС, яка створює необхідну витрату в 5,6 л/хв. Також тут є три манометри. Манометр М1 та М2 показують тиск на вході та виході з ежектора Е, а манометр М3 – тиск на виході з кавітатора АК. Витратоміра В показує витрату обробленої рідини після кавітатора. Клапан тиску КТ створює навантаження, як в системі, в яку

пізніше планується встановити цей кавітатор. В системі також є датчик температури T , за допомогою якого ми дізнаємось на скільки рідина нагрівається при такій обробці.

2.2 Гідравлічний розрахунок

Вихідні данні:

Витрата від насоса розраховується за формулою:

$$Q_n = n * q * \eta_v$$

В нашому стенді для обробки Ньютонівських рідин гідродинамічною кавітацією використовується електричний бензонасос Bosch Rexroth EHP080LDG66F004-20C0654R0D120-S00. Його робочий об'єм дорівнює 4 см^3 .

Для розрахунку витрати обираю стандартну та найбільш оптимальну для роботи насосу частоту обертання 1450 об/хв. Тоді $Q_n = 1450 * 4 * 0,98 / 1000 = 5,7$ л/хв.[18]

2.2.1 Розрахунок трубопроводу

Для того, щоб розрахувати трубопровід, потрібно розбити його на ділянки з однаковою витратою. Ділянка – це трубопровід, який включає в себе місцеві опори (такі як штуцери, трійники, коліна та інше) та гідроапарати.[19]

Внутрішній діаметр труби обчислюють за наступною формулою:

$$d_T = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_T}{\pi \cdot V_{CP}}}$$

де Q_T , в $\text{м}^3/\text{с}$ – витрата в трубопроводі,

V_{CP} , $\text{м}/\text{с}$ – середня швидкість рідини, що протікає.

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	34
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

Для різного призначення трубопроводу обирають різну середню швидкість:

для всмоктувальних ліній вибираємо $v_{\text{вс}} = 1$ м/с;

для напірних ліній вибираємо $v_{\text{н}} = 5$ м/с;

для зливних ліній вибираємо $v_{\text{зл}} = 2$ м/с.[19]

Отримане значення округляють по Держстандарту 10362 і Держстандарту 8734-75 (6,8,10,16,20,25 мм).

- Отже, внутрішній діаметр для всмоктувальної лінії та дійсна швидкість дорівнює:

$$d_{\text{вс}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_T}{\pi \cdot V_{CP}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,7}{3,14 \cdot 1 \cdot 60000}} = 0,011 \text{ м} = 11 \text{ мм};$$

приймаємо по Держстандарту 8734-75 $d_{\text{вс}} = 10$ мм.

$$v_{\text{вс}} = \frac{4Q_n}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 5,7}{60000 \cdot 3,14 \cdot 0,01^2} = 1,2 \text{ м/с}.$$

- Внутрішній діаметр труби для напірної лінії та дійсна швидкість дорівнює:

$$d_{\text{н}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_T}{\pi \cdot V_{CP}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,7}{3,14 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 60000}} = 0,0049 \text{ м} = 4,9 \text{ мм};$$

приймаємо по Держстандарту 8734-75 $d_{\text{вс}} = 6$ мм.

$$v_{\text{н}} = \frac{4Q_n}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 5,7}{60000 \cdot 3,14 \cdot 0,06^2} = 3,4 \text{ м/с}.$$

Для нашого дослідження така швидкість замала, тому ми замовимо нестандартні трубки діаметром 5 мм.

Так можна буде отримати середню швидкість:

$$v_n = \frac{4Q_n}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 5,7}{60000 \cdot 3,14 \cdot 0,05^2} = 4,84 \text{ м/с.}$$

Такі умови будуть більш наближеними до умов, що ми маємо на мені створити в нашому стенді.

- Внутрішній діаметр труби для зливної лінії та дійсна швидкість дорівнює:

$$d_{зл} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_T}{\pi \cdot V_{CP}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,7}{3,14 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 60000}} = 0,007 \text{ м} = 7 \text{ мм};$$

приймаємо по Держстандарту 8734-75 $d_{вс} = 8 \text{ мм.}$

$$v_{зл} = \frac{4Q_n}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 5,7}{60000 \cdot 3,14 \cdot 0,08^2} = 1,89 \text{ м/с.}$$

2.2.2 Розрахунок втрат тиску в трубопроводі

Гідравлічні втрати в трубопроводі рахують додаючи втрати на гідравлічне тертя Δp_T , втрати в місцевих опорах Δp_M та втрати у гідроапаратах Δp_δ . [19]

Гідравлічні втрати тиску на тертя рахують за формулою:

$$\Delta p_T = \left(\frac{1}{2} \lambda \rho V^2 \right) / d_T ,$$

тут l – довжина відрізка трубопроводу; λ - коефіцієнт тертя; ρ - щільність рідини; V - середня швидкість протікання рідини в перерізі; d_t - діаметр трубки або шланги.[19]

Коефіцієнт тертя λ відрізняється в залежності від режиму течії рідини. Цей коефіцієнт визначають за допомогою числа Рейнольдса:

$$Re = V \cdot d_m / \nu,$$

тут V - середня швидкість рідини, d_t - діаметр трубки, ν - кінематична в'язкість рідини.[19]

Якщо рух ламінарний, тобто $Re < 2320$. Для коефіцієнта тертя λ приймають наступну формулу, враховуючи можливі звуження чи скривлення перетину труби:

$$\lambda = 64 / Re$$

Якщо ж рух турбулентний, тобто $Re \geq 2320$, тоді коефіцієнт тертя λ буде залежати не тільки від числа Рейнольдса, а і від відносної шорсткості стінок труби. Для труб із сталі шорсткість обирають $\Delta = 0,03\text{мм}$, а труби із кольорового металу вважають практично гладкими.[19]

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}.$$

Кінематична в'язкість бензину ν при температурі 15°C буде $0,88$ СантіСтокс.

- Для всмоктувальної лінії коефіцієнт Рейнольдса буде:

$$Re = \frac{1,2 \cdot 0,01}{0,88 \cdot 10^{-6}} = 13636$$

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	37
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

Це набагато більше ніж 2320, отже рух турбулентний
коефіцієнт Дарсі :

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{13636}} = 0,0277.$$

Довжина всмоктувальної лінії $l_{\text{вс}}=0,3$ м.

Тоді, втрати на гідравлічне тертя:

$$\Delta p_{\text{ТВС}} = \frac{0,5 \cdot 0,3 \cdot 750 \cdot 0,0277 \cdot 1,2^2}{0,01} = 448,74 \text{ Па};$$

- Для напірної лінії коефіцієнт Рейнольдса буде:

$$\text{Re} = \frac{4,84 \cdot 0,005}{0,88 \cdot 10^{-6}} = 27500$$

Це набагато більше ніж 2320, отже рух турбулентний.
коефіцієнт Дарсі :

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{27500}} = 0,025.$$

Довжина напірної лінії $l_{\text{вс}}=0,9$ м.

Втрати на гідравлічне тертя:

$$\Delta p_{\text{ТНП}} = \frac{0,5 \cdot 0,9 \cdot 750 \cdot 0,025 \cdot 4,8^2}{0,005} = 38880 \text{ Па};$$

- Для зливної лінії коефіцієнт Рейнольдса буде:

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підпис	Д		38

$$Re = \frac{1,89 \cdot 0,008}{0,88 \cdot 10^{-6}} = 17181$$

Це набагато більше ніж 2320, отже рух турбулентний.
коефіцієнт Дарсі :

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{17181}} = 0,0276.$$

Довжина зливної лінії $l_{зл}=0,3$ м.

Втрати на гідравлічне тертя:

$$\Delta p_{тзл} = \frac{0,5 \cdot 0,3 \cdot 750 \cdot 0,0276 \cdot 1,89^2}{0,008} = 1386 \text{ Па};$$

Отже, загальні втрати на гідравлічне тертя дорівнюють:

$$\Sigma \Delta p_t = 38880 + 448 + 1386 = 40\,714 \text{ Па}.$$

Гідравлічні втрати тиску на місцевих опорах розраховуються за наступною формулою:

$$\Delta p_m = (\xi \rho V^2) / 2 ,$$

тут ξ - коефіцієнт місцевого опору.

В моїй системі є 4 трикутників, 2 коліна, 8 штуцерів. Отже втрати на місцевих опорах дорівнюють:

$$\Delta p_m = (\xi \rho V^2) / 2 = (4 \cdot 1,2 + 2 \cdot 0,13 + 8 \cdot 0,12) \cdot 750 \cdot 4,8^2 / 2 = 52013 \text{ Па}$$


					ДПО1.МА7204.00.00.00 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підпис	Д		39

Висновок: так як максимальний тиск в системі має бути не вище 450000 Па, враховуючи втрати, налаштовую запобіжний клапан тиску на тиск приблизно 502013 Па, тобто 0,45...0,50 МПа.[19]




2.3 Підбір гідравлічного обладнання в систему


Таблиця 2.1 – Підбір гідравлічного обладнання та вимірювальних пристроїв

№	Назва установки	Зображення	Основні характеристики
1	2	3	4
1	Всмоктувальний фільтр FSB 110		Тонкість фільтрації 20 мкм Витрата – Від 5 до 20 л\хв
2	Електричний бензонасос Bosch Rexroth EHP080LDG6 6F004-20C0654R0D 120-S00		Робочий об'єм – 4,0 см ³ Витрата (при 1450об\хв) – 5,7 л\хв

			Робочий тиск – 5бар
3	Манометр Bosch Rexroth ABZMM63- 10 BAR/MPA- U/V-G		$P_{\max}=100$ Бар

Продовження Табл.2.1

4	Гідрокла пан тиску Bosch Rexroth Z DB 6 D P 1 - 2X / 50		$Q_{\max}=60$ л/хв; $P_{\max}=5$ М Па.
7	Гідробак		Об`єм баку – 15 л
8	Витратом ір ОВЕН PM1		Живлення: 50Гц, 12В. Споживча потужність: 0.1Вт. Рекомендований час вимірювань: не більш ніж 1.5с.

	Датчик температур и ОВЕН ПД-100 ДИ		Діапазон робочих температур: -40...+100°C Ступінь захищеності корпусу: ірv65
--	---------------------------------------	---	---

[18]

2.4 Розрахунок діаметру дроселя в кавітаційному пристрої

Необхідна середня швидкість рідини через дросель для отримання стабільної кавітації дорівнює приблизно 25 м/с.

Діаметр сопла можна визначити з формули з рівняння витрати в соплі Лаваля:

$$d_{op} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}},$$

тут Q – витрата через дросельний пристрій, V – швидкість рідини, що проходить через дросель.

$$d_{op} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000083}{3,14 \cdot 25}}$$

Отже, діаметр дроселя $d_{др} = 0,0021 \text{ м} = 2,1 \text{ мм}$.

Визначу діаметр підводних отворів:

$$d_n = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_m}},$$

де Q – витрата в трубопроводі, V – швидкість рідини, що протікає.

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000083}{3,14 \cdot 5}} = 0,0045 \text{ м} = 4,5 \text{ мм}$$

Приймаю діаметр відповідно до Держстандарту 8732-78 $d_n = 6 \text{ мм}$. [19]

Висновки до розділу 2:

- Спроектовано 4 гідравлічних схеми для стенду для обробки гідродинамічною кавітацією ньютонівських рідин, що відповідають початковим умовам, а саме максимальний тиск в системі 0.45 МПа, витрата робочої рідини 5,7 л/с, робоча рідина бензин, температура 10...40 °С.
- Проаналізовано їх переваги та недоліки та обрано найбільш оптимальну систему для наших умов.
- Проведено необхідні гідравлічні розрахунки та визначено втрати тиску в системі. Загальні втрати тиску складають 52013 Па.
- Підібрано гідравлічне обладнання для даного стенду.
- Спроектовано та сконструйовано кавітаційний пристрій та ежектор.
- Після проведення розрахунків, підібрано оптимальний діаметр дроселя для кавітаційного пристрою – 2,1 мм. Таким чином можливо збільшити швидкість рідини в системі з 4,84 до 25 м/с.

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підпис	Д		43

РОЗДІЛ 3. Розробка технології для виготовлення корпусу кавітатора

З метою покращення технологічного процесу, розглянемо виготовлення корпусу для гідродинамічного кавітатора (Рис 3.1). Будуть визначені такі основні параметри, як технологічний контроль креслення, аналіз технологічності деталі, вибір заготовки, технологічного процесу та типових схем обробки поверхонь.

3.1 Технологічний контроль креслення

В результаті технологічного контролю креслення корпусу гідродинамічного кавітатора, виявлено наступне: на кресленні розставлені всі розміри, необхідні для виготовлення деталі: шорсткості всіх поверхонь деталі проставлені в відповідності з ГОСТ 2789-73; допуски і граничні відхилення розмірів приведені в відповідності з ГОСТ 25346-82 і ГОСТ 25347-82; допуски форми і розміщення поверхонь проставлені з ГОСТ 24643-81; вимоги до точності виготовлення поверхонь (проставлені в відповідності з ГОСТ 24643-81) корпусу відповідають вимогам, що пред'являються до шорсткості цих поверхонь.(рис.3.1.)

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підпис	Д		44

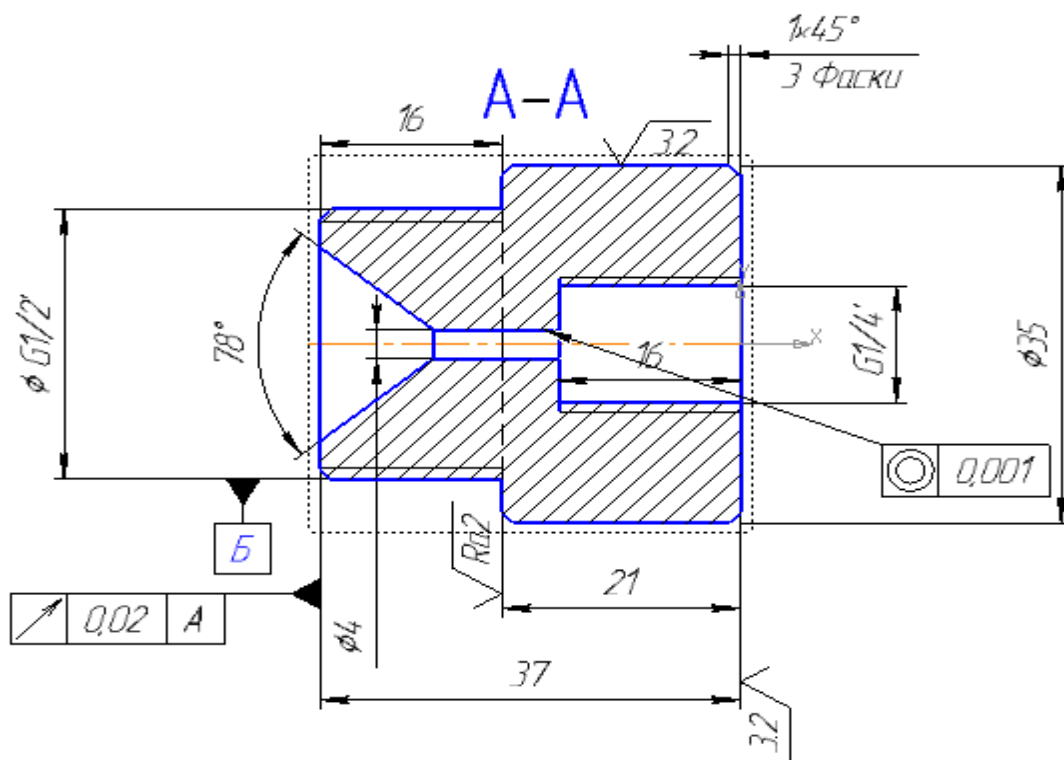


Рис.3.1. Корпус гідродинамічного кавітатора

3.2. Аналіз технологічності деталі та вибір заготовки

Основа цієї деталі буде виготовлена з круглого профілю сталі 20 ГОСТ 1050-88

Механічні характеристики трубної сталі -20, виготовленою за ГОСТ 1050-74 при температурі 20° С:

- границя міцності на розтяг (тимчасовий опір) $\sigma_B = 420 \text{ МПа}$;
- відносне видовження після розриву $\delta = 25\%$;
- твердість не більше 207 НВ;
- густина $\rho = 7900 \text{ кг} / \text{м}^3$.

3.3 Вибір типового технологічного процесу і типових схем обробки поверхонь

Технологічні процеси для обробки круга:

					ДПО1.МА7204.00.00.00 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підпис	Д		45

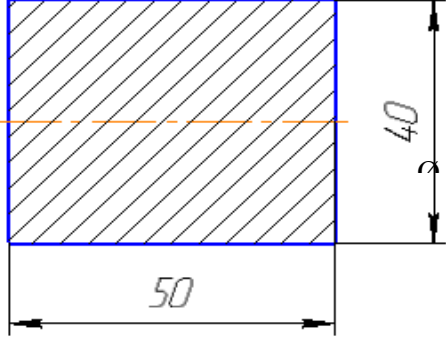
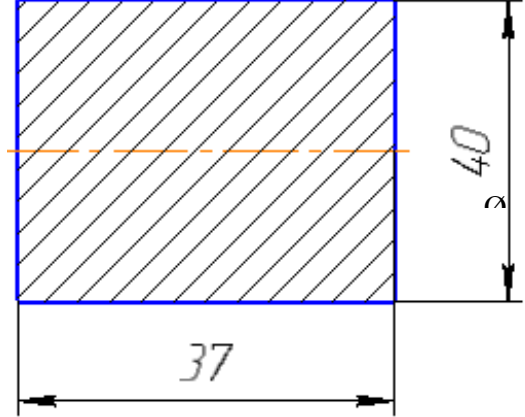
- Чорнова обробка заготовки;
- Відрізати заготовку за допомогою відрізного різця 32x20x170 з пластиною з твердого сплаву T15K6. ГОСТ 18884-73;
- Підрізати торці за допомогою підрізного різця 32x20x170 з пластиною з твердого сплаву 32x20x170 T15K6. ГОСТ 18871-73;
- Зовнішня токарна обробка за допомогою прохідного відігнутого різця 32x20x170 з пластиною з твердого сплаву 32x20x170 T15K6. ГОСТ 18884-73;
- Свердління отвору, за допомогою свердла 2302-0731. ГОСТ 2069-75
- Розсвердлення осьового отвору свердлом 2302-0748. ГОСТ 2069-75
- Проточити внутрішній отвір під різьбу свердлом 2302-0796. ГОСТ 2069-75
- Розточування конусного отвору за допомогою внутрішнього прохідного різця з пластиною з твердого сплаву 32x20x170 T15K6. ГОСТ 18871-73;
- Підрізати торці за допомогою підрізного різця 32x20x170 з пластиною з твердого сплаву 32x20x170 T15K6. ГОСТ 18871-73;
- Проточування зовні корпусу під зовнішню різьбу за допомогою зовнішнього прохідного різця 32x20x170 з пластиною з твердого сплаву T15K6. ГОСТ 18884-73;
- Проточити фаски за допомогою прохідного відігнутого різця 32x20x170 з пластиною з твердого сплаву 32x20x170 T15K6. ГОСТ 18884-73;
- Проточити фаски за допомогою прохідного відігнутого різця 32x20x170 з пластиною з твердого сплаву 32x20x170 T15K6. ГОСТ 18884-73;
- Нарізання різьби в внутрішнього отвору G1/4' ГОСТ 3266-81;
- Нарізання різьби на зовні корпусу G1/4' ГОСТ 3266-81;

Розробка маршрутного технологічного процесу

На основі креслення деталі і описаного типового технологічного процесу вибираємо технологічну базу і розробляємо технологічний маршрут обробки деталі (таблиця 3.1).

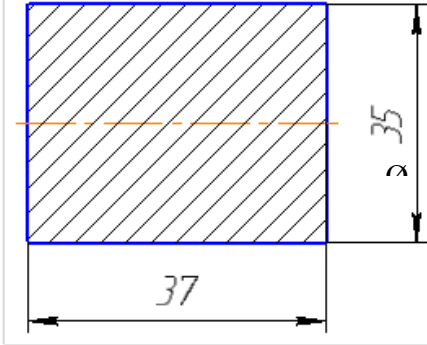
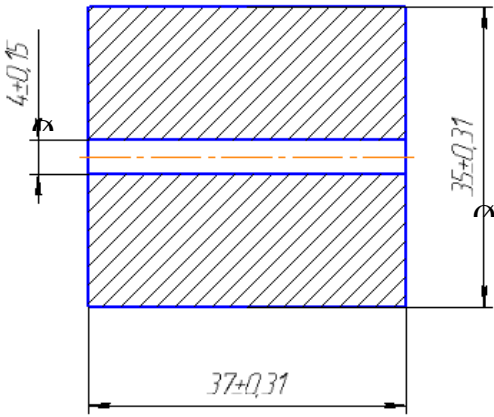
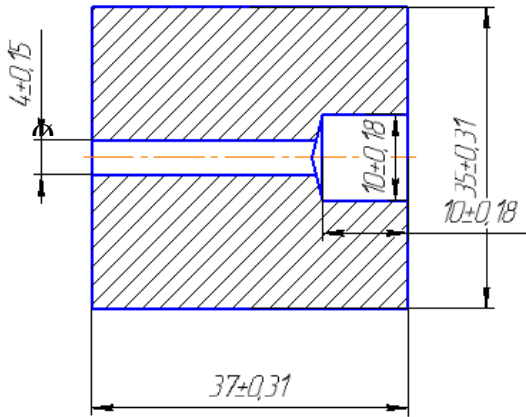
					ДПО1.МА7204.00.00.00 ПЗ	46
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

Таблиця 3.1 - Схема технологічного процесу виготовлення корпусу кавітатора

№	Операція	Зображення	Зміст операції
1	2	3	4
1	Заготовка (Круг)		Токарно револьверний станок
2	Відріза ння заготовки та підріза ння торців		Відріза ння різцем до 37мм

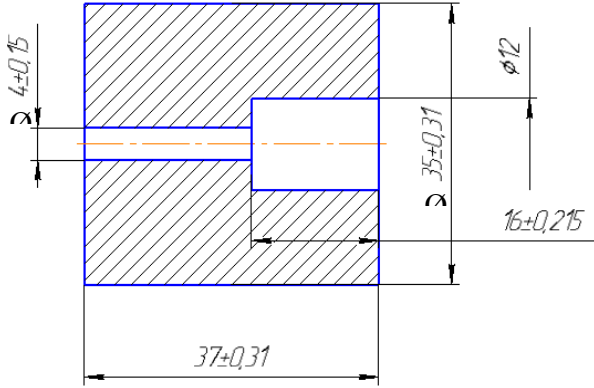
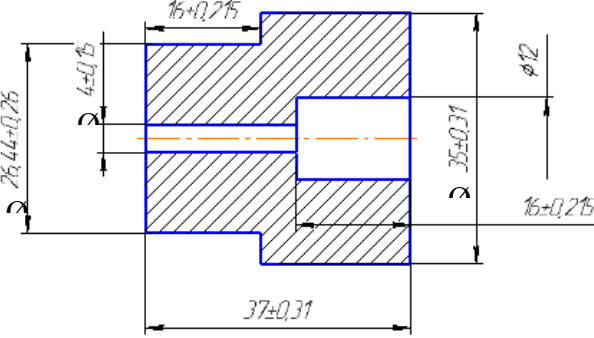
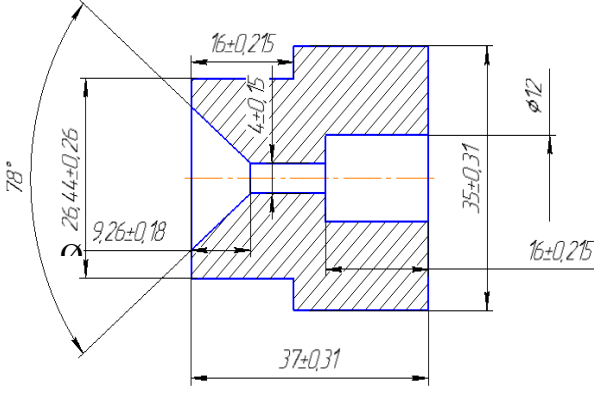
Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
---	---	---	---

3	Токарна обробка по зовнішньому діаметру		Зовнішн я проточка до діаметру 35мм
4	Свердлін ня осьового отвору		Наскрі́з не свердління свердлом діаметр 4мм
5	Свердлін ня осьового отвору для розточки		Свердлі ння свердлом діаметр 10мм

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
---	---	---	---

6	Розточка осьового отвору		Розточува ння різцем 12 мм на глибину 16 мм
7	Токарна обробка по зовнішньому діаметру		Проточка різцем до діаметру 30мм На довжину 16 мм
8	Токарна обробка, проточка внутрішнього конусу		Проточка конусу на глибину 9 мм під кутом 78°

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
---	---	---	---

9	Точіння я фасок		Точіння фасок 1 ^x 45°
10	Точіння я фасок з		Точіння фасок 1 ^x 45°
11	Наріза ння різьби		Нарізан ня плашкою зовнішньої трубних різьби G1/4'

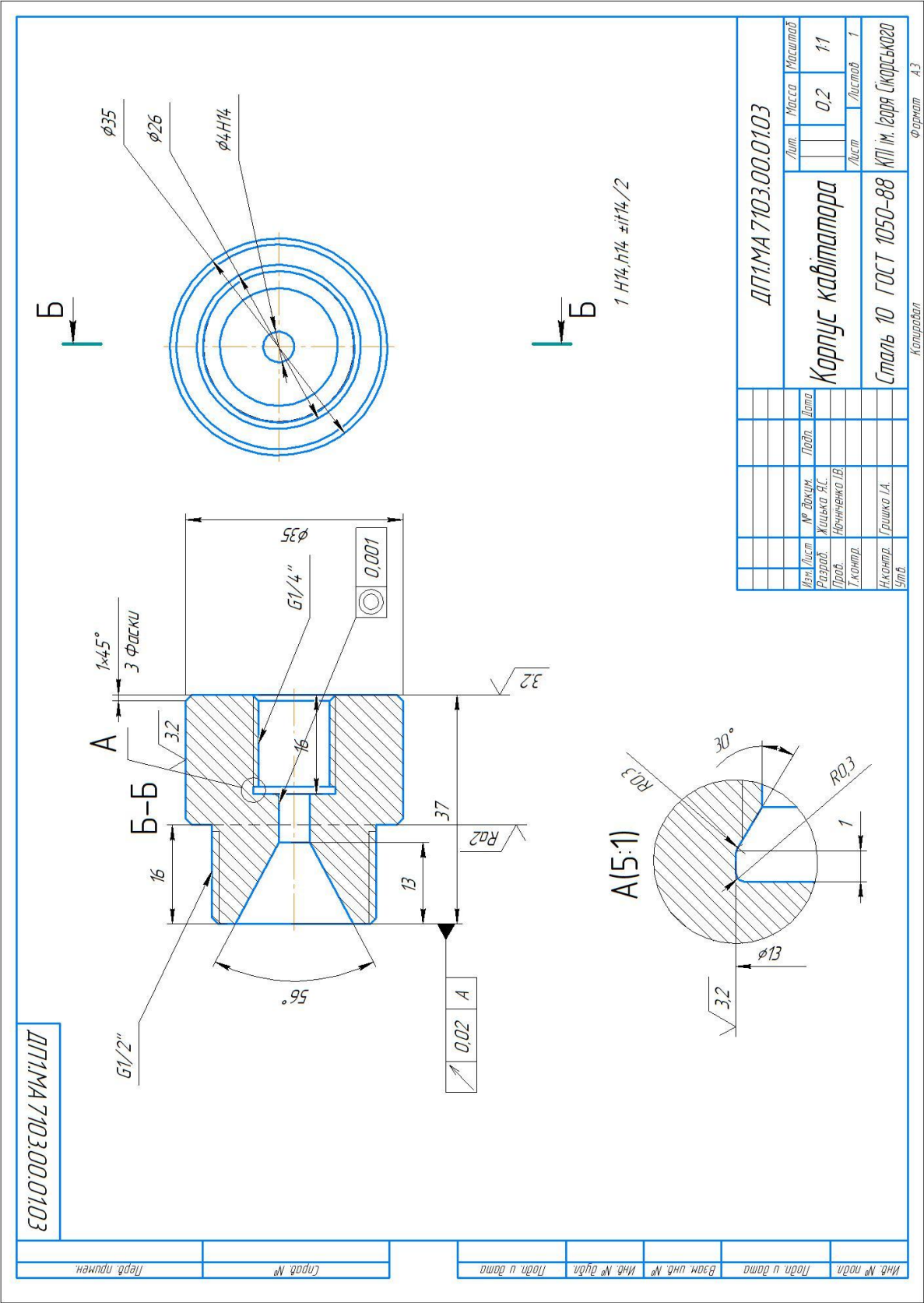
Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
---	---	---	---

12	Наріза ння різьби		Нарізан ня мечиком зовнішньої трубної різьби G1/4'
13	Слюса рна	(зачистка заусениці, притупити гострі канавки)	Слюсар ний стіл
14	Проми вка		

3.4 Креслення деталі

На рис 3.2 зображено креслення корпусу гідродинамічного кавітатора з основними розмірами та необхідними шорсткостями.



Висновки до розділу 3

В третьому розділі було розроблено технологію виготовлення корпусу кавітатора, завдяки чому можливо розрахувати фінансові витрати на його виготовлення.

Проведено технологічний контроль креслення.

Обрано заготовку.

Обрано типовий технологічний процес і типові схеми обробки поверхонь корпусу гідродинамічного кавітатора..

Розроблено послідовність операцій обробки корпусу гідродинамічного кавітатора.

					<i>ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ</i>	<i>А</i>
<i>З</i>	<i>А</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Д</i>		<i>53</i>

РОЗДІЛ 4. Охорона праці

Темою дипломної роботи є «Стенд для обробки ньютонівських рідин гідродинамічною кавітацією». У даній роботі досліджено характеристики кавітаторів, робота проводиться за персональним комп'ютером. В даному розділі «Охорона праці» будуть розглянуті загальні питання охорони праці під час проектування дипломної роботи.

4.1. Характеристика об'єкту

Розміри приміщення, в яких встановлений комп'ютер та інша оргтехніка: площа 32 кв.м., а об'єм $V = S \cdot h = 32 \cdot 2,7 = 86,4 \text{ м}^3$. У цьому приміщенні передбачено відповідні параметри температури і чистоти повітря.

На рис .1 зображений схематичний план кімнати, де проводяться досліди. Відповідно до державних санітарних норм "Влаштування і обладнання кабінетів комп'ютерної техніки в навчальних закладах та режим праці учнів на персональних комп'ютерах" ДСанПіН 3.3.2.007-98 площа на одне робоче місце з ПК для дорослих користувачів повинна складати не менше 6.0 м^2 , а об'єм – не менше 20 м^3 . Отже, габаритні розміри приміщення повністю відповідають санітарним нормам.[20]

Для облицювання стін, стель, підлоги приміщень, де розміщені ПК, слід використовувати матеріали, дозволені органами санітарно-епідеміологічного нагляду, а для внутрішньої обробки інтер'єру – матеріали, що дифузно-відбиваються, з такими коефіцієнтами віддзеркалення: для стелі – 0.7-0.8; для стін – 0.5-0.6; для підлоги – 0.3-0.5. [20]

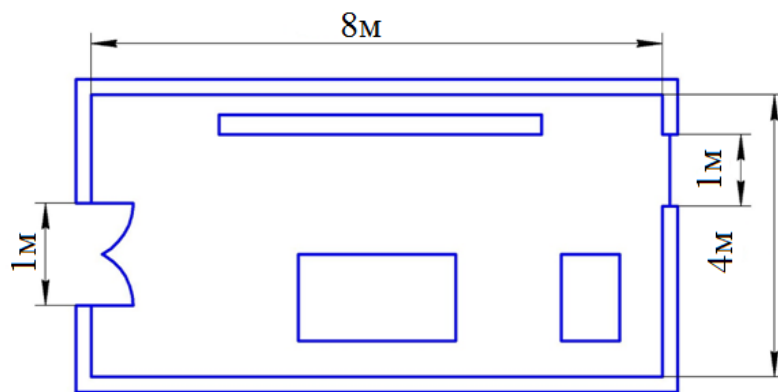


Рис 4.1 План кімнати

4.2. Мікроклімат

Середня температура приміщення в теплий період року дорівнює 23°C , відносна вологість повітря 49%(Табл.4.1.).

У холодний період року, середня температура складає 23°C . Значення відносної вологості дорівнює 58%.

Виходячи з «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99, визначаємо дану роботу, як легку фізичну роботу (категорія І) при якій витрата енергії дорівнює 105 - 140 Вт (90 – 120 ккал/год.) - категорія Іб, тобто робота, що виконуються сидячи і не потребує фізичного напруження.[21]

Таблиця 4.1 - Мікроклімат кімнати в різні пори року

Період року	Температура, °C			Відносна вологість, %	
	Оптимальна	Фактична		Оптимальна	Фактична
		Верхня межа	Нижня межа		
Холодний	21 - 24	23	21	40 - 60	57
Теплий	23 - 28	28	25	40 - 60	46

Для створення необхідних параметрів мікроклімату у приміщенні застосовується витяжна вентиляція та проводиться провітрювання приміщення.

Витяжна вентиляція приміщення досягається видаленням з них нагрітого або забрудненого повітря і подачею чистого зовнішнього повітря.[20-21]

Основні параметри мікроклімату (температура повітря, вологість і швидкість руху повітря на робочому місці) повинні відповідати вимогам. Крім того, необхідно забезпечити необхідні концентрації позитивних і негативних іонів в повітрі робочої зони. Результати досліджень показали, що позитивні іони у великій кількості негативно впливають на розумову і фізичну працездатність (з'являється стомлюваність), на діяльність серцево-судинної системи і системи кровотворення, а негативні іони сприятливо впливають на здоров'я людини.

Середня температура приміщення в теплий період року дорівнює **23°C**, відносна вологість повітря 49%.[20]

У холодний період року, середня температура складає **23°C**. Значення відносної вологості дорівнює 58%.

Виходячи з «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99, можна зробити висновок, що всі параметри мікроклімату приміщення в теплий та холодний період року знаходяться в діапазоні допустимих значень, тому можна зробити висновок, що мікроклімат приміщення є сприятливим для праці.[21]

4.3. Освітлення

Недостатність освітлення призводить до напруги зору, зниження уваги, приводить до настання передчасної стомленості. Надмірно яскраве освітлення викликає засліплення, роздратування і різь в очах. Неправильний напрям світла на робочому місці може створювати різні тіні, відблиски, дезорієнтувати що працює. Всі ці причини можуть привести до нещасного випадку або профзахворювань, тому настільки важливий правильний розрахунок освітлення, визначення необхідного числа світильників, їх типу і розміщення.

Згідно державних правил природного та штучного освітлення – ДБН В.2.5-28:2018. Штучне освітлення в приміщеннях для експлуатації ПК повинне здійснюватися системою загального рівномірного освітлення. У випадках переважної роботи з документами, слід застосовувати системи комбінованого освітлення (до загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення, призначені для освітлення зони розташування документів).[21]

Освітленість на поверхні столу в зоні розміщення робочого документа повинна бути 300-500 лк. Освітлення не повинне створювати відблисків на поверхні екрану. Освітленість поверхні екрану не повинна бути більше 300 лк.

Як джерела світла при штучному освітленні слід застосовувати переважно люмінесцентні лампи типу. У світильниках місцевого освітлення допускається застосування ламп розжарювання, зокрема галогенних.[20]

В приміщенні застосовується штучне освітлення комбіноване (місцеве і загальне) і природне освітлення бокове. Штучне освітлення виконується за

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підпис	Д		57

допомогою електричних джерел світла - ламп розжарювання. Виходячи з цього, проведемо розрахунки освітленості нашого приміщення.

Розрахунок освітлення проводиться для кімнати площею 32м², ширина якої 4м, висота–2.7 м. Скористаємося методом світлового потоку.[21]

Визначимо світловий потік в приміщенні і порівняємо його з допустимим, за формулою:

$$E_{\text{еф}} = \frac{F_{\text{л}} N n \eta}{S \cdot k_z \cdot z}$$

Де: $E_{\text{еф}}$ – розраховується світловий потік, Лк;

E – нормована мінімальна освітленість, Лк (визначається за таблицею).

Роботу програміста, відповідно до цієї таблиці, можна віднести до розряду точних робіт, отже, мінімальна освітленість буде $E = 300\text{лк}$;

S – площа освітлюваного приміщення (у нашому випадку $S = 32\text{м}^2$);

z – відношення середньої освітленості до мінімальної (звичайно приймається рівним 1,1 ... 1,2, нехай $Z = 1,1$);

k_z – коефіцієнт запасу, враховує зменшення світлового потоку лампи в результаті забруднення світильників у процесі експлуатації (його значення залежить від типу приміщення й характеру проведених у ньому робіт і в нашому випадку $K = 1,5$);[21]

N - кількість світильників;

n - кількість ламп у світильнику.

η - коефіцієнт використання, (виражається відношенням світлового потоку, що падає на розрахункову поверхню, до сумарного потоку всіх ламп і обчислюється в частках одиниці; залежить від характеристик світильника, розмірів приміщення, фарбування стін і стелі, які характеризуються коефіцієнтами відображення від стін ($P_{\text{с}}$) і стелі ($P_{\text{п}}$), Стеля приміщення свіжопобілена $\rho_{\text{сл}} = 70\%$, стіни мають світло-сірий колір $P_{\text{сн}} = 50\%$, підлога з

паркету $\rho_p=30\%$.. Значення η визначимо по таблиці коефіцієнтів використання різних світильників. Для цього обчислимо індекс приміщення по формулі:

$$I = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{32}{2.7 \cdot (4+8)} = 1,1$$

Де: S – площа приміщення, $S = 32 \text{ м}^2$;

h - розрахункова висота підвісу, $h = 2.7 \text{ м}$;

A - ширина приміщення, $A = 4 \text{ м}$;

B – довжина приміщення, $B = 8 \text{ м}$.

Підставивши значення отримаємо:

Знаючи індекс приміщення I , за таблицею знаходимо $\eta = 0,38$.

Для освітлення використовується люмінесцентні лампи типу PHILIPS TUV 36W, світловий потік яких $F = 3400 \text{ Лк}$. [21]

Підставимо всі значення у формулу для визначення світлового потоку E_{ef} :

$$E_{ef} = \frac{3400 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 0,38}{32 \cdot 1,5 \cdot 1} = 215,3 \text{ Лк}$$

4.4 Електробезпека

Електробезпека – це система організаційних та технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого та небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики. [21]

В приміщення одночасно експлуатується і обслуговується 2 персональних ЕОМ, у доступному місці встановлюється аварійний резервний

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	A
З	А	№ докум.	Підпис	Д		59

вимикач та електричний щит з запобіжником, що може повністю виключити електричний струм приміщення, крім освітлення. Заземлення електричного щита виконано із заземленою нейтраллю, а розетки лабораторії виконані з захисним зануленням.

Крім того, кожен ПК в приміщенні на випадок перенавантаження електричної мережі, підключений в розетку з окремим запобіжником виключення. [21]

Для підключення іншої переносної електроапаратури використовуються гнучкі проводи в надійній ізоляції, також з додатковим запобіжником вимикання, також електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом без заплутування проводів у приладів і меблів. [21]

Приміщення відповідає усім нормам електробезпеки за ПУЕ 2017 та є придатним та безпечним для роботи.

4.5 Пожежна безпека

Приміщення, в яких встановлені ПК, по пожежній небезпеці відносяться до категорії В, і повинні задовольняти вимогам по запобіганню і гасінню пожежі, з обов'язковою наявністю телефонного зв'язку і пожежної сигналізації.

Меблі в приміщенні лабораторії із МДФ, дверні та віконні переплети із металопластика, корпуси ЕОМ і приладів із металу та полімерних матеріалів. По вибуху і пожежо-небезпечності приміщення відноситься до категорії В. [21]

На основі ДСТУ Б В.1.1-36:2016 "Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою" будівля відповідає II степені вогнестійкості, що потребує від будівельників конструкції норм вогнестійкості (часу опору вогню):

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	A
З	А	№ докум.	Підпис	Д		60

- несучі стіни, стіни сходових кліток і колони - 2 год.
- сходові клітки, сходи, балки і марші у сходових клітках - 1 год.
- зовнішні стіни навісних панелей - 0.25 год.
- внутрішні і зовнішні стіни (перегородки) - 0.25 год.
- плити і настили конструкцій міжповерхових перекриттів – 0.75 год.
- плити, настили та інші несучі конструкції - 0.25 год.

Необхідний час евакуації складає –40 секунд. Евакуацію необхідно здійснювати швидко, чітко та без паніки. [20]

Для такого приміщення підбираємо Вогнегасник вуглекислотний ВВК-1,4 (ОУ 2) в кількості 2 шт.

4.6 Рекомендації по організації роботи при дії небезпечних і шкідливих чинників в лабораторії з ПК

Оператори ПК стикаються з впливом багатьох небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Особливо небезпечною є підвищена напруга електричної мережі, яка подається на блок живлення системного блоку. Неприятливий вплив на користувача ПК може надавати шум вентиляторів і накопичувачів системного блоку. [21]

У 80% працівників при напруженій зоровій роботі помічається прогресуюче зниження працездатності, що настає через 40-60 хв. і поступово призводить до перевтоми, розладів центральної нервової та інших систем організму. У другій половині дня (іноді раніше) з'являється загальна втома, головний біль, біль в очах. У користувачів ПЕОМ вимушена робоча поза і виконання дрібних стереотипних рухів призводить до кісткової - м'язової дискомфорту. Виявляються такі симптоми, як біль у кістках, скутість м'язів, відчуття втоми, судом, оніміння та тремтіння рук. За даними ВОЗ, в операторів і представників інших професій, які працюють з ПЕОМ, внаслідок стресу виникають психічні порушення. Такі розлади, як тривога, дратливість і пригнічення, виявляється у 25-70% операторів. [20-21]

Основні правила роботи за ЕОМ

					ДПО1.МА7204.00.00.00 ПЗ	61
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

1. Сидіть прямо. Вам повинно бути зручно.
2. Верхня частина монітора повинна бути розташована на рівні очей або трохи нижче, а нижня трохи ближче до Вас.
3. Відстань між монітором і очима має бути 45-75 см. Освітлення повинне падати так само як і при писанні з лівого боку.
4. Не забувайте моргати, при морганні очей омивається слізної рідиною і не пересихає, а пересихання очі шкодить зору.
6. Щогодини роботи за комп'ютером робіть перерву на 15-20 хвилин.

Висновки до розділу 4

У розділі охорона праці дипломної роботи ми розглянули умови та безпеку праці в приміщенні для написання дипломного проекту. Порівняли загальний мікроклімат приміщення, виконали розрахунок освітлення і загалом умови праці на робочому місці. Проаналізувавши пожежну безпеку в приміщенні, ми дійшли до висновку, що вона відповідає державним нормам.

					ДПО1.МА 7204.00.00.00 ПЗ	62
З	А	№ докум.	Підпис	Д		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі було спроектовано та розраховано експериментальний стенд для обробки кавітацією рідких середовищ. Виконання цього завдання складалося з таких етапів:

- Розглянуто основні чинники кавітації та типи насадків для кавітаційних пристроїв.
- Проаналізовано різні конструкції кавітаторів, їхні переваги та недоліки.
- Прийшовши до висновка, що сучасні кавітатори маловивчені, знайдено необхідність розробки експериментального стенду.
- Спроектовано схему гідравлічну принципову для стенду для обробки гідродинамічною кавітацією рідких середовищ.
- Проведено необхідні гідравлічні розрахунки, а також підібрано обладнання.
- Сконструйовано ежектор та гідродинамічний кавітатор в систему.
- Розраховано оптимальний діаметр дроселя для гідродинамічного кавітатора. Він складає 2,1 мм. Таким чином можливо отримати швидкість рідини 25 м/с при швидкості рідини в системі 4,8 м/с.

Даний стенд дозволяє отримувати двофазний потік після обробки рідкого середовища. В рідині спочатку буде додаватися домішка газу азоту чи аргону 5-7%. А потім рідке середовище буде оброблене кавітаційним пристроєм.

Далі заплановане проведення експериментів з різними типами насадків, а також з різними видами пального. Так як кавітаційний пристрій виготовлено із оргскла, кавітацію будемо досліджувати методом візуалізації та фотофіксації. Після проведення експериментів можливо буде обрати найбільш оптимальні насадки для наших умов. Так кавітаційний пристрій зможе функціонувати в більш ширших умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. И. М. Федоткин, И. С. Гулый. Теоретические основы производства избыточной энергии, расчет и конструирование кавитационных теплогенераторов. - 2000. - 898 с. : ил.; ISBN 5-7763-2417-3.
2. Кавитация в переработке нефти / [О. М. Яхно, А. Д. Коваль, В. П. Пищенко та ін.]. – Київ: Світ, 1999.
3. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания / В. В. Пилипенко. – Київ: Наукова думка, 1989.
4. Рождественский В. В. Кавитация / В. В. Рождественский. – Ленинград: Судостроение, 1977. – 247 с.
5. Гришаев А.А. О механизме нагрева воды при гидродинамической кавитации [Електронний ресурс] / В. В. Рождественский. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://newfiz.info/cavita.htm>.
6. О возникновении кавитации [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://chem21.info/info/1366092/>.
7. Жицька Я.С., Кривошеев В.Є., Ночніченко І.В., Інновації молоді в машинобудуванні – 2021. - №3, Розробка стенду для обробки ньютонівських рідин гідродинамічною кавітацією [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/230868>
8. Жицька Я.С., Ночніченко І.В., Інновації молоді в машинобудуванні – 2020. - №2, До питання розробки кавітаційно стабільного гідродинамічного кавітатора пального для обробки рідких середовищ[Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://imm-mmi.kpi.ua/imm2020/paper/view/21327>
9. Тарасенко Т. В. Кавітаційне витікання рідини через дросельний пристрій / В. М. Бадах // Mechanics and Advanced Technologies. - 2017. - № 3. - С. 82-91.
10. Седов Л.І., Механіка суцільного середовища, т.2, видавництво «Наука», 1967.

11. Frenkel, Y. I., "Electrical phenomena connected with cavitation caused by ultrasonic oscillations in a liquid" Russ. J. Phys. Chem. 14 (1940): pp 305–308.
12. Differences between cavitators, their application in hydrodynamic facilities of UKG [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zavodest.ru/en/sfera-primeneniya/14-otlichiya-kavitatorov.html>.
13. Что такое кавитатор и зачем он нужен? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://szemp.ru/raznoe/kavitator-eto.html>.
14. Nochnichenko I.V., Luhovskyi O.F., Kostiuk D.V. (2019) Study of hydrodynamic luminescence in a cavitation liquid medium / // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Problemy tertia ta znoshuvannia» # 3(84). – S.57-62 doi:10.18372/0370-2197.3(84).13853.(Index Copernicus - ISSN: 0370-2197).
15. I. Nochnichenko, O. Luhovskyi, D. Kostiuk, O. Jakhno Research of the Influence of Hydraulic Orifice Material on the Hydrodynamic Cavitation Processes Accompanied by Luminescence, International Scientific-Technical Conference on Hydraulic and Pneumatic Drives and Control, 2020, Springer Cham, pp. 293-300.
16. Ihor V. Nochnichenko; Alexandr F. Luhovskyi; Oleg M. Jakhno; Dmytro V. Kostiuk; Paweł Komada; Ainur Kozbakova (2019) Experimental research of hydroluminescence in the cavitating flow of mineral oil, Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Vol. 1117615 (6 November 2019); doi: 10.1117/12.2536946. PDF: 8 pages (Scopus -ISSN: 2577-5421).
17. Кривошеєв В.Є., Костюк Д.В., Ночніченко І.В. Інновації молоді в машинобудуванні – 2020. - №2, С. 283-286.
18. Каталог Bosch Rexroth [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.boschrexroth.com/en/dc/>.
19. Буслов В.К. Проектування об'ємних гідроприводів / В.К. Буслов; НТУУ «КПІ». Київ, 2008 – 80с.
20. Основи охорони праці: Навч. посіб. / В.В. Березуцький, Т.С. Бондаренко, Г.Г. Валенко та ін .; За заг. ред. В.В.Березуцького. - 2-х вид.,перероб і доп. - Х .: Факт, 2007. - 480 с.
21. Ткачук К.Н., Зацарный В.В. и др. Охрана труда и промышленная безопасность: Учебное пособие. -Киев: Либра, 2010.- 558 с.

