

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота
другий магістерський
(рівень вищої освіти)

на тему: «Зменшення гідравлічного опору рідини в трубопроводах
шляхом застосування ефекту кавітації»

Виконав: студент II курсу,
групи 8.1451-дн
спеціальності гідроенергетика
освітньої програми гідроенергетика
Тимошук Ярослав Ігорович
(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н., Осаул О.І.
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф., к.т.н. Карпенко Г.В.
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2022

**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики

Рівень вищої освіти другий магістерський

Спеціальність 145 Гідроенергетика

Освітня програма Гідроенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



« 15 » 12 20 22 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Тимощуку Ярославу Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) «Зменшення гідравлічного опору рідини в трубопроводах шляхом застосування ефекту кавітації».

Керівник роботи доц. к.т.н., Осаул Олександр Іванович.

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

затверджені наказом ЗНУ від « 02 » липня 2022 року №598-с _____

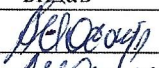
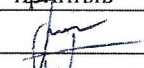


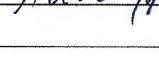
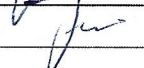


1 Строк подання студентом роботи 15 грудня 2022 року.

2 Вихідні дані до роботи: Розрахувати різницю витрат рідини у напірному трубопроводі і різницю споживаної потужності електронасосу при зміні внутрішньої поверхні водоводу і кута нахилу напірного водоводу.

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Особливості існуючих режимів руху води у водоводі. 2. Особливості явища кавітації та її види. 3. Шкідливий та корисний вплив кавітації. 4. Виникнення гідравлічного удару та захист. 5. Дослідження рельєфу робочої поверхні водоводу. 6. Розрахунок спільної роботи насосів і водоводів графічним і аналітичним способом. 7. Дослідження конструкції водоводу зі штучним формуванням кавітаційного потоку. 10. Розрахунок гідравлічних величин у напірному водоводі.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Титульний аркуш, мета та завдання роботи, види гвинтоподібних треків, зміна кута нахилу напірного трубопроводу на лабораторній установці, обробка теоретичних і експериментальних результатів досліджень, графіки залежності витрат рідини і споживаної електроенергії від наявності гвинтоподібного треку при різному куті нахилу трубопроводу.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 2	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 3	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 4	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		

7 Дата видачі завдання 10.09.2022 р.


КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз режимів руху рідини у водоводі агрегату	28.09.2021	
2	Дослідження рельєфу робочої поверхні водоводу	10.10.2021	
3	Експериментальні дослідження зниження гідравлічного опору рідини в напірному трубопроводі шляхом застосування гвинтоподібних треків різної шорсткості при різному куті нахилу напірного трубопроводу	29.10.2022	
4	Розрахунок різниці споживаної потужності електронасосу між встановленими гвинтовими треками та без треку при різному куті нахилу напірного трубопроводу; різниці витрат рідини між встановленими гвинтовими треками різної шорсткості та без треку при різному куті нахилу напірного трубопроводу	14.11.2022	
5	Визначення питомих витрат для трубопроводів з гладким треком і чарунковим треком	27.11.2022	

Студент  Я.І. Тимошук
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)  О.І. Осаул
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  С.Є. Чижов
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Тимошук Я.І. «Зменшення гідравлічного опору рідини в трубопроводах шляхом застосування ефекту кавітації».

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 145 «Гідроенергетика». Науковий керівник - канд. техн. наук, доц. Осаул О.І. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2022 р.

В дипломній роботі розглянуті існуючі види режимів руху рідини та енергії потоку, виконаний аналіз знайдених даних та обрано, в якості базового режиму дослідження – режим обертання потоку в замкненій системі. Об'єктом дослідження є модель системи транспортування рідини, а предметом – режими експлуатації водоводу зі штучним формуванням обертального кавітаційного потоку. Розроблено модель напірного трубопроводу для ГАЕС, проведено досліди та аналіз отриманих експериментальних даних. Виявлено більш ефективний варіант експлуатації моделі напірного трубопроводу для ГАЕС.

Ключові слова: ТУРБУЛЕНТНИЙ ПОТІК, КАВІТАЦІЯ, ГВИНТОВИЙ РУХ, ГЛАДКИЙ ТРЕК, ЧАРУНКОВИЙ ТРЕК, НАПІРНИЙ ТРУБОПРОВІД, ЗАВИХРЕННЯ, КАВІТАЦІЙНІ БУЛЬБАШКИ, ГІДРООПР, КУТОВИЙ РЕЖИМ, ПЕРЕБІГ РІДИНИ.

ANNOTATION

Tymoshchuk Y.I. "Reduction of hydraulic resistance of liquid in pipelines by applying the cavitation effect".

Qualifying thesis for obtaining a master's degree in the specialty 145 "Hydropower". Research supervisor - candidate. technical of Science, Assoc. Osaul O.I. Engineering Educational and Scientific Institute named after Y.M. Potebnya Zaporizhzhia National University. Department of Heat and Hydropower, 2022

In the thesis, the existing types of modes of fluid movement and flow energy are considered, the analysis of the found data is performed, and the mode of rotation of the flow in a closed system is chosen as the basic mode of research. The object of the study is the model of the liquid transportation system, and the subject is the operating modes of the water pipeline with artificial formation of a rotating cavitation flow. A model of a pressure pipeline for a gas power plant was developed, experiments and analysis of the obtained experimental data were carried out. A more effective version of operating the pressure pipeline model for the gas station was revealed.

Keywords: TURBULENT FLOW, CAVITATION, HELICAL MOTION, SMOOTH TRACK, SHOULDER TRACK, PRESSURE PIPELINE, STORAGE, CAVITATION BUBBLES, HYDRO-DISTANCE, ANGULAR MODE, FLUID FLOW.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ У ВОДОВОДІ АГРЕГАТУ.....	10
1.1 Виникнення явища вихору.....	10
1.2. Структура турбулентного потоку.....	12
1.3 Дослідження вихрового руху.....	18
1.4 Отримання енергії в нерівноважних середовищах.....	24
2 ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВИХ ПОРУШЕНЬ У ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ ВОДОВОДУ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	30
2.1 Причини виникнення кавітації в турбулентному потоці.....	30
2.2 Явище гідродинамічної кавітації.....	32
2.3 Вплив кавітації на робочі елементи агрегату.....	37
2.4 Ефективне застосування явища кавітації.....	37
2.5 Причини виникнення гідравлічного удару в напірному водоводі агрегату.....	39
2.6 Методи захисту від гідравлічного удару.....	40
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РЕЛЬЄФУ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ВОДОВОДУ АГРЕГАТУ.....	44
3.1 Матеріал водоводу.....	44
3.2 Типи водоводів за призначенням.....	46
3.3 Умови спільної роботи насосного обладнання і водоводів.....	49
3.4 Удосконалення систем перебігу рідин з використанням ефекту різновісності середовищ.....	51
3.4.1 Збільшення втрати напору при турбулентному русі потоку рідини	51
3.4.2 Характер гвинтового руху та властивості гвинтової лінії.....	52
3.5 Дослідження експлуатації напірного водоводу зі штучним формуванням кавітаційного потоку при різному куті нахилу.....	59
3.5.1 Дослідницька модель.....	63

3.5.2 Програма дослідження моделі водоводу.....	65
3.6 Аналіз виконаної роботи та обробка результатів випробувань.....	67
3.6.1 Розрахунки гідравлічних величин у напірному водоводі.....	68
3.6.2 Визначення різниці споживання електроенергії.....	72
3.6.3 Визначення різниці витрат рідини.....	73
3.6.4 Розрахунок питомих витрат.....	74
3.7 Графічна інтерпретація дослідження.....	75
3.8 Ефективність дослідницької моделі і різниця витрат.....	78
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ДОСЛІДНИЦЬКОЇ МОДЕЛІ.....	80
4.1 Вплив небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	80
4.2 Організація захисту системи від експлуатаційних пошкоджень.....	82
4.3 Проектування звукоізолюючого кожуха для електронасосу.....	84
4.4 Заходи з електробезпеки.....	88
4.5 Заходи з пожежної безпеки.....	89
4.6 Надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру.....	91
ВИСНОВКИ.....	92
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	95

ВСТУП

Актуальність роботи. Пріоритетними напрямками в сфері гідроенергетики є підвищення витрат рідини при перекачуванні потоку, при зниженні енерговитрат насосного обладнання, застосування унікальних гідравлічних пристроїв, заснованих на використанні ефекту різновісності середовищ та ефекту закрученого потоку води у водоводі.

Підвищення продуктивності системи забезпечує пристрій для зменшення гідравлічного опору потоку рідини в трубопроводі, який містить гвинтоподібну спіраль зі сталевго дроту відрізняється тим, що гвинтоподібні треки виконані зі сталевго смуги або труби із зовнішньою пористою рельєфною поверхнею і перфорованою по всій довжині треку отворами для води від виходу повітря, що рухається обертально-поступально вертикально вгору, що забезпечує збільшення швидкості руху води, при цьому надходить з перфорованої отворами сталевго труби або повітряного колектора. Повітря сприяє зниженню гідроопору, прискоренню потоку водоповітряної суміші, гідроопору руху якої значною мірою сприяє пориста рельєфна структура на поверхні всіх елементів конструкції водоводу, що призводить до помітного зменшення витрат електроенергії при перекачуванні води на електроакумулюючих електростанціях.

Метою роботи є удосконалення системи переміщення потоку рідини за допомогою пристрою для зменшення гідравлічного опору рідини в водоводі ГАЕС.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз існуючих режимів руху рідини у водоводі агрегату;
- провести дослідження рельєфу робочої поверхні водоводу;
- визначити вплив явища кавітації на елементи агрегату і гідравлічний опір;

- розробити програму дослідження моделі напірного водоводу зі штучним формуванням кавітаційного потоку при різному куті нахилу;
- провести розрахунок витрат рідини і енерговитрат для порожнього напірного водоводу і водоводу за наявності пристрою для зниження гідравлічного опору.

Об'єктом дослідження є напірний трубопровід дослідницької моделі, при зміні кута нахилу напірного водоводу від 0° до 90° .

Методи та способи дослідження. Поставлені задачі вирішувались за допомогою проведення теоретичних та експериментальних досліджень, спільного застосування розрахункових і інженерних методик дослідження. В роботі застосовувалися основні положення турбулентних та вихрових потоків, що відбуваються в трубопроводах.

Наукова новизна отриманих результатів. Запропоновано і обґрунтовано використання пристрою для зниження гідравлічного опору рідини в напірному трубопроводі в якості підвищення витрати рідини і енергоефективності системи.

Практична цінність роботи. Експериментальні дослідження показали доцільність використання даного пристрою для зниження гідравлічного опору в напірних водоводах на гідроакумулювальних електростанціях і інших трубопровідних мережах.

Апробація роботи. Результати роботи представлені на II Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти «Молода наука - 2022», аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально- економічного розвитку регіонів України» 18-20 жовтня 2022 р. [34].

Структура та обсяг кваліфікаційної випускної роботи. Магістерська робота включає вступ, чотири розділи, висновки та перелік джерел посилання з 20 позицій. Загальний обсяг складає 98 сторінок, у тому числі 22 рисунки та 4 таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ У ВОДОВОДІ АГРЕГАТУ

Основна особливість сучасного етапу розвитку гідроенергетики полягає в переході від моделі до реальності. Чисельне моделювання на основі рішення рівнянь газової та рідинної динаміки, записаних в найзагальнішому вигляді - у формі Нав'є-Стокса або Рейнольдса, витісняє формально простіші моделі типу «в'язкої– нев'язкої» взаємодії. В той же час спостерігається перехід від простих моделей до вивчення реальних процесів не лише в тому, що стосується властивостей робочого тіла, зокрема в'язкості і теплопровідності, але і при описі реальної, неспрощеної геометрії об'єктів.

1.1 Виникнення явища вихору

Вихор - це рух рідини чи газу, який супроводжується обертанням частинок середовища. Переважна більшість течій, що відбуваються і в природі, і в технічних пристроях, супроводжується появою вихорів [16].

На гідроакумуючих електростанціях, враховуючи механіку вихору потоку, існує можливість не тільки знизити втрати напору по всій довжині водоводу, а й перетворити частину теплової енергії у кінетичну силу. Тому актуальність техніки завихрення на теперішній час є дійсною.

Для того щоб зрозуміти механіку вихору, з початку треба розібратися з природним вихором, який зустрічається в природі. Ця рухома матерія у формі води, вітру або пилу, у формі будь-якої енергії, такої як електрика в провідці або навіть магнітні поля, - може рухатися колами. Коли ж рух цієї енергії починає переходити в спіраль, утворюється особливий вихор, і характер спірального вихору визначається тим, як він рухається. Виходячи зі спостережень, вихор являє собою коло, в якому початок сходиться з кінцем. Певну роль відіграє також математика вихору, наприклад, Золотий Перетин

або ряд Фібоначчі. Вони здаються майже однаковими, проте вони абсолютно різні за своєю природою.

Вихор Золотого Перетину буде нескінченно обертатися у напрямку до центру або від центру, ніколи не досягаючи центру і ніколи не припиняючи свого розширення зовні. Вихор Фібоначчі також нескінченно розкручується зовні від центру. Однак вихор Фібоначчі абсолютно кінцевий в своєму прагненні всередину, до центру. Він, зрештою, досягає свого початку, і там він повинен або зупинитися, або змінити напрямок на протилежний. Якщо він змінює напрямок, то з'являється спіраль Фібоначчі, що створює абсолютно новий вихор, що обертається зовні - у протилежному напрямку [7].

Також є інший вид – тороїдний – що входить точно в центр і також змінює напрямок свого обертання на протилежний. Вихор цього типу обертається, насправді, в трьох вимірах, слідуючи контурам форми тора [7].

Дослідженню вихорів присвячені роботи багатьох дослідників. Серед класиків такі імена, як: Ньютон, Бернуллі, Гельмгольц, Томсон, а серед математиків - Коші, Стокс, Лагранж і т.д. Серед сучасників необхідно віддати належне Міловічу А., Меркулову В., Гольдштіку В.

Виходячи з досліджень О. Рейнольдса, встановлено критерій, який характеризує критичне співвідношення між інерційними силами і силами в'язкості, при встановленому значенні якого ламінарний потік перетвориться в турбулентний і надалі у вихровий. Дане співвідношення отримало назву - число Рейнольдса [8]:

$$Re = \frac{\rho \vartheta L}{\eta} \quad (1.1)$$

ρ - щільність рідини, кг/м³;

ϑ - швидкість потоку, м/с;

L - лінійний розмір, м;

η - динамічний коефіцієнт в'язкості.

Він дозволяє визначити характерні умови утворення турбулентності і вихорів в певних умовах течії рідини поблизу різноманітних поверхонь і форм.

Турбулентний рух асоціюється з безладно зароджуваними і зникаючими вихорами середовища, які хаотично стикаються один з одним, а також з обмежувачими потік стінками або з тілом, що рухається в необмеженому середовищі, і тим самим відбирають і марно розтрачують кінетичну енергію, перетворюючи її в тепло [9]. Однак, це виглядає саме так, відбувається не дуже часто і зазвичай в тих випадках, коли форма рухомого тіла або стінок, що обмежують потік, занадто неправильна, а жорсткість їх поверхні мала. Слід зауважити, що в побуті і техніці під турбулентністю часто мається на увазі саме таке хаотичне завихрення середовища, проте в гідродинаміці як науці, турбулентною називається будь яка течія, характер якої відмінний від ламінарного, тобто з будь-якими завихреннями в тілі потоку - як хаотичними, так і впорядкованими - аж до квазістаціонарних.

1.2 Структура турбулентного потоку

Турбулентним називають потік, що супроводжується інтенсивним перемішуванням рідини, пульсаціями швидкостей і тисків. Також ця форма руху рідини супроводжується втратами гідродинамічної стійкості руху, тобто - це такий стан середовища, при якому пульсації руху різних масштабів, мають перекачувальну енергію між ними. Під масштабом (по Тейлору та Прандтлю) розуміється величини відстаней, при яких істотно змінюється швидкість руху [10]. Найбільш характерні ознаки та особливості турбулентної течії легше всього продемонструвати на історичному прикладі - плинні в круглій трубці.

Експериментальне дослідження усталеного потоку рідини проводиться в широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса. За рахунок сил в'язкого тертя на довжині труби тиск падає від величини p_1 до p_2 . Оскільки витрата рідини по довжині труби незмінна, то з умови рівноваги сил тиску і тертя впливає для середнього дотичного напруження на стінках труби [11], Па:

$$U_w = \frac{1}{4} \frac{d(p_1 - p_2)}{L} \quad (1.2)$$

а коефіцієнт в'язкого тертя визначається як

$$c_f = \frac{U_w}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1.3)$$

Послідовний перехід від режиму до режиму визначається критичним числом Рейнольдса. При низьких числах Рейнольдса (до 2000) течія має плавний характер, коли цівки струму поширюються на великі відстані, не змішуючись один з одним - ламінарний перебіг (рис.1.1, а). З ростом числа Re рух рідини стає нестійким і цівки струму епізодично розмиваються - перехідний режим (рис.1.1, б). І на кінець, потік, що розвивається по трубі характеризується інтенсивним перемішуванням і цівка рідини перетворюється в пляму, заповнює весь поперечний переріз - турбулентний плин (рис. 1.1, в). На графіку (рис.1.1, г) залежності $C_f(Re)$ характерно збільшується коефіцієнт тертя в порівнянні з ламінарним режимом [11].

Прогресування турбулентної течії посилюється пульсаціями швидкості відносно середньої величини по простору і за часом. У міру посилення пульсацій форма їх поступово змінюється від простих синусоїдальних коливань до безладного завихрення руху з безперервно мінливим спектром довжин хвиль і частот.

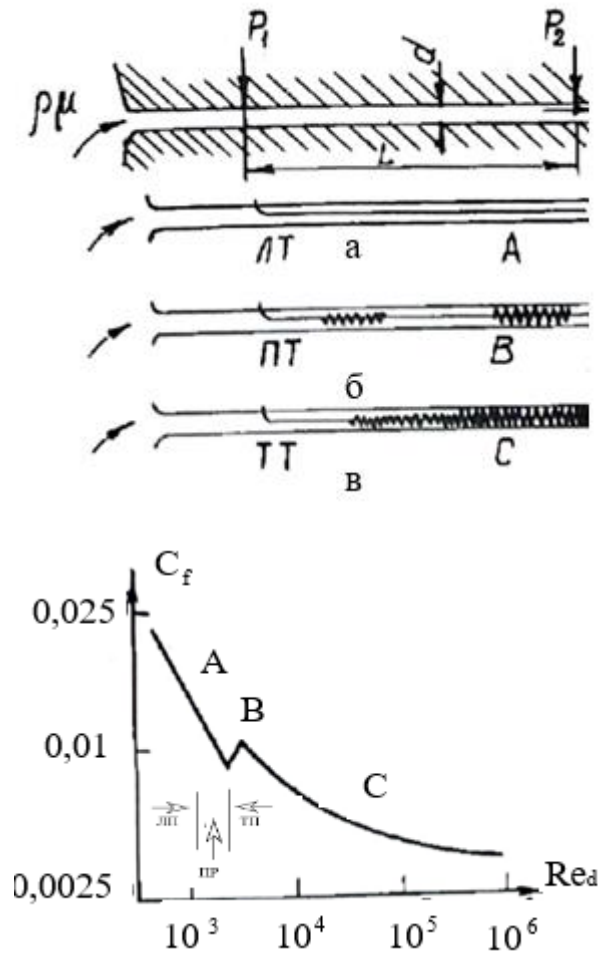


Рисунок 1.1 - Графік залежності $C_f(Re)$ та процес переходу від ламінарного у турбулентний режим

Реальний турбулентний плин можна умовно розділити на дві частини: усталене (з шаруватою структурою) зразок ламінарної течії; пульсаційне (обумовлене переміщенням турбулентних вихорів), яке відбувається довільним чином в просторі (це підхід Рейнольдса до дослідження турбулентних течій). Внаслідок того, що лінії струму в осереднених пульсаційних рухах різні, здійснюється додаткове (до ламінарного) перенесення кількості руху і енергії. Вважають, що в цьому випадку перенесення кількості руху пов'язане з турбулентним тертям між шарами рідини, а перенос тепла - з турбулентною теплопровідністю. Перехід до турбулентного режиму, як правило, супроводжується прискоренням процесу

обміну кількістю руху та енергії в пристінкових шарах, завдяки чому опір тіла і тепловіддача з поверхні зростають[12].

По мірі зростання числа Рейнольдса з'являються спочатку великомасштабні пульсації (чим менше масштаб руху, тим пізніше такі пульсації з'являються). При дуже великих числах Рейнольдса в турбулентному потоці присутні пульсації з масштабами від найбільших до дуже малих (рис.1.2). Від пульсацій з великими масштабами енергія переходить в пульсації з меншими масштабами, практично не дисипуючись при цьому [13]. Можна сказати, що є ніби безперервний потік енергії від крупно- до дрібномасштабних пульсацій, тобто від малих частот до великих. Цей потік дисипує, тобто кінетична енергія переходить в тепло, всаких дрібномасштабних пульсаціях. Зрозуміло, для підтримки стаціонарного стану потоку необхідна наявність зовнішніх джерел енергії, що безперервно передаватимуть її основному великомасштабному руху. Основну ж роль в турбулентному потоці відіграють великомасштабні пульсації, масштаб яких - порядок величин характеристичних довжин, визначаючих розміри області, в якій відбувається турбулентний рух [14].

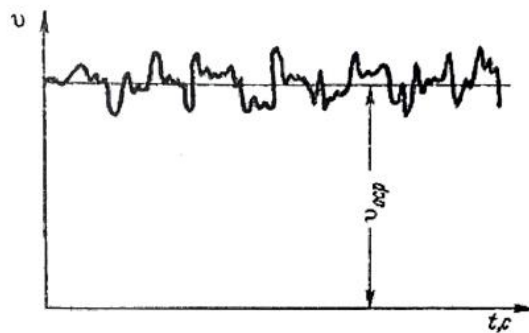


Рисунок 1.2 - Пульсація швидкості в турбулентному потоці

Коректний опис розглянутих властивостей течії рідини можливий тільки з залученням найбільш загальної моделі, що спирається на систему диференціальних рівнянь руху (рівняння Нав'є-Стокса) для в'язкої нестисливої рідини. Дані рівняння в циліндричній системі координат у вигляді[15]:

рівняння руху:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_x}{\partial \varphi} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \\
 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_x}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} \right), \\
 & \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{v_\varphi^2}{r} \\
 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{v_r}{r^2} \right), \quad (1.4) \\
 & \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_x \frac{\partial v_\varphi}{\partial x} + \frac{v_r v_\varphi}{r} \\
 &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right)
 \end{aligned}$$

рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (1.5)$$

рівняння переносу тепла без урахування вузької дисипації (розсіювання) енергії:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (1.6)$$

Прийнято вважати, що рівняння Нав'є-Стокса повністю описують турбулентні явища, що відбуваються в потоці. Простіші моделі течії,

побудовані на основі концепції в'язко-нев'язкої взаємодії та інших принципових спрощень, використовується все рідше, бо вони з одного боку, неадекватно описують аналізовані течії рідини, а з іншого - можуть виявитися складнішими з алгоритмічного погляду.

Турбулентна пульсація виникає за рахунок періодичного повторення бурхливих локальних викидів маси рідини з гідродинамічними нестійкими ділянками периферійної області потоку. Рідина відчуває різке гальмування і має вагомий градієнт швидкості течії. Викидна рідина утворює підковоподібні вихори, які рухаються у внутрішню частину потоку, тим самим зароджуються нові локальні відриви потоку. Первинний масштаб у вихорів зветься основним або зовнішнім, порівняним з масштабом потоку, а швидкість порівняно з швидкістю течії (частота їх пульсацій швидкості невелика). Розмір турбулентних вихорів характеризує місцевий масштаб турбулентності.

Коли число Рейнольдса велике, рух найбільш великих вихорів визначається нестійким і тягне за собою більш дрібні вихори, аж до появи найдрібніших вихорів, для яких $Re < 1$. Рух рідини всередині турбулентного вихору носить ламінарний характер і залежить від молекулярної густини. Існуюча енергія, що передається в поздовж ланцюжка вихорів дисипується (переходить в тепло). В дрібно масштабних вихорах на їх рух не впливає орієнтований поступальний рух потоку, весь рух рівномірний, пульсації ізотропні. Вихори внутрішнього масштабу рухаються як одне ціле, частота пульсації незмінна (постійна) і дорівнює більшому значенню [16].

У центральній частині типової турбулентної течії в трубі (рис. 1.1, в) принаймні половина кінетичної енергії турбулентності і велика частина турбулентних напруг обумовлені вихорами з довжиною хвилі, що перевищує радіус труби. Розмір дисипативних вихорів при цьому залежить від в'язкості, зазвичай їх довжина хвилі становить менше 1% радіуса труби.

Таким чином, по П.Бредшоу [17], турбулентність - це тривимірний (нестаціонарний рух, в якому внаслідок розтягування вихорів

створюється безперервний розподіл пульсацій швидкості в інтервалі довжин хвиль від мінімальних, визначених в'язкими силами, до максимальних, що визначаються граничними умовами течії.

1.3 Дослідження вихрового руху

Першими дослідниками вихрового руху являються Рене Декарт (1596 - 1650), Христиан Гюйгенс (1629 - 1695), Йоган Бернуллі (1667 - 1748), Данил Бернуллі (1700 - 1782). Саме вони відкрили перші закономірності вихрових рухів і взаємодій. Однак Ньютонівська картина світу витіснила вихрову теорію Декарта і була надовго майже забута [18]. Зацікавленість вихровою динамікою відродилися в середині XIX століття. В основі загальної вихрової теорії закладені труди Гельмгольца, Кельвіна і Кірхгофа. Особливе значення у вихровій теорії мають теореми Гельмгольца про вимороженості вихрових ліній, що дозволяє розглядати вихрові утворення, як деякі матеріальні об'єкти, подібні тілам в класичній механіці (твердо тільність вихору). Моделі вихору Кірхгофа (модель еліптичного вихору і вихрового кільця) використовуються і донині для отримання плям завихреності. У 1877г. Вальтер Греблі провів аналіз руху трьох вихорів на площині на основі рішення системи трьох нелінійних диференціальних рівнянь [19], вміщують два інтеграли руху. Греблі також ввів геометричну інтерпретацію, корисну для аналітичного уявлення руху трьох вихорів на сфері. Останні дослідження подібної системи відносяться до 1998р. Відповідно до теорії Кельвіна весь світ розуміється як ефір, у якому взаємодіють вихори Гельмгольца, при цьому самі атоми мають форму вихрових кілець. Однак ця теорія була витіснена атомною та квантовою механікою.

Експериментального і теоретичного дослідження закономірностей вихрових рухів в рідинах (газі/воді/плазмі) присвячена величезна кількість робіт.

У 50-ті роки дослідження вихрового ефекту розгорнулися в США і СРСР, що призвело до утворення двох центрів. У СРСР найбільш продуктивно виступала лабораторія кафедри "Теплотехніка" Куйбишевського авіаційного інституту на чолі з Олександром Петровичем Меркуловим. І інші великі вчені виявили інтерес до вихрового ефекту - В.С. Мартиновський, В.П. Алексєєв, М.Г. Дубінській, В.М. Бродянській, І.А. Чарний, Г.Л. Гродзовській, Ю.Е. Кузнєцов та ін.

Серед зарубіжних вчених свій внесок у вивчення вихрового ефекту внесли: С. Фултон, Р. Касснер, Г. Шепер, Ф. Шультц-Грюн, Д. Вебстер, Е. Еккерт, Д. Хартнет, Д. Кейс, Д. Рейнольде, Б. Парулейкар, М. Сібулкін, К. Ліндерстрем-Ланг і ін. Якщо в 50 - 60-ті роки за кордоном дослідження проводилися, в основному, в США і Європі, то пізніше цілий ряд робіт виконаний японськими вченими: Х. Такахама, Х. Якахама, М. Огава, Н. Сода.

Велике значення мають регулярно проведені з 1972 р конференції з вихрового ефекту, беззмінним Головою Оргкомітету яких є А.П. Меркулов. В опублікованих працях шести проведених конференцій узагальнено досвід дослідження в країні і впровадження вихрового ефекту.

На сьогодні, практично доведеним є той факт, що в вихорах як штучного походження (різних пристроях вихровий енергетики), так і природного (смерчах, торнадо) часто відбуваються фізичні процеси, енергія яких перевищує витрати енергії на їх утворення. Вихрові енергетичні технології засновані на законах класичної термодинаміки і збереження енергії.

Перший напрямок розробки вихрової енергетики пов'язано з копіюванням природного процесу імплзії і трансформації теплової енергії з низьким потенціалом в кінетичну енергію. Найбільш наглядним прикладом природної імплзії є смерчі, торнадо.

Спостерігаючи їх протягом сотень років, вчені переконалися, що смерчі мають величезну умовно некеровану енергію, що має електричну природу.

Причому верхня частина смерчу заряджена позитивно, нижня - негативно. По суті, торнадо являє собою величезний природний мотор-генератор. На торнадо діаметром більше 800 м зосереджена енергія великої атомної бомби. Фактично процес торнадо є строго керованим, отже, є можливість використання енергії даного процесу.

Перший, хто звернув увагу на використання природної енергії вихору - австрійський винахідник Віктор Шаубергер, починаючи свої дослідження в першій половині ХХ в. він створив прототипи штучних торнадо.

Ні один пристрій Шаубергера не обходиться без вихорового обертання води або повітря, що проходять через особливу конфігурацію труб. Він розробив і запатентував спіральну трубу для рідких і газоподібних субстанцій [20], Шаубергер позначив цей профіль, що нагадує форму рогів африканської антилопи Куду. Але можна знайти іншу аналогію, як гвинтові сходи або канал ствола нарізної зброї. Така конфігурація перерізу труби дозволяє знизити втрати на тертя при проходженні потоку води по ній, крім цього дозволяє контролювати процеси молекулярної активності, рідини або газу, що проходять через нього, підтверджуючи, що молекулярні розщеплення, трансформація і сполуки можуть утворюватися в такій трубі в результаті вихорового руху води, а це вже трохи пояснює необхідність присутності саме спірального гелікоїда.

Можна стверджувати, що прототипом спіральної гелікоїдної труби, була труба з двопоточним спіралевидним плином (рис. 1.4), яку ще застосовували в 1933 році в Кохлебені для експерименту по плавленню кам'яної руди розміром до 10 см в діаметрі [21]. А через рік, в 1934 році Шаубергер модифікував вид труби з лопатками (рис. 1.5). В такій трубі відбувався розподіл потоку на центральний, що містить кисень і пристінковий, що містить карбон. Під терміном карбону розуміються будь які речовини, крім водню і кисню. Він вказував, що кисень збирався в при осьовому місці вихору в гелікоїді, спіралевидний рух закручував масу так, що центр локалізації кисню зміщувався до центру вісі [22].

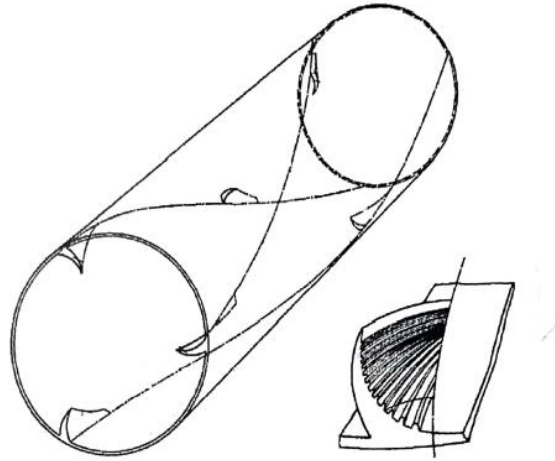
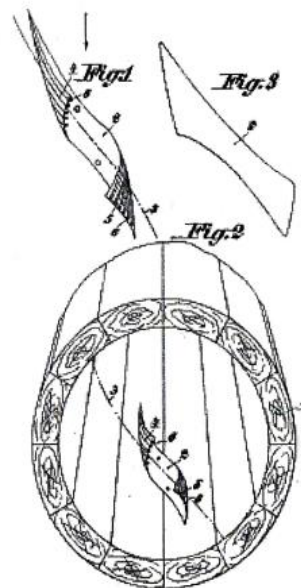


Рисунок 1.4 - Труба з двопоточним спіралевидним плином



1 - труба, 2 - елемент закрутки потоку, 3 - вісь, 4 - вигнуті кінці, 5 - нарізні смуги

Рисунок 1.5 - Пристрій для пропускнуї здатності води

Усередині труби були встановлені лопатки з срібної міді для додання потоку спірального обертання, завдяки якому руда і все що щільніше води, збиралося в центрі вісі обертання і не торкалася стінок труби. Цей спосіб також впливав па зменшення динамічного опору магістральних трубопроводів. Закручування потоку вздовж центральної вісі за допомогою елементарних вставок-метеликів або вставлення всередину труби нескінченної пружини (створення динамічного віртуального гелікоїда) здатне

істотно зменшити енергетичні витрати на переміщення вмісту будь-якої транспортної труби. Витрати по модернізації транспортної труби такими вставками-метеликами абсолютно мінімальні.

Патент Шаубергера, практично готове технічне рішення для збільшення пропускної здатності будь-якого трубопроводу. У 1952 році, в технічному коледжі Штутгарта Францем Попелем і Віктором Шаубергером було виявлено, що при перебігу рідини в спіралеподібних каналах форми рогу антилопи, на певних витратах, опір каналу падає. Існує режим, коли воно повністю зникає, а за тим, приймає від'ємне значення (швидкість 60 см/с). Ефект зниження опору зростає із збільшенням швидкості (або числа Рейнольдса) і автори експерименту дійшли до такого значення цього числа, при якому виникає негативний перепад тиску [5]. Незважаючи на те, що досягнутий всмоктуючий ефект є слабким і малоприматним для практичного використання, він є вражаючим, оскільки суперечить з існуючими законами. Можна вважати, що, при подальшому збільшенні швидкості або масштабів течії, не виключено виникнення набагато сильніших ефектів (тим більше що, з ростом масштабів, вплив тертя зникає).

Питання вихрового руху рідини розглядається з ХХ ст. [23,14,24], інтерес до цього явища надав видатний російський учений проф. Л.Я. Міловіч [25], котрий усе своє наукове життя присвятив вивченню та розвитку вихрового руху.

В природних явищах, коли змінюються граничні умови при появі на шляху руху потоку рідини перешкоди, рідині доводиться звиватися (викручуватися) у вигляді спіралі, утворюючи вихровий шнур, і далі продовжувати свій шлях по поверхні. Цей природний механізм трансформації потоку при зміні зовнішніх умов із збереженням енергії потоку реалізується гвинтовим рухом [26].

Гвинтовий рух рідини - це рух, при якому лінії вихорів у всіх своїх точках збігаються з лініями струмів. Кожна частка рідини не тільки рухається поступально по своїй траєкторії, але і обертається навколо вісі дотичній до

цієї траєкторії в точці положення самої частинки. Результатом цього обертання є зсув послідовних шарів рідини відносно один одного в напрямку, нормальному до поступальної швидкості, що породжує рух всієї її маси в площині, нормальної до основного напрямку. Математична модель такого виду гвинтової трансформації руху рідини (рис. 1.7) була вперше розроблена російським ученим проф. І.С. Громекою [27], а також проф. А.Я. Міловичем [21]. Основні властивості гвинтового руху:

- 1) у всій масі рідини має місце інтеграл сталості енергії її частинок: $H = \text{const}$;
- 2) поверхні, ортогональні до траєкторій, неможливі;
- 3) відношення поступальної швидкості руху частки до кутової швидкості її вихрового обертання - величина постійна стала;
- 4) невихровий рух рідини з потенціалом швидкостей є окремим випадком руху гвинтового.

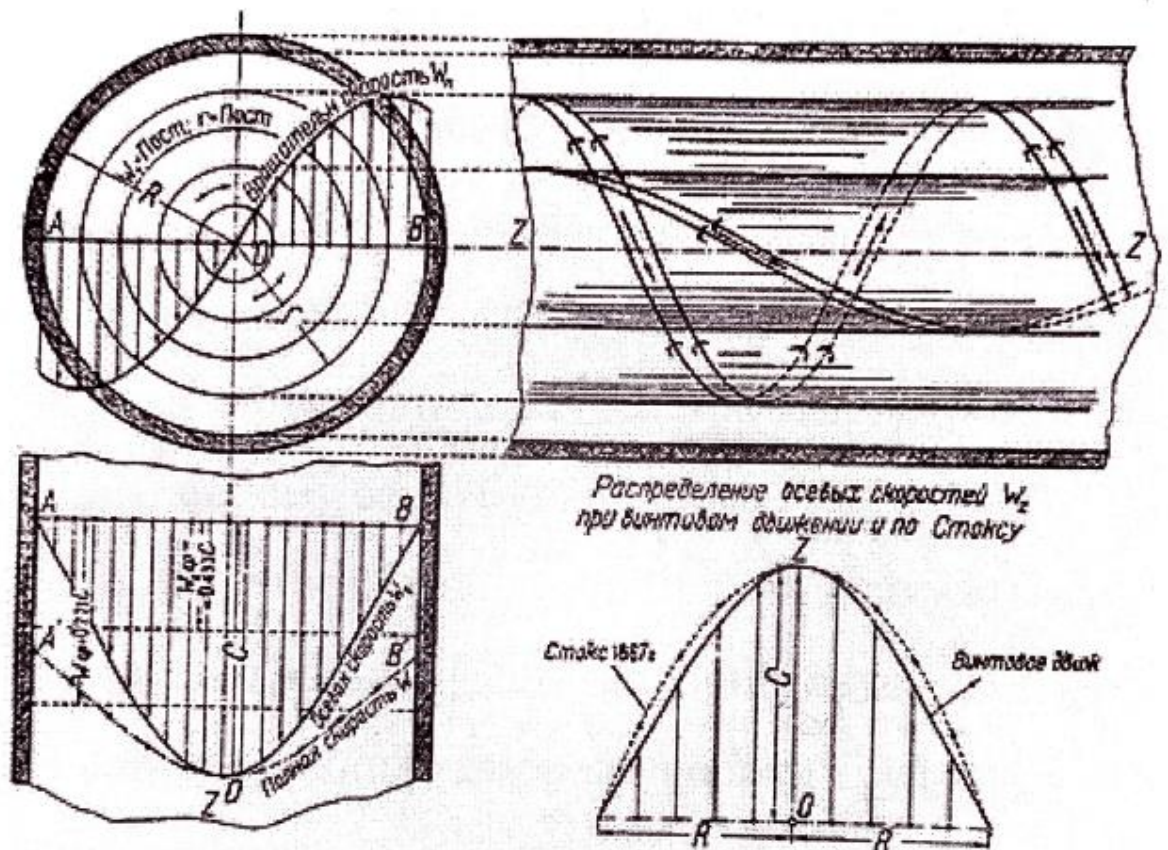


Рисунок 1.7 - Гвинтовий рух рідини по прямій круглій трубі

Для кінцевого вихрового шнура виконання закону збереження енергії $H = \text{const}$ можливо тільки за рахунок безперервної взаємної трансформації енергії, коли вихор періодично розсіює свою енергію в простір у вигляді джерела і потім взамін поглинає енергію з простору у вигляді стоку. Вихровий рух в колекторі з непроникними стінками, коли таке розсіювання (обмін в просторі) обмежене, можливо, тільки коли функції горизонтальної (та вертикальної складової швидкості є функціями періодичними. Потік, що плине по трубі, стає за словами проф. А.Я. Міловича подібним звучанню струни.

На теперішній час доведений той факт, що в вихорах як штучного походження так і природного часто відбуваються фізичні процеси, вихідна енергія яких перевищує втрати енергії на їх утворення. У вихрових гідравлічних пристроях робочим середовищем є вода, яка може відчувати сильний енергетичний вплив, при цьому змінюються фізико-хімічні властивості води і відбувається кавітаційний процес.

1.4 Отримання енергії в нерівноважних середовищах

У 1607 році датський вчений Корнеліус ван Дреббель продемонстрував англійському королю Якову I «вічний» годинник, що приводиться в рух природно, настільки ж «вічним» двигуном. Дреббель запатентував їх ще в 1598 році. Однак на відміну від інших численних пристроїв з такою ж назвою цей двигун дійсно в певному сенсі був «вічним».

У чому ж був секрет цих годинників (вірніше, їх двигуна). Вічні годинники Дреббеля працювали від приводу, що використовує, як і будь-який інший реальний двигун, єдино можливе джерело роботи - нерівноважності (різниця потенціалів) у зовнішньому середовищі.

Але нерівноважність, використана Дреббелем - особливого роду, хоча вона також пов'язана з різницею температур і тисків. Вона може діяти в зовсім рівноважному навколишньому середовищі, температура і тиск якого

однакові у всіх точках. У чому ж тут справа і звідки береться робота? Секрет полягає в тому, що різниці потенціалів тут все ж таки присутні, однак вони проявляються не в просторі, а в часі. Найбільш наочно це можна пояснити на прикладі атмосфери. Нехай в тому районі, де знаходиться двигун, не спостерігається жодної істотної різниці тисків і температур. Але (загальні у всіх точках) тиск і температура все ж міняються (наприклад, вдень і вночі). Ці різниці і можуть бути використані для отримання роботи (в повній згоді з законами термодинаміки).

В описі винаходу «Спосіб вилучення запасу енергії, що міститься в рідині і газі і перетворення її в механічну роботу» (Патент РФ № 2059110) наведено варіант псевдо-вічного й успішно працює сонячного двигуна [28]. Для збільшення числа циклів і потужності найбільш повно використовуються властивості двох нерівноважних по відношенню один до одного середовищ - води і повітря. Закон Архімеда розглядається як наслідок закону збереження енергії, в якому виштовхуюча сила ув'язується з витратами енергії на створення води і повітря, кількість цієї енергії визначило і такі фізичні властивості як, наприклад, щільність, теплоємність, теплопровідність.

Частково співвідношення енергії створення густий відображено в коефіцієнті нерівноважності рівному 820 і, якби люди знайшли спосіб використовувати цю нерівноважність повністю, то отримали б виграш в енергії в 820 разів. Нерівноважності проявляються з моменту підведення повітря під стовп води і збільшуються в міру спливання за рахунок збільшення об'єму повітря і відбору теплоти біля води, при цьому повітря подається з температурою нижче температури води, тому «Якщо, наприклад, тиск повітря дорівнює 4 Атм (0,4 МПа), а температура + 20°C (293 К), то при розширенні до атмосферного тиску він охолodиться приблизно до - 75 °C (198 К), тобто на 95 °C». Відбір теплоти буде відбуватися в умовах, близьких до адіабатних, тобто з мінімальними втратами теплоти, тому вода є гарним акумулятором теплоти, але поганим її провідником.

Розрахунок енергостворюючої пневмогідравлічної турбіни приведений в патентах РФ № 2120058, № 2170364, № 2024780) [28]. В яких джерелом стисненого повітря є компресор. Найбільш придатними є компресори об'ємного і динамічного типу. Поршневий компресор споживає енергії у декілька разів менше динамічного, тому обраний компресор об'ємного типу:

- джерело стисненого повітря - компресор поршневий ВП2-10/9;
- продуктивність - 0,167 м³/с;
- кінцевий тиск, МПа - 0,9 (9 атм.);
- потужність на валу компресора - 56,5 кВт.

Судити про ефективність пневмогідравлічної турбіни будемо, порівнюючи затрачену і отриману потужності, тобто кількість роботи в секунду.

Продуктивність компресора - об'єм повітря, що надійшов у компресор при атмосферному тиску, тобто продуктивність в 0,167 м³/с - об'єм повітря перед входом в компресор і після спливання в турбіні. При подачі повітря під нижній рівень турбіни через верхній рівень буде витіснено 0,167 м³/с води і її стільки ж надійде під нижній рівень, створюючи водно-повітряну суміш і її рух всередині корпусу турбіни. Значення 0,167 м³/с відповідає витраті води при розрахунку потужності пневмогідравлічної турбіни. Розрахунок за формулою розрахунку потужності гідротурбіни [28]:

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \text{ККД} \quad (1.7)$$

де, 9,81 - прискорення вільного падіння, м/с²; Q - витрати води, м³/с; H - напір, м.

ККД реальної турбіни набуває високих значень і при найбільш сприятливому режимі досягає 0,94...0,95 або 94...95%. Потужність отримуємо в кВт. Оскільки робочим тілом є водно-повітряна суміш, є

необхідність підтвердження правомірності застосування формули розрахунку потужності для гідравлічної турбіни. Найбільш ефективним режимом роботи турбіни є режим, при якому використовується суміш щільністю $0,5 \text{ т/м}^3$ (що складається з 50% води і 50% повітря). У цьому режимі тиск повітря трохи вище абсолютного тиску в корпусі турбіни. Повітря з напірного патрубку компресора виходить окремими бульбашками через рівні проміжки часу, а обсяг бульбашок дорівнює обсягу води між ними в корпусі турбіни. Пузир приймає форму кульового сегмента та у фіксованому просторі працює як поршень, витісняючи воду тільки вгору, тому її перетіканню вниз перешкоджає більш високий тиск, а перетоку в сторони - нестислої води. При постійній подачі $0,167 \text{ м}^3/\text{с}$ повітря буде витіснене $0,167 \text{ м}^3/\text{с}$ води, тобто через верхній рівень турбіни буде витіснене $2 \cdot 0,167 \text{ м}^3/\text{с}$ водно-повітряної суміші з підвищеною швидкістю потоку всередині турбіни, тоді [28]:

$$N = 9,81 \cdot 2 \cdot Q \cdot 0,5 \cdot H \cdot \text{ККД} = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \text{ККД} \quad (1.8)$$

Візьмемо установку з висотою водяного стовпа рівною 2м і визначимо необхідну потужність двигуна компресора на підведення під цей стовп води повітря з урахуванням атмосферного тиску виходячи з даних технічної характеристики компресора:

$$N = \frac{2\text{м} \cdot 56,6\text{кВт}}{90\text{м} + 10\text{м}} = 1,13 \text{ кВт}$$

На всій висоті установки буде спостерігатися висхідний потік водно-повітряної суміші, в якому незалежна від глибини занурення тіла виштовхуюча сила дозволяє розмістити не менше 5 робочих коліс. Енергетичний режим пропонованої турбіни відбувається в більш вигідних умовах, ніж у відомому насосі «Ерліфт», тому перетік води відбувається нижче рівня води в турбіні, тобто в умовах, близьких до умов невагомості,

без значного підйому води в корпусі турбіни, на що в насосі витрачається основна кількість енергії. Візьмемо ККД турбіни рівним 0,9. У цьому випадку потужність дорівнює:

$$N = 9,81 \cdot 0,167 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 0,9 = 14,7 \text{ кВт}$$

Таким чином, була отримана енергія, що в 13 разів перевищує витрачену:

$$\frac{14,7 \text{ кВт}}{1,13 \text{ кВт}} = 13$$

Збільшення потужності за рахунок розміщення додаткових робочих коліс підтверджено в експериментальних моделях. Побічно працездатність турбіни підтверджена дослідями, проведеними в Санкт-Петербурзькому Державному технічному університеті. Ось що пише доктор технічних наук, професор, член комісії з нетрадиційних джерел енергії при Уряді РФ, завідувач кафедри «Поновлювані джерела енергії і гідроенергетика» Елістратов В.В.: «Виходячи з гідравліки гідромашин і наших численних дослідів по впуску повітря в робоче колесо гідротурбіни з метою зниження кавітаційної ерозії, було показано, що при поліпшенні кавітаційних показників енергетичні показники значно знижувалися» [28]. У цьому випадку досліді показують, що повітря яке підводиться, створює зустрічний потік, що діє на робоче колесо знизу та змушує його обертатися у зворотний бік. Пропонована установка має здатність відбирати теплоту з води і перетворювати її на механічну енергію. З урахуванням різниці температур води і повітря, коли температура води дорівнює 80°C (термальне джерело, вода, нагріта в сонячному колекторі, в системі охолодження турбін, компресорів і т.д.), а температура повітря 20°C, коефіцієнт збільшення об'єму повітря, відповідно до закону Люссака, дорівнює:

$$1 + (80^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) / 273 = 1,2$$

Потужність буде рівна:

$$N = 14,7 \text{ кВт} \cdot 1,2 = 17,6 \text{ кВт}.$$

17,6 кВт / 5 = 3,5 кВт, 3,5 кВт / 1,13 кВт = 3,1 – в 3,1 рази на одно колесо.

При розрахунку потужності, необхідної для підведення повітря, ми врахували атмосферний тиск (1 атмосфера = 10 м водного стовпа), що означає, що спливаюче повітря долає абсолютний тиск всередині корпусу турбіни, що складається з тиску стовпа води в турбіні і атмосферного і дорівнює тиску 12-метрового стовпа води. Абсолютний тиск всередині корпусу турбіни нейтралізовано силою плавучості повітря, але воно присутнє за корпусом і впливає на підведення води в турбіну. Цей вплив рівноцінний впливу на водний потік розрідження, створюваного в корпусі турбіни усім, що знаходиться в турбіні, об'ємом повітря (в гідротурбіні даний ефект відсутній) і при відповідній конструкції турбіни ми можемо розглядати тиск як $H = H_{\text{в.ст.}} + 10 \text{ м}$. Тоді потужність буде рівна:

$$N = 9,81 \cdot 0,167 \text{ м}^3/\text{с} \cdot 12 \text{ м} \cdot 5 \cdot 1,2 \cdot 0,9 = 106,14 \text{ кВт}.$$

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВИХ ПОРУШЕНЬ У ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ ВОДОВОДУ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1 Причини виникнення кавітації в турбулентному потоці

За рахунок умов роботи електронасоса з водоводом з рухомими спіралевідними вставками при різних режимах експлуатації може виникати зниження тиску. Крім того, при обтіканні цієї спіральної вставки на ній може виникати зниження тиску. Таким чином, в деяких проточних місцях гідравлічної установки тиск може бути низьким, такі умови можуть вплинути на виникнення кавітації.

Одним з основних факторів, що визначають рух рідини при низькому тиску, є міцність рідини на розрив. За дослідними даними чиста вода яка містить тверді домішки витримує розтяг 0,2 - 0,3 МПа, а в особливих умовах до 10 - 25 МПа. Однак міцність звичайної води на розрив визначається тиском насиченої пари $P_{в.п.}$, значення якого залежить від температури рідини. Це пояснюється тим, що у воді з водотоків і навіть з водопроводу міститься велика кількість дрібних твердих і газоподібних включень, які являють собою дрібні локальні об'єми. Утворенню цих об'ємів (мікро бульбашок) сприяє і присутність у воді розчиненого повітря. Коли тиск в рідині падає нижче тиску насиченої пари, на межі мікробульбашок починається інтенсивний перехід рідини в газоподібний стан - пар (кипіння) і утворюються місцеві розриви суцільності - *каверни*, що заповнені, головним чином, водяною парою. Після утворення каверн подальше зниження тиску рідини не відбувається, бо воно компенсується швидким збільшенням об'єму каверн.

У гідроагрегаті рух води являє собою турбулентний потік. Характерною особливістю турбулентного потоку є пульсація швидкостей і тисків в кожній точці, яка особливо інтенсивна в прикордонних зонах.

Виникнення в турбулентному потоці розривів у суцільності рідини - каверн носить назву **кавітації**.

Під кавітацією розуміється, виникнення в рідині порожнин (кавітаційних бульбашок, або каверн), заповнених водяною паром або газом, що виділився з рідини. Це явище пояснив Рейнольдс в 1894 р., а назвав це явище Фруда – кавітацією [29]. Якщо тиск в будь-якій точці рідини стає рівним тиску насиченої пари цієї рідини, то рідина в цьому місці випаровується і утворює парову бульбашку. Прикладом може служити кипіння води. При нагріванні води тиск її насиченої пари підвищується. Коли досягається температура кипіння, тиск пари стає рівним тиску навколишнього середовища, і у воді з'являються парові бульбашки.

Парові бульбашки в рідині легше утворюються при зниженому тиску. Коли ж тиск навколишнього середовища стає більше тиску насиченої пари рідини, кавітаційна пляшечка з силою зриваються. Таке зривання бульбашок створює шум, викликає вібрацію і пошкодження конструкцій, несприятливо відбивається на роботі відповідних машин і механізмів. Місцеве зниження тиску в рідині відбувається при відносно швидкому русі тіла і рідини.

Розрізняють кавітацію гідродинамічну і акустичну. В гідродинамічній V кавітації, пониження тиску при якому утворюються розриви суцільності, відбувається за рахунок виникнення великих місцевих швидкостей в потоці рухомої краплинної рідини, а при акустичній – акустичні хвилі, змінні тиски, що створені в об'ємі рідини за рахунок ультразвукових коливань.

В трубопровідних системах з постійним перерізом, кавітація виникає при течії з високою швидкістю рідини, нагрітої до температури, близької до температури насиченої пари, і так само в наслідок гідравлічних ударів. Явище кавітації несприятливо впливає на роботу обладнання, призводить до вібрацій і шуму, ерозійного руйнування матеріалу і збільшенню гідравлічних опорів.

Питання виникнення і розвитку кавітації є однією з актуальних проблем гідродинаміки. Багато робіт присвячені цьому явищу. Можна

згадати теоретичні та експериментальні дослідження Епштейна Л.А., Шальнева К.К., монографію Гуревича М.І. [30], Перника А.Д.[31] та ін.

Численними дослідженнями [32 - 35] встановлено, що на виникнення кавітації впливають такі чинники:

- збільшення місцевої швидкості рідини;
- опір рідини розтягуючим напруженнями;
- деякі фізичні та термодинамічні властивості рідини (поверхневий натяг, тиск насиченої пари; в'язкість і ін.).

Фактично, збільшення швидкості потоку рідини, зниження тиску на вході і підвищення температури рідини, що перекачується, є основними причинами кавітації. При цьому небезпеку для трубопровідної системи представляє не сама кавітація, а її наслідки, коли відбувається схлопування бульбашок. Згідно гіпотези Фокса і Херцфельда [36], що центром кавітації є найдрібніший пухирець, наповнений паром або газом, який захищений оболонкою, що являє собою мономолекулярну плівку органічного походження. Ця оболонка сприймає напругу стиснення і розтягування і виконує роль бар'єру, для того щоб пара або газ не виходив із оболонки. Виникнення кавітації пояснюється руйнуванням цієї оболонки.

2.2 Явище гідродинамічної кавітації

У реальній рідині завжди присутні найдрібніші бульбашки газу або пари, які рухаючись з потоком і потрапляючи в область тиску втрачають стійкість і набувають здатність до необмеженого росту (рис.2.1).

Енергія бульбашки пропорційна добутку його об'єму і тиску в навколишньому середовищі. При постійній енергії об'єм бульбашки змінюється обернено пропорційно тиску у рідині. Опір руху бульбашки обумовлено в'язкістю рідини, яка проявляє себе головним чином, в локальних зонах головної і тильної частини. Внаслідок цього втрати енергії бульбашкою істотно менше втрат обтічним твердим тілом того ж розміру.

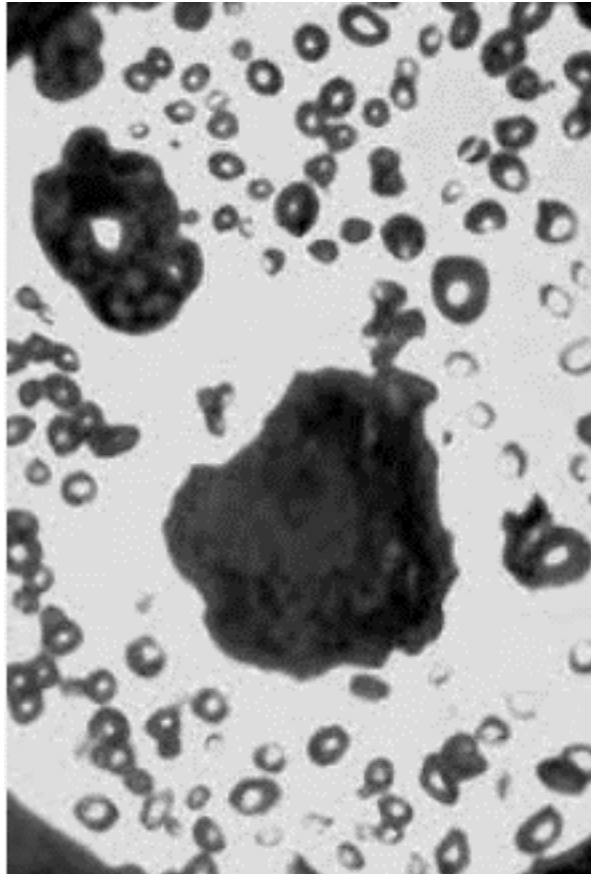


Рисунок 2.1 - Кавітаційні бульбашки

Спливаючи в поле тяжіння, бульбашка може збільшити свою енергію, якщо будуть перекриті її втрати. Збільшується енергія бульбашки і при русі в напрямку прискореного переміщення. Бульбашка перестає існувати, коли втрачає свою енергію [31].

Бульбашка при сприятливих умовах може пройти великий шлях і перенести з собою речовинний струмінь, тому що речовинний обмін бульбашки з навколишньою рідиною дуже обмежений.

Після переміщення бульбашки в зону підвищеного тиску і вичерпання кінетичної енергії рідина розширюється, бульбашка припиняє ріст і скорочується. Якщо вона містить багато газу, то після досягнення мінімального радіусу вона відновлюється і здійснює декілька затухаючих коливань, а якщо газу мало, то бульбашка схлопується повністю в першому періоді життя поблизу обтічного тіла (наприклад, в трубі з місцевим звуженням).

З великою швидкістю відбувається скорочення каверни яке супроводжується звуковим імпульсом (гідралічним ударом) яке тим сильніше, чим менше газу містить бульбашка. Під час розвитку кавітації, у випадкові моменти часу, виникає і закривається безліч бульбашок. Таке явище супроводжується шумом з суцільним спектром від декількох Гц до 1000 кГц. Якщо кавітаційна бульбашка замикається поблизу від обтічного тіла, то велике повторювання ударів призводить до руйнування(кавітаційна ерозія) поверхні тіла (гребних гвинтів кораблів, лопатей турбіни та ін.) (рис.2.2.)

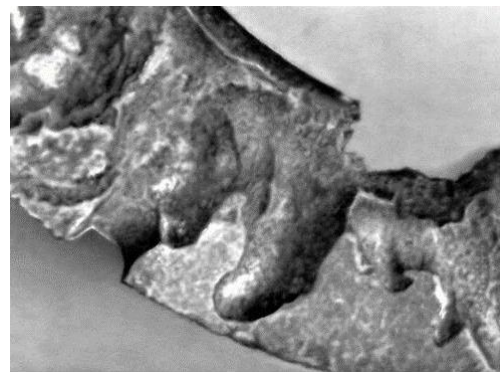


Рисунок 2.2 – Кавітаційна ерозія

Якщо б рідина була ідеальною, а поверхня твердого тіла, з яким вона межує, ідеально змоченою, то розрив каверни відбувся б при тиску значно нижчому ніж тиск насиченої пари рідини. Зазвичай же розрив існує при тисках, які не на багато менше тиску насиченої пари. Низька міцність пов'язана з тим, що є наявність кавітаційних зародків, що погано змочують ділянки твердого тіла: твердих часток з тріщинками, заповненими газом, мікроскопічними бульбашками, що обертаються від розчинення мономолекулярними оболонками, іонних утворень, що виникають під дією космічних променів.

Для характеристик кавітації обтічного тіла використовують різні безрозмірні параметри (критерії), одним з найбільш важливих параметрів є

число кавітації, що є критерієм подібності при моделюванні гідродинамічних течій:

$$\chi = 2 \frac{p - p_n}{\rho v_\infty^2}, \quad (2.1)$$

де p - гідростатичний тиск набігаючого потоку;

p_n - тиск насиченої пари;

v_∞^2 - швидкість рідини на достатньому віддаленні від тіла;

ρ - щільність рідини.

Збільшення швидкості потоку після початку кавітації викликає швидке зростання числа кавітаційних бульбашок, що слідом за тим об'єднуються в загальну велику каверну, потім течія переходить в струміння. Течія зберігає свій нестационарний характер лише в області замикання каверни. Особливо швидко струмінна течія організовується в разі погано обтічних тіл. Якщо всередину каверни, через тіло, де виникає кавітація, підвести атмосферне повітря або газ, то розмір каверни росте. Тоді встановиться течія, яка буде відповідати числу кавітації, утвореному вже не по насиченому тиску водяної пари p_n а по тиску газу усередині каверни p_k , тобто

$$\chi = 2 \frac{p_\infty - p_k}{\rho v_\infty^2}, \quad (2.2)$$

Спливання такої каверни буде визначатися числом Фруда:

$$F_r = \frac{v_\infty^2}{gd} \quad (2.3)$$

де g - прискорення сили тяжіння;

d - деякий характерний лінійний розмір.

Так як p_k може бути набагато більше p_n то в таких умовах при малих швидкостях набігаючого потоку важче отримувати течії, відповідні низьким значенням, тобто глибоким ступенем розвитку кавітації. Так, при русі тіла в воді зі швидкістю 6...10 м/сек можна отримати його обтікання, відповідне швидкостям до 100 м/сек. Кавітаційні течії, що виходять в результаті підведення газу всередину каверни, називаються штучною кавітацією [29].

Гідродинамічна кавітація може супроводжуватися рядом фізико-хімічних ефектів, наприклад іскроутворенням і люмінесценцією. У ряді робіт виявлено вплив електричного струму і магнітного поля на кавітацію, що виникає при обтіканні циліндра в гідродинамічній трубі.

Дослідження кавітації і боротьба з нею має велике значення, тому що кавітація шкідливо впливає на роботу гідротурбін, насосів та ін., знижує коефіцієнт корисної дії і призводить до руйнування обладнання.

Експериментальні дослідження кавітації проводяться на кавітаційних трубах, що являють собою звичайні гідродинамічні труби, що обладнанні системою регулювання статичного тиску [32].

Спостерігається, що максимальна інтенсивність кавітаційного руйнування відбувається в кислих середовищах і збільшується з пониженням рН середовища. Збільшення агресивності середовища призводить до зростання ролі корозійного чинника, причому більшою мірою, чим менше корозійна стійкість матеріалу. В нейтральних, як і в лужних середовищах, корозійні процеси відбуваються з кисневою деполяризацією і на поверхні утворюються щільні окисні плівки, що знижують змочення та змінюють характер адсорбційних процесів. Також змінюються умови виникнення і змикання кавітаційних бульбашок. Все це як правило збільшує кавітаційну стійкість сталей і сплавів.

2.3 Вплив кавітації на робочі елементи агрегату

Кавітація в багатьох випадках небажана. Наприклад, вона викликає руйнування гребних гвинтів суден, робочих органів насосів, гідротурбін і т.п., кавітація викликає шум, вібрації і зниження ефективності роботи.

Коли руйнуються кавітаційні бульбашки, енергія рідини зосереджується в дуже невеликих об'ємах. Тим самим, утворюються місця підвищеної температури і виникають ударні хвилі, які є джерелами шуму. Шум, що створюється кавітацією, є особливою проблемою на підводних човнах (субмаринах), так як через шум їх можуть виявити. При руйнуванні каверн звільняється багато енергії, що може викликати основні ушкодження. Кавітація може зруйнувати практично будь-який матеріал. Наслідки, викликані руйнуванням каверн, ведуть до великого зносу робочих органів.

Ступінь пошкодження матеріалу залежить від його якості. Так, наприклад, міцність литва з нержавіючої сталі класу 1.4408 (AISI 316) приблизно в 20 разів вище, ніж у матеріалі, що стандартно використовується в будівництві насосів – сірий чавун (GG 25). Міцність бронзи вище в два рази, ніж у чавуну.

Змінюючи швидкість потоку рідини, тиск і температуру рідини, що перекачується, можна не допустити кавітацію. Зменшення швидкості потоку і збільшення тиску знижує ймовірність появи кавітації. Так, наприклад, підвищуючи тиск на вході (наприклад, в результаті збільшення підпору, підвищення рівня води в шахті), можна знизити ймовірність утворення бульбашок пари і уникнути кавітації [40].

2.4 Ефективне застосування явища кавітації

Хоча кавітація небажана в багатьох випадках, однак є винятки. Наприклад, зверху кавітаційні торпеди, що використовуються військовими, обволікаються у великі кавітаційні бульбашки істотно зменшуючи контакт з

водою. Ці торпеди можуть пересуватися значно швидше, ніж звичайні торпеди.

Кавітація може бути корисною при ультразвуковому очищенні пристроїв. Ці пристрої створюють кавітацію, використовуючи звукові хвилі і руйнування кавітаційних бульбашок для чищення поверхні.

У промисловості кавітація часто використовується для гомогенізації, або змішування, і відсадження зважених часток у колоїдному рідинному складі, наприклад, суміші фарб або молоці. Робота багатьох промислових змішувачів ґрунтується на цьому принципі. Зазвичай це досягається завдяки конструкції гідротурбін або шляхом пропускання суміші через кільцеподібний отвір, який має вузький вхідний отвір і значно більший вихідний. Вимушене зменшення тиску призводить до кавітації, оскільки рідина прагне в бік більшого об'єму. Цим методом може управлятися гідравлічні пристрої, які контролюють розмір вхідного отвору, що дозволяє регулювати процес роботи в різних середовищах. Зовнішній бік змішувальних клапанів, за яким кавітаційні бульбашки переміщуються в протилежний бік, щоб викликати імплізію (внутрішній вибух), піддається величезному тиску і часто виконується з надміцних або жорстких матеріалів, наприклад, з нержавіючої сталі, стеліта або навіть полікристалічного алмазу (PCD).

Для попередження та зменшення кавітаційних руйнувань деталей гідроприсроїв застосовуються різні заходи конструктивного та експлуатаційного характеру: зниження кількості лопатей у насосі, створення суперкавітуючих гребневих гвинтів, вдосконалення профілів обтічних потоком рідини деталей, піддув повітря у передбачувану зону зносу, додавання в рідину, циркулюючу по замкнутому контуру і т.п.

Однак у більшості випадків ці заходи призводять лише до часткового зменшення руйнувань, вимагаючи значних матеріальних витрат або зниження робочих параметрів установок.

Тому найбільш ефективним слід вважати використання для виготовлення деталей гідромашин спеціальних матеріалів, що мають високу опірність кавітаційному руйнуванню.

Як і у випадку багатьох інших видів зношування, на жаль, зв'язок між стандартними показниками механічних властивостей металів і їх кавітаційно-ерозійною стійкістю відсутня, що ускладнює вибір матеріалу для виготовлення деталей гідромашин.

Найбільш доцільним слід вважати енергетичний підхід, що дозволяє розглядати процес руйнування при кавітації з позицій загального закону збереження енергії, тобто критерій зносостійкості повинен визначатися здатністю тіла поглинати підведену кавітуючим потоком енергію руйнування.

Такими властивостями характеризуються наплавлені низько вуглецеві мартенситні старіючі, хромонікелеві (0X12H8TЮ), залізо-нікелеві (04H18K9Ю5T), (0H20TЮ) сталі, вуглецеві хромисті сталомартенситного класу (14X13).

Всі розглянуті напрямки більшою чи меншою мірою використовуються в повсякденній практиці виготовлення та ремонту деталей гідромашин. Переваги, безумовно, заслуговують ті, які передбачають використання стандартних сталей і сплавів і наплавочних електродних матеріалів в першу чергу [41].

2.5 Причини виникнення гідравлічного удару в напірному водоводі агрегату

Гідравлічний удар може виникнути у напірному водоводі при різкому або поступовому закритті засувки або включення чи виключення з роботи насосів. Тому цей розділ є актуальним, щоб розглянути поняття та види гідравлічного удару.

Гідравлічний удар - це різке, миттєве (ударне) підвищення або зниження тиску в напірному трубопроводі, по якому рухається рідина (вода), з огляду на різкі зміни в часі швидкості її руху. Наприклад, при миттєвому перекиданні трубопроводу запірним пристроєм, миттєвої зупинки насосного агрегату, різкій зміні внутрішнього розміру трубопроводу з великого на менший і т.п. Якщо різке збільшення тиску в трубопроводі перевищить допустиму величину, трубопровід або арматура на ньому отримають порив або пошкодження [42].

Гідравлічний удар робить істотний вплив на перебіг перехідних процесів агрегатів, що повинно враховуватися при проектуванні напірних водоводів і елементів проточного тракту турбіни, особливо при їх розрахунку на міцність.

Несталим гідравлічним режимом (гідравлічний удар) називається хвильовий процес, що виникає в крапельній рідині при швидкій зміні її швидкості руху. Несталий гідравлічний режим який визначає перехід гідравлічної системи з одного стану в інший, називається перехідним гідравлічним режимом.

Залежно від інерційних властивостей трубопровідної системи і характеристик впливу, перехідні гідравлічні режими можуть мати характер гідравлічного удару або квазістаціонарного режиму. Квазістаціонарні режими мають монотонний характер і викликаються тривалими збуреннями, наприклад, плановим закриттям головних засувок при відключенні магістралей. У цих режимах небезпеку як правило, може представляти кінцевий тиск.

При швидкій зміні швидкості руху мас води процес зміни величини тиску має хвильовий характер, що можна зафіксувати і побачити за допомогою осцилографа в реальному масштабі часу. Хвилі гідравлічного удару поширюються по системі теплопостачання зі швидкістю звуку у воді (1000-1300 м/с) і можуть багаторазово повторюватися, поки енергія удару не витратиться на роботу тертя і деформації трубопроводів. Крім того, при

наявності хвиль тиску в трубопроводі можуть виникати умови резонансу, тобто збіг частоти власних і вимушених коливань стовпа рідини в трубопроводі. Цей процес спостерігається в тупикових точках трубопроводу, наприклад, у внутрішніх трубопроводах систем будівель. При цьому руйнівний вплив гідроударів багаторазово посилюється [43].

При сталому режимі тиск в будь-якому перерізі напірного водоводу визначається п'єзометричним рівнем, що дорівнює:

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)^c \quad (2.4)$$

При несталому русі додається динамічна складова - гідравлічний удар і висота п'єзометричного рівня, що дорівнює

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)^c + \Delta H^c \quad (2.5)$$

При несталому русі змінюються витрати, а отже і гідравлічні витрати, і швидкісний напір у водогоні. Гідравлічний удар відкладають від п'єзометричної лінії, відповідної кінцевої витраті.

Позитивний гідравлічний удар збільшує внутрішній тиск у водоводі і вимагає відповідного збільшення товщини його стінок або облицювань, а негативний удар знижує тиск і може призвести до утворення вакууму.

Слід зазначити, що вакуум небезпечний тільки в тому випадку, якщо при цьому можливий розрив суцільності потоку, тобто коли абсолютний тиск наближається до тиску водяної пари.

2.6 Методи захисту від гідравлічного удару

На гідроаккумуляуючій електростанції захист від гідравлічного удару є одним з головних чинників безаварійної роботи станції.

При розрахунку водоводів на підвищення тиску при гідравлічному ударі (визначене з урахуванням протиударної арматури або утворення вакууму) зовнішнє навантаження слід приймати не більше навантаження від колони автомобілів.

Підвищення тиску при гідравлічному ударі слід визначити розрахунком і на його підставі приймати заходи захисту.

Заходи захисту систем водопостачання від гідравлічних ударів слід передбачити для випадків:

- різкого вимикання всіх або групи спільно працюючих насосів внаслідок порушення електроживлення;
- виключення працюючого насоса до закриття поворотного затвора (засувки) на його напірній лінії;
- пуск насоса при відкритому поворотному затворі (засувці) на напірній лінії, обладнаний зворотним клапаном;
- механізоване закриття поворотної засувки при виключенні водоводу в цілому або його окремих ділянок;
- відкриття або закриття швидкохідної водозбірної арматури.

Заходи захисту які слід приймати від гідравлічного удару, що викликають раптовим вимиканням або включенням насосів:

- установити на напірних лініях насосів зворотний клапан зрегулюванням відкриття та закриття;
- установити на водоводі клапанів для впускання і заземлення повітря;
- установити на водоводі зворотний клапан, який розчленовує водовід наокремі ділянки з невеликим статичним напором на кожному з них;
- установити скидання води через насоси в зворотному напрямку при їх вільному обертанні або повному гальмуванні;

- установити на початку водоводу повітряно-водяних камер (ковпаків), що пом'якшують процес гідравлічного удару.

Для захисту від гідравлічного удару допускається застосовувати: установку запобіжних клапанів і клапанів-гасителів, скидання води з напірної лінії у всмоктувальну ємність, впуск води в місцях можливого утворення розривів потоку в водоводі, установку глухих діафрагм, які руйнуються при підвищенні тиску понад допустиму межу, пристроїв водонапірних колон, використання насосних агрегатів з більшою інерцією обертових мас. Захист трубопроводів від підвищення тиску, що викликається закриттям поворотного затвора (засувки), повинен забезпечуватися збільшенням часу цього закриття. При недостатньому часі закриття затвора з прийнятим типом приводу слід вживати додаткових заходів захисту (установка запобіжних клапанів, повітряних ковпаків, водонапірних колон та ін.).

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РЕЛЬЄФУ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ВОДОВОДУ АГРЕГАТУ

3.1 Матеріал водоводу

Матеріал, з якого виготовлено водовід, має велике значення для перехідних процесів на гідроакумулюючій електростанції.

Особливості будівництва напірних водоводів.

Для забезпечення стійкості об'єкта створюються спеціальні підтримуючі конструкції – свайне поле, глибиною більше 20 метрів. На сваї встановлюються верхні бетонні будівлі, на які монтуються секції водоводів. [25].

При виборі матеріалу та класу міцності труби для водоводів та водопровідних мереж слід враховувати:

- робочий тиск і робочу температуру середовища, що транспортується;
- властивості навколишнього середовища та середовища, що транспортується;
- властивості матеріалів і виробів (міцність, холодостійкість, стійкість проти корозії, зварюваність і т.п.);
- температуру навколишнього повітря для трубопроводів, розташованих на відкритому повітрі або в неопалюваних приміщеннях.

За розрахункову температуру повітря при виборі матеріалів і виробів для трубопроводів слід приймати середню температуру найбільш холодної п'ятиденки згідно СНіП 2.01.01-82. Також враховувати статистичні дані розрахунку, агресивність ґрунту і води, умови роботи трубопроводів і вимоги до якості води.

Для напірних водоводів слід застосовувати неметалеві труби (залізобетонні, азбестоцементні, пластмасові та ін.).

Застосування чавунних труб допускається тільки в межах населених пунктів, території промисловості, сільськогосподарських підприємств.

Застосування сталевих труб допускається:

- на ділянках з розрахунковим внутрішнім тиском більше 1,5 МПа;
- для переходів підлогу залізними і автомобільними дорогами, через водні перешкоди і яри;
- в місцях перетину господарсько-питного водопроводу з мережами каналізації;
- при прокладанні трубопроводів по автодорожнім і міським мостам, поопорах естакад та в тунелях.

Сталеві труби повинні прийматися економічних сортamentів зі стінкою, товщина якої повинна визначатися розрахунком (але не менше 2 мм) з урахуванням умов роботи трубопроводів. Для залізобетонних і азбестоцементних трубопроводів допускається застосування металевих фасонних частин.

Величину розрахункового внутрішнього тиску належить приймати рівною найбільшому можливому за умовами експлуатації тиску в трубопроводі на різних ділянках по довжині (при найбільш не вигідному режимі роботи) без урахування підвищення тиску при гідравлічному ударі або з підвищенням тиску при гідравлічному ударі з урахуванням дії протиударною арматури, якщо цей тиск в поєднанні з іншими навантаженнями зробить на трубопровід більший вплив.

Величину випробувального тиску на різних випробувальних ділянках, якому повинні піддаватися трубопроводи перед здачею в експлуатацію, слід указувати в проектах організації будівництва, виходячи з міцних показників матеріалу і класу труб, прийнятих для кожної ділянки трубопроводу, розрахункового внутрішнього тиску води і величин зовнішніх навантажень, що впливають на трубопровід в період випробування.

Розрахункова величина випробувального тиску не повинна перевищувати наступних величин для трубопроводів із труб:

- чавунних - заводського випробувального тиску з коефіцієнтом 0,5;
- залізобетонних і азбестоцементних - гідростатичного тиску, передбаченого ДСТУ або технічними умовами для відповідних класів труб при відсутності зовнішнього навантаження;
- сталевих і пластмасових - внутрішнього розрахункового тиску з коефіцієнтом 1,25.

Чавунні, азбестоцементні, бетонні, залізобетонні та керамічні трубопроводи повинні бути розраховані на спільний вплив розрахункового внутрішнього тиску і розрахункової приведеної зовнішнього навантаження.

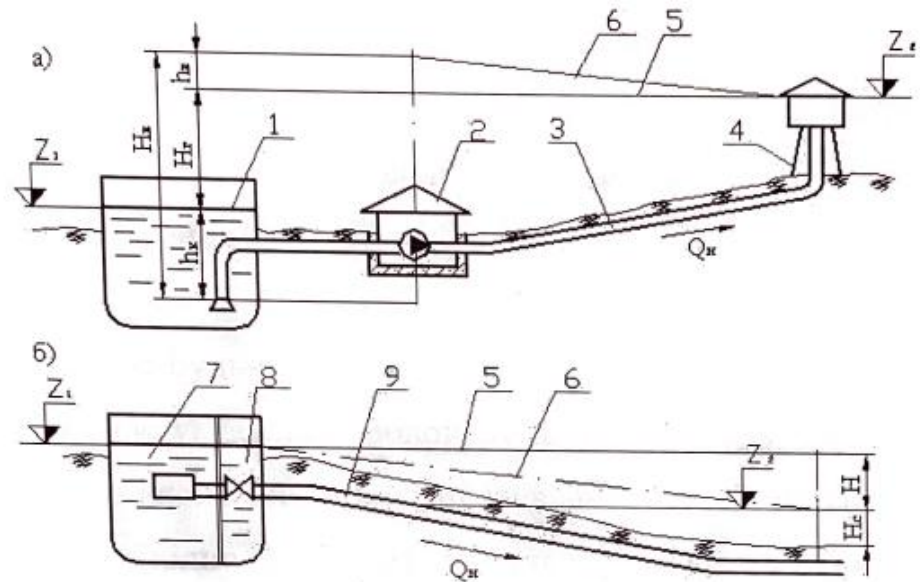
Сталеві та пластмасові трубопроводи повинні бути розраховані на вплив внутрішнього тиску і на спільну дію зовнішньої наведеної навантаження, атмосферного тиску, а також на стійкість круглої форми поперечного перерізу труб.

Вкорочення вертикального діаметра сталевих труб без внутрішніх захисних покриттів не повинно перевищувати 3%, а для сталевих труб з внутрішніми захисними покриттями і пластмасових труб повинно прийматися за стандартами або технічними умовами на ці труби. При визначенні величини вакууму слід враховувати дію передбачених на трубопроводі противакуумних пристроїв.

3.2 Типи водоводів за призначенням

Водоводи - транзитні трубопроводи, що з'єднують окремі споруди системи водопостачання. Вони призначені для транспортування води від водо-джерела до об'єкта водопостачання.

За способом створення напору водоводи поділяються на: напірний, самопливні (або гравітаційні) і комбінований. В напірних водоводах подача води здійснюється насосом, в соматичних - самопливом під дією сил тяжіння. Комбінований водовід складається з напірних і самопливних водоводів. Розглянемо схеми напірного і самопливного водоводів на рис.3.2[38].



1- резервуар; 2 - насосна станція; 3 - напірний водовід; 4 - водонапірна башта; 5 - лінія гідростатичного напору; 6 - лінія гідродинамічного напору; 7 - підземний напірний резервуар; 8 - камера перемикання; 9 - самопливно-напірний водовід.

Рисунок 3.2 - Розрахункові схеми водоводів напірного (а) та самопливно-напірного (б)

Залежно від гідравлічного режиму роботи розрізняють напірні і безнапірні водоводи. Напірні водоводи працюють повним перетином і в трубах мається внутрішній тиск, а безнапірні - неповним перетином і внутрішній тиск в них відсутній.

Водоводи є відповідальними елементами в системі водопостачання і повинні задовольняти санітарно-гігієнічним вимогам. До них пред'являються вимоги по економічності і надійності подачі води споживачам. Водоводи укладають із сталевих, чавунних азбестоцементних і залізобетонних труб.

По напірних водоводах (рис. 3.2, а) воду подають з живлячого резервуара з меншої позначки його вільної поверхні Z_1 в живильний резервуар на висоту Z_2 . Для цих водоводів лінія гідродинамічного напору завжди буде знаходитися вище лінії гідростатичного напору.

В самопливних водоводах (рис.3.2, б) відмітка рівня води в живильному резервуарі більше відміток ніж в тих, що на величину наявного напору $H = z_1 - z_2$. Для цих водоводів лінія гідродинамічного напору завжди буде знаходитися нижче лінії гідростатичного напору.

Напірний і самопливний водоводи працюють повним перерізом, самопливно-безнапірний - неповним. Водоводи є відповідальними елементами в системі, до них пред'являються дві основні вимоги: економічність і надійність подачі води споживачам.

Для забезпечення безперебійної роботи водоводи укладаються зазвичай у дві нитки, які часто з'єднують перемиканнями, що дозволяють вимкнути на ремонт будь-яку ділянку в разі аварії на ньому.

Допускається укладання водоводу в одну нитку при значній його довжині і техніко-економічному обґрунтуванні. Якщо водовід проектується в одну нитку, необхідно передбачити влаштування запасних резервуарів (наприкінці водоводу). Для оберігання одного трубопроводу від розливу в разі аварії на другому відстань між нитками водоводу приймають залежно від матеріалу труб, внутрішнього тиску і геологічних умов.

Вибір діаметрів труб.

Економічно найвигідніший діаметр труб напірних водоводів вважається такий, при якому наведені витрати по комплексу взаємопов'язаних споруд «Насосна станція і водовід» будуть найменшими.

Економічно найвигіднішим діаметром труб самопливно-напірного водоводу вважається такий (або комбінація з двох діаметрів), якому відповідає найменша вартість водоводу за умови забезпечення необхідного напору в його кінцевій точці. Ця умова виконується при повному використанні наявного напору H .

3.3 Умови спільної роботи насосного обладнання і водоводів

Спільна робота насосів і водоводів можлива лише в тому випадку, якщо створюваний насосами напір H_n відповідний їх продуктивності Q_n , дорівнюватиме повній висоті водопідйому H_n (рис.3.3). Вона визначається за формулою:

$$H_n = H_r + h_k + h_b = H_r + Q_n^2 \cdot (S_k + S_b) \quad (3.1)$$

де, H_r - геометрична висота водопідйому, вимірювана між рівнями води живильному (z_1) і напірному (z_2) резервуарах, м;

h_k, h_b -втрати напору в комунікаціях насосної станції та водоводів відповідно, м;

Q_n - витрата води, що подається насосом, м³/сабо л/с;

S_k, S_b - опори комунікацій насосної станції та водоводу, с²м/л².

Розрахувати спільну роботу насосів і водоводів можна двома способами: графічним і аналітичним.

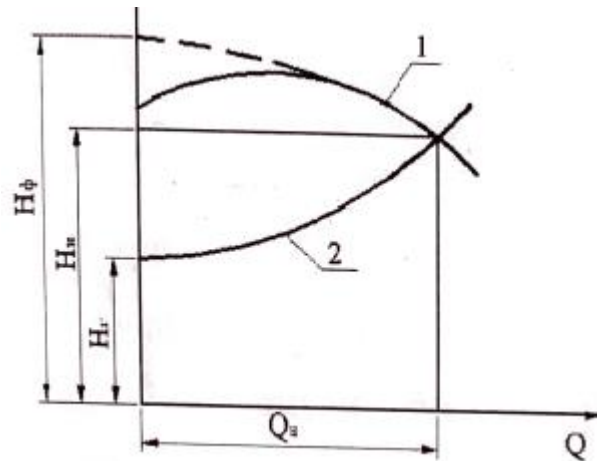
Розрахуємо спільну роботу насосів і водоводів графічним способом. Для цього на координатну сітку нанесемо характеристику насоса Q_n (крива 1) і за формулою будуємо характеристику Q_n водоводів (крива 2). Координата точки перетину цих двох кривих визначає значення подаваної насосом витрати Q_n і визначеному при цьому напорі H_n .

При другому способі характеристики Q-Н насосів і трубопроводів представляють аналітичними виразами:

- для насосів

$$H_n = H_n - S_\phi - Q_n^2 \quad (3.2)$$

- для трубопроводів – рівнянням (3.1).



1- характеристика QH відцентрового насоса, 2- характеристика водопровідної системи.

Рисунок 3.3 - Графік спільної роботи насосів і водоводів

Прирівнявши праві частини виразів (3.1) і (3.2), після перетворень отримаємо формулу для визначення витрати води:

$$Q_H = \sqrt{\frac{H_\phi + H_R}{S_K + S_B + S_\phi}}, \quad (3.3)$$

де H_ϕ і S_ϕ - параметри аналітичної характеристики Q - H відцентрових насосів, величину яких можна обчислити за формулами:

$$S_\phi = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2}, \quad (3.4)$$

$$H_\phi = H_1 + S_\phi \cdot Q_1^2 = H_2 + S_\phi \cdot Q_2^2, \quad (3.5)$$

де H_1 і H_2 - напір, що розвивається насосом при подачі відповідно Q_1 і Q_2 (приймаються за довідковими даними).

3.4 Удосконалення систем перебігу рідин з використанням ефекту різновісності середовищ

3.4.1 Збільшення втрати напору при турбулентному русі потоку рідини

При обтіканні потоку спіралі зони водоверті у центрі труби та лінії струму турбулентного потоку біля стінок труби (рис. 3.4). Турбулентні дотичні напруження, що діють уздовж потоку, відносно великі, тому спостерігається більша втрата напору в межах коловоротних зон (вихорів).

Місцеві втрати напору характеризуються:

- 1) місцевим скривленням ліній струму й живих перерізів;
- 2) зменшенням або збільшенням живих перерізів уздовж потоку;
- 3) виникненням місцевих відривів транзитного струменя від стінок і виникненням зон водоверті.

У межах таких ділянок спостерігається:

- 1) деформація епюр осереднених швидкостей уздовж потоку;
- 2) підвищення пульсації швидкостей та тисків.



а

б

а) загальний вигляд деформації; б) епюра швидкості

Рисунок 3.4 - Загальна деформація потоку при наявності спірального треку

У дослідницькій роботі будуть враховуватися такі фактори впливу на перекачування води: шорсткість поверхні треку, кут нахилу водоводу.

Трубопровід постійного діаметра, що має місцеві перепони на шляху руху води: коліно насоса, вихід з труби та гвинтоподібний трек (спіраль).

3.4.2 Характер гвинтового руху та властивості гвинтової лінії

Рух твердого тіла, який складається з обертального і поступального, спрямованого уздовж вісі обертання, називається гвинтовим (рис.3.6). Розрізняють право-гвинтовий (рис.3.6, а) та ліво-гвинтовий рух (рис.3.6, б).

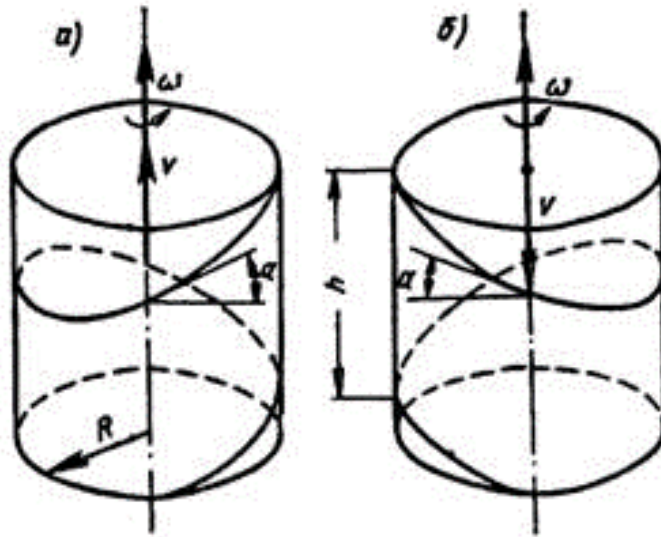


Рисунок 3.6 - Гвинтовий рух у двох варіантах

Відстань h , пройдена проекцією якої-небудь точки тіла на вісь гвинта при одному обороті, називається кроком гвинта. Відношення поступальної швидкості v до кутової ω називається параметром гвинта p :

$$p = \frac{v}{\omega} = \frac{h}{2\pi} \quad (3.6)$$

Підйом гвинтової лінії (траєкторія довільної точки M на відстані R від вісі гвинта) дорівнює

$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{p}{R} = \frac{h}{2\pi R} \quad (3.7)$$

Швидкість точки M дорівнює, м/с

$$v_M = \sqrt{v^2 + R^2 \omega^2} \quad (3.8)$$

Прискорення при рівномірному гвинтовому русі в загальному випадку визначається за правилом додавання прискорень, м/с²

$$a_M = R\omega^2. \quad (3.9)$$

Звичайною або циліндричною гвинтовою лінією називається траєкторія точки М, що бере участь одночасно в двох рухах: в обертальному навколо вісі z і в поступальному паралельно цій вісі з постійними швидкостями.

Позначимо відстань від точки М до Oz через a , кутову швидкість - через ω , швидкість у поступальному русі через v , для кута повороту φ в обертальному русі точки М за час t має $\varphi = \omega t$; поступальне переміщення за той же час $z = vt$ або $z = h\varphi$, де $h = v/\omega$. Якщо до рівнянь $x = a \cos\varphi$, $y = a \sin\varphi$ траєкторії точки М в обертальному русі приєднати рівняння $z = h\varphi$, то отримаємо параметричні рівняння шуканої траєкторії (рис.2.3,а).

Геометричний зміст h (наведений крок, параметр гвинта) є переміщення точки М паралельно Oz при повороті на 1 радіан.

Повний крок $H = 2\pi h$ є переміщення IOz при одному оберті навколо Oz.

Гвинтом називається сукупність двох колінеарних векторів. Вектор кутової швидкості лежить на вісі гвинта Oz.

Проекція гвинтової лінії на xOy є окружність $x = a \cos\varphi$, $y = a \sin\varphi$, звана далі основні окружності, проекція на yOz: $y = a \sin\varphi$, $z = h\varphi$ є синусоїда, так як винятком φ виходить $y = \sin \frac{z}{h}$ Проекція на xOz є косинусоїда.

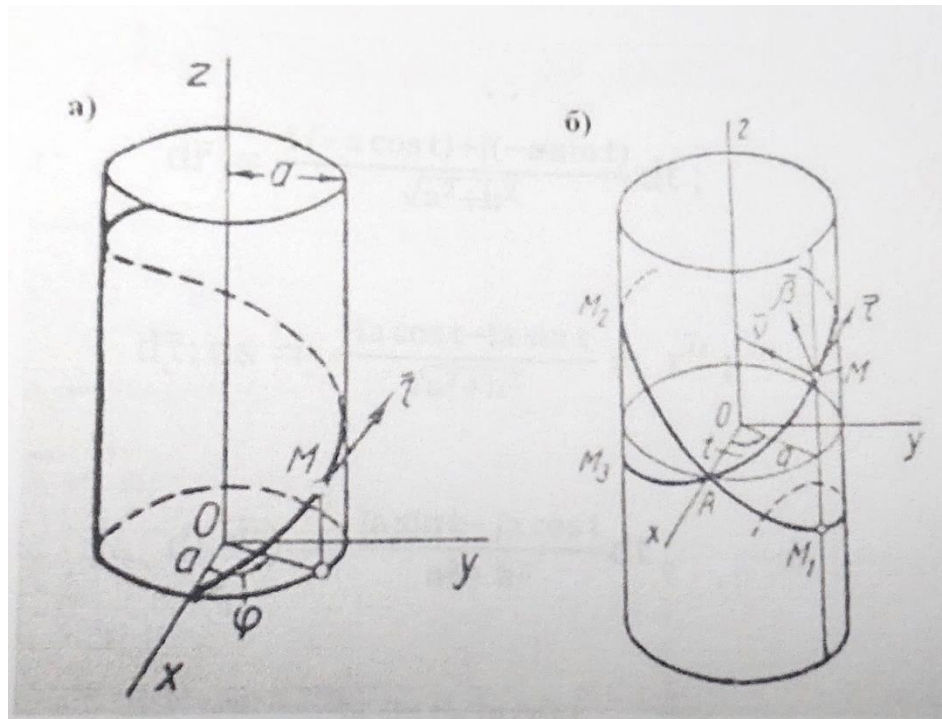


Рисунок 3.7 - Гвинтова лінія права(а) та ліва (б)

Якщо виключити $\varphi = \frac{z}{h}$ з системи $x^2 + y^2 = a^2$, $\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \varphi$, то отримаємо кручену лінію як перетин двох поверхонь: $x^2 + y^2 = a^2$, $\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \varphi$ – круглого циліндра і прямого гелікоїда. Надалі положення $\omega = 1$.

Параметричні рівняння $x = a \cos \varphi$, $y = a \sin \varphi$, $z = h\varphi$ визначають праву гвинтову лінію при $h > 0$ і ліву кручену лінію при $h < 0$. На рисунку 2.3 (б) для правої гвинтової лінії при $t > 0$ гілка AM лежить над xu , при $t < 0$ гілка M_3A - під xu ; для лівої гвинтової лінії при $t > 0$ гілка AM_1 лежить під xu , при $t < 0$ гілка M_2A - над xu .

$$\bar{r} = \bar{i}a \cos t + \bar{j}a \sin t + \bar{k}ht; \quad (3.10)$$

$$\overline{dr} = [\bar{i}(-a \sin t) + \bar{j}a \cos t + \bar{k}h]dt; \quad (3.11)$$

$$ds = |\overline{dr}| = \sqrt{a^2 + h^2}dt; \quad (3.12)$$

$$\bar{\tau} = d\bar{r}: ds = \frac{\bar{i}(-asint) + \bar{j}acost + \bar{k}h}{\sqrt{a^2+h^2}} = \bar{r}'; \quad (3.13)$$

$$d\bar{\tau} = \frac{\bar{i}(-acost) + \bar{j}(-asint)}{\sqrt{a^2+h^2}} dt \quad (3.14)$$

$$d\bar{\tau}: ds = \frac{\bar{i}acost - \bar{j}asint}{\sqrt{a^2+h^2}} = \bar{r}''; \quad (3.15)$$

$$d(\bar{r}'') = \frac{\bar{i}asint - \bar{j}acost}{\sqrt{a^2+h^2}} dt; \quad (3.16)$$

$$d(\bar{r}''): ds = \frac{\bar{i}asint - \bar{j}acost}{(a^2+h^2)^{3/2}} = \bar{r}'''; \quad (3.17)$$

$$K = \left| \frac{d\bar{r}}{ds} \right| = \frac{a}{a^2+h^2}; \quad (3.18)$$

$$\rho = \frac{a^2+h^2}{a}; \quad (3.19)$$

$$\bar{\vartheta} = \rho \bar{r}''' = -\bar{i}cost - \bar{j}sint; \quad (3.20)$$

$$\bar{\beta} = \bar{\tau} \cdot \bar{\vartheta} = \frac{\bar{i}hsint + \bar{j}hcost + \bar{k}h}{\sqrt{a^2+h^2}}; \quad (3.21)$$

$$T = \rho^2 (\bar{r} \cdot \bar{r}'' \cdot \bar{r}''') = \frac{h}{a^2+h^2}. \quad (3.22)$$

Рівняння елементів тригранника в точці $M(t)$ кривої:

- дотичній

$$\frac{X - \alpha \cos t}{-\alpha \sin t} = \frac{Y - \alpha \sin t}{\alpha \cos t} = \frac{Z - ht}{h}; \quad (3.23)$$

- нормальній площині

$$X\alpha \sin t - Y\alpha \cos t - hZ + h^2t = 0; \quad (3.24)$$

головною нормалі

$$\frac{X-\alpha \cos t}{\cos t} = \frac{Y-\alpha \sin t}{\sin t} = \frac{Z-ht}{0}; \quad (3.25)$$

спрямляються площині

$$X \sin t + Y \cos t - \alpha = 0; \quad (3.26)$$

дотичній площині

$$X \sin t - Y \cos t + \frac{\alpha}{h}Z - \alpha t = 0; \quad (3.27)$$

бінормалі

$$\frac{X-\alpha \cos t}{h \sin t} = \frac{Y-\alpha \sin t}{-h \cos t} = \frac{Z-ht}{\alpha}; \quad (3.28)$$

Властивості гвинтової лінії. Довжина дуги гвинтової лінії, відрахованої від точки А (t=0) (рис.2.3, б), м

$$s = \sqrt{\alpha^2 + h^2t}; \quad (3.29)$$

Для того ж і дуга а кола - проекції гвинтової лінії на xOy: $\sigma = at$, s пропорційна σ

$$s = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{\alpha}\right)^2} \sigma; \quad (3.30)$$

Рівняння гвинтової лінії з параметром s

$$x = \alpha \cos \frac{s}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}; \quad (3.31)$$

$$y = \alpha \sin \frac{s}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}; \quad (3.32)$$

$$z = \frac{hs}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}. \quad (3.33)$$

Направляючі косинуси:

- дотичній

$$\left\{ \frac{-\alpha \sin t}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}, \frac{\alpha \cos t}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}, \frac{h}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}} \right\}; \quad (3.34)$$

- головній нормалі

$$\{-\cos t, -\sin t, 0\}; \quad (3.35)$$

бінормалі

$$\left\{ \frac{h \sin t}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}, \frac{-h \cos t}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}, \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}} \right\}; \quad (3.36)$$

Дотична утворює з віссю гвинта постійний кут, для якого

$$\cos \gamma = \frac{h}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}; \quad (3.37)$$

чи інакше - гвинтова лінія перетинає утворений циліндр, на якому вона лежить, під постійним кутом γ .

Кут $90^\circ - \gamma = 0$ між гвинтовою лінією і основною окружністю або між дотичним до них, званий кутом підйому гвинтової лінії, визначається з формули:

$$\sin \theta = \frac{h}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}; \quad (3.38)$$

$$\cos \theta = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}; \quad (3.39)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{h}{\alpha}. \quad (3.40)$$

Відношення повного кроку h до довжини основного кола є $\operatorname{tg} \theta$:

$$\frac{H}{2\pi\alpha} = \frac{h}{\alpha} \quad (3.41)$$

Проекція головної нормалі на xOy : $Y = X \operatorname{tg} t$.

Головна нормаль у всякій точці M перетинає вісь гвинта і перпендикулярна їй. Головна нормаль збігається з нормаллю до циліндричної поверхні. Гвинтова лінія - геодезична на циліндрі.

Біномраль утворює постійний кут Φ з віссю гвинта, рівний куту підйому гвинтової лінії

$$\cos \Phi = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}; \quad (3.42)$$

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{h}{\alpha}. \quad (3.43)$$

Всяка пряма, яка перебуває на найкоротшій відстані r від вісі гвинта і утворює з віссю гвинта кут Φ , який визначається рівністю

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{h}{r}; \quad (3.44)$$

називається - променем гвинта. Бінормалі всіх гвинтових ліній даного гвинта несуть промені гвинта, вони утворюють комплекс променів.

У всякій точці гвинтової лінії кривизна і кручення постійні. Права гвинтова лінія має позитивне кручення, для лівої гвинтової лінії кручення негативне

$$T = -\frac{h}{\alpha^2+h^2}. \quad (3.45)$$

Вираз кривизни та кручення через кут θ

$$K = \frac{\cos^2 \theta}{\alpha}; \quad (3.46)$$

$$T = \frac{\cos^2 \theta \operatorname{tg} \theta}{\alpha} = \frac{\sin 2\theta}{2\alpha}. \quad (3.47)$$

Загальні гвинтові лінії (лінії укусу) - криві, дотичні до яких утворюють постійний кут з заданим напрямом. Головна нормаль загальної гвинтової лінії збігається з нормаллю до циліндричної поверхні.

У всякій точці загальної гвинтової лінії $K: T = \text{const}$. Еволюти (просторові) всякої плоскої кривої - загальні гвинтові лінії.

3.5 Дослідження експлуатації напірного водоводу зі штучним формуванням кавітаційного потоку при різному куті нахилу

У даному дослідженні закладені ідеї 30-х років минулого століття, це ідеї австрійського винахідника Віктора Шаубергера, які дуже важливі для

створення сучасних магістральних газопроводів, нафтопроводів, водоводів, гідроелектростанцій і всіх інших видів трубопровідного транспорту. В патенті [43] представлена конструкція водоводу, що забезпечує обертальний рух потоку за рахунок встановлених лопаток (вставок).

Спираючись на ідею патенту сконструйовано водовід з вбудованою всередину водоводу спіраллю, яка має кут нахилу 30° (рис. 3.8)

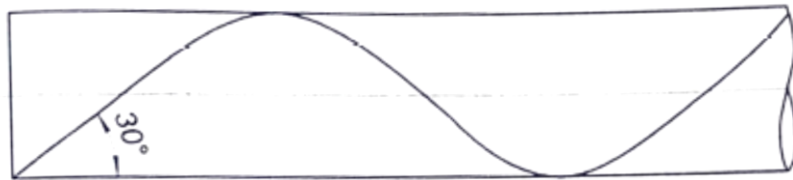


Рисунок 3.8 - Труба з гвинтоподібним треком під кутом нахилу 30°

Якщо враховувати, що довжина треків дорівнюватиме $L = 3\text{ м}$, а крок спіралі при 30° $\tau = 180\text{ мм}$, то визначимо, що кількість витків становить, шт.

$$n_B = \frac{L}{\tau} = \frac{3000}{180} = 16 \text{ витків.}$$

Для виконання дослідного проекту використовується спіралеподібний трек (рис. 3.9), де змінюється шорсткість поверхні цієї спіралі: гладкий трек, чарунковий трек.



Рисунок 3.9 - Гвинтоподібний гладкий трек

Вивчення рельєфу поверхні шкіри акули дозволило виявити важливий аргумент, що шкіра акули зовсім і не шкіра, а луска зі спеціальними гострими зубчиками-лусочками, які відштовхують все чужорідне. Якщо провести рукою від голови до хвоста, то вона здається гладкою-гладкою, а якщо в інший бік то можна серйозно травмуватися. Це тому, що лусочки розташовані в порядку який утворює «алмазний» візерунок.

Група вчених з Гарварду провела перші в історії лабораторні дослідження гідродинаміки шкіри акул і з'ясувала, що унікальна структура лусочок прискорює рух морських хижаків на 6,6 % і при цьому знизити енерговитрати на переміщення на 5,9 %. Поставити раніше неможливий експеримент вдалося завдяки технологіям 3D-сканування і друку.

Як зазначає The Journal of Experimental, шкіра акули завжди викликала жвавий інтерес як біологів, так і інженерів своєю незвичайно шорсткою поверхню: вона складається з найдрібніших лусочок у формі тризубів які розсіюють воду і знижують опір під час руху (рис. 3.10).

На рисунку 3.10 показано розроблену структуру шкіри акули з елементами мембран (біоміметична тканина).

Зануривши біоміметричну шкіру в проточну воду, дослідники імітували рух риби при частоті вертикальних коливань 1,5 Гц з амплітудою виявили, що матеріал прискорює рух на 6,6 %, з використанням на 5,9 % менше енергії в порівнянні з гладкою мембраною в аналогічних умовах до розсіюють воду біля поверхні шкіри, створюючи завихрення, що зменшує коефіцієнт тертя [44].

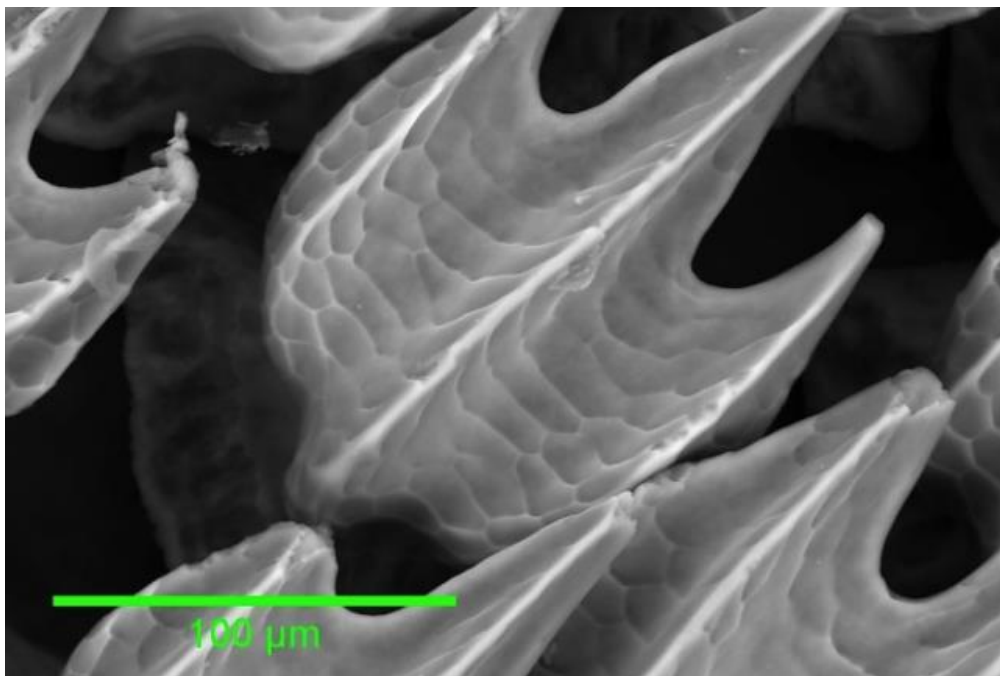


Рисунок 3.10 – 3D-друк шкіри акул

Знаючи структуру шкіри акул і її властивості, для наступних досліджень зробили чарунковий трек (рис. 3.11), при його використанні очікували зменшення опору і збільшення продуктивності насоса, що перекачує.

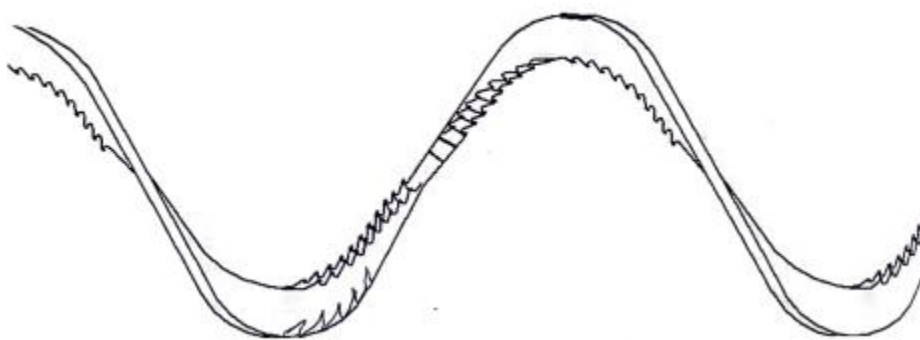
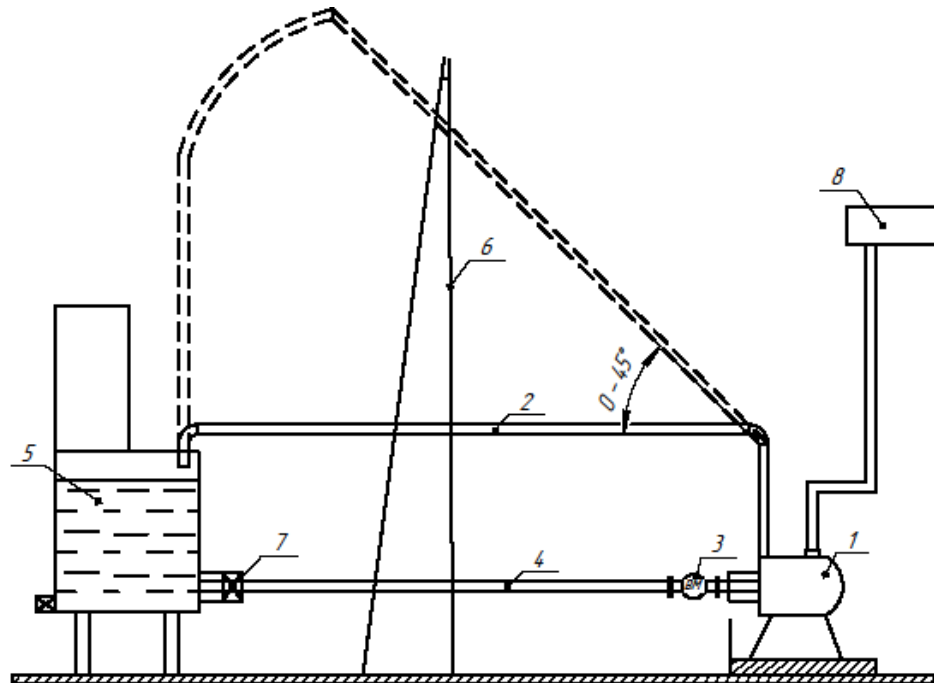


Рисунок 3.11 – Гвинтоподібний чарунковий трек

3.5.1 Дослідницька модель

На кафедрі теплоенергетики та гідроенергетики ЗНУ, в лабораторному приміщенні розроблена удосконалена лабораторна установка для дослідження режимів експлуатації водоводу зі штучним формуванням кавітаційного потоку, що представлено рисунком 3.12



1 - електронасос; 2 — трубопровід; 3 - витратомір; 4 - зворотній водовід; 5 - бак-акумулятор; 6 - опора; 7 - засувка; 8 - шафа автоматичного управління, електролічильник

Рисунок 3.12 - Модель водоводу для ГАЕС

Для виявлення характеру динаміки руху води, кут нахилу водоводу довжиною 3,15 м змінювали від 0° , 45° , 90°

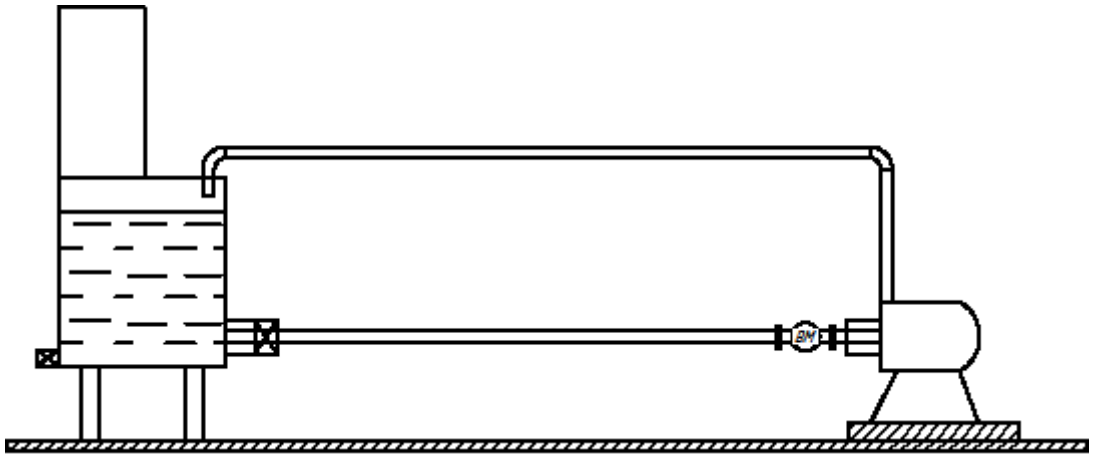


Рисунок 3.13 - Лабораторна установка з кутом нахилу водоводу 0°

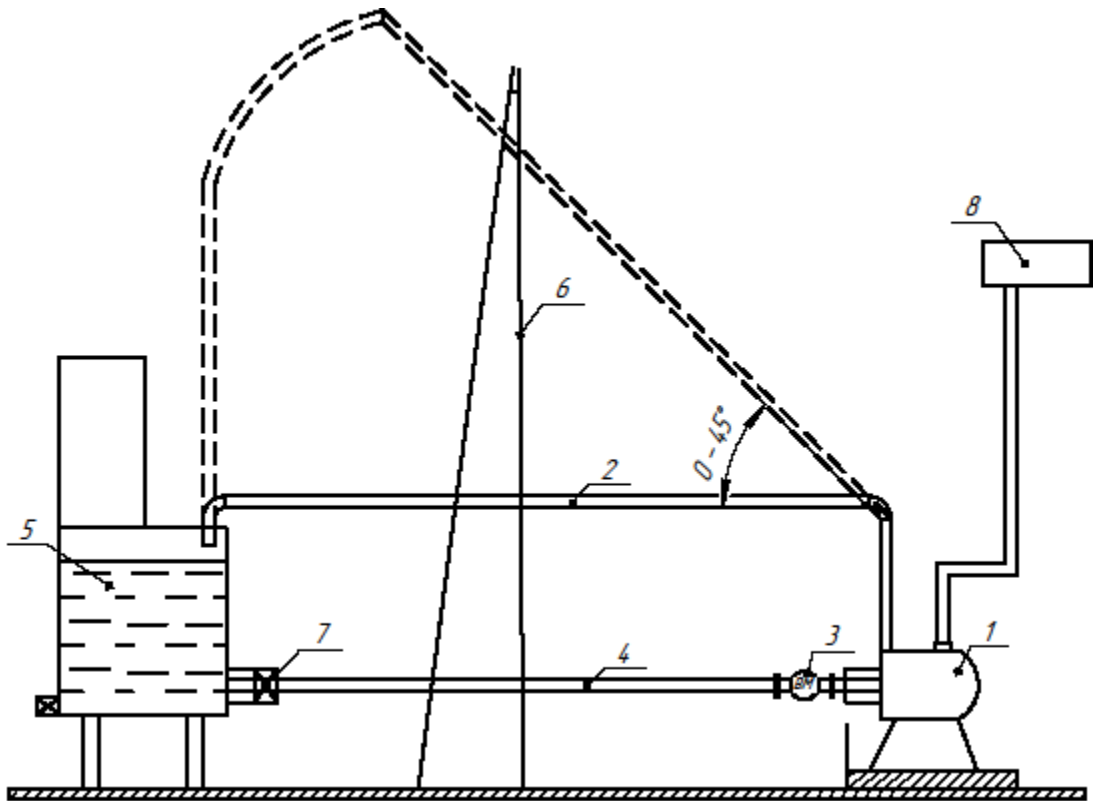


Рисунок 3.14 - Лабораторна установка з кутом нахилу водоводу 45°

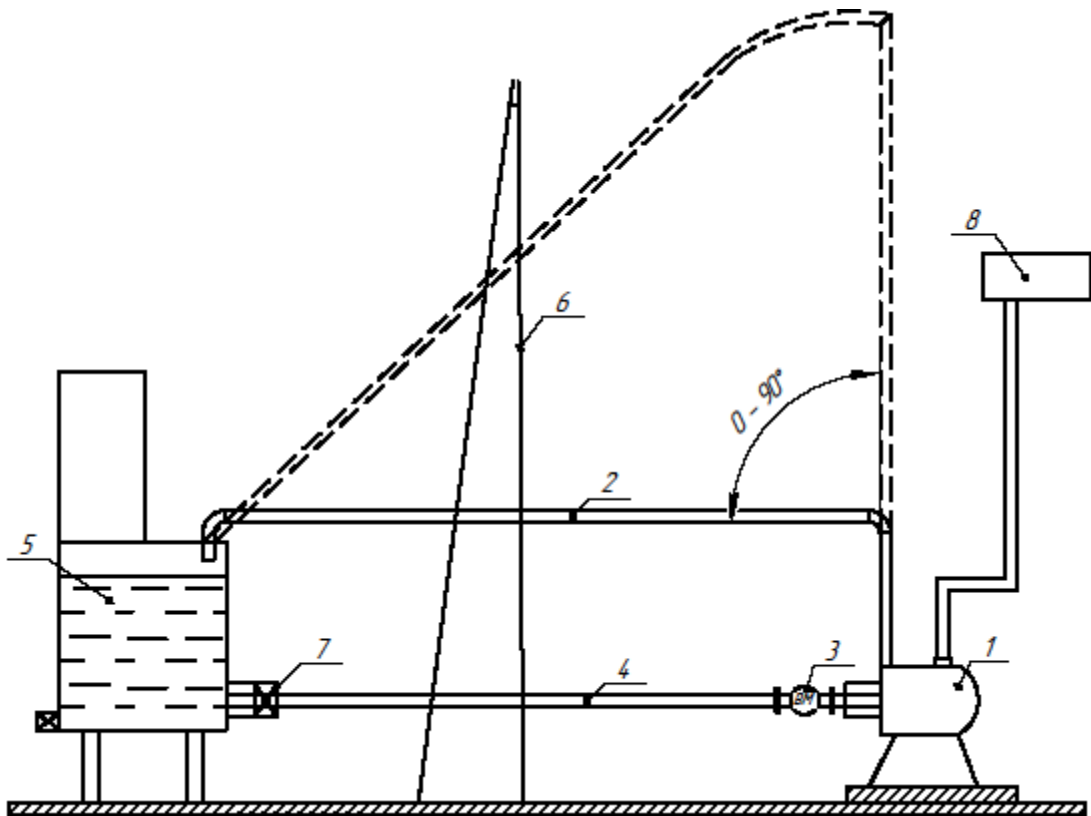


Рисунок 3.15 - Лабораторна установка з кутом нахилу водоводу 90°

3.5.2 Програма дослідження моделі водоводу

Експеримент проводився двома шляхами:

- шляхом зміни кута нахилу водоводу від 0° до 90° ;
- шляхом зміни стану внутрішньої поверхні водоводу. Реалізується завдяки використанню в водоводі гвинтоподібних вставок двох типів: гладкого і чарункового треку.

Вплив кута нахилу водоводу на стан потоку (експерименти без установки гвинтоподібних треків).

Для проведення експерименту шляхом зміни кута нахилу водоводу на установці проводились дослідження у наступній послідовності:

1) на початку проведення дослідів перевіряється вся система на відсутність течії у замкненій системі трубопроводів;

2) водовід встановлюється у необхідне положення (0° , 45° , 90°) за програмою експерименту;

3) вода повинна заповнювати систему до її виходу з напірного трубопроводу в накопичувальний бак, тобто знаходитись у зворотному трубопроводі та на нижньому рівні баку;

4) перевірити роботу електроприводу з контрольними приладами; завантаження води проводиться при всіх відкритих кранах; при фіксуванні початкових показників годинника, електролічильника та витратоміра вмикається електронасос;

5) через встановлений термін часу (10 хвилин) фіксуються початкові і кінцеві показники витрат електроенергії та води;

6) після проведення експерименту вимикається установка, закривається засувка 7, з трубопроводу зливається вода через ш.к. $\frac{1}{2}$ " встановлений на насосі.

Вплив спірального гладкого треку на стан потоку.

Для проведення експерименту шляхом зміни стану внутрішньої поверхні водоводу встановлюють гвинтоподібний гладкий трек та на установці проводяться досліди у наступній послідовності:

1) на початку проведення дослідів перевіряється вся система на відсутність течії в замкненої системі трубопроводів;

2) завантажити гвинтоподібний гладкий трек у напірний водовід;

3) вода повинна заповнювати систему до її виходу з напірного трубопроводу у накопичувальний бак, тобто знаходитись у зворотному трубопроводі та на нижньому рівні баку, засувка 7 закрита;

4) перевірити роботу електроприводу з контролюючими приладами; завантаження води проводиться при відкритих кранах;

5) при визначенні початкових показників, годинника, електролічильника та витратоміра вмикається електронасос, водночас відкривається засувка 7;

6) через встановлений термін часу (10 хвилин) записуються показники витрат електроенергії та води;

7) після проведення експерименту вимикається установка, закриваються крани.

Вплив спірального чарункового треку на стан потоку.

Для проведення експерименту шляхом зміни стану внутрішньої поверхні напірного водоводу встановлюють гвинтоподібний чарунковий трек та на установці проводяться досліді у наступній послідовності:

1) на початку проведення дослідів перевіряється вся система на відсутність течії в замкненій системі трубопроводів;

2) завантажується гвинтоподібний чарунковий трек у напірний водовід;

3) вода повинна заповнювати систему до її виходу з напірного трубопроводу у накопичувальний бак, тобто знаходитись у зворотному трубопроводі та на нижньому рівні баку, засувка 7 закрита;

4) перевірити роботу електроприводу, контролюючими приладами;

5) завантаження води проводиться при відкритих кранах;

6) при визначенні початкових показників, годинника, електролічильника та витратоміра вмикається електронасос, водночас відкривається засувка 7;

7) через встановлений термін часу (10 хвилин) записуються показники витрат електроенергії та води;

8) після проведення експерименту вимикається установка, закриваються крани.

Таблиця 3.1 - Програма дослідження моделі водоводу

Горизонтальне положення напірного трубопроводу	1. Порожній трубопровід
	2. Напірний трубопровід із треком:
	- Гладкий спіральний трек
	- Чарунковий спіральний трек
Нахил напірного водоводу 45°	1. Порожній трубопровід
	2. Напірний трубопровід із треком:

	- Гладкий спіральний трек
	- Чарунковий спіральний трек
Нахил напірного водоводу 90°	1. Порожній трубопровід
	2. Напірний трубопровід із треком:
	- Гладкий спіральний трек
	- Чарунковий спіральний трек

3.6 Аналіз виконаної роботи та обробка результатів випробувань

Режими проведення експерименту наведені в таблиці 3.2. де, $W_{\text{мит}}$ - величина споживаної потужності, кВт; Q - величина витрат води, л/хв.

Таблиця 3.2 - Експериментальні дані з напірного водоводу

Внутрішня поверхня водоводу	Показники	Кут нахилу водоводу		
		0°	45°	90°
Порожній трубопровід	Q , л/хв.	123,5	101,6	99,6
	W_1 , кВт	1,888	1,948	2,232
	W_2 , кВт	1,978	1,901	1,879
Трубопровід з гладким треком	Q , л/хв	108,16	142,1	165,3
	W_1 , кВт	1,786	1,917	2,105
	W_2 , кВт	1,713	1,639	1,404
Трубопровід з чарунковим треком	Q , л/хв.	88,5	154,96	209,5
	W_1 , кВт	1,703	1,923	2,095
	W_2 , кВт	1,757	1,491	1,271

Після проведення експериментів з відповідними умовами: без гвинтоподібних треків та з гвинтоподібними треками у напірному водоводі проводиться порівняння теоретичних результатів з експериментальними.

3.6.1 Розрахунки гідравлічних величин у напірному водоводі

Під кутом нахилу 0° без урахування гвинтового треку.

У роботі буде використовуватися труба з ПВХ діаметром $d = 50\text{мм} = 0,05\text{м}$ і довжиною $l = 3,0\text{ м}$. По трубі з витратою $Q = 78,7\text{ м}^3/\text{Г} = 0,002035\text{ м}^3/\text{с}$ рухається вода при температурі $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ (приблизна величина, для розрахунку).

Шорсткість труб з ПВХ - $\Delta = 1,5 \cdot 10^{-6}\text{ м} = 0,0000015\text{ м}$. Коефіцієнт кінематичної в'язкості для води при $t = 20^\circ\text{C}$ - $\nu = 1,004 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с} = 0,00000104\text{ м}^2/\text{с}$. Відносна шорсткість $\Delta_r = \Delta : d = 0,0000015 : 0,05 = 3 \cdot 10^{-5}$.

За Альтшулем граничні числа Рейнольдса виражаються формулами:
нижнє граничне число Рейнольдса

$$(Re_d)''_{\text{перед}} \approx \frac{10}{\Delta_r} = \frac{10}{3 \cdot 10^{-5}} = 333333,3;$$

верхнє граничне число Рейнольдса

$$(Re_d)''_{\text{перед}} \approx \frac{500}{\Delta_r} = \frac{10}{3 \cdot 10^{-5}} = 16666666,7.$$

Середня швидкість руху води в трубі, м/с

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,002035}{3,14 \cdot 0,05^2} = 1,037.$$

Число Рейнольдса

$$Re_d = \frac{vd}{\nu} = \frac{1,037 \cdot 0,05}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 51649,021.$$

Обчислення λ (коефіцієнта гідравлічного тертя) за формулою Альтштуля

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\Delta_r + \frac{68}{Re_d} \right)^{0,25} = 0,11 \left(0,00003 + \frac{68}{51649,021} \right)^{0,25} = 0,02095.$$

Визначимо середню швидкість по формулі Шезі, м/с

$$v = C\sqrt{RJ}, \quad (3.48)$$

де R - гідравлічний радіус, м;

$J = h_l : l$ - п'єзометричний уклон.

По формулі Вейсбаха - Дарсі для втрат напору по довжині через швидкісний напір у турбулентному русі рідини, м

$$h_l = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = 0,02095 \frac{3 \cdot 1,037^2}{0,05 \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,069.$$

Тоді $J = h_l : l = 0,069 : 3 = 0,023$

C – коефіцієнт Шезі

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 9,8}{0,02095}} = 61,164;$$

$$v_{ш} = C\sqrt{RJ} = 61,164\sqrt{0,0025 \cdot 0,023} = 0,4638 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Інші розрахунки для всіх дослідів наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Обробка експериментальних даних

Характеристики	Внутрішня поверхня водоводу	Кут нахилу водоводу		
		0°	45°	90°
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Порожній трубопровід	0,002035	0,001705	0,001375
$v, \text{ м/с}$		1,0371	0,8687	0,7012
Re_d		51649,1	43305,2	28970
λ		0,02095	0,0217	0,0227
C		61,164	59,828	58,496
$v_{ш}, \text{ м/с}$		0,463	0,383	0,305
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Трубопровід з гладким треком	0,001796	0,002351	0,002955
$v, \text{ м/с}$		0,9352	1,2271	1,5092
Re_d		46159,2	60685,3	75211,4
λ		0,0215	0,0202	0,0189
C		60,217	62,325	64,665
$v_{ш}, \text{ м/с}$		0,402	0,534	0,664
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Трубопровід з чарунковим треком	0,001491	0,002591	0,003211
$v, \text{ м/с}$		0,9351	1,2275	1,4199
Re_d		37927,4	64978,1	91791,8
λ		0,0226	0,0188	0,0158
C		58,63	62,09	65,54
$v_{ш}, \text{ м/с}$		0,337	0,585	0,728

Графік порівняння залежності середньої швидкості від шорсткості та наявності треку приведений на рис.3.16.

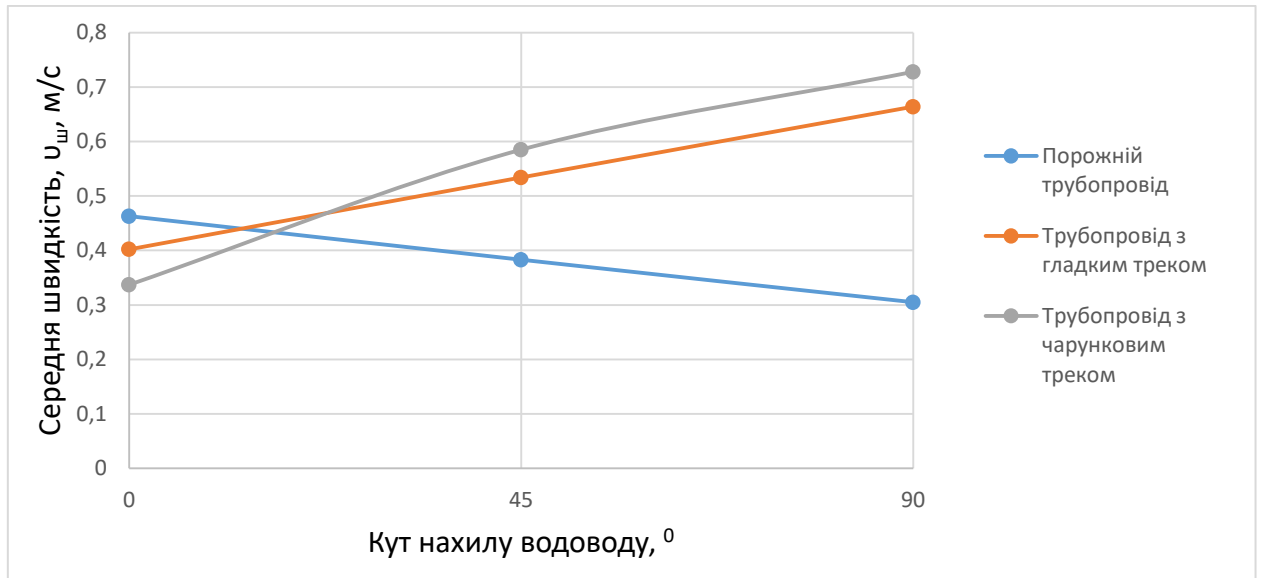


Рисунок 3.16 - Графік залежності середньої швидкості від шорсткості та наявності треку

3.6.2 Визначення різниці споживання електроенергії

Визначення різниці споживання електроенергії між встановленим гвинтовим треком та без треку, при кутах нахилу напірного водоводу від 0° до 90° визначається по формулі (3.49), кВт

$$\Delta W_{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}}; \quad (3.49)$$

де $W_{\text{ел.ліч.1}}$ - величина споживання електроенергії без урахування треку, кВт

$W_{\text{ел.ліч.2}}$ - величина споживання електроенергії з урахуванням треку, кВт.

Для трубопроводу з гладким треком

Розрахунок витрат на початок експерименту

$$\Delta W_{0^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,888 - 1,789 = 0,102 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{45^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,948 - 1,917 = 0,031 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{90^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 2,232 - 2,105 = 0,127 \text{ кВт};$$

Розрахунок витрат на кінець експерименту

$$\Delta W_{0^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,978 - 1,713 = 0,265 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{45^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,901 - 1,639 = 0,262 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{90^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,879 - 1,404 = 0,475 \text{ кВт};$$

Для трубопроводу з чарунковим треком

Розрахунок витрат на початок експерименту

$$\Delta W_{0^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,888 - 1,703 = 0,185 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{45^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,948 - 1,923 = 0,025 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{90^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 2,232 - 2,095 = 0,137 \text{ кВт};$$

Розрахунок витрат на кінець експерименту

$$\Delta W_{0^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,978 - 1,757 = 0,221 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{45^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,901 - 1,491 = 0,411 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{90^\circ} = W_{\text{ел.ліч.1}} - W_{\text{ел.ліч.2}} = 1,879 - 1,271 = 0,608 \text{ кВт};$$

3.6.3 Визначення різниці витрат рідини

Визначення різниці витрат рідини між встановленим гвинтовим треком і без треку, при куті нахилу напірного водоводу від 0° до 90° визначається по формулі (3.50), л/хв

$$\Delta Q_{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ} = Q_2 - Q_1, \quad (3.50)$$

де Q_1 - показник витрати води без наявності треку в трубопроводі, л/хв;

Q_2 - показник витрати води за наявності гвинтоподібного треку, л/хв.

Для трубопровода з гладким треком

$$\Delta Q_{0^\circ} = Q_2 - Q_1 = 108,16 - 123,5 = -15,34 \frac{\text{л}}{\text{хв}};$$

$$\Delta Q_{45^\circ} = Q_2 - Q_1 = 142,9 - 101,6 = 41,3 \frac{\text{л}}{\text{хв}};$$

$$\Delta Q_{90^\circ} = Q_2 - Q_1 = 165,3 - 99,6 = 65,7 \frac{\text{л}}{\text{хв}};$$

Для трубопровода з чарунковим треком

$$\Delta Q_{0^\circ} = Q_2 - Q_1 = 88,5 - 123,5 = -35 \frac{\text{л}}{\text{хв}};$$

$$\Delta Q_{45^\circ} = Q_2 - Q_1 = 145,96 - 101,6 = 53,36 \frac{\text{л}}{\text{хв}};$$

$$\Delta Q_{90^\circ} = Q_2 - Q_1 = 209,5 - 99,6 = 109,9 \frac{\text{л}}{\text{хв}};$$

3.6.4 Розрахунок питомих витрат.

Визначаємо питомі витрати за формулою (3.51), $\frac{\text{Вт}}{\frac{\text{л}}{\text{хв}}}$

$$\Delta W_{\text{пит.}0^{\circ},45^{\circ},90^{\circ}} = \frac{\Delta W}{\Delta Q}. \quad (3.51)$$

Для трубопровода з гладким треком, $\frac{\text{Вт}}{\frac{\text{л}}{\text{хв}}}$

$$\Delta W_{\text{пит.}0^{\circ}} = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \frac{265}{15,34} = 17,2;$$

$$\Delta W_{\text{пит.}45^{\circ}} = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \frac{262}{41,3} = 6,3;$$

$$\Delta W_{\text{пит.}90^{\circ}} = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \frac{475}{65,7} = 7,2;$$

Для трубопровода з чарунковим треком, $\frac{\text{Вт}}{\frac{\text{л}}{\text{хв}}}$

$$\Delta W_{\text{пит.}0^{\circ}} = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \frac{221}{35} = 6,3;$$

$$\Delta W_{\text{пит.}45^{\circ}} = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \frac{411}{53,36} = 7,7;$$

$$\Delta W_{\text{пит.}90^{\circ}} = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \frac{608}{109,9} = 5,5.$$

3.7 Графічна інтерпретація дослідження

Згідно з отриманими даними по п.3.6 будуються гістограми:

- залежність коефіцієнта гідравлічного опору від кута нахилу напірного водоводу від 0° до 90° , із гвинтоподібними треками та без треків;
- залежність величини середньої швидкості руху рідини від кута нахилу напірного водоводу від 0° до 90° , із гвинтоподібними треками та без треків;
- залежність величини витрат рідини від кута нахилу напірного водоводу від 0° до 90° , із гвинтоподібними треками та без треків;
- різниця величини питомих витрат між гладким гвинтоподібним треком в напірному водоводі і чарунковим треком при куті нахилу напірного водоводу від 0° до 90° ;
- різниця витрат рідини між гладким треком в напірному водоводі і чарунковим треком при куті нахилу напірного водоводу від 0° до 90° .

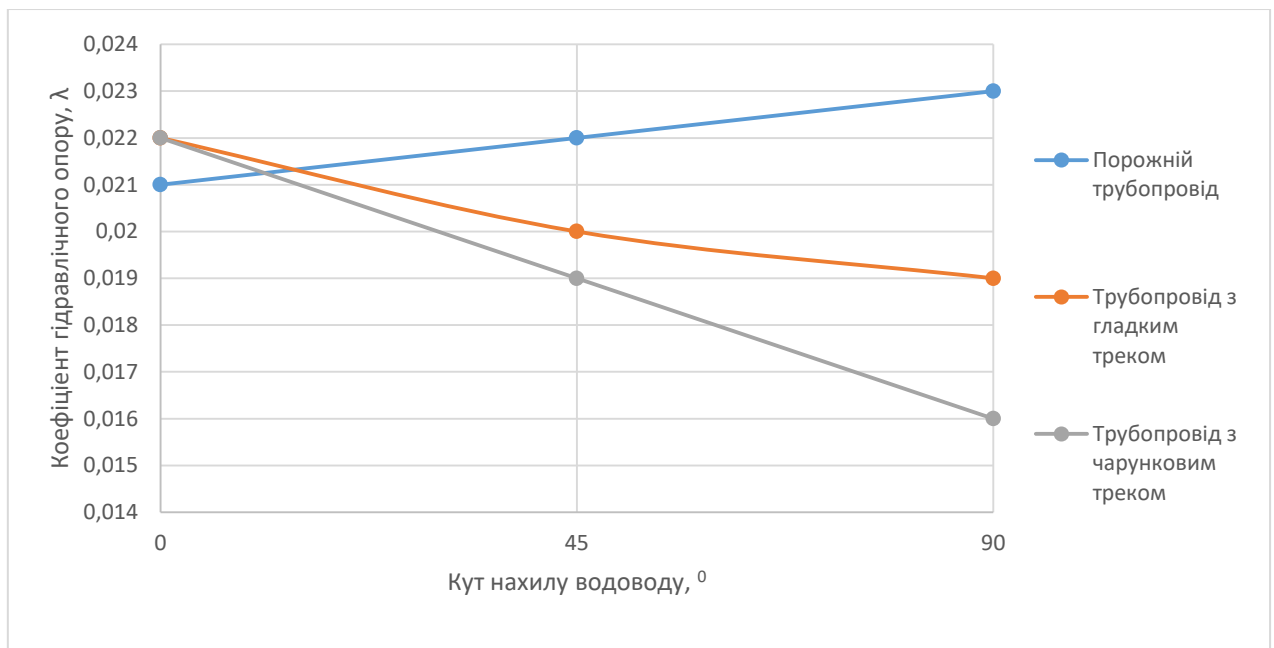


Рисунок 3.17– Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від кута нахилу напірного водоводу від 0° до 90° , із гвинтоподібними треками та без треків

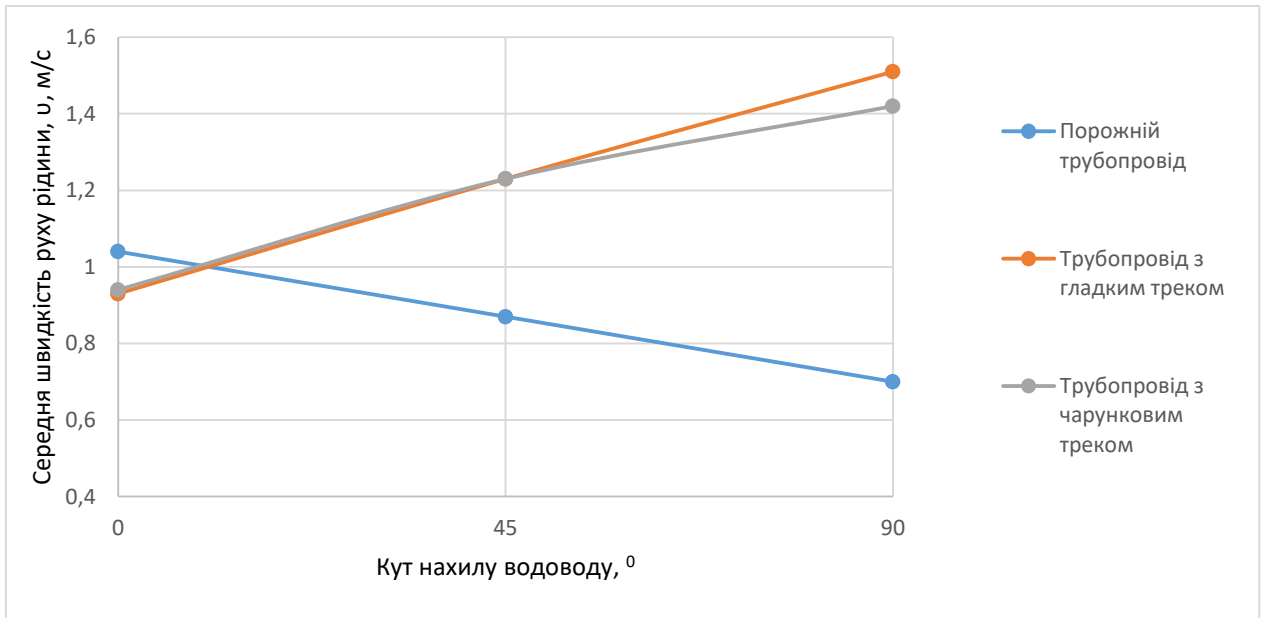


Рисунок 3.18 – Залежність величини середньої швидкості руху рідини від кута нахилу напірного водоводу від 0° до 90° , із гвинтоподібними треками та без треків

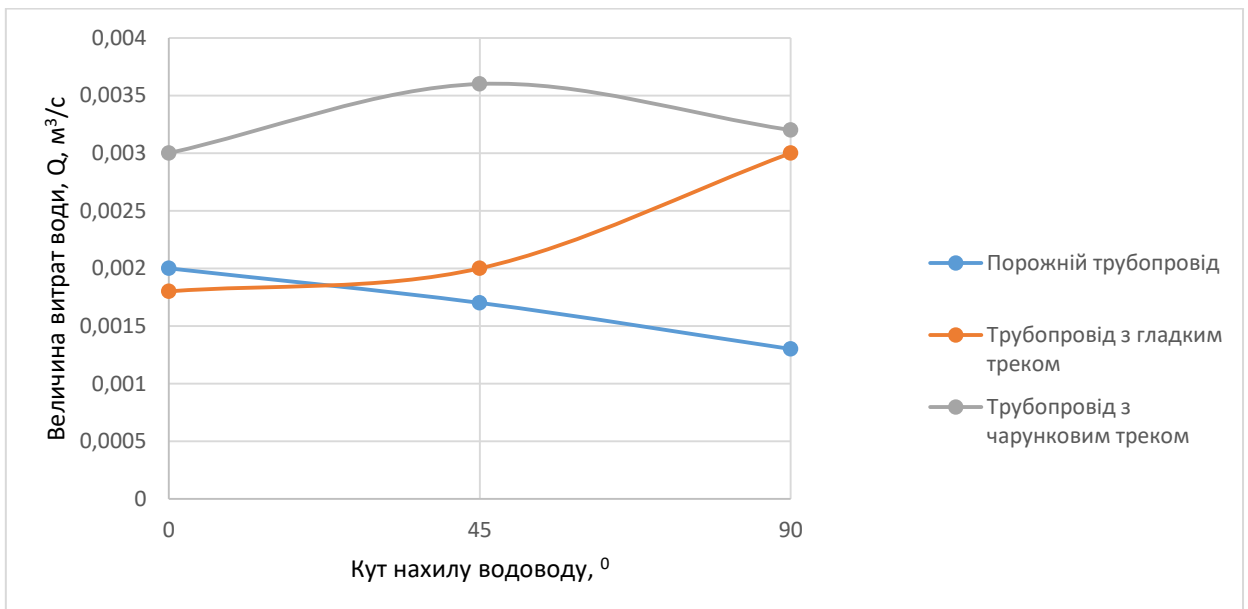


Рисунок 3.19 – Залежність величини витрат рідини від кута нахилу напірного водоводу від 0° до 90° , із гвинтоподібними треками та без треків

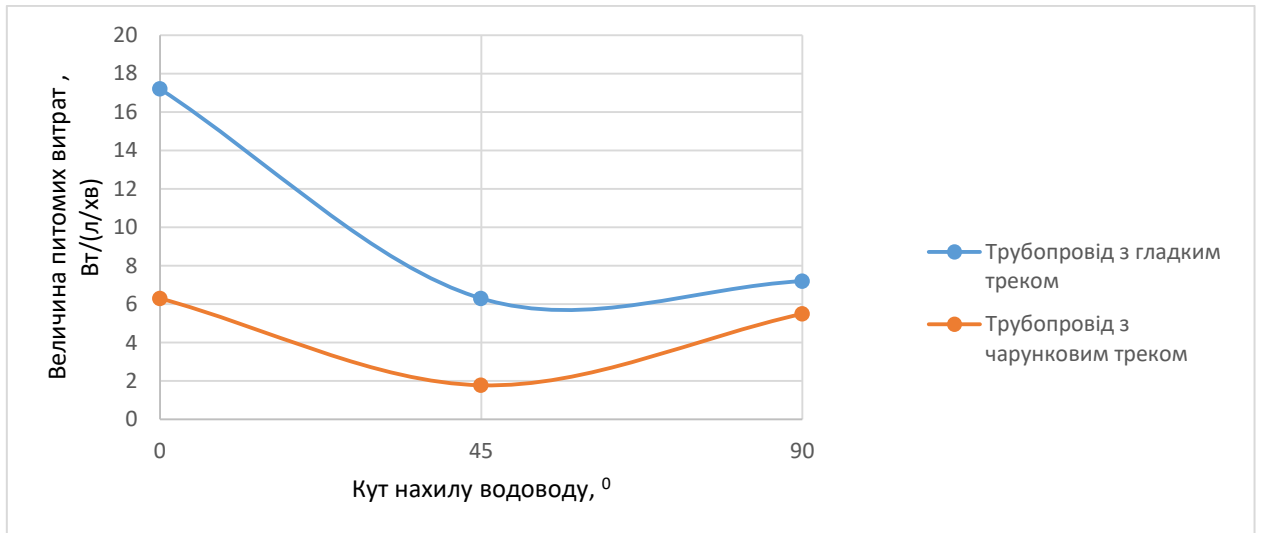


Рисунок 3.20 – Різниця величини питомих витрат між гладким гвинтоподібним треком в напірному водоводі і чарунковим треком при куті нахилу напірного водоводу від 0° до 90°

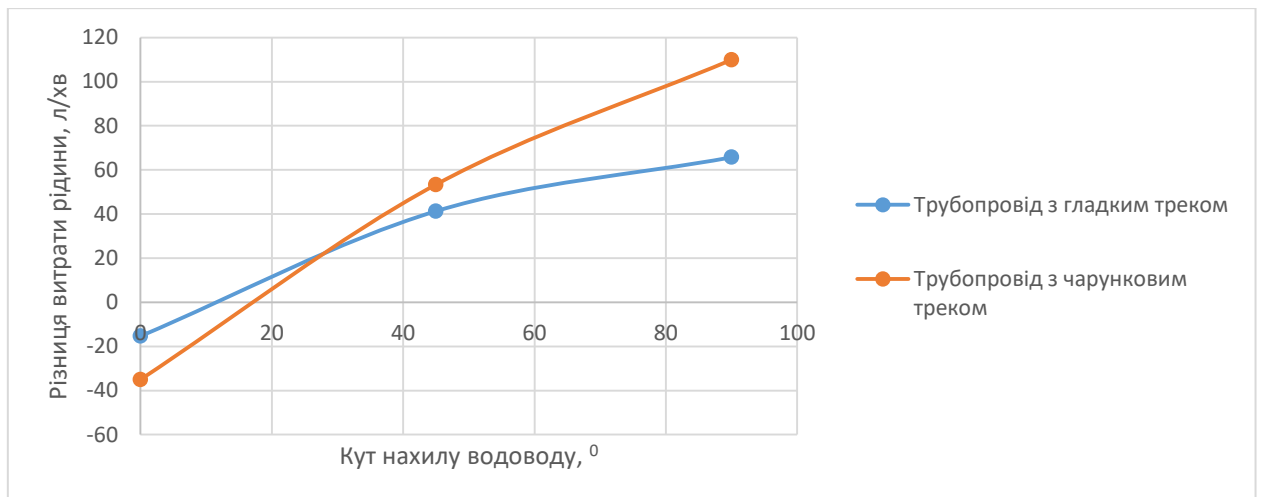


Рисунок 3.21 - Різниця витрат рідини між гладким треком в напірному водоводі і чарунковим треком при куті нахилу напірного водоводу від 0° до 90°

3.8 Ефективність дослідницької моделі і різниця витрат

В результаті проведення дослідження напірного водоводу зменшеної моделі ГАЕС використанням двох видів руху потоку рідини – турбулентного і вихрового, було встановлено, що ефективність порожнього напірного

трубопроводу нижче, ніж ефективність трубопроводу із гвинтоподібним гладким і чарунковим треком. Показники витрати електроенергії при проведенні досліду були значно вище, ніж у трубопроводів з гвинтоподібними треками.

Проведення дослідження з порожнім напірним трубопроводом при куті нахилу 0° показало, що витрата рідини вище порівняно з напірним трубопроводом з гладким і чарунковим треком. Після встановлення порожнього напірного водоводу під кутом нахилу 45° і 90° показники витрати і швидкості рідини знижувались через вплив гідравлічного опору. Після встановлення в напірний трубопровід гвинтоподібних треків двох типів: гладкого і чарункового, і зміні кута нахилу трубопроводу від 0° до 90° показники витрати рідини зросли, а показники витрати електроенергії при перекачуванні рідини знизилися.

Таким чином, після проведення експерименту було порівняно отримані експериментальні дані з напірного водоводу без гвинтоподібних треків і за їх наявності. В результаті порівняння встановлено, що експлуатація напірного трубопроводу за наявності гвинтоподібного чарункового треку більш доцільна, порівняно із порожнім трубопроводом і трубопроводом з гвинтоподібним гладким треком. Отриманий результат обумовлено зростанням витрати рідини і зниженням витрати електроенергії для електронасосу в дослідницькій моделі ГАЕС.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ДОСЛІДНИЦЬКОЇ МОДЕЛІ

4.1 Вплив небезпечних та шкідливих виробничих факторів

В процесі проведення дослідних робіт на лабораторній установці водоводу можливий вплив небезпечних і шкідливих виробничих факторів: фізичних: небезпека прориву напірного водоводу; підвищений рівень шуму на робочому місці; ураження електричним струмом; недостатня освітленість робочої зони та психофізіологічних: нервово-психічні перевантаження (монотонність праці).

Джерелом розриву напірного водоводу є несталий рух рідини у водоводі, що характеризується виникненням гідравлічного удару. Гідравлічний удар здатний викликати утворення поздовжніх тріщин в трубах, що може призвести до їх розколу, або пошкоджувати інші елементи трубопроводу. Також гідроудар може пошкодити насос, що працює під тиском.

Джерело шуму в лабораторії є насос MULTINOXVE 200/80. Шум справляє на людину негативну фізіологічну дію, що полягає не тільки в пошкодженні слухового апарату, а й негативному впливу на нервову систему, викликаючи уповільнення психологічної реакції. Під впливом виробничого шуму виникають різні професійні захворювання: порушується серцевої діяльності, змінюється кров'яний тиск, погіршується діяльність органів дихання. Спостерігаються також ослаблення пам'яті, уваги, гостроти зору. Таким чином, шум може стати причиною травматизму. Під впливом шуму значно знижується продуктивність праці, причому знижується тим більше, чим складніший процес і чим більше в ньому елементів розумової праці.

Характеристикою шуму є октавні рівні звукової потужності L_p , дБ. Для даної установки спектр звукової потужності, що випромінюється насосом MULTINOXVE 200/80 представлений у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Спектр звукової потужності, що випромінюється насосом MULTINOXVE 200/80

Середньо - геометрична частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукової потужності, дБ	60	62	64	70	72	71	65	67

Нормативний рівень звукового тиску і рівень звуку на постійних робочих місцях представлені у табл.4.2.

Таблиця 4.2 - Нормативний рівень звукового тиску і рівень звуку на постійних робочих місцях

Середньо - геометрична частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукової потужності, дБ	83	74	58	63	60	57	55	54

Джерело ураження електричним струмом є розподільчий щит, через який відбувається живлення від мережі. Електричний струм, що проходить через живий організм, викликає термічну, електролітичну та біологічну дію.

Недостатнє освітлення робочого місця ускладнює тривалу роботу, викликає підвищене стомлення і сприяє розвитку. Занадто низькі рівні освітленості викликають апатію, сонливість, а в деяких випадках сприяють розвитку почуття тривоги. Тривале перебування в умовах недостатнього освітлення супроводжується зниженням інтенсивності обміну речовин в

організмі і ослабленню його реактивності. До таких же наслідків призводить тривале перебування в світловому середовищі з обмеженим спектральним складом світла і монотонним режимом освітлення.

Зайве яскраве світло сліпить, знижує зорові функції, призводить до перезбудження нервової системи, зменшує працездатність, порушує механізм сутінкового зору. Вплив надмірної яскравості може викликати фотоопіки очей і шкіри, кератити, катаракти та інші порушення.

Психофізіологічний чинник є джерелом всіляких роздратувань, що переробляються головним мозком, спонукаючи людину до трудової діяльності. Психофізіологічні чинники виникають в наслідок: нервово-психічних перевантажень, розумових перевантажень, емоційних перевантажень, перенапруги аналізаторів, перевантаження м'язів корпусу і ніг. Надмірні фізичні та нервово-психічні перевантаження зумовлюють зміни у фізіологічному та психічному станах працівника, призводять до розвитку втоми та перевтоми. Проявами перевтоми є головний біль, підвищена стомлюваність, дратівливість, нервозність, порушення сну, а також такі захворювання, як вегето-судинна дистонія, артеріальна гіпертонія, виразкова хвороба, ішемічна хвороба серця, інші професійні захворювання.

4.2 Організація захисту системи від експлуатаційних пошкоджень

Для забезпечення надійної роботи напірних водоводів потрібен розрахунок параметрів і організація відповідного захисту системи від різких підвищень тиску (гідравлічних ударів). Параметри потоку при зазначених явищах залежать від вибраного типу труби для напірних магістралей.

Однією з найважливіших характерне, що впливає на зміну величини тиску при гідравлічних ударах і залежить від характеристик водоводу є швидкість поширення фронту ударної хвилі C , м/с, величину якої приблизно можна визначити за формулою Кортвега-Жуковського [46]:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho_{ж}}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} \cdot D}{E_T \cdot \delta}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} \cdot D}{E_T \cdot \delta}}} \quad (4.1)$$

де $E_{ж}$ - модуль об'ємної пружності рідини, Па; для води при атмосферному тиску і температури рідини близько 20°C $E_{ж} = 206 \cdot 10^6$ Па;

E_T - модуль пружної деформації матеріалу труб, Па; для сталі $E_T = 206 \cdot 10^9$, Па; для чавуну $E_T = 98 \cdot 10^9$, Па; для полівінілхлориду (ПВХ) $E_T = 4 \cdot 10^9$, Па; для поліетилену ПВП $E_T = 0,9 \cdot 10^9$, Па; для поліетилену ПНП $E_T = 0,3 \cdot 10^9$, Па;

δ - товщина стінки водоводу, м.

Розрахуємо швидкість поширення ударної хвилі [46], м/с:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho_{ж}}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} \cdot D}{E_T \cdot \delta}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} \cdot D}{E_T \cdot \delta}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{206 \cdot 10^9 \cdot 0,05}{0,9 \cdot 0,9^9 \cdot 0,005}}} = 249,06. \quad (4.2)$$

З формули (4.1) видно, що найбільший вплив на величину швидкості поширення фронту ударної хвилі надає модуль пружної деформації матеріалу, з якого виготовлені труби. Так, проводячи розрахунки за формулою (4.1), одержуємо, що в залежності від співвідношення D/δ швидкість C в сталевих трубах змінюється від 1380 м/с до 1180 м/с, чавунних - 1310...990) м/с, в полівінілхлоридних - 655...300 м/с, поліетиленових ПВП - (300...150) м/с, в поліетиленових ПНП - 250...125 м/с.

Таким чином, обраний матеріал труб для будівництва або реконструкції напірних водоводів робить значний вплив на одну з важливих характеристик гідравлічного удару, і при заміні сталевих труб полівінілхлоридними або

поліетиленовими швидкість поширення фронту ударної хвилі може знизитися в 3...7 разів.

Пропонується для захисту від шуму використання звукоізолюючого кожуха на насос. Звукоізолюючий кожух є найбільш простим і дешевим способом зниження шуму у виробничому приміщенні. Кожух буде виконаний із сталі і всередині облицьований звукопоглинальним матеріалом товщиною 30-50 мм

Для захисту від ураження електричним струмом рекомендується використання захисного заземлення каркасу розподільчого щита. У разі виникнення пробоя ізоляції між фазою і корпусом електроустановки, корпус її теж може виявитися під напругою. Якщо до корпусу в цей час доторкнулась людина – струм, що проходить через людину, не представляє небезпеки, тому що його основна частина потече до захисного заземлення, яке має дуже низький опір.

Для забезпечення найкращих умов оптимальна освітленість повинна встановлюватися з урахуванням світлових властивостей (коефіцієнта відбиття) робочої поверхні, розмірів оброблюваної деталі, частоти і процесу зокрема, точності зорової роботи. Освітлення лабораторних кабінетів у вузах повинно відповідати технічним та санітарно-гігієнічним нормам. Норма для працездатності в лабораторному кабінеті при освітленості в 400лк, так само необхідно правильно підібрати світильник в поєднанні з природним світлом. Підтримувати чистоту шибок і поверхонь світильників [47].

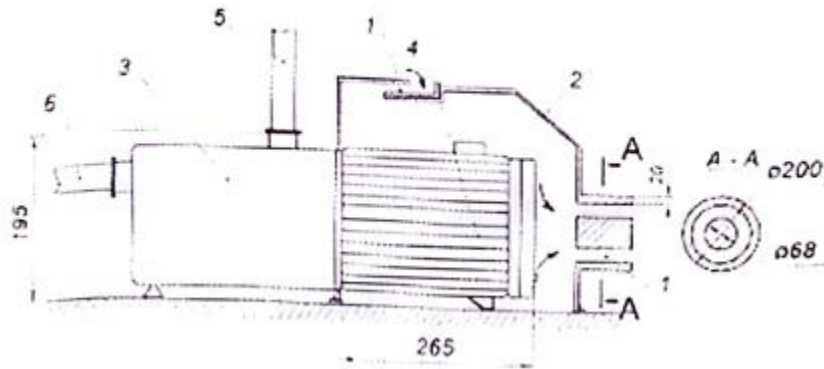
4.3 Проектування звукоізолюючого кожуха для електронасосу

Звукоізолюючий кожух на насос представлений на рисунку 4.1.

Габарити насосу:

- довжина 0,265 м;
- ширина 0,26 м;
- висота 0,195 м.

Завдання: запроекувати звукоізолюючий кожух на насос.



1 - глушники в отворах для циркуляції повітря; 2 - глушники в отворі для приводу; 3 - звуковбирне облицювання; 4 - насос; 5 – водовід

Рисунок 4.1 - Звукоізолюючий кожух на насос

Розрахункова точка (робоче місце оператора) знаходиться на відстані 1 м від поверхні насоса.

Визначення необхідної ефективності кожуха.

Визначимо, дБ

$$\Delta L_{\text{еф.тр.}} = L_p - 10 \log S_k - L_{\text{доп}} + 5, \quad (4.3)$$

де L_p - октавний рівень звукової потужності джерела шуму, дБ;

S_k - площа уявної поверхні, що оточує насос і проходить через розрахункову точку, м^2

$L_{\text{доп}}$ - допустимий по нормам рівень звукового тиску у розрахунковій точці (на робочому місці), визначається по [48], дБ.

$$S_{\text{дж}} = (0,195 \cdot 0,265) \cdot 2 + (0,26 \cdot 0,195) \cdot 2 + (0,26 \cdot 0,265) = 0,27 \text{ м}^2.$$

Припустимо, що уявна поверхня кожуха насоса $S_k = 0,72 \text{ м}^2$.

Розрахунок необхідної звукоізолюючої здатності стінок кожуху;

$$\Delta L_{\text{эф.тр.1}} = 62 - 10 \log 0,72 - 83 + 5 = -13,57 \text{ дБ}$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр.2}} = 63 - 10 \log 0,72 - 74 + 5 = -13,57 \text{ дБ}$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр.3}} = 66 - 10 \log 0,72 - 58 + 5 = -4,57 \text{ дБ}$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр.4}} = 73 - 10 \log 0,72 - 53 + 5 = 14,43 \text{ дБ}$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр.5}} = 75 - 10 \log 0,72 - 60 + 5 = 21,43 \text{ дБ}$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр.6}} = 74 - 10 \log 0,72 - 57 + 5 = 23,43 \text{ дБ}$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр.7}} = 68 - 10 \log 0,72 - 55 + 5 = 19,43 \text{ дБ}$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр.8}} = 80 - 10 \log 0,72 - 54 + 5 = 22,43 \text{ дБ}$$

Розрахунок необхідної звукоізолюючої здатності стінок кожуху.

З конструктивних міркувань обирається кожух з плоскими гранями. Далі визначається необхідна звукоізолююча здатність стінок кожуха по формулі (4.3)

$$R_{\text{к.тр}} = \Delta L_{\text{эф.тр.}} + 10 \log \frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{дж}}} \quad (4.3)$$

$$R_{\text{к.тр1}} = -13,57 + 10 \log 2,66 = -9,32$$

$$R_{\text{к.тр2}} = -4,57 + 10 \log 2,66 = 18,68$$

$$R_{к.тр3} = 14,43 + 10 \log 2,66 = 30,68$$

$$R_{к.тр4} = 26,43 + 10 \log 2,66 = 30,68$$

$$R_{к.тр5} = 21,43 + 10 \log 2,66 = 25,68$$

$$R_{к.тр6} = 23,43 + 10 \log 2,66 = 27,68$$

$$R_{к.тр7} = 19,43 + 10 \log 2,66 = 23,68$$

$$R_{к.тр8} = 22,43 + 10 \log 2,66 = 26,67$$

Для кожуха з металу з ребрами жорсткості не рідше 0,1 м x 0,1 м вибір конструкції стінок виконується.

Як впливає з зіставлення $R_{к.тр8}$ даними таблиці 4.2 стінки кожуха зі сталі повинні мати товщину не менше 0,7 мм.

Глушник шуму, через який здійснюється доступ повітря під кожух, вбудовані прорізи кожуха, повинні мати ефективність не нижче $R_{к.тр}$. Глушники підбираються по [48].

В отворах 1 та 2 для циркуляції повітря застосовують щільні глушники довжиною по 0,25 м при ширині щілини 40 мм. У місці переходу валу підбирається кільцевий глушник з одностороннім облицюванням довжиною 0,25 при ширині щілини 20 мм.

Акустична ефективність при всіх глушниках однакова. Відповідно акустична характеристик приведена у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Розрахункові дані звукоізолюючого кожуха на насос

Величина	Одиниця виміру	Середньо-геометрична частота, Гц							
		62	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_p	дБ	62	63	66	73	75	74	68	70
$L_{доп}$		83	74	58	53	60	57	55	54
$\Delta L_{эф.тр}$		13,57	4,57	14,43	26,43	21,43	23,43	19,43	22,43
$R_{к.тр}$		-	-	18,68	30,68	25,68	27,68	23,68	26,67
$\Delta t_{ГЛ}$		15	13	13	14	17	19	29	17

В ході проведених розрахунків визначеного звукоізолюючий кожух насос може знизити рівень шуму в лабораторії на 26,68 дБ.

4.4 Заходи з електробезпеки

Згідно з ПБЕ лабораторія відноситься до сухих приміщень, тому що, відносна вологість повітря дорівнює 55 %. За ступенем небезпеки відноситься до 1-го класу - приміщення з підвищеною небезпекою враження електричним струмом, тому що в ньому присутня ознака - можливість одночасного дотику я металевому корпусу електроустановки та заземлення металоконструкції.

До захисту від дотику до не струмоведучих частин обладнання, які випадково опинились під напругою, рекомендується використати захисне заземлення [49]. Заземлювачі встановлюють природні та штучні.

До природних заземлювачів відноситься металеві конструкції будівель, з'єднані з землею.

В якості штучних заземлювачів використовуються сталеві труби, стрижні або куточок, довжиною не менше 2,5 м, забитих в землю і з'єднаних один з 4 сталевими смугами або приварені дротом. В якості заземлюючих провідників, що з'єднують заземлювач з заземлюючими приладами зазвичай

використовуються сталеві або мідні шини, які приварюють до корпусу машини або з'єднують з ними болтами. Захисному заземленню підлягають металеві корпуси електричних машин, трансформаторів, щити і шафи.

Захисне заземлення значно знижує напругу, під яку може потрапити людина. Це пояснюється тим, що провідники заземлення, сам заземлювач і земля мають деякий опір. При пошкодженні ізоляції струм замикання протікає по корпусу електроустановки, заземлювача і далі по землі до нейтралі трансформатора, викликаючи на їх опір падіння напруги, яка хоча і менше 220В, але може бути відчутною для людини. Для зменшення цієї напруги необхідно вжити заходи до зниження опору заземлювача щодо землі, наприклад, збільшити кількість штучних заземлювачів.

Для захисту людини від ураження електричним струмом застосовують захисні засоби: гумові рукавички, гумове взуття, гумові килимки, інструменти з ізольованими ручками, попереджувальні плакати. Для попередження нещасних випадків від ураження електричним струмом необхідно контролювати стан ізоляції проводів електроустановок.

Стан ізоляції проводів перевіряють в нових установках, після реконструкції, модернізації, тривалої перерви в роботі. Профілактичний контроль ізоляції проводів проводять не рідше 1 разу на 3 роки. Опір ізоляції проводів вимірюють мегомметром на номінальну напругу 1000В на ділянках не знятих плавких вставках і при вимкнених струмоприймачах між кожним ізольованим проводом і нульовим робочим проводом і між кожними двома проводами. Опір ізоляції має бути не менше 0,5 МОм.

4.5 Заходи з пожежної безпеки

Однією з головних причин виникнення пожежі є коротке замикання. Чинники виникнення короткого замикання: стара або пошкоджена електропроводка, монтаж, виконаний з порушеннями, ізоляція з дефектами,

електроприлади, що не відповідають умовам електробезпеки (старі або зіпсовані), ослаблення місць з'єднання проводів, випадкові обриви лінії.

Перед тим як приступати до роботи з електроустановкою необхідно пройти протипожежний інструктаж: вступний і первинний.

При проведенні вступного інструктажу, яку інструктують мусить бути ознайомлена з наступними темами:

- загальні заходи пожежної безпеки;
- можливі причини виникнення пожеж та заходи щодо їх запобігання;
- практичні дії у разі виникнення пожежі.

Вступний інструктаж допускається проводити одночасно з інструктажем з охорони праці (техніки безпеки). Про проведення вступного протипожежного інструктажу і повірці знань проводиться запис в журналі реєстрації вступного інструктажу з обов'язковими підписами осіб які інструктували і яку інструктували.

Первинний інструктаж проводиться безпосередньо на робочому місці. При цьому ті, що інструктуються повинні бути ознайомлені:

- з планом евакуації та порядком дій у разі виникнення пожежі;
- із зразками всіх наявних в лабораторії первинних засобів пожежогасіння.

У кожному освітньому закладі розробляється і вивішується на видному місці план евакуації людей при пожежі. У плані евакуації повинні бути відображені:

- способи швидкого оповіщення всіх педагогів та учнів про пожежу;
- шляхи виходу людей з палаючих ділянок або тих, що перебувають під загрозою вогню і диму приміщень;
- запасні та основні виходи.

Загальні вимоги до пожежної безпеки в лабораторії:

- не використовувати старі дроти з невідповідною ізоляцією; не свердлити, не різати стіни в тих місцях, де прокладений силовий кабель;
- знімати ізоляцію при монтажі вкрай обережно та акуратно, не різати дріт ножем уздовж жил;

- стежити за тим, щоб мережа була відключена при роботах з нею, на щитку потрібну вивішувати табличку «Йдуть роботи, електрику не вмикати» або залишити чергувати людину;
- встановлювати захисні пристрої відключення - автоматичні вимикачі, пристрої захисного відключення, дифавтомати;
- регулярно стежити за станом електричних точок - розеток і вимикачів, при необхідності відразу ж їх замінювати;
- не експлуатувати пошкоджені електроприлади, від яких летять іскри, за винятком деяких інструментів, наприклад, в яких є вугільні щітки - вони при роботі трохи іскрять (таке буває в дрилі, електролобзику та інших інструментах);
- при монтажі проводки не вести дроти одним великим пучком, краще пустити їх паралельно поруч або використовувати спеціальні коробки;
- основними засобами заходу від пожежі у лабораторії є: пожежний водовід, вогнегасник (наприклад: вогнегасник порошковий ВП-2), евакуація та пожежний сигнал (евакуація) [50].

4.6 Надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру

У загальному випадку небезпечні фактори, здатні ініціювати аварії ГЕС поділяються на два типи: природні, техногенні. Серед природних небезпек найбільш руйнівними є: повені, підтоплення, ерозія, землетруси, зсуви, селі, карст, смерчі, сильні заморозки, різні мерзлотні явища.

Техногенні аварії бувають різних видів: пошкодження верстата. Устаткування, транспортного засобу, системи енергопостачання, будівлі, яке може супроводжуватися вибухами, пожежами, викидом радіоактивних речовин, що не спричинило за собою значного матеріального збитку і серйозних жертв (вибухи можуть бути викликані неправильною експлуатацією побутових і газових плит або балонів з газом, що знаходиться під тиском) [51].

ВИСНОВКИ

Гідроенергетика – галузь відновлювальної енергетики, а також сукупність великих природних та штучних підсистем, які слугують для перетворення кінетичної енергії води в електроенергію. Реалізація нашого дослідження являється достатньо актуальним для даної галузі та може знайти застосування на гідроелектростанціях, а саме на гідроакумульованих електростанціях. В результаті проведення дослідження присвяченого зниженню гідравлічного опору рідини в напірному трубопроводі та спираючись на теоретичний матеріал і досвід вчених, які були розглянуті під час виконання науково-дослідницької роботи були зроблені відповідні висновки по даній роботі.

З'ясувавши, що форма обтічного елемента в різних режимах руху впливає однаковим чином, тобто утворює завихрення потоку рідини і користуючись патентами австрійського вченого В. Шаубергера, можна стверджувати, що внутрішня конфігурація труби дозволяє знизити величину гідравлічного опору і підвищити продуктивність напірних трубопроводів при транспортуванні потоку рідини. Дана перевага досягається за рахунок вмонтованого в середину напірного трубопроводу гвинтоподібного гладкого та чарункового треків. Завихрення потоку відбувається вздовж центральної вісі напірного водоводу, що значно впливає на збільшення витрат рідини, що перекачується при зменшенні витрат електроенергії на насосному обладнанні. В той самий час відбувається збільшення швидкості потоку рідини, що свідчить про зниження гідравлічного опору рідини.

Для досягнення поставленої мети за основу були взяті існуючі види транспортування рідини в водоводах, а саме турбулентний і вихровий рух. Було відзначено, що обидва ці рухи супроводжуються утворенням вихорів, тим самим закручуючи потік рідини, що подається. Їх різниця полягає в тому, що турбулентний рух характеризується хаотичним завихренням середовища, а вихровий рух попутно вздовж направляючого потоку, тобто його траєкторія

руху визначається спіральним струменем, який обертається навколо своєї вісі. Завихрення рідини в напірному трубопроводі забезпечує пристрій для зниження гідравлічного опору рідини, який містить гвинтоподібну спіраль зі сталевого дроту, який за своєю конфігурацією може бути гладким або чарунковим.

На транспортування потоку рідини також впливає умова нерівноважності (перепад тисків, температур, різниця в щільності, теплоємності, теплопровідності), тобто різниця потенціалів (води і повітря), яка проявляється через виштовхуючу силу. Наслідком взаємодії води і повітря при його подачі під стовп води є виштовхуюча сила, яка, створюючи висхідний потік водоповітряної суміші, здійснює роботу тим самим підвищуючи ефективність системи. Виштовхуюча сила залежить від різниці витрат енергії на утворення води і повітря, кількість якої відображено в фізичних властивостях (щільність, теплоємність, теплопровідність).

В ході проведення дослідження було змонтовано зменшену модель напірного трубопроводу ГАЕС, який в свою чергу оснащувався гвинтоподібними треками різної шорсткості і має здатність працювати при різних кутах нахилу водоводу від 0° до 90° . В результаті проведених робіт, отримали показники витрати рідини при порожньому трубопроводі і за наявності гвинтоподібних треків, на початку і на кінці дослід, провели розрахунок різниці витрати рідини. Дані розрахунки свідчать, що з вмонтованими гвинтоподібними треками пропускна здатність водоводу збільшилась, за наявності гладкого треку у 1,5 рази, за наявності комірчастого треку у 2,5 рази. При цьому зросла швидкість потоку рідини, що підтверджує зменшення гідравлічного опору з урахуванням треку. Аналізуючи проведений дослід, отримали різницю споживаної потужності електронасосу між порожнім трубопроводом і трубопроводом з треками різної шорсткості при зміні кута нахилу водоводу від 0° до 90° , за наявності треків і при куті нахилу водоводу 45° і 90° спостерігається зниження енерговитрат електронасосу. Після отримання експериментальних даних

витрати рідини і витрати потужностей електронасосу, розраховали значення питомих витрат. Показники питомих витрат мають тенденцію зменшення вже при куті нахилу 45° з використанням чарункового треку, та при куті нахилу 90° , це свідчить про високу продуктивність і економічну ефективність використання вихрового руху та чарункової поверхні гвинтоподібного треку.

Таким чином, результати проведення дослідження свідчать про підвищення продуктивності системи після встановлення пристрою для зниження гідравлічного опору рідини в напірних трубопроводах, та можуть знайти своє застосування в експлуатації напірних водоводів гідроакумулювальних електростанцій і інших трубопровідних мережах. Визначили небезпечні пошкодження окремих елементів агрегату внаслідок експлуатації і шкідливі фактори, які можуть виникати в процесі роботи на території ГЕС та в лабораторії, де знаходиться досліджувана модель. Розглянули правила та норми електробезпеки та пожежної безпеки при роботі з агрегатом, спроектували ефективний спосіб зниження шуму електронасосу в приміщенні, а саме монтаж на двигун насосу звукоізолюючого кожуху, що знизить рівень шуму в декілька разів і підвищить рівень акустичної ефективності.

ПЕРЕЛІ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Абрамов Е. И. Элементы гидропривода: Справочник. Киев: Техника, 1977. 320 с.
2. Авакян А. Б., Шарапов В. А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. Москва: Энергия, 1977. 225 с.
3. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости): уч.пособие для вузов. Москва: Стройиздат, 1975. 323 с.
4. Альтшуль А.Д., Калицун В.И. Гидравлические сопротивления трубопроводов. М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1964. 285 с.
5. Аршеневский Н. Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих электростанций. Москва: Энергия, 1977. 168 с.
6. Бабурин Б.Л. Гидроаккумулирующие электростанции. Москва: Энергия, 1978. 168 с.
7. Богданович Л.Б. Гидравлические механизмы поступательного движения: Схемы и конструкции. Киев: МАШГИЗ, 1958. 181 с.
8. Василевский А. Г., Штерн Б. П. Опыт повышения эффективности эксплуатации гидроэлектростанций. Москва: Энергия, 1978. 179 с.
9. Васильев Б.А., Герцев Н.А. Гидравлические машины. Москва: Агропромиздат, 1988. 272 с.
10. Горшков А. М. Насосы. Москва: Госэнергоиздат., 1947. 188 с.
11. Иванов А. Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Ленинград: Судостроение, 1980. 237с.
12. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва: Машиностроение, 1975. 120 с.
13. Кривченко Г.И. Гидравлические машины. Турбины и насосы. Москва: Энегроатомиздат, 1983. 245 с.
14. Кудря С. О., Яценко Л. В. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України: Ін-т електродинаміки. Київ: НАН України, 2001. 41с.

15. Ландау Ю.А. Гидроэнергетика и окружающая среда. Киев: Либра, 2004. 210 с.
16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва: Наука, 1973. 848 с.
17. Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том I / Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ: 2018. 181с.
18. Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том II / Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ: 2018. 181с.
19. Малі річки України: довідник / за ред. А. В. Яцика. Київ: Урожай, 1991. 193 с.
20. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Москва: Машиностроение, 1969. 182 с.
21. Мороз А. В. Етапи становлення та сучасний стан малої гідроенергетики України. Відновлювана енергетика. Київ: 2013. С. 59-63.
22. Ободовський О. Г., Рахматулліна Е. Р., Тимуляк Л. М. Коротка історія розвитку та сучасний стан малої гідроенергетики на рівнинних річках України. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2016. Т. 4 (43). С. 94-106.
23. Обрезков В. И. Гидроэнергетика. Москва: Энергоиздат, 1981. 206 с.
24. Пирсол И.А. Кавитация. Москва: Мир, 1975. 95 с.
25. Полушкин К. П. Монтаж гидроагрегатов. Ленинград: Энергия, 1977. 98 с.
26. Поташник С. И. О стратегических направлениях развития гидроэнергетики Украины на период до 2030 г. Киев.: Энергетика и электрификация. 2005. 80 с.
27. Пояснювальна записка до проекту Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку малої гідроенергетики стимулювання України».
URL: <http://w1.cl.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=27675&pf35401=92020>(дата звернення: 28.11.2022).

28. Руднев С.С., Подвидз Л. Г. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач. Москва: Машиностроение, 1974. 416 с.
29. Світлий Ю. Г., Білецький В. С. Гідравлічний транспорт (монографія). Донецьк: Східний видавничий дім. Донецьке відділення НТШ. Редакція гірничої енциклопедії, 2009. 436 с.
30. Серебряков Р.А., Бирюк В.В., Практическое применение вихревого эффекта. *Конверсия*, 1994. № 10. С.19-20.
31. Синюгин В.Ю. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. Москва: ЭНАС, 2008. 155 с.
32. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов. Москва: Высшая школа, 1985. 382 с.
33. Стан і перспективи розвитку малої гідроенергетики, сонячної, вітрової та інших джерел поновлюваної енергії зарубіжних країн та України. URL:<https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/4.-Stan-i-perspektyvu-rozvytku-PDE.pdf> (дата звернення 27.11.2022).
34. Тимощук Я. І. Корегування гідравлічного опору рідини в трубопроводах ГЕС та ГАЕС. II Всеукраїнська науково-практична конференція за участю молодих науковців, Запоріжжя: ЗНУ, 2022. С. 84–85. URL: https://www.znu.edu.ua/ii_znu/nauka/conf2/znrbyk_22.pdf (дата звернення 01.12.2022).
35. Турбулентна течія; Турбулентність // Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Львів: Освіта, 2010. 197 с.
36. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Ленинград: Энергия, 1970. 552 с.
37. Tan-Atichat J., Nagib H. M., Loehrke R. I. Interaction of free-stream turbulence with screens and grids: a balance between turbulence scales. *J. Fluid Mech.*, 1982. 114p.
38. Wu Wenhao. Progress with China's major program of hydro development. *The International Journal on Hydropower and Dams*, 2004. 20 p.

39. World Hydropower Potential and Development. *The International Journal on Hydropower and Dams*, 2008. 36 p.