

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра приладобудування**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма Комп'ютерно-інтегровані технології та системи точної механіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Лущик Дмитро Вікторович**

1. Тема проєкту «Вимірювальний перетворювач витрати рідино-фазних середовищ вихорового класу», керівник проєкту Драчук Олеся Олександрівна, асистент, затверджені наказом по університету від «25»травня 2020 р. №1180-с
2. Термін подання студентом проєкту 14 червня 2020р.
3. Вихідні дані до проєкту: вимірюване середовище – етиловий спирт; номінальний діаметр  $D_n=100$  мм; діапазон вимірюваних витрат, м<sup>3</sup>/год:  $Q_{min}-4$ ;  $Q_{max}-160$ ; перепад тиску при  $Q_n$  – не більше 50 кПа; максимальний робочий тиск вимірюваного середовища – 4 МПа; температура вимірюваного середовища, °С: +20; температура навколишнього середовища, °С: +5 .. +55; допустима відносна похибка, % – 1,5.
4. Зміст пояснювальної записки: огляд і аналіз існуючих витратомірів; розробка схеми вимірювання; розробка математичної моделі витратоміра; розрахунки конструктивних елементів приладу; розрахунки метрологічних характеристик витратоміра; розробка конструкції приладу.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо). Витратомір. Складальний кресленик, 1 арк. ф. А1.

Витратомір. 3-D модель, 1 арк. ф. А2. Витратомір. Принципова схема, 1 арк. ф. А2. Робочі креслення деталей, 1 арк. ф. А1. Графічні матеріали, 1 арк. ф. А1.

#### 6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічний	Антонюк Віктор Степанович, д.т.н., професор		

#### 7. Дата видачі завдання 08.04.2020

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Ознайомлення з завданням ДП	08.04.2020	
	Проведення огляду літературних джерел	13-20.04.2020	
	Проведення огляду та аналізу аналогів	21.04-27.04.2020	
	Розробка структурної та принципової схеми.	28.04-5.05.2020	
	Розробка конструкції приладу	06.05-20.05.2020	
	Підготовка пояснювальної записки	21.05-28.05.2020	
	Виконання технологічного розділу ДП	29.05-03.06.2020	
	Підготовка графічних матеріалів	04.06-08.06.2020	
	Подання ДП для перевірки дипломному керівнику, одержання відгуку	09.06.2020	
	Подання ДП на рецензію	12.06.2020	
	Захист ДП	18.06.2020	

Студент

Дмитро ЛУЩИК

Керівник

Олеся ДРАЧУК

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

**Приладобудівний факультет  
Кафедра приладобудування**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології  
та системи точної механіки»**

**спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
на тему: «Вимірювальний перетворювач витрати рідино-фазних середовищ  
вихорового класу»**

Виконав (-ла):

Студент (-ка) 4 курсу, групи ПМ-61

Лущик Дмитро Вікторович \_\_\_\_\_

Керівник:

Асистент,

Драчук Олеся Олександрівна \_\_\_\_\_

Консультант з технологічної частини:

Професор, д.т.н.,

Антонюк Віктор Степанович \_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент, к.т.н.,

Шевченко Вадим Володимирович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року



**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Вимірювальний перетворювач витрати рідино-**  
**фазних середовищ вихорового класу»**

Київ – 2020 року

## Реферат

Дипломний проєкт складається з вступу, трьох розділів, висновків та переліку використаних джерел. Диплом містить 89 сторінок, 51 рисунок, список використаних джерел та 2 додатки.

Метою дипломного проєкту є розробка вимірювального перетворювача витрати вихорового типу для рідкого вимірювального середовища етилового спирту.

Для досягнення мети проаналізовано вихоровий метод вимірювання витрати, розглянуті різновиди вихорових витратомірів, підсумовані їх переваги та недоліки. Визначено фізичні характеристики вимірюваного середовища. Розглянуто технічні характеристики існуючих вихорових витратомірів. Розроблено математичну модель вимірювання витрати. Проаналізовано різні форми тіл обтікання та їх вплив на стабільність результату. Досліджено метрологічні та технологічні характеристики.

**Ключові слова:** вихоровий витратомір, витрата, рідина, вихоровий метод, етиловий спирт.

## Abstract

The diploma project consists of an introduction, three sections, conclusions and a list of sources used. The diploma contains 89 pages, 51 figures, a list of sources used and 2 applications.

The aim of the diploma project is to develop a vortex-type flow measuring transducer for liquid measuring medium of ethyl alcohol.

To achieve this goal, the vortex method of flow measurement were analyzed, the types of vortex flowmeters were considered, their advantages and disadvantages are summarized. The physical characteristics of the measured medium were determined. The technical characteristics of the existing vortex flowmeters were considered. A mathematical model of flow measurement has been developed. Different shapes of flow bodies and their influence on the stability of the result were analyzed. Metrological and technological characteristics were investigated.

**Keywords:** vortex flowmeter, flow, liquid, vortex method, ethyl alcohol.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. ОПИС ВИМІРЮВАНОВОГО СЕРЕДОВИЩА.....	11
2. ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Опис класу вихорових витратомірів.....	19
2.2 Огляд існуючих приладів.....	24
2.3 Розробка схеми вимірювання.....	33
2.4 Розробка математичної моделі вимірювання витрати.....	36
2.5 Розрахунок конструктивних елементів витратоміру.....	38
2.6 Розрахунок метрологічних характеристик витратоміру.....	60
3. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	66
3.1 Опис конструкції приладу.....	66
3.2 Розрахунок технологічності приладу.....	67
3.3 Розрахунок параметричної точності складання.....	71
3.4 Проєктування технологічного процесу складання.....	78
ВИСНОВОК.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	84

<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>				
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Луцик</i>		
<i>Перевір.</i>				
<i>Реценз.</i>				
<i>Н. Контр.</i>				
<i>Затверд.</i>				
			<i>Літера</i>	<i>Аркви</i>
			8	<i>Арквиів</i>
<i>4 курс, ПБФ</i>				

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$D$  – умовний прохід, *мм*;

$Q_M$  – масова витрата, *м<sup>3</sup>/год*;

$Q$  – об'ємна витрата, *м<sup>3</sup>/год*;

$v$  – швидкість руху рідини, *м/с*;

$V_m$  – питомий об'єм, *м<sup>3</sup>/кг*;

$\gamma$  – питома вага, *Н/м<sup>3</sup>*;

$\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, *м<sup>2</sup>/с*;

$\nu_{кін}$  – кінематична в'язкість, *м<sup>2</sup>/с*;

$d$  – характерний діаметр тіла обтікання, *мм*;

$S$  – площа поперечного перерізу трубопроводу, *м<sup>2</sup>*.

$l$  – довжина каналу, *мм*;

$\Delta P$  – втрата тиску, *Па*;

$Re$  – число Рейнольдса;

$Re_{кр}$  – критичне число Рейнольдса;

$Sh$  – число Струхалія;

$P_{max}$  – максимальний тиск, *МПа*;

$t_{max}$  – максимальна температура, *°С*;

$t_{min}$  – мінімальна температура, *°С*;

$L$  – розмір згинального крила;

$\lambda$  – інтенсивність відказів;

ERP (Enterprise Resource Planning) – система планування ресурсів підприємства.

ЧЕ – чутливий елемент;

ВБ – вимірювальний блок;

ОБ – обчислювальний блок;

ВП – вимірювальний пристрій;

ДЗМ – датчик згинального моменту;

ТО – тіло обтікання.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

## ВСТУП

**Актуальність проблеми.** 11 грудня 2019 року Президент України підписав Закон «Про внесення змін до Закону України «Про державне регулювання виробництва і обігу спирту етилового, коньячного і плодового, алкогольних напоїв, тютюнових виробів та пального» щодо лібералізації діяльності у сфері виробництва та обігу спирту етилового» № 318-ІХ. Документ скасовує державну монополію на виробництво спирту в Україні з 1 липня 2020 року [1], тому вірогідно, що в наступні роки спиртовиробна галузь в нашій країні буде стрімко розвиватись, будуть з'являтися все більше і більше самостійних малих та середніх підприємств, яким необхідне сучасне обладнання для організації виробництва етанолу. Тому актуальним є розробка приладів для цієї галузі, одним з яких є витратомір етилового спирту.

Витратомір – це технічний засіб, який призначений для вимірювання, реєстрації та відображення масової та об'ємної витрати речовини в поточних умовах.

В даному дипломному проєкті розглядаються питання вимірювання витрати етилового спирту в промисловості. Об'єктом дослідження є процес виміру витрати етанолу. Предметом дослідження є вихоровий витратомір. Метою є розробка та конструювання вихорового витратоміра етилового спирту.

Для досягнення поставленої мети ми повинні розв'язати наступні задачі:

- Розрахунок математичної моделі вимірювання
- Побудова структурної та принципової схеми витратоміра
- Розрахунок конструкції витратоміра
- Визначення метрологічних характеристик виробу
- Розрахунок технологічності приладу
- Побудова технологічної схеми та схеми складального складу

					<i>ДІП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## 1. ОПИС ВИМІРЮВАНОВОГО СЕРЕДОВИЩА

Етиловий спирт – безбарвна, летка, легкозаймиста речовина. Також його називають винним спиртом, етанолом.

Етанол є гарним розчинником великої кількості речовин - як органічних, так і неорганічних. Разом з водою в пропорціях 95,6% етилового спирту та 4,4% води, утворює азеотропну суміш, яка широко розповсюджена в хімічній промисловості, промисловостях з виготовлення ліків, продуктів харчування, паливній та інших. З водою може змішуватись у будь-яких співвідношеннях.

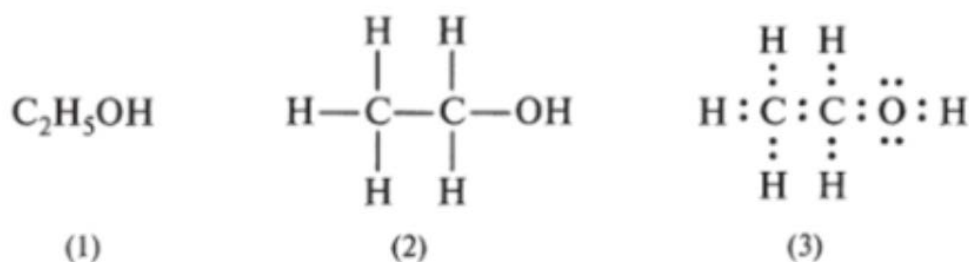


Рисунок 1.1 - Молекулярна формула етанолу (1), структурна формула (2), електронна формула (3)

Виготовляють спирт використовуючи ферментацію різноманітних сільськогосподарських культур, що містять в собі цукор, крохмаль чи целюлозу. Для промислового призначення, етанол можуть синтезувати з газової чи нафтової сировини.

Для того, щоб описати фізичні властивості даного середовища, необхідно визначитись с його основними характеристиками, що дають змогу повністю зрозуміти природу речовини. В даній роботі вимірювальним середовищем є етиловий спирт у рідкому стані, тому далі розглянемо основні параметри, які використовують для опису рідин, а також які необхідні для подальших розрахунків.

Густина (питома маса) — фізична величина, що показує масу, яку має в собі одиниця об'єму речовини. В системі SI вимірюється у  $кг/м^3$ . Позначається символом  $\rho$  та визначається за формулою:

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.1)$$

де  $m$  – маса речовини;

$V$  – об'єм речовини.

У етилового спирту густина залежить від об'ємної частки води у складі речовини, а також від температури. Цю залежність продемонстровано на рис. 1.2.

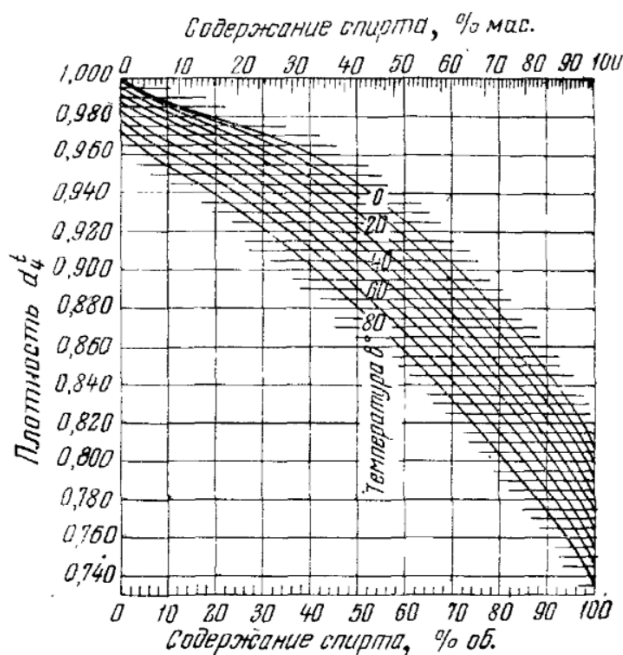


Рисунок 1.2 - Відносна густина водно-спиртових розчинів при різній температурі

Стандартним значення густини для етилового спирту прийнято брати значення при температурі 20 °С та з об'ємною часткою води 4.4%, що становить 0,7905 г/см<sup>3</sup>.

В'язкість  $F$  (внутрішнє тертя) – це властивість текучих тіл чинити опір переміщенню однієї частини речовини відносно іншої частини [2].

В системі SI в'язкість вимірюється у паскалях на секунду [Па·с].

$$F = \eta \frac{d\omega}{dy}, \quad (1.2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт пропорційності, що називається коефіцієнтом динамічної або абсолютної в'язкості [2];

$d\omega$  – градієнт швидкості в двох шарах, що знаходяться на відстані  $dy$ .

Динамічний коефіцієнт в'язкості  $\eta$  характеризує протидію рідини зсувним зусиллям. Він залежить від роду рідини і параметрів її стану, в основному температури.

При збільшенні температури внутрішнє тертя у рідин зменшується. Натомість для газів це призводить до збільшення в'язкості.

Для етилового спирту динамічна в'язкість складає  $1.19 \cdot 10^{-3}$  Па/с.

Кінематична в'язкість – відношення динамічного коефіцієнта в'язкості  $\eta$  до густини рідини  $\rho$  [2]:

$$v_{\text{кін}} = \frac{\eta}{\rho}. \quad (1.3)$$

В системі SI вимірюється в квадратних метрах на секунду [ $\text{м}^2/\text{с}$ ]. Також використовується позасистемна одиниця – стокс [Ст], де  $1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Так як кінематична в'язкість розраховується використовуючи параметр динамічної в'язкості, то вона так само залежить в значній мірі від температури речовини. У випадку з етиловим спиртом, ще й існує залежність від вмісту води у речовині, тому залежність кінематичної в'язкості від цих параметрів представлена на рис. 1.3.

Содержанне спирта, % мас.	Вязкость при температуре, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
0	64,4	46,8	36,1	29,3	23,9	20,4	17,2	15,1	13,4	
10	117,7	79,1	56,8	42,3	33,2	27,1	22,4	19,2	16,3	
20	194,8	119,8	80,6	57,5	42,8	34,0	27,8	23,5	19,7	
30	257,4	153,8	100,7	70,3	51,6	40,0	32,3	26,7	22,5	
40	271,2	166,7	110,5	75,2	57,2	44,2	35,4	29,0	24,9	
50	256,9	162,8	111,5	79,5	59,4	46,1	36,8	30,5	27,2	
60	226,7	151,7	106,6	77,9	58,9	46,2	37,4	31,2	27,5	
70	192,2	134,4	98,3	72,9	56,4	44,5	35,4	30,7	27,5	
80	152,8	112,4	85,3	65,4	51,5	41,9	34,8	29,4	26,6	
90	115,9	89,2	70,4	56,5	45,9	38,2	32,3	27,5	24,5	
95	96,4	77,0	62,7	51,1	41,2	35,7	30,5	26,6	23,5	
100	79,5	66,8	55,6	46,1	38,2	33,0	28,1	24,7	22,0	

Рисунок 1.3 - Кінематична в'язкість водно-спиртових розчинів (в  $\text{м}^2/\text{год} \cdot 10^4$ )

Питомий об'єм  $V_m$  – це об'єм одиниці маси речовини, величина обернена до густини.

$$V_m = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} . \quad (1.4)$$

Питома вага  $\gamma$  – це сила тяжіння одиниці об'єму речовини. В системі SI вимірюється у  $\text{Н/м}^3$ .

$$\gamma = \frac{G}{V} , \quad (1.5)$$

де  $G$  – сила тяжіння речовини (її вага).

Питома вага не є постійною величиною, адже вона залежить від величини прискорення вільного падіння, яка є змінною.

Поверхневий натяг - це питома робота збільшення поверхні при її розтягуванні за умови сталості температури [2].

Коефіцієнт поверхневого натягу  $\sigma$  — кількісна характеристика поверхневого натягу рідини, одиницею вимірювання якого є  $[\text{Н/м}]$  [2].

Стисливість - фізична величина, що характеризує властивість речовини змінювати власний об'єм під дією тиску [2]. Стисливість оцінюється коефіцієнтом об'ємного стиснення  $\beta$ :

$$\beta = - \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta p} , \quad (1.6)$$

де  $\Delta V = V - V_0$  зміна об'єму рідини при зміні тиску  $\Delta p = p - p_0$ ;

$V_0$  – об'єм при початковому тиску  $p_0$ ;

$V$  – об'єм при кінцевому тиску  $p$ .

Знак мінуса в рівнянні показує те, що позитивному приросту тиску  $\Delta p$  відповідає негативний приріст (зменшення) об'єму  $\Delta V$  [2].

Температура плавлення (температура замерзання) — це температура, при якій тверде кристалічне тіло здійснює перехід у рідкий стан і навпаки [2].

Температура самозаймання – це найнижча температура горючої речовини, при нагріванні до якої виникає полум'яне горіння або вибух [2]. Ця температура потрібна для досягнення енергії активації реакції горіння.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Критична точка – це поєднання значень температури та тиску, при яких зникає різниця у властивостях рідкої і газоподібної фаз речовини. У критичній точці щільність рідини і її насиченої пари стають рівні, а поверхневий натяг рідини падає до нуля, тому зникає межа розділу фаз рідина-пар [2].

Відомості про витрату. Витратою називають кількість переміщеної рідини, газу чи пару за одиницю часу через поперечний переріз.

Для вимірювання об'єму рідини, що протікає через поперечний переріз, визначають об'ємну витрату, а при вимірюванні маси – масову витрату.

Об'ємна витрата – це об'єм речовини, який проходить через площу перерізу за одиницю часу. В системі SI вимірюється в кубічних метрах за секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Переважно позначається символом  $Q$ .

$$Q = v \cdot S, \quad (1.7)$$

де  $v$  – швидкість руху речовини;

$S$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

Масова витрата - маса речовини, що проходить через задану площу перерізу за одиницю часу [2]. В системі SI вимірюється у кілограмах за секунду ( $\text{кг}/\text{с}$ ). Переважно позначається символом  $Q_M$ .

$$Q_M = \rho \cdot v \cdot S. \quad (1.8)$$

Нормальні умови (стандартні умови) — це значення тиску й температури, для яких заведено приводити результати розрахунків та експериментів з метою простішого порівняння між ними [2].

Національний інститут стандартів і технології США визначає нормальними умовами температуру  $20^\circ \text{C}$  і абсолютний тиск 1 атм (101,325 кПа). Натомість Міжнародний союз теоретичної і прикладної хімії у 1982 році встановив такі стандартні умови: тиск 100 кПа (1 бар) і температура  $0^\circ \text{C}$  (273,15 К,  $32^\circ \text{F}$ ) [3]. В даній роботі ми будемо приймати за нормальні умови температуру  $20^\circ \text{C}$  та тиск 1 атмосферу.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Робочі умови – це значення фактичних параметрів температури та тиску речовини у конкретний момент часу та у конкретному місці.

Отже, основні фізичні властивості етилового спирту можна підсумувати у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Фізичні властивості етилового спирту [4]

Густина (при 20 °С)	0,7905 г/см <sup>3</sup>
Температура плавлення	-114,15 °С
Температура кипіння	+78,39 °С
Температура самозаймання	+363 °С
Об'ємна частка води	4,4%
Динамічна в'язкість (при 20 °С)	1.19 мПа/с
Поверхневий натяг (при 20 °С)	22,39 · 10 <sup>-3</sup> Н/м
Критична точка	241 °С (при тиску 6,3 МПа)

### Виготовлення етилового спирту.

Частіше за все етанол отримують одним з двох способів:

- шляхом бродіння органічних продуктів, багатих на вуглеводи, під впливом ферментів бактерій і дріжджів;
- гідратацією етилену.

При бродінні утворюється розчин, що містить до 15% етанолу. При більш концентрованому складі дріжджі стають неактивними, тому реакція припиняється. Далі продукт піддається подальшому очищенню і дистиляції.

Якщо застосовується сировина у вигляді деревини, соломи та інших матеріалів, що містять целюлозу, попередньо вона піддається гідролізу, а потім тільки бродінню.

Гідратація здійснюється по одній з схем:

- пряма - проводиться при температурі 300 градусів за Цельсієм і тиску 7 МПа, під впливом ортофосфорної кислоти, нанесеної на активоване вугілля, азбест або силікагель;

- не пряма, тобто з утворенням проміжного ефіру сірчаної кислоти з подальшим гідролізом, реакція здійснюється при температурі від 80 до 90 градусів за Цельсієм і тиску 3,5 МПа.

У промисловості найчастіше використовують спосіб бродіння.

Виробничий процес складається з наступних послідовних етапів:

1. Очищення зерен від пилу, каменів і інших домішок на повітряно-ситовому сепараторі. Невеликі металеві частинки, що містяться в зерновій суміші, видаляються з апарату за допомогою магнітного пристрою-роздільника.
2. Окремій обробці піддається зерно, призначене для приготування солоду. Його також очищають від сміття та бур'янів.
3. Подрібнення. Дроблення дозволяє поліпшити і прискорити процес зброджування, збільшивши вихід кінцевого продукту.
4. Варіння. Подрібнене зерно змішується з водою і підігрівається до температури 130-170 градусів за Цельсієм. Відбувається безперервне розварювання. Тривалість процесу залежить від температури, що застосовують: при 130-140 °С - 60 хвилин, при 165-170 °С - 4 хвилини. У процесі варіння руйнується клітинна структура зерна, розчиняється крохмаль і відбувається хімічна зміна цукрів.
5. Охолодження. Для цукрування отриману масу остуджують до температури 57 градусів за Цельсієм. Потім додають ферменти (утворюється глюкоза) або солодове молоко (формується мальтоза). Для його приготування пророщують зернові культури (оптимально в пропорції ячмінь, жито і просо 2: 1: 1 відповідно), висушують подрібнюють і заливають водою до отримання консистенції рідкого кефіру. В результаті процесу цукрування отримують сусло спиртового виробництва, в якому близько 75% - зброджувані цукри, приблизно 20% - декситрини, решта (5%) - крохмаль.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

6. Бродіння (біохімічний процес). Процес протікає в закритих ємностях, що необхідно для запобігання втрат продукту. Бродіння починається з введення дріжджів в сусло. Здійснюється «доцукрування» здебільшого крохмалю і декстринів. При безперервному виробництві швидкість бродіння становить до 60 годин.
7. Дистиляція. При перегонці бражки, в якій вже міститься до 14,5% алкоголю, отримують концентрований розчин. Це досягається за рахунок нагріву цього розчину до температури понад 80 градусів за Цельсієм. Пари з алкоголем відокремлюються і збираються в окремій ємності.
8. Ректифікація. Відбувається поділ речовини з різною температурою кипіння в результаті тепло- і масообміну. У ректифікаційній установці продукт очищується від шкідливих домішок і досягає максимальної міцності.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

## 2. ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Опис класу вихорових витратомірів

Вимірювання витрати рідини, пару чи газу є дуже важливим процесом на сучасних виробництвах. З кожним роком вимоги до витратомірів стають все більші й більші, разом зі швидким розвитком технологій, що дозволяють не витратити ресурси через допустимі похибки. Від вимірювачів витрат необхідні висока точність, надійність, низька ціна та енергоспоживання, широкий динамічний діапазон, стабільність вимірювань. Сьогодні цим вимогам відповідають вихорові витратоміри. Дані витратоміри поділяються на три групи, які істотно відрізняються один від одного.

#### **Вихорові витратоміри зі статичним тілом обтікання.**

Принципом дії такого витратоміра є залежність частоти вихорів, що утворюються речовиною після проходження тіла обтікання, від швидкості потоку речовини.

Тіло обтікання (ТО) – це тіло, зазвичай із твердого матеріалу, яке встановлюється перпендикулярно до потоку в проточній частині витратоміра задля формування вихорових доріжок. Може мати різні форми виготовлення.

Потік рідини або газу намагається обігнути ТО, встановлене всередині витратоміра. В результаті руху змінюється напрямок обтікаючих струменів і збільшується швидкість потоку, при цьому зменшується тиск. Після проходження найширшого місця перешкоди, відбувається зменшення швидкості течії і збільшення тиску. Таким чином, на фронтальній частині тіла обтікання спостерігається підвищений тиск, а на задній – зменшений тиск. Пройшовши найширше місце, шар потоку біля тіла обтікання відривається від нього і під дією перепаду тисків, утвореного за ТО, змінює напрям руху, утворюючи вихори. При цьому, розвиток вихору з однієї сторони перешкоджає його утворенню з протилежної сторони, тому виникає подвійна доріжка з вихорів. Це явище має назву «доріжка Кармана» (рис. 2.1).

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		19



Рисунок 2.1 - Доріжка Кармана

Поверхня тіла обтікання з часом не забруднюється, адже самі вихори її очищують, тому використання витратомірів даного типу можливе навіть для сильно забруднених середовищ.

### **Вихорові витратоміри з прецесією воронкоподібного вихору.**

Це витратоміри, потік в яких закручується в первинному перетворювачі, а потрапляючи в широкую частину труби, струмінь приймає воронкоподібний вигляд і прецесує - тобто створює пульсації тиску. Для перетворення частоти пульсації в уніфікований вимірювальний сигнал використовуються напівпровідникові термоанемометри або п'єзоелементи. Даний тип вихорових витратомірів поділяється на прилади з гвинтовим пристроєм, що створює вихори (рис. 2.2), і з тангенціальним введенням в камеру (рис. 2.3). Їх відмінність полягає в тому, яким способом закручується потік речовини.

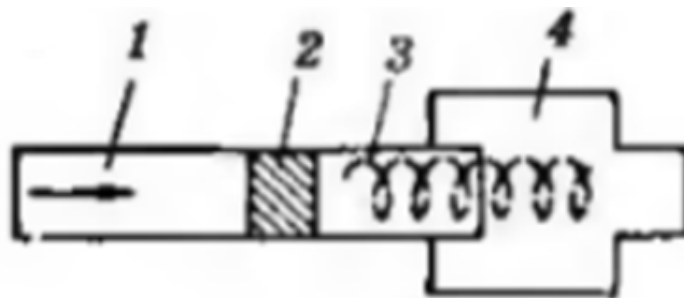


Рисунок 2.2 - Схема гвинтового пристрою:

1 – труба вхідного потоку; 2 – циліндрична камера з різьбою для закручування потоку; 3 – патрубок; 4 – камера чи труба великого діаметру

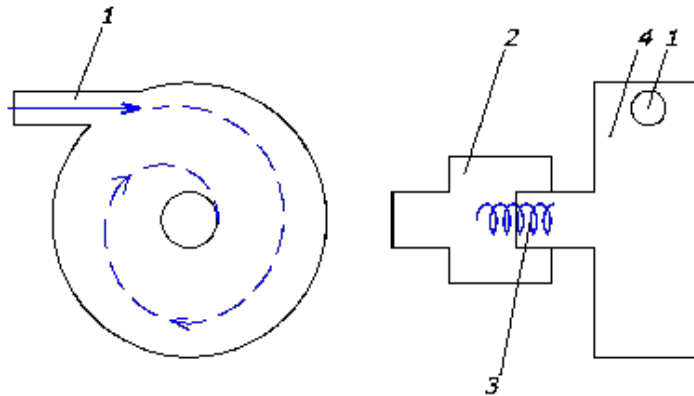


Рисунок 2.3 - Схема пристрою тангенціального введення в камеру:

1 – труба вхідного потоку; 2 – камера чи труба великого діаметру;  
3 – патрубок; 4 – циліндрична камера з різьбою для закручування потоку

Для гвинтового пристрою, постійність числа Струхаля  $Sh$  досягається при числі Рейнольдса  $Re \geq 3 \cdot 10^3$ , а при тангенціальному введенні потрібні значно більші числа Рейнольдса, тому в витратомірах набагато частіше використовується перший тип пристрою, який до того ж не вимагає перед собою прямої ділянки труби. Проте, у гвинтового виконання, падіння тиску на закручуючому пристрої вище [5].

### Вихорові витратоміри з осцилюючим струменем.

Це витратоміри, де первинним перетворювачем є струмінь. Пульсації тиску, в даному випадку, створюються при витіканні струменя з отвору шляхом його автоколивання, що викликається спеціальною конструкцією витратоміра. Вихорові витратоміри з осцилюючим струменем можуть бути двох типів: релаксаційний (рис. 2.4) і зі зворотним гідравлічним зв'язком (рис. 2.5).

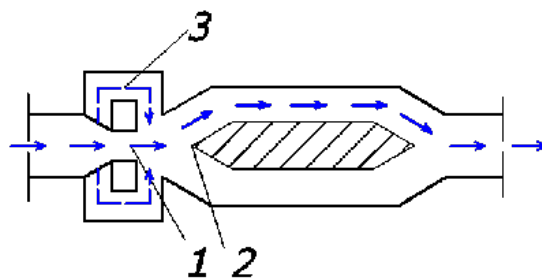


Рисунок 2.4 - Релаксаційний перетворювач:

1 – сопло; 2 – дифузор; 3 – обхідна трубка

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

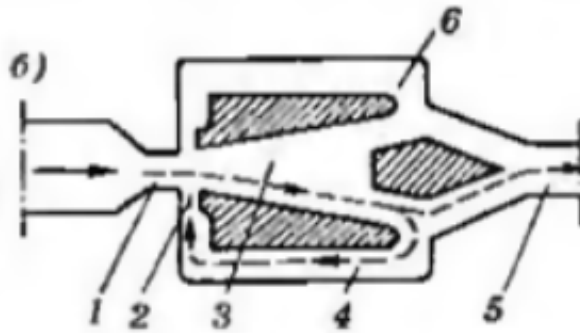


Рисунок 2.5 - Перетворювач вихорового витратоміра  
зі зворотним гідравлічним зв'язком:

1, 2 – сопло; 3 – дифузор; 4 – нижній відвідний канал;  
5 – вихідний патрубок; 6- верхній відвідний канал

Прилади, що мають перетворювач зі зворотним зв'язком, кращі, оскільки такий перетворювач дозволяє більш строго забезпечити процес осциляції і має чи не лінійну залежність між витратою і частотою коливання. Такі витратоміри можуть бути використані з маленькими трубами, діаметром від 12 до 100 мм, тому нижнє значення числа Рейнольдса  $Re$  в  $2 \cdot 10^3$  значно менше, ніж у інших вихорових витратомірів [5].

### **Переваги та недоліки вихорових витратомірів.**

Незважаючи на значні відмінності принципу роботи кожного виду вихорового витратоміра, спільними можна виділити наступні переваги та недоліки.

Переваги:

- відсутність рухомих частин;
- частотний вихідний сигнал;
- простота і надійність конструкції витратоміра;
- широкий динамічний діапазон;
- можливість отримання універсального градуювання;
- висока точність та стабільність показань;
- можливість вимірювання витрати рідини, пари та газу одним пристроєм, шляхом простого програмного налаштування.

Також до переваг можна віднести порівняно невелику вагу за умовний прохід в порівнянні з іншими типами витратомірів [6], що наведено на рис. 2.6.

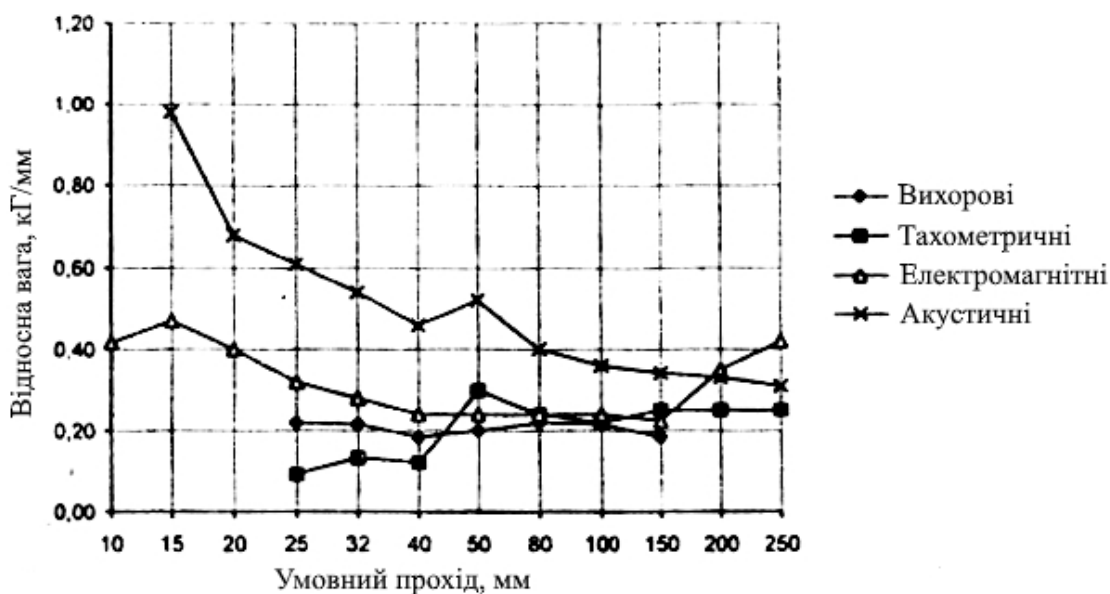


Рисунок 2.6 - Порівняльна таблиця ваги різних типів витратомірів від діаметру умовного проходу

Недоліки:

- зменшення площі перерізу каналу, що призводить до падіння тиску;
- чутливість до акустичних сигналів та вібрації;
- складність застосування при низьких швидкостях потоку.

Отже можна сказати, що вихорові вимірювальні перетворювачі відповідають високим вимогам сьогодення.

Найголовнішою метою, яка ставиться перед приладами даного типу, є висока точність вимірювань, і вихорові витратоміри, в залежності від виду та умов монтажу, мають похибку вимірювань всього 0.5-1.5%, що є достатнім для більшості задач. Більша точність може досягатись за рахунок суворої відповідності технології виробництва, дотримання всіх правил монтажу, використання досконалішої сучасної елементної бази, точнішого калібрування під конкретні умови використання.

Другим найважливішим фактором є надійність, і вихорові ВП мають один із найкращих параметрів надійності серед інших видів витратомірів, адже чим

простіша конструкція - тим надійніший прилад, а в даному випадку в конструкції перетворювача відсутні рухомі частини, що дозволить використовувати витратомір з терміном служби щонайменше 10 років.

Не менш важливим є параметр діапазону вимірювань, який визначається як відношення найбільшої витрати, що може виміряти витратомір, до найменшої. Найгіршими за цим показником є ВП зі звужуючим пристроєм, в яких діапазон вимірювання близько 3, тоді як у вихорових витратомірів діапазон для рідин складає 15-20, а для газів значення доходять до 400.

Не можна не згадати відсутність залежності результатів показів від тиску, високу швидкодію приладу, під якою розуміють швидку реакцію вихідних показів приладу (затримка не перевищує десятих долей секунди) при стрибкоподібній зміні витрати. Також вихорові витратоміри можуть працювати з агресивними та забрудненими середовищами, бо корозія, ерозія та забруднення майже не впливають на покази вимірювань [7], чим не можуть похвастатись наприклад тахометричні ВП та витратоміри з використанням діафрагм та сопел, адже в таких абразивних середовищах вони швидко втрачають точність показів через зміну форми сопла, гостроти кромки чи внутрішнього діаметру.

## 2.2 Огляд існуючих приладів

### **Вихоровий витратомір Rosemount 8800.**

Вихоровий вимірювальний перетворювач компанії Emerson (рис. 2.7) забезпечує надійність та безпеку використання завдяки датчику вихорів, який можна замінювати прямо під час роботи витратоміра, не перекриваючи потік вимірювального середовища. Витратомір може виготовлятися у багатьох конфігураціях в залежності від поставлених задач, наприклад фланцеві чи безфланцеві версії, варіанти з розширеним температурним режимом роботи, з конічними або прямими переходами, є моделі з двома або чотирьома витратомірами, що вбудовуються в трубу послідовно.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



Рисунок 2.7 - Вид Rosemount 8800

Генерація вихорового сигналу у даного витратоміра зображена на рис. 2.8.

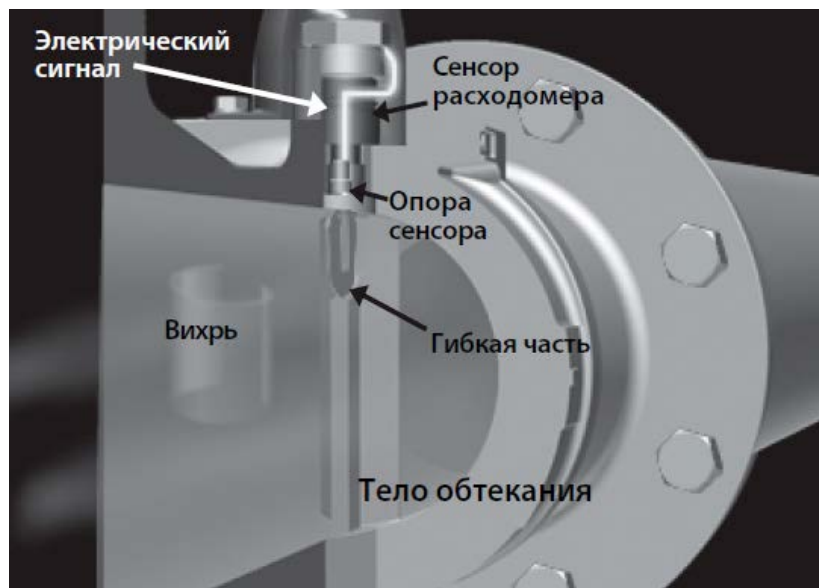


Рисунок 2.8 - Генерація вихорового сигналу витратоміра Rosemount 8800

Після тіла обтікання потік технологічного середовища розділяється, і з кожного боку тіла створюються поперемінно вихори. Кожен з них створює зону низького тиску на одній зі сторін тіла обтікання. Низький тиск призводить гнучку частину тіла обтікання в рух. Він передається опорі сенсора, яка знаходиться поза потоком. Рух опори тисне на сенсор, який містить

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

п'єзоелектричний елемент. Вплив сили на п'єзоелектричний елемент призводить до перетворення механічної енергії в електричний сигнал. Цей сигнал передається в електронний блок для обробки. Блок вимірює частоту генерованого електричного сигналу і робить розрахунки даних про витрату [8].

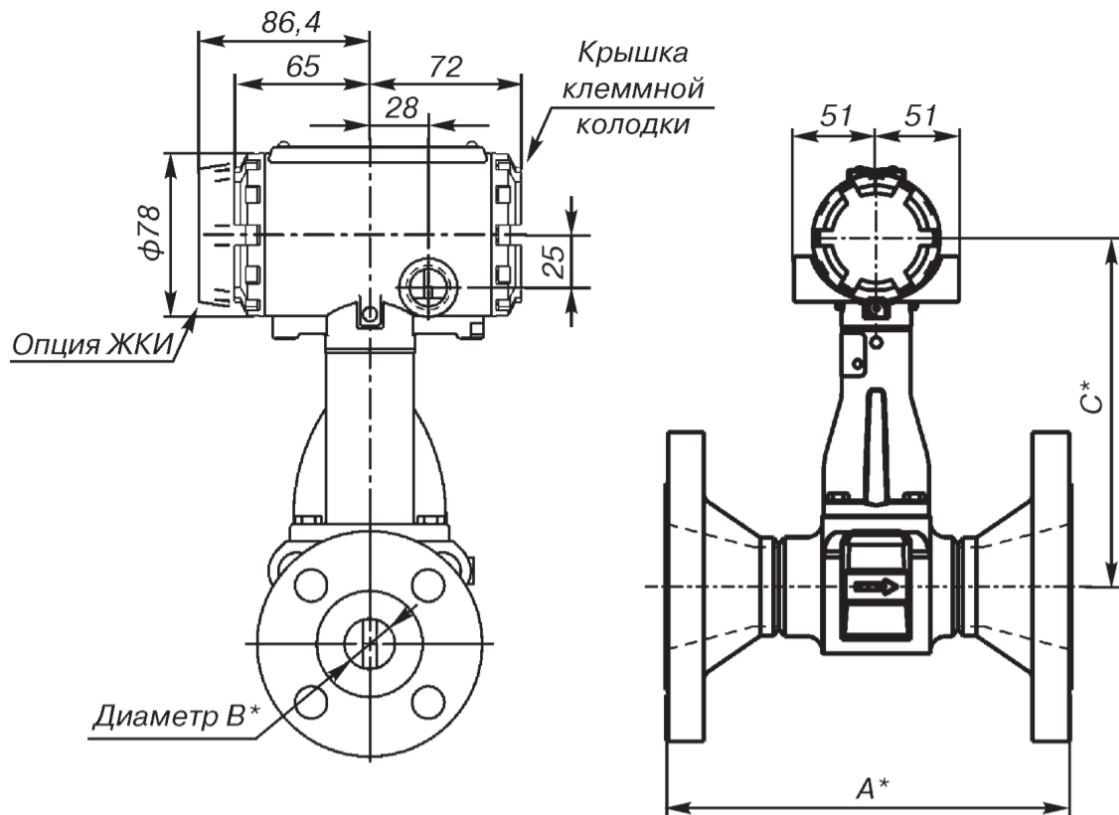


Рисунок 2.9 - Схема витратоміра Rosemount 8800

Технічні характеристики Rosemount 8800 [8]:

- Вимірювані середовища: газ, пар, рідина.
- Умовний прохід Ду: від 15 до 300.
- Тиск вимірюваного середовища: до 25МПа.
- Діапазон температур вимірюваного середовища: -40...232 °С.
- Температура навколишнього середовища: -50...85 °С.
- Похибка вимірювання (для рідин):  $\pm 0,65\%$ .
- Похибка вимірювання (для газу, пару):  $\pm 1,0\%$ .
- Ступінь захисту від пилу та води: IP66.
- Максимальна допустима амплітуда вібрації: для рідини – 2,21 мм, для газу – 1,09 мм.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

## Вихоровий витратомір ЭМИС-ВИХРЬ 200.

Особливостями ЭВ-200 (рис. 2.10) є те, що він не вимагає періодичного перекалібрування, діагностика і заміна вузлів проводиться без демонтажу, а доставляють лічильники тільки після проходження обов'язкового тесту на перевірному стенді. Дистанційна передача даних, налаштування, перевірка приладів (через RS-485 на базі протоколу Modbus RTU) дозволяють знижувати витрати на обслуговування. Витратомір має можливість конструктивного виконання з конічними переходами [9].



Рисунок 2.10 - Вигляд витратоміра ЭВ-200

На схемі вихорового перетворювач витрати ЭВ-200 (рис. 2.11) видно, що він складається з протоочної частини (1) і електронного блоку (2). Протоочна частина виконана у формі циліндру, в поперечному перерізі якого встановлено тіло обтікання (3). За тілом обтікання знаходиться чутливий елемент (4).

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

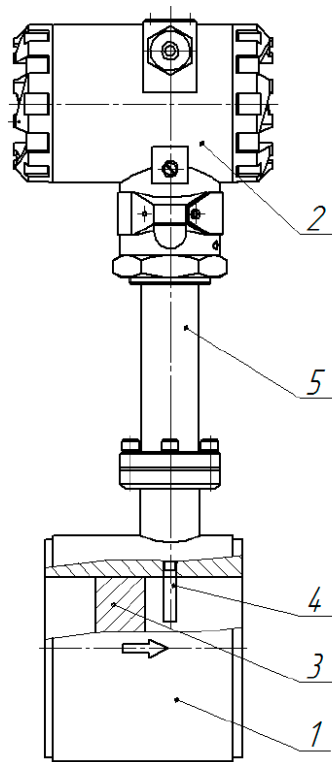


Рисунок 2.11 - Схема витратоміра ЭВ-200:

- 1 – проточна частина; 2 – електронний блок; 3 – тіло обтікання;  
4 – чутливий елемент; 5 – трубчата стійка.

Електронний блок (2) кріпиться на циліндрі проточної частини за допомогою трубчастої стійки (5). Електронні плати розміщені в електронному блоці.

У перетворювачі реалізований метод вимірювання витрати, заснований на вимірюванні частоти вихорів. У циліндрі проточної частини встановлено тіло обтікання, яке викликає утворення вихорів в потоці вимірюваного середовища. Вихори поширюються по черзі спереди і ззаду кожної зі сторін тіла обтікання. Частота зриву вихорів з тіла обтікання пропорційна швидкості потоку середовища, а, отже, пропорційна об'ємній витраті вимірюваного середовища. Ці вихори викликають коливання тиску вимірюваного середовища по обидва боки крила сенсора. Крило передає пульсації тиску на п'єзоелемент. П'єзоелемент перетворює пульсації в електричні сигнали. Електронний блок формує вихідні сигнали перетворювача після посилення, фільтрації, перетворень і цифрової обробки сигналу [10].

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Технічні характеристики ЭВ-200 [10]:

- Вимірювані середовища: газ, пар, рідина.
- Умовний прохід Ду: від 15 до 300.
- Тиск вимірюваного середовища: до 25 МПа.
- Діапазон температур вимірюваного середовища: -40...450 °С.
- Температура навколишнього середовища: -40...70 °С.
- Динамічна в'язкість рідин: не більше 7 мПа\*с.
- Похибка вимірювання (для рідин):  $\pm 0,5\%$ .
- Похибка вимірювання (для газу, пару):  $\pm 1,5\%$ .
- Ступінь захисту від пилу та води: IP66.
- Стійкість до вібрації: 10 – 100 Гц з прискоренням не більше 4,9 м/с<sup>2</sup>.

### **Вихоровий витратомір digitalYEWFLO.**

Вихоровий вимірювальний перетворювач digitalYEWFLO – це інтелектуальний прилад, що призначений для вимірювання об'ємної витрати рідини, газу чи пари. Зображення витратоміра представлено на рис. 2.12.



Рисунок 2.12 - Вигляд витратоміра digitalYEWFLO

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Вбудоване програмне забезпечення digitalYEWFL0 дозволяє по введеним в пам'ять параметрам процесу перерахувати об'ємну витрату в масову або нормовану, а також ввести корекцію по числу Рейнольдса в області малих витрат і поправку на стисливість газів. У серії витратомірів digitalYEWFL0 застосована унікальна цифрова електроніка, яка використовує розроблену компанією YOKOGAWA технологію спектральної обробки сигналу SSP. Завдяки цьому витратомір постійно аналізує вібрацію, стан робочого середовища і, використовуючи ці дані, автоматично підлаштовує режими обробки сигналу і своєчасно інформує про нештатних режимах потоку і вібрації, якщо такі виникають [11].

DigitalYEWFL0 на замовлення поставляються в багатопараметричний варіанті з вбудованим в тіло обтікання температурним датчиком Pt1000. Вимірjana температура може бути використана як для корекції розрахунку витрати, так і незалежно виведена на дисплей і на верхній рівень [11].

Зображення схеми вихорового ВП показано на рис 2.13.

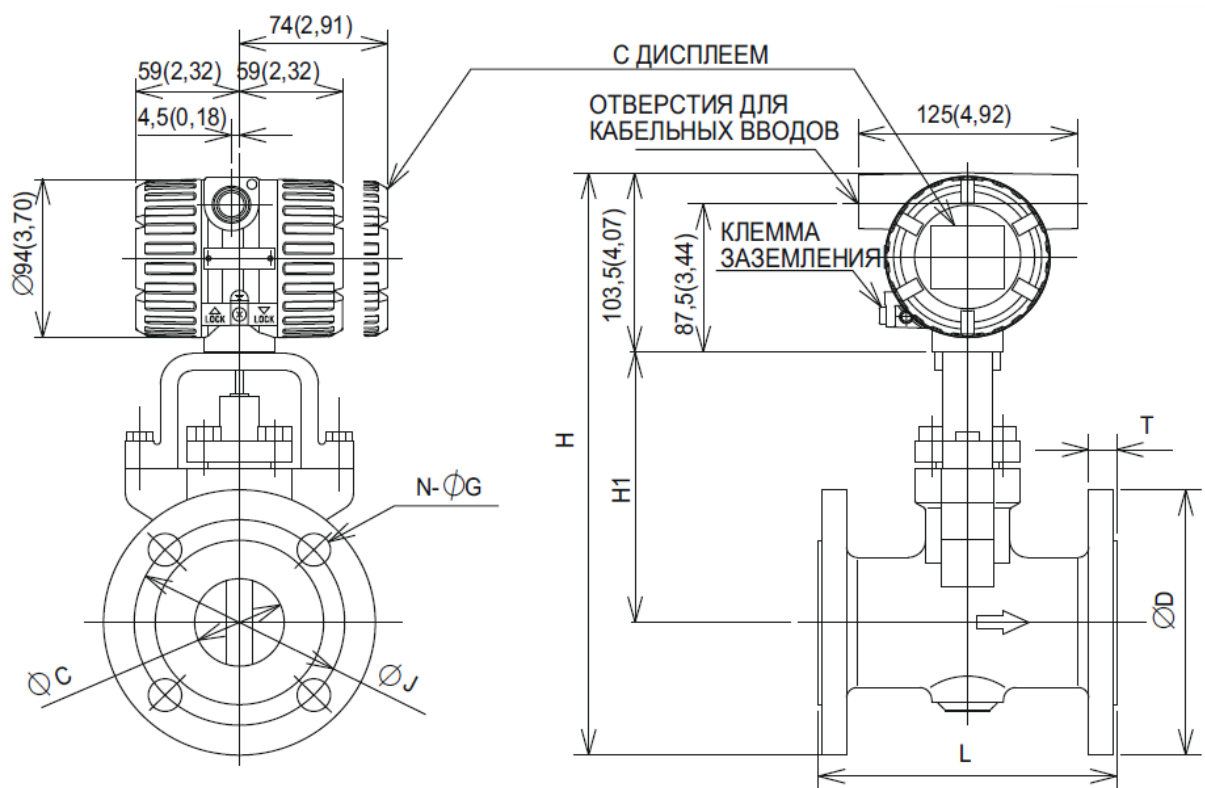


Рисунок 2.13 - Схема витратоміра digitalYEWFL0

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Технічні характеристики digitalYEWFLO [12]:

- Вимірювані середовища: газ, пар, рідина.
- Умовний прохід Ду: від 15 до 400.
- Тиск вимірюваного середовища: до 42МПа.
- Діапазон температур вимірюваного середовища: -29...250 °С.
- Температура навколишнього середовища: -29...85 °С.
- Вологість повітря: 5..100% при 40 °С (без конденсації).
- Похибка вимірювання (для рідин):  $\pm 0,75\%$ .
- Похибка вимірювання (для газу, пару):  $\pm 1,0\%$ .
- Ступінь захисту від пилу та води: IP66.
- Стійкість до вібрації: 1G.

### **Вихоровий витратомір ИРВИС-К300.**

Вихорові перетворювачі (ВП) витрати Ирвис-К300 (рис. 2.14) призначені для перетворення об'ємної витрати неагресивних горючих та інертних газів, водяної пари, рідин в електричний вихідний сигнал у складі вузлів комерційного і технологічного обліку в установках комунальних та промислових підприємств [13].



Рисунок 2.14 - Вигляд витратоміра Ирвис-К300

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

На рис. 2.15 зображена схема витратоміра, де 1 – відрізок трубопроводу, 2 – тіло обтікання, 3 – детектор вихорів, 4 – корпус блока перетворювача-підсилювача, 5 – спеціальний болт, 6 - модуль електронних плат, 7 – кришка, 8 – отвір під кабель, 9 – накидна гайка, 10 – пломба, 11 – гвинт заземлення, 12 – штанга [13].

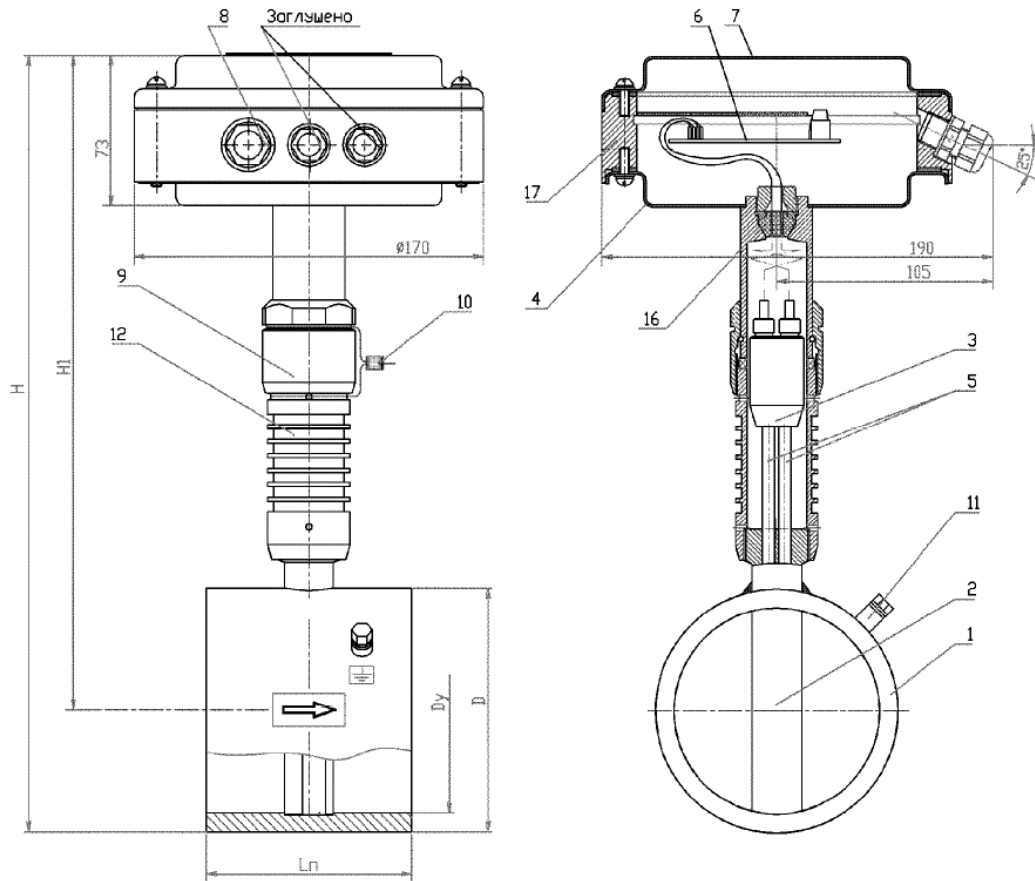


Рисунок 2.15 - Схема витратоміра Ирвис-К300

Технічні характеристики [13]:

- Вимірювані середовища: газ, пар, рідина.
- Умовний прохід Ду: від 27 до 300.
- Тиск вимірюваного середовища: до 10 МПа.
- Діапазон температур вимірюваного середовища: -40...60 °С.
- Температура навколишнього середовища: -40...45 °С.
- Вологість повітря: не більша 95% ± 3% при 35°С.
- Динамічна в'язкість рідин: від  $6 \times 10^{-6}$  до  $35 \times 10^{-6}$  Па·с.
- Похибка вимірювання (для рідин): ±1,0%.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

- Похибка вимірювання (для газу, пару):  $\pm 1,5\%$ .
- Ступінь захисту від пилу та води: IP54.
- Стійкість до вібрації: частота синусоїдальних коливань від 5 до 150 Гц.
- Амплітуда прискорення не більше  $6,8 \text{ м/с}^2$ .

### 2.3 Розробка схеми вимірювання

Методи вимірювань витрати речовини засновані на перетворенні енергії руху потоку в зручні для вимірювань види енергії, тобто в електричний сигнал. Тому, структуру витратоміра можна зобразити як сполучення первинного перетворювача (ПП) (у нашому випадку п'єзоелектричний датчик згинального моменту), вимірювального блоку (ВБ) та відлікового пристрою (ВП). Функції ВП та ВБ можуть поєднуватись у структурі обчислювального пристрою ОП (рис. 2.16).

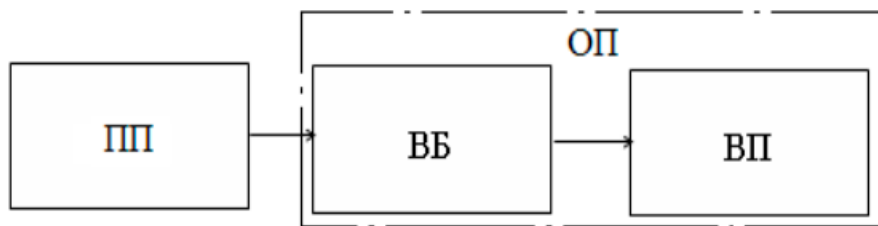


Рисунок 2.16 - Загальна структурна схема витратоміра

Для того, щоб скласти структурну схему для вихорового витратоміра, розглянемо відомі існуючі аналоги структурних схем.

Поширеним варіантом є схема, що містить первинний перетворювач і схему обробки сигналів, що включає фільтр з регулюючим імпедансним елементом, блок управління, ланцюг що диференціюється на вході фільтра і інтегруючий ланцюг на вході блоку управління. Вихід блоку управління з'єднаний з регулюючим імпедансним елементом фільтра, керуючий вхід з виходом фільтра, а фільтр виконаний смуговим. Принцип дії заснований на автоматичному налаштуванні збігу фаз вхідного і вихідного сигналів фільтра, завдяки якому фільтр налаштовується на середню частоту смуги пропускання, відповідну частоті зриву вихорів [14].

Ще одним варіантом є структурна схема, що містить набори фільтрів верхніх і нижніх частот з різними частотами зрізу і кутами нахилу характеристик. Адаптивна логіка вибирає фільтри верхніх нижніх частот таким чином, щоб виділити інформаційний сигнал в діапазоні вимірювання і компенсувати квадратичну залежність рівня сигналу від швидкості вимірюваного середовища [14].

Зазначені аналоги мають суттєві недоліки, що обмежують точність і захищеність від електричних наводок. Після включення або перезапуску, а також внаслідок швидкої зміни швидкості потоку вимірюваного середовища, на виходах витратомірів-аналогів формуються помилкові сигнали, що не містять інформацію про витрату, до тих пір, поки система не налаштується на інформаційну гармоніку, що призводить до значних похибок. Крім того, система може захопити гармонійну складову, що виникла внаслідок впливу на первинний перетворювач періодичних збурень від вібрації трубопроводу, пульсацій потоку або акустичних шумів, що призводить до параметричної відмови (втрати працездатності) витратомірів [14].

Таким чином, щоб уникнути даних недоліків, на рис. 2.17 зображена структурна схема вихоровго ВП, на якій можна побачити, що вихід первинного перетворювача 1 підключений до сигнального входу першого нормуючого підсилювача 2, вихід якого через фільтр 3 підключений до сигнального входу другого нормуючого підсилювача 4, вихід другого нормуючого підсилювача підключений до входу аналого-цифрового перетворювача 5, вихід аналого-цифрового перетворювача підключений до входу мікроконтролера 6, перший керуючий вихід мікроконтролера підключений до керуючого входу першого нормуючого підсилювача, другий керуючий вихід мікроконтролера підключений до керуючого входу другого нормуючого підсилювача, сигнальний вихід мікроконтролера підключений до блоку 7 формування вихідних сигналів, на виходах якого формуються стандартні вихідні сигнали і інтерфейси витратоміра [14].

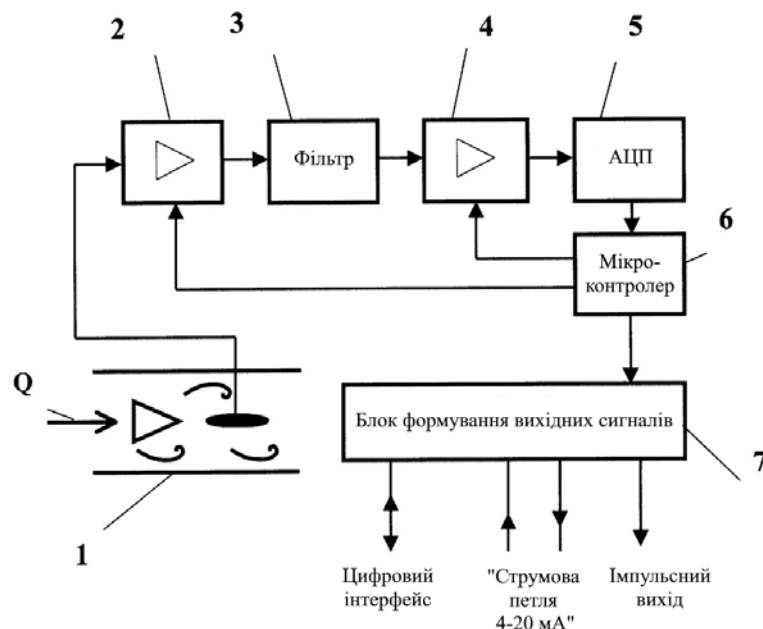


Рисунок 2.17 - Структурно-принципова схема вихорового витратоміра:

- 1 – первинний перетворювач; 2 – перший нормуючий підсилювач; 3 – фільтр;  
 4 – другий нормуючий підсилювач; 5 – аналого-цифровий перетворювач;  
 6 – мікроконтролер; 7 – блок формування вихідних сигналів.

Потік вимірюваного середовища, що протікає через проточну частину, викликає формування вихорів за тілом обтікання, що впливають на чутливий елемент первинного перетворювача 1. Сигнал з первинного перетворювача 1 надходить на вхід першого нормуючого підсилювача 2, який забезпечує попереднє посилення сигналу. Фільтр 3 подавляє гармонійні складові, що знаходяться поза діапазону вимірюваного сигналу. Другий нормуючий підсилювач 4 приводить сигнал у відповідність з діапазоном аналого-цифрового перетворювача 5. Аналого-цифровий перетворювач 5 робить вибірку сигналу з частотою опитування, необхідної для відновлення сигналу в діапазоні вимірюваних частот. Мікроконтролер 6 оцінює рівень вхідного сигналу і виконує автоматичне регулювання коефіцієнтів посилення нормуючих підсилювачів 2 і 4, роблячи таким чином адаптацію до рівня сигналу. Мікроконтролер 6 здійснює пошук і виділення сигналу вихорової частоти відповідно до алгоритму цифрової адаптивної фільтрації, яка реалізує смуговий фільтр високого порядку з переналаштовуваною шириною і центральною

частотою смуги пропускання, обчислює поточне значення вихорової частоти, обчислює значення витрати і видає сигнали в блок 7 формування вихідних сигналів. Блок 7 формує вихідні сигнали у вигляді сигналу струму імпульсного сигналу і забезпечує роботу цифрового інтерфейсу. В якості мікроконтролера може бути застосована мікросхема PIC16C76 фірми Microchip Technology Inc [14].

Завдяки введенню адаптації до рівня сигналу і застосування цифрової адаптивної фільтрації, витратомір універсальний по відношенню до рідких і газоподібних середовищ з різною щільністю і забезпечує точне вимірювання швидкості або витрати в широкому діапазоні, при впливі збурень у вигляді вібрації трубопроводу, пульсацій потоку і акустичних шумів. Регулятор потоку реалізований на мікропотужних компонентах і розрахований на живлення від стандартного струмового інтерфейсу 4-20 мА [14].

#### 2.4 Розробка математичної моделі вимірювання витрати

Структура течії і закономірності формування регулярних вихорів в широкому діапазоні однозначно визначаються двома числами гідродинамічної подібності: число Струхалія і число Рейнольдса [7].

Число Струхалія  $Sh$  є безрозмірною величиною, що показує залежність між частотою вихороутворення і швидкістю потоку:

$$Sh = \frac{f \cdot d}{v}, \quad (2.1)$$

де  $d$  – характерний діаметр тіла обтікання;

$f$  – частота генерації вихорів.

Число Струхалія залежить від форми і розміру тіла обтікання. При оптимальній конструкції тіла обтікання, число Струхалія залишається незмінним в широкому діапазоні чисел Рейнольдса, а отже частота  $f$  стає пропорційна швидкості  $V$ , тому, вимірюючи частоту, можна зробити висновок про швидкість, а значить і про об'ємну витрату речовини.

Число Струхалія в інтервалі чисел Рейнольдса  $5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^5$  величина постійна і рівна 0,184-0,21, точне значення якої залежить від конкретної форми ТО [15].

Число Рейнольдса  $Re$  є безрозмірною величиною, що характеризує співвідношення в'язких та інерційних сил у рідинах та газах.

$$Re = \frac{D \cdot v}{\nu_{кін}} = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{Q \cdot D}{\nu_{кін} \cdot S}, \quad (2.2)$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість;

$D$  – внутрішній діаметр труби.

Для кожного виду течії існує критичне число Рейнольдса  $Re_{кр}$ , яке визначає перехід ламінарної течії в турбулентну. Коли число Рейнольдса потоку менше за критичне, то потік знаходиться в ламінарному стані, а коли більше – з'являється турбулентність.

Отже, щоб визначити об'ємну витрату (1.7) за допомогою вихорового витратоміра, потрібно знайти добуток швидкості потоку та площі його поперечного перерізу. Швидкість потоку  $v$  виводимо з рівняння Струхалія:

$$v = \frac{f \cdot d}{Sh}. \quad (2.3)$$

Число Струхалія є сталою величиною, характерний діаметр тіла обтікання  $d$  є сталою величиною, а частоту вихорів  $f$  вимірюємо датчиком в потоці.

Площу поперечного перерізу  $S$  можна знайти за формулою:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}. \quad (2.4)$$

Таким чином ми бачимо, що у рівнянні об'ємної витрати змінюваною величиною є лише частота вихорів, отже можна вивести залежність об'ємної витрати від частоти:

$$Q(f) = \frac{f \cdot d \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot Sh}, \quad (2.5)$$

Використовуючи дану формулу, побудуємо графік статичної характеристики (рис. 2.18), де вихідними даними є наступні значення:

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Число Струхаля  $Sh = 0.184$  [15];

Внутрішній діаметр  $D = 0.1$  м;

Характерний діаметр тіла обтікання  $d = 0,025$  м.

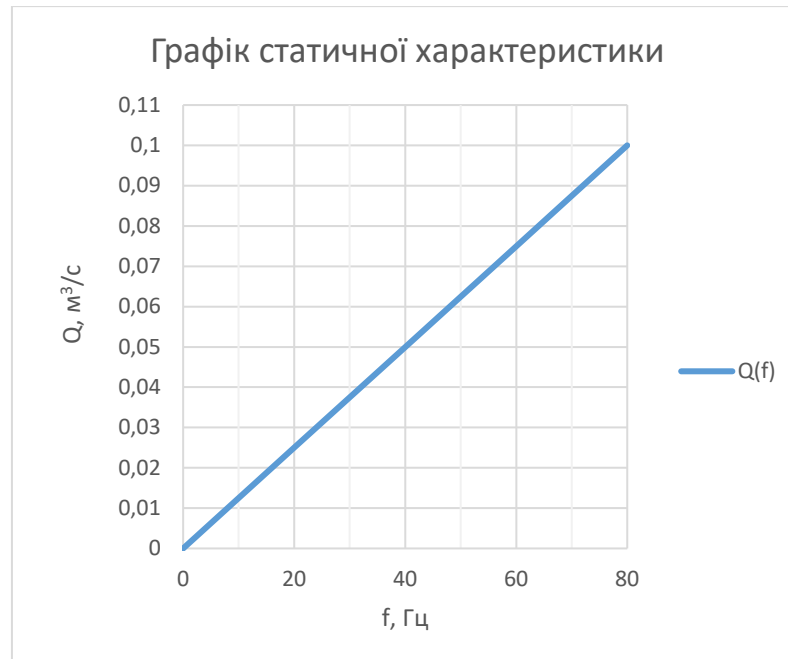


Рисунок 2.18 - Статична характеристика витратоміра

Масова витрата  $Q_m$  – це масова кількість речовини, що проходить через поперечний переріз за одиницю часу, і знайти її можна через об’ємну витрату за формулою:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho. \quad (2.6)$$

Отже, знаючи об’ємну витрату, можна розрахувати і масову витрату.

## 2.5 Розрахунок конструктивних елементів витратоміру

Раніше найпоширенішим підходом для визначення оптимальних форм конструктивних елементів були дослідження з експериментальними зразками. Шляхом послідовних наближень та корегувань або використовуючи теорію планування експерименту, дослідники отримували оптимальний варіант геометрії тієї чи іншої частини виробу. Цей процес займав багато часу і потребував значних матеріальних витрат, що не дозволяло оперативно проводити дослідження чисельної кількості можливих варіацій конструкцій.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Також не завжди вдавалося правильно провести експеримент в силу людського фактору і забезпечити повторюваність результатів. Тому, щоб уникнути зайвих витрат при розробці приладу та пришвидшити дослідження, інженери в більшій своїй кількості почали застосовувати комп'ютерне моделювання, в тому числі для моделювання витратомірів та процесів вихороутворення. Зараз потужності сучасних комп'ютерів дають змогу проводити такі дослідження доволі швидко, а також конструювати деталі найрізноманітніших форм та конструкцій. Для цих цілей ми будемо використовувати програмний продукт SolidWorks.

**Загальний огляд SolidWorks.** SolidWorks — це система автоматизованого проектування для інженерного аналізу та моделювання виробів та процесів різного рівня складності.

SolidWorks є серцем інтегрованого комплексу автоматизації виробництва, за допомогою якого можливе здійснення підтримки всього життєвого циклу виробу згідно з концепцією CALS — технологій, що включають двонаправлений обмін інформацією з рештою застосунків та створення універсального формату документації.

У 1993 році світ вперше побачив дану програму. На той час вона склала конкуренцію таким продуктам як AutoCAD, SDRC I-DEAS і Pro/ENGINEER.

Завданнями, які вирішує Solidworks, є:

Конструкторська підготовка виробництва:

- Трьохмірне проектування виробів (деталей та зборок) різного ступеня складності.
- Створення різних видів документації.
- Промисловий дизайн.
- Проектування комунікацій, як наприклад трубопроводи, тощо.
- Інженерний аналіз (дослідження на теплопередачу, міцність, стійкість, частотний аналіз, електромагнітні розрахунки та інше).
- Швидкий аналіз технологічності на етапі проектування.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

### Технологічна підготовка виробництва:

- Проектування технологічного оснащення.
- Проведення аналізу технологічності конструкції.
- Аналіз технологічності процесів виготовлення (таких як лиття, штампування, вигинання та інші).
- Розробка технологічних процесів.
- Нормування матеріальне та трудове.
- Механообробка - імітація роботи верстата.

### Управління даними і процесами:

- Робота з єдиним типом електронної моделі приладу.
- Цифровий технічний документообіг.
- Можливість колективної розробки.
- Можливість роботи команд на відстані один від одного.
- Архівування технічних документів.
- Проектне управління.
- Захист даних від несанкціонованого доступу.
- Підготовка даних для системи планування ресурсів підприємства та розрахунок вартості виробу.

**Модуль SolidWorks Flow Simulation.** Для даної роботи використовується модуль SolidWorks Flow Simulation, який є модулем гідрогазодинамічного аналізу в середовищі SolidWorks. Для модуля Flow Simulation немає різниці між геометричними сутностями, створеними в SolidWorks або імпортованими в базовий модуль. Забезпечується підтримка для 64-розрядних операційних систем з доступом до всієї доступної оперативної пам'яті. Також використовується багатопроцесорність при вирішенні [16].

Модуль Flow Simulation дає можливість моделювання процесів:

- ідеальні і реальні гази;
- стаціонарні і нестаціонарні течії;
- одно- та багатокомпонентні течії;

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

- стискувані і нестискувані течії;
- зовнішні та внутрішні течії;
- ламінарні і турбулентні течії;
- розрахунки теплопередачі всередині течії;
- течії в пористих середовищах;
- розрахунок траєкторій руху краплин та твердих частинок в потоці та ін.
- різні види конвекції;
- урахування шорсткості стінок;
- радіаційний теплообмін;

Початковими та цінцевими умовами можуть задаватись такі вихідні параметри:

- температура, тиск, параметри турбулентності;
- швидкість, масові та об'ємні витрати;
- напірні характеристики віртуальних крильчаток;
- джерела тепла та змодельовані теплові вентилятори;
- різноманітні типи стінок з такими параметрами, як шорсткість, коефіцієнт тепловіддачі;
- можливість вказати залежність умов та параметрів від часу та координат;

Для управління обчислювальними операціями, SolidWorks генерує розрахункову сітку моделі твердого тіла. Дана сітка підлаштовується в залежності від поля вирішення та геометричних характеристик виробу.

Результуючі дані досліджень виводяться у вікні програми SolidWorks. Також існує можливість виводу інформації у вигляді кольорових епюр, ізоліній і векторів, відображення результатів за допомогою ізоповерхонь.

### **Розробка деталей та конструкції вихорового витратоміру**

Щоб сконструювати витратомір зі статичним тілом обтікання, спочатку окремо побудуємо всі деталі згідно вихідних параметрів та властивостей вимірювального середовища.

Основою даного вимірювального перетворювача є корпус (рис. 2.19), на який в свою чергу розміщуються інші деталі, тому моделюємо його першим.



Рисунок 2.19 - Вигляд корпусу ззовні

На рис. 2.20 відображається гідравлічний канал корпусу у розрізі.

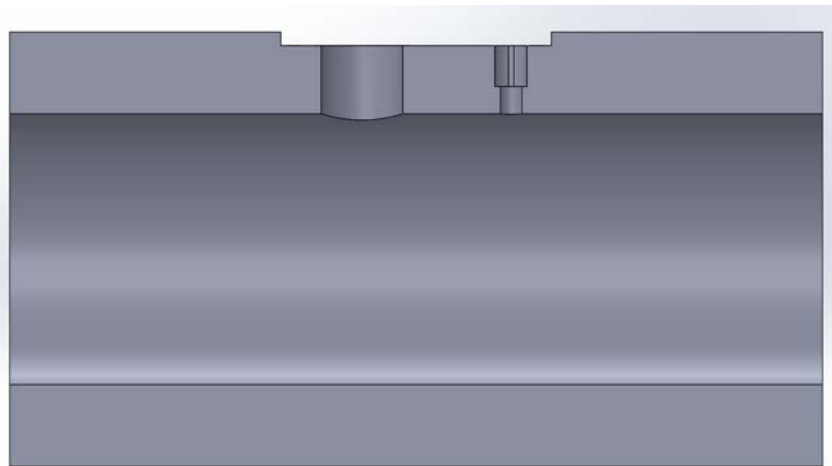


Рисунок 2.20 - Вигляд корпусу всередині

Основою корпусу є труба з нержавіючої сталі, адже вимірювальним середовищем є етиловий спирт, що є корозійно активною речовиною. З практики спиртового виробництва відомо [17], що апаратура, виконана з дешевих і доступних матеріалів, швидко зношується, що викликає витрату великих коштів

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

на передчасний ремонт і заміну обладнання, а продукти корозії до того ж можуть погіршити якість спирту. Тому, для виготовлення корпусу витратоміра, було обрано неіржавну сталь AISI 304 (08X18H10).

Нержавіюча сталь 304 розробки American Iron and Steel Institute - це сплав, що містить незначну масову частку вуглецю та відноситься до групи аустенітних сталей. Високі показники жароміцності і стійкості до корозії зробили цей сорт одним з найбільш затребуваних і використовуваних у всіх сферах промисловості. Головна особливість сталевого сплаву AISI 304 - велика масова частка нікелю і хрому (від 10% і 18% відповідно). Ці елементи і забезпечують високі показники стійкості до корозії і міцність матеріалу. Завдяки включенню до складу сплаву хрому, утворюється поверхнева оксидна плівка, що забезпечує стійкість нержавіючої сталі до впливу хімічно активних речовин. Також гарною особливістю даної неіржавної сталі є легка зварюваність, що буде в нагоді при приварюванні фланців [18].

Для перевірки відповідності обраних розмірних параметрів труби згідно вихідних даних та завданню, розрахуємо параметри трубопроводу.

### **Розрахунок параметрів трубопроводу.**

Матеріал труби – нержавіюча сталь AISI 304.

Допустима напруга при 20 °С:  $\sigma = 184$  МПа [19].

Допуск до товщини труби  $c_{11}$ , згідно ГОСТ 10704-91, складає 10% від товщини стінки, тобто  $c_{11} = 3$  мм.

Максимальний тиск в трубі згідно вихідних даних  $P_{\max} = 4$  МПа.

Зовнішній діаметр труби  $D_{\text{зовн}} = 160$  мм.

Внутрішній діаметр труби  $DN = 100$  мм.

Розрахунок товщини стінок:

$$x_s = \frac{(D_{\text{зовн}} - DN)}{2}, \quad (2.7)$$
$$x_s = \frac{(160 - 100)}{2} = 30 \text{ мм.}$$

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Розрахункова товщина стінок:

$$S_R = \frac{P_{max} \cdot D_{зовн}}{2 \cdot \sigma + P_{max}} + c_{11}, \quad (2.8)$$

$$S_R = \frac{4 \cdot 160}{2 \cdot 184 + 4} + 3 = 4,98 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт запасу міцності:

$$k = \frac{x_S}{S_R}, \quad (2.9)$$

$$k = \frac{30}{4,98} = 6,03.$$

Так як коефіцієнт  $k$  більший за одиницю, то можна сказати, що труба має достатній запас міцності для вирішення задачі.

Проте, у трубі під час виготовлення виробу, робляться 8 отворів глибиною 15 мм, причому спочатку з поверхні труби прибирається 5 мм скругленого шару, щоб утворити плоску поверхню, тому найменшою відстанню між внутрішнім діаметром та отворами під болти є:

$$x_{S2} = \frac{(D_{зовн} - DN)}{2} - 5 - 15, \quad (2.10)$$

$$x_{S2} = \frac{(160 - 100)}{2} - 5 - 15 = 30 - 20 = 10 \text{ мм.}$$

Таким чином, коефіцієнт  $k_2$  буде складати:

$$k_2 = \frac{x_{S2}}{S_R}, \quad (2.11)$$

$$k_2 = \frac{10}{4,98} = 2,01.$$

Отже, навіть у такому випадку коефіцієнт  $k_2$  більший за одиницю, що дозволяє нам говорити про те, що даних параметрів труби достатньо для вирішення всіх поставлених завдань з достатнім запасом міцності.

### Тіло обтікання.

Наступним кроком проєктуємо ТО (рис. 2.21), що встановлюється в корпус і кріпиться в ньому за допомогою чотирьох болтів DIN EN 24016 - M5 x 25 x 16 NC.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

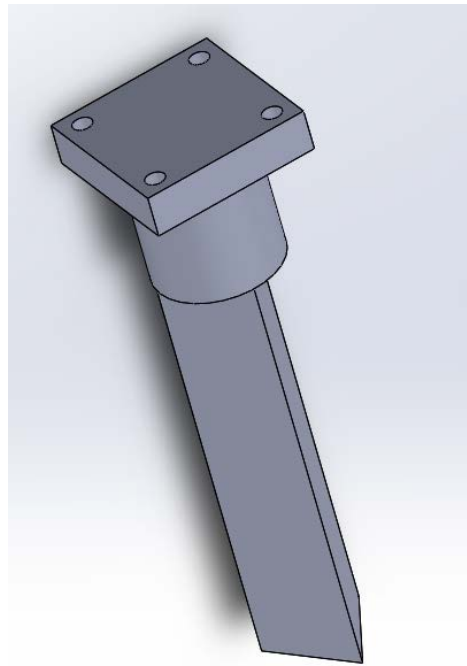


Рисунок 2.21 - Вигляд тіла обтікання

Для того, щоб побудувати ТО, необхідно визначитись з найголовнішими параметрами, що його характеризують. Такими параметрами є вибір форми та розміри. Від їх конфігурації залежить число Струхаля, яке є визначальним у розрахунках конкретного витратоміра, самій наявності процесу вихороутворення, його параметрах та характеристиках. Також від ТО залежить мінімальне число Рейнольдса, при якому утворюються стійкі вихорові коливання.

Основними формами тіл обтікання у вихорових витратомірах є тіла у формі циліндра, призми, пластини, кульки та інші.

Найпростішою у виготовленні є форма циліндра, але вона має недолік, який суттєво погіршує її метрологічні властивості. При обтіканні циліндра, точка відриву вихорів змінює своє положення в залежності від швидкості потоку. При цьому змінюється розмір  $d$  в формулі числа Струхаля, а значить  $i$  в формулі витрати, а тому лінійність вимірювання порушується [6]. Тому, потрібно використовувати тіло обтікання з гострими чіткими кромками, щоб величина найширшого місця тіла обтікання  $d$  залишалася незмінною.

Проте, остаточно визначитись з формою обтікання нам допоможе порівняльна таблиця 2.1, яка наведена у роботі [15]:

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Таблиця 2.1 – Співставлення характеристик різних конфігурацій ТО

Форма тіла обтікання	Коефіцієнт супротиву	Число Струхаля	Співставлення характеристик
Циліндр. Характерний розмір – діаметр $d$	$C = 1,2$ ; майже постійний в ламінарному потоці	$Sh_{max} = 0,21$ . В діапазоні $Re =$ $10^4-10^5$ змінюється на $\pm 1.5\%$	1. Число Струхаля має більше значення ніж при обтіканні пластини 2. Висока точність виготовлення
Пластина. Характерний розмір $d = a \cdot \sin\alpha +$ $b \cdot \cos\alpha$ $\alpha = 70-90^\circ$	$C = 2,01$ ; майже постійний в ламінарному та турбулентному режимі до $M =$ $0,12$	$Sh_{max} = 0,18$ . В діапазоні $Re =$ $0,5 \cdot 10^4-2 \cdot 10^4$ змінюється на $\pm 4\%$	1. Число Струхаля менше ніж при обтіканні циліндра 2. Висока стабільність утворення вихорів 3. Можливість вимірювання безпосередньо позаду пластини 4. Високий супротив

Продовження таблиці 2.1

<p><math>\Delta</math> – подібне тіло. Характерний розмір <math>d = a \cdot b</math> – площа поверхні, яка повернута до течії</p>	<p><math>C = 0,19</math>; майже постійний в ламінарному потоці</p>	<p><math>Sh = 0,18</math>. В діапазоні <math>Re = 10^4 - 10^5</math> змінюється на <math>\pm 2\%</math></p>	<p>1. Супротив менше, ніж при обтіканні пластини 2. Можливість вимірювання перед тілом обтікання 3. Висока стабільність утворення вихорів</p>
---	--	---	---

З таблиці 2.1 видно, що найбільшу похибку 4% числа Струхаля в діапазоні чисел  $Re$  від 5000 до 20000 має пластина, а також вона має найбільший коефіцієнт супротиву, тому дана форма нам не підходить. Циліндр, незважаючи на те, що має велику точність виготовлення, не підходить через змінювану точку відриву вихорів. Отже, обираємо форму у вигляді призми з основою рівностороннього трикутника.

Для визначення розмірів рівностороннього трикутника в основі тіла обтікання, звернемося до роботи [15], в якій сказано, що для утворення стійких вихорів після ТО при використанні трикутної призми, має виконуватись наступне співвідношення:

$$\frac{d}{D} < 0,3. \quad (2.12)$$

Графічне зображення характерного діаметру тіла обтікання  $d$  та внутрішнього діаметру трубопроводу  $D$  показано на рис.2.22.

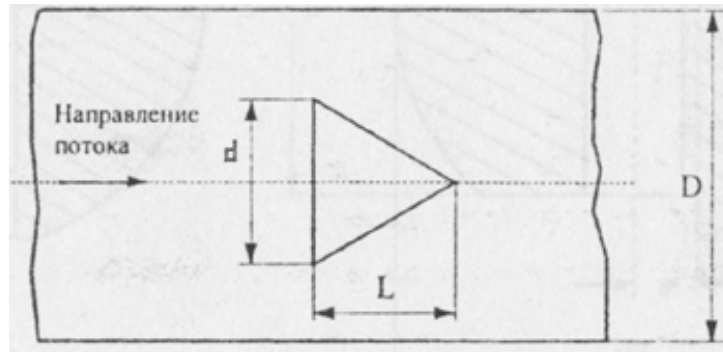


Рисунок 2.22 - Призматичне тіло обтікання

За вихідними даними, діаметр  $D = 100$  мм. Отже, сторона рівностороннього трикутника повинна бути:

$$h < 0,3D,$$

$$h < 0,3 \cdot 100,$$

$$h < 30 \text{ мм.}$$

Якщо дотримується це відношення, то число Струхаля є постійним і рівним  $0,184 \pm 2\%$  при числах Рейнольдса  $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$  [15].

Враховуючи також джерело [20], в якому рекомендується обирати довжину основи трикутного тіла меншою за  $\frac{D}{3}$ , а також щоб задовільнити умови зручності виготовлення та кріплення в корпусі, визначаємо сторони рівностороннього трикутника рівними 25 мм, щоб дана трикутна призма вписувалася в круг діаметром 30 мм (рис. 2.23). В результаті наше тіло обтікання буде мати вигляд:

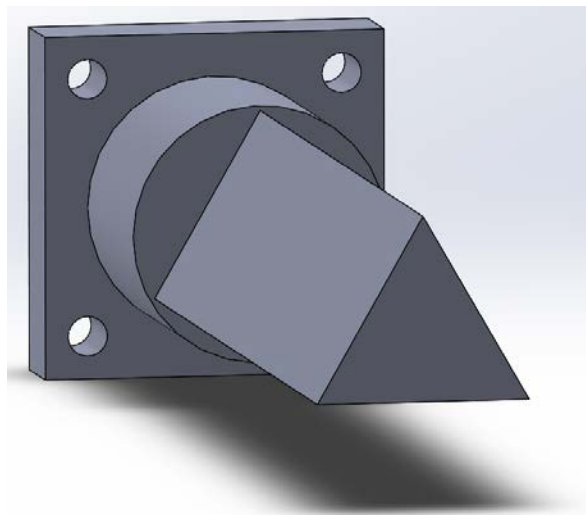


Рисунок 2.23 - Вигляд на призму з основою рівностороннього трикутника

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		48

### Первинний вимірювальний перетворювач.

Датчик (сенсор, давач) – електронний перетворювач сигналу будь-якої природи в електричний сигнал.

Датчик згинального моменту (ДЗМ) – це прилад, що відноситься до вимірювальної техніки, зокрема до п'єзоелектричних датчиків для реєстрації частоти вихоротрування у вихорових ВП.

Розглянемо датчик згинального моменту 108М. Його вигляд наведено на рис. 2.24, на якому видно, що ДЗМ містить корпус 1, до якого прикріплене крило 6, товщина якого зменшується від корпусу і до вільного кінця пластини так, що кут між площинами пластини становить  $1,5 \dots 4^\circ$  (балка рівного опору). Ця пластина занурюється в потік речовини у трубі витратоміра за тілом обтікання так, що її площина симетрії лежить на осі трубопроводу і паралельна потоку [21].

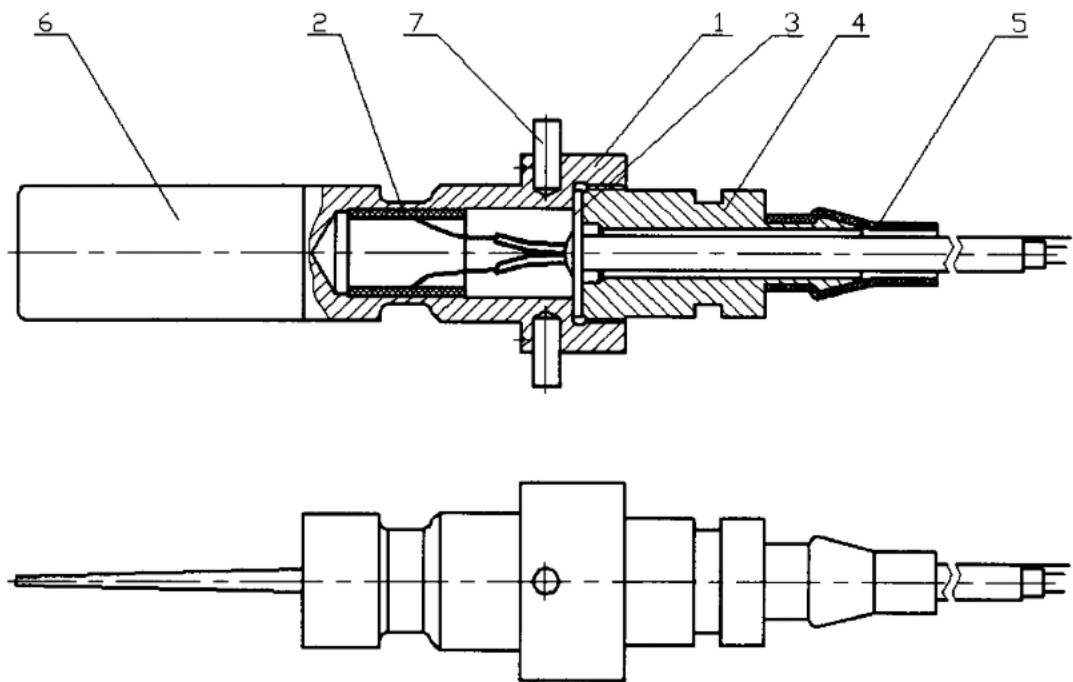


Рисунок 2.24 - Схема датчика згинального моменту:

1 – корпус датчика; 2 – п'єзоелемент; 3 – струмознімач; 4 – ніпель; 5 – дріт; 6 – зовнішня пластина (крило); 7 – виступи, що дозволяють досягти певної орієнтації датчика в трубопроводі

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Вихори діють на крило зі змінним тиском з частотою

$$f = \frac{Sh \cdot V}{d}. \quad (2.13)$$

Число Струхаля  $Sh$ , яке в широкому інтервалі чисел Рейнольдса  $200 < Re < 200000$ , змінюється слабо і близьке до 0,2 [21].

Сили тиску, що діють на крило, викликають його періодичні згини, що передаються на корпус. Всередині корпусу встановлено п'єзоелемент у вигляді порожнього циліндра, поляризованого в радіальному напрямку; зовнішня циліндрична поверхня покрита суцільним електродом, а на внутрішній поверхні електрод розрізаний на дві частини, причому площа розрізу збігається з площиною крила. При вигині крила, наприклад, вправо, права половина п'єзоелемента відчуває осьовий стиск, а ліва - розтягнення, і між внутрішніми електродами п'єзоелемента виникає за рахунок п'єзомодуля п'єзокераміки електричний сигнал - напруга (в режимі холостого ходу) або заряд (в режимі короткого замикання), частота якого дорівнює частоті зовнішнього впливу на крило. По електричному дроту, кінці якого припаюються до електродів п'єзоелемента, сигнал передається на реєструючі прилади [21].

Схема підключення датчика зображена на рисунку 2.25.

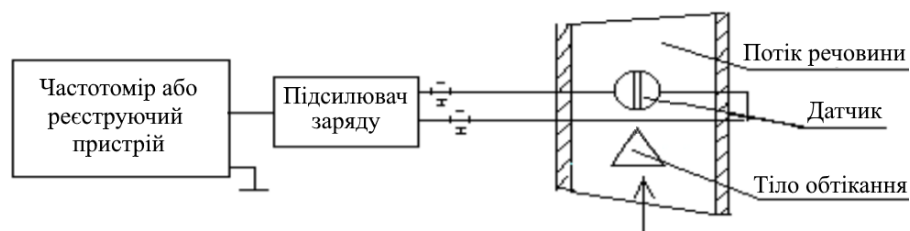


Рисунок 2.25 - Підключення датчика 108М

Недоліком ДЗМ 108М є обмеження в використанні до граничної температури  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Це обумовлено наступними причинами:

- п'єзоелектричний матеріал ЦТС-83г має точку Кюрі близько  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$  і граничні температури при тривалій роботі  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Інші п'єзоелектричні матеріали системи цирконат-титанат свинцю мають температуру точки Кюрі, що не перевищує  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ЦТС-21), і максимальну робочу температуру  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  [21];

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

- припій ПСР-2,5, що застосовується, має температуру плавлення 294 °С [21];

- електричний дріт АВКТ-6 має термостійкість 300 °С [21].

Проте, для нашого витратоміра, діапазону вимірювання до 290 °С буде достатньо, тому необхідності у дорожчих датчиках немає.

Перевагами п'єзоелектричного датчика згинального моменту є характеристики, що наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристики датчика М108 [22]

Характеристика	Датчик 108М
Коефіцієнт перетворення, нКл / Н * м, не менше	100
Діапазон вимірювань, мН * м	від 0 до 100
Електрична ємність, пФ, не менше	800
Опір ізоляції, Ом, не менше	10 <sup>10</sup>
Власна частота, кГц, не менше для L = 10; 16; 25 L = 32; 40; 64	6,0 1,0
Діапазон робочих температур, Т, °С	Від -60 до 290
Зміна коефіцієнта перетворення від температури,%, не більше	Від -10 до 30
Максимальний робочий тиск, МПа	30
Ступінь захисту від води і пилу по ГОСТ 14254-80	IP 68
Габарити (без кабелю), мм, не більше	Ø12x(29+L)
Маса, г, не більше	20

Розміри сенсора 108М наведені на рис. 2.26.

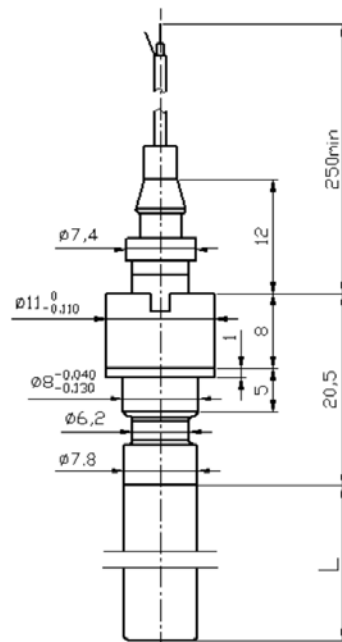


Рисунок 2.26 - Габаритні розміри конструкції датчика згинального моменту  
108М:

L – розмір згинального крила, що може складати 10..120 мм [22]

Приклад схеми установки п'єзоелектричного датчика у трубопроводі наведений на рисунку 2.27 .

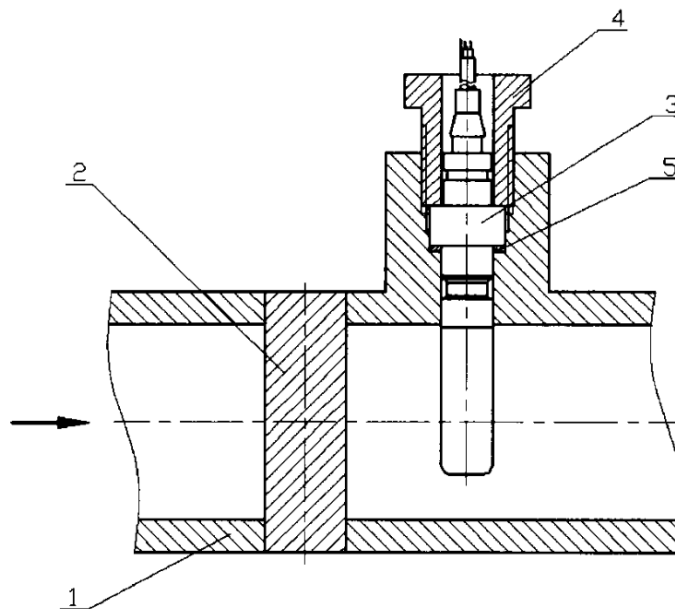


Рисунок 2.27 - Схема вихорового витратоміра з вимірювачем згинального моменту:

1 – трубопровід; 2 – тіло обтікання; 3 – датчик 108М; 4 – штуцер; 5 – прокладка

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Згідно всіх даних про датчик, моделюємо його у середовищі моделювання SolidWorks (рис 2.28).

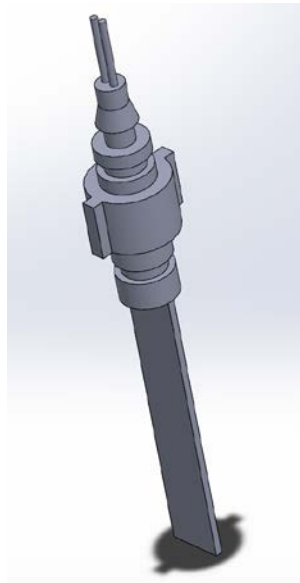


Рисунок 2.28 - Модель датчика згинального моменту

### **Стійка блоку електроніки.**

Стійка блоку електроніки – це деталь вихорового вимірювального перетворювача, функцією якої є закривання всіх внутрішній комунікацій витратоміра, в основному електричних дротів, та інших складових деталей, від зовнішніх впливів. Також, зверху на стійку кріпиться обчислювальний блок електроніки. Отже, головними вимогами до даної деталі є достатня внутрішня площа для вміщування, виступаючих над поверхнею корпусу, елементів тіла обтікання, п'єзоелектричного датчика та його дротів, а також має бути передбачене кріплення під обчислювальний блок.

Згідно даних, що деталь тіла обтікання виступає над поверхнею корпусу на 10 мм + висота болта 4 мм, а також згідно висоти виступаючого ніпеля, що утримує сенсор, щоб забезпечити не екстремальний згин дротів, що виходять з ДЗМ, внутрішню стінку робимо висотою 25 мм. Беручи до уваги параметри плоскої поверхні на корпусі, зовнішню довжину коробки стійки робимо 100 мм, ширину – 55 мм. Також передбачаємо отвори для чотирьох болтів для кріплення стійки до корпусу та різьбу у трубі зверху для встановлення блоку електроніки.

Результат моделювання зображено на рисунках 2.29 та 2.30.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

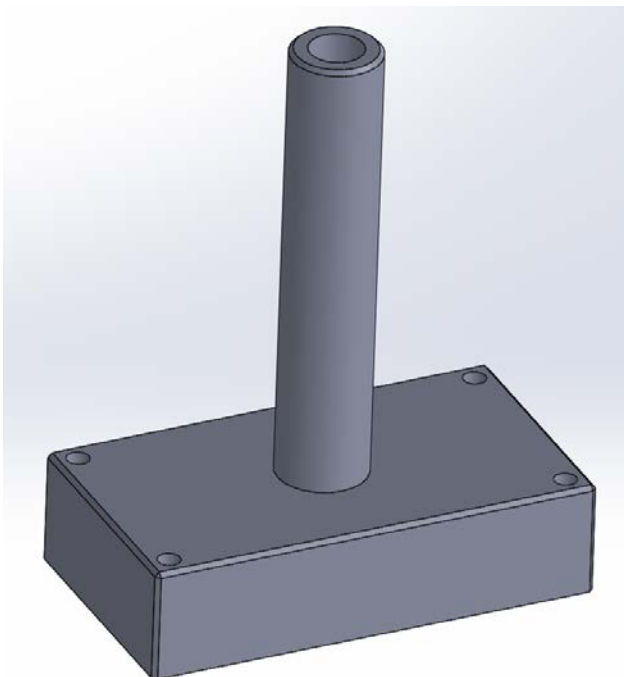


Рисунок 2.29 - Зовнішній вигляд стійки блоку електроніки

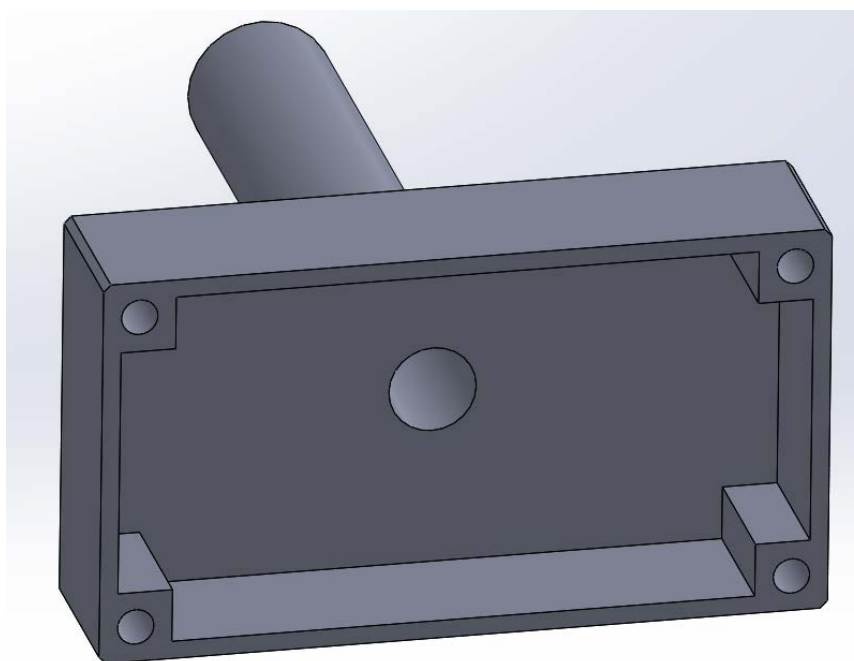


Рисунок 2.30 - Вигляд знизу на стійку блоку електроніки

**Дослідження процесу руху етилового спирту в сконструйованому витратомірі.**

Для того, щоб провести дослідження поведінки речовини у трубі витратоміра, потрібно задати початкові умови у налаштуваннях проєкту Flow Simulation. Використаємо майстер проєктів, щоб задати всі необхідні параметри.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Першим вікном, при відкритті майстеру проєктів, є вікно, в якому можна дати ім'я проєкта та залишити до нього коментар (рисунки 2.31).

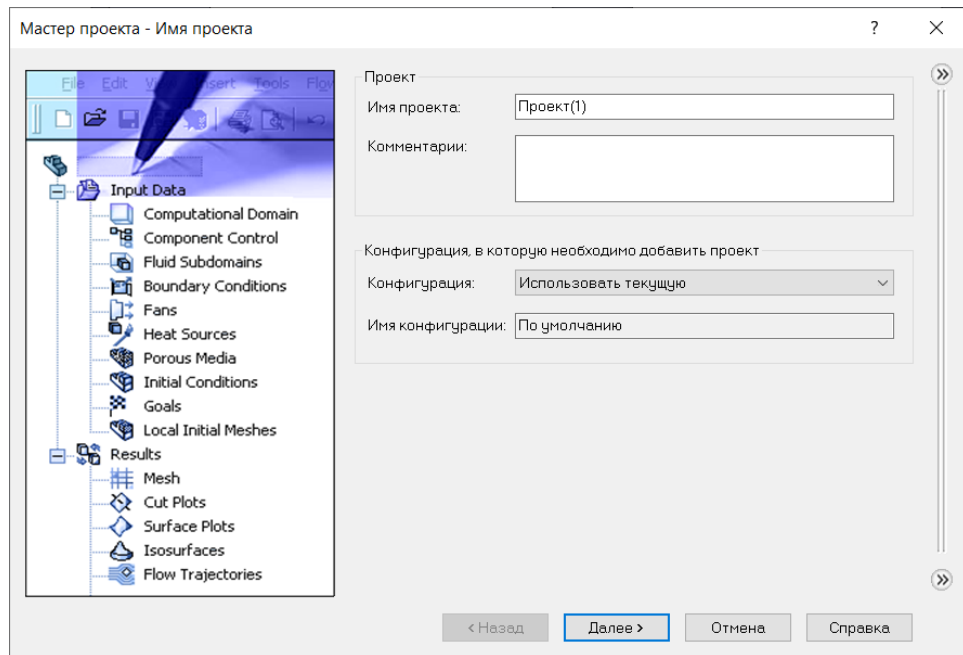


Рисунок 2.31 - Вікно майстера проєкту – «Ім'я проєкту»

В наступному вікні нам пропонується обрати систему одиниць вимірювання та відразу переглянути для яких параметрів які використовуються одиниці вимірювання. Обираємо систему SI (рисунки 2.32).

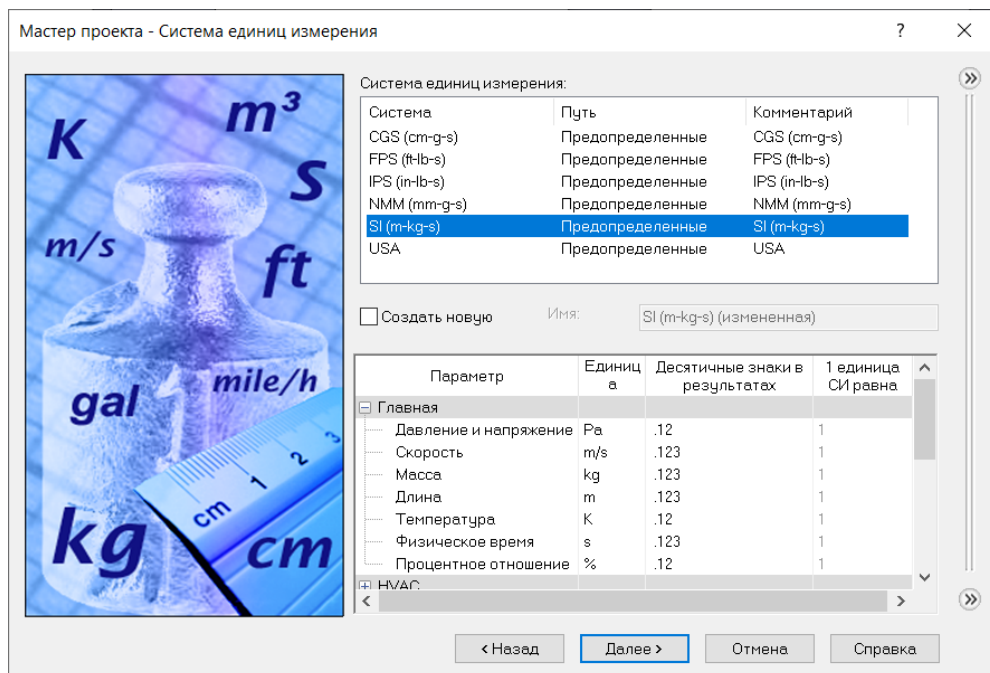


Рисунок 2.32 - Вибір системи одиниць вимірювань

Далі потрібно обрати чи є наша задача внутрішня, чи зовнішня, а також інші фізичні моделі, якими додатково можуть охарактеризувати та вплинути на виконання вашої задачі. Обираємо тип задачі внутрішній (див. рисунок 2.33), а також ставимо галочку навпроти пункту «Нестационарність», щоб моделювання вихорів було можливим.

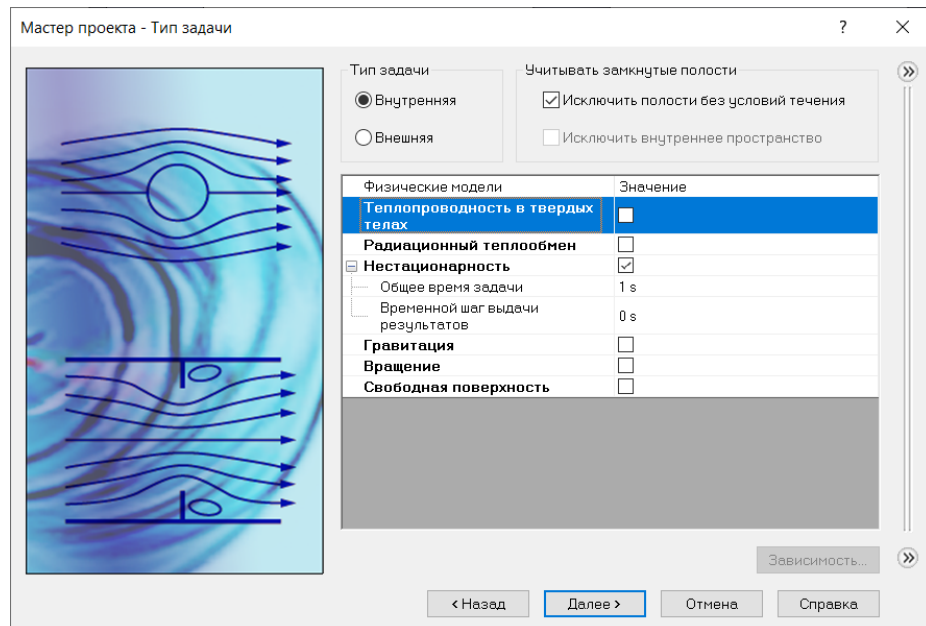


Рисунок 2.33 - Вікно з вибором типу задачі

На рис. 2.34 в параметрах текучого середовища обираємо етанол та переходимо далі.

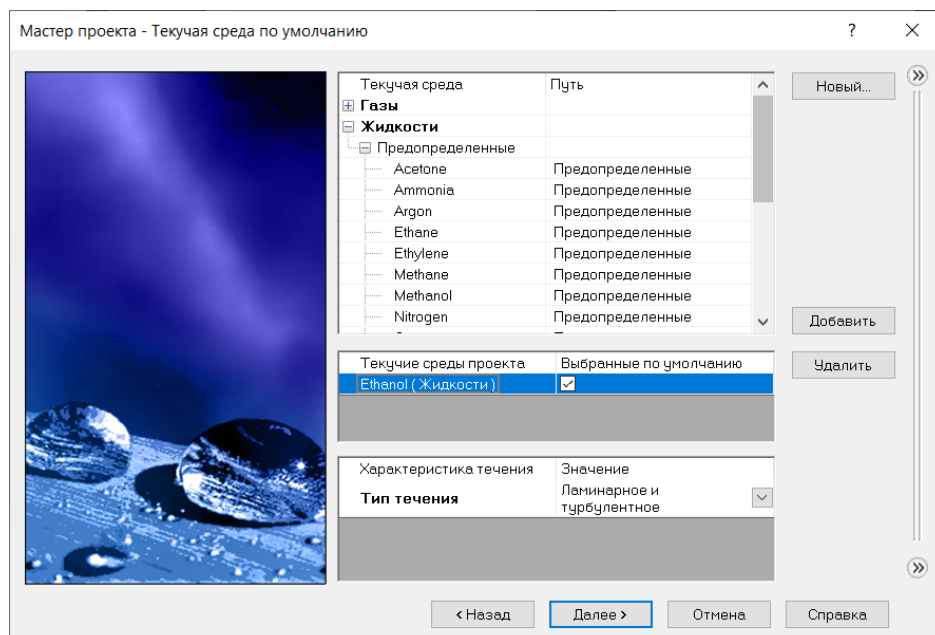


Рисунок 2.34 - Вибір середовища дослідження

У наступному вікні умови на стінках залишаємо за замовчуванням.

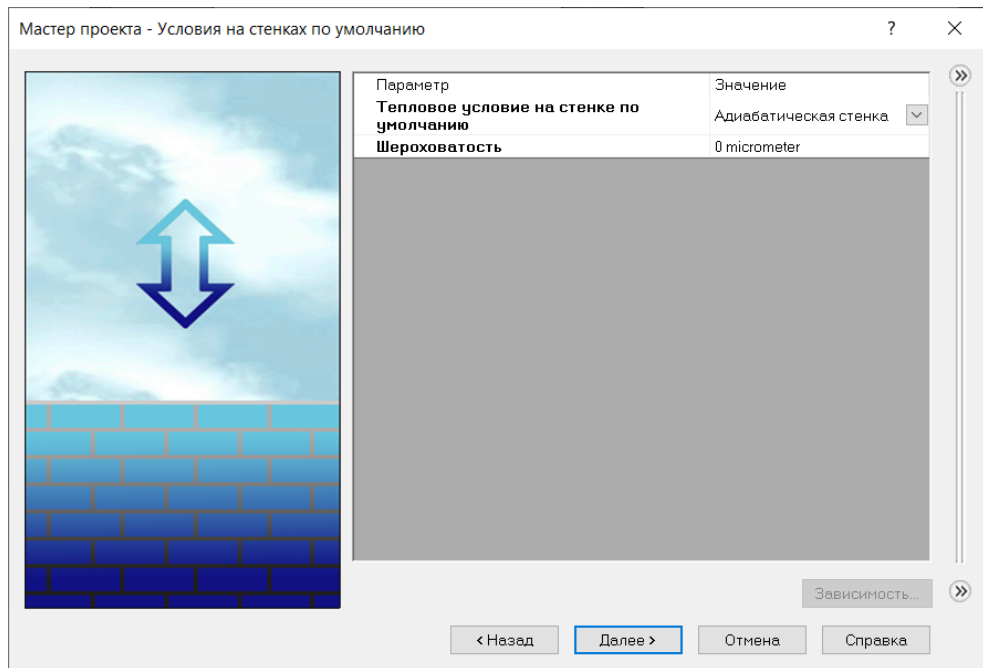


Рисунок 2.35 - Вибір характеристик стінок

І у фінальному вікні (рис. 2.36) для зручності відразу задаємо температуру в 313.2 К, щоб в майбутньому, при вказуванні параметрів, не потрібно було кожного разу вручну змінювати температуру на необхідну за вихідними умовами.

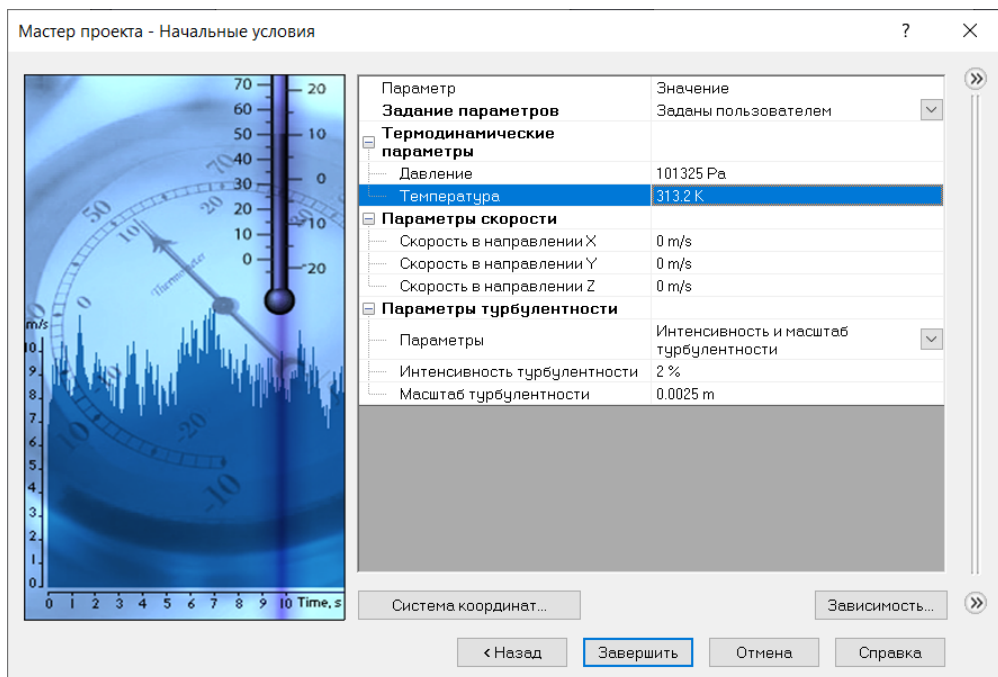


Рисунок 2.36 - Вікно з початковими умовами

Після закриття майстеру проєктів, програма сама запропонує створити заглушки на кінцях витратоміра (рисунок 2.37), щоб далі були можливі розв'язування завдань.

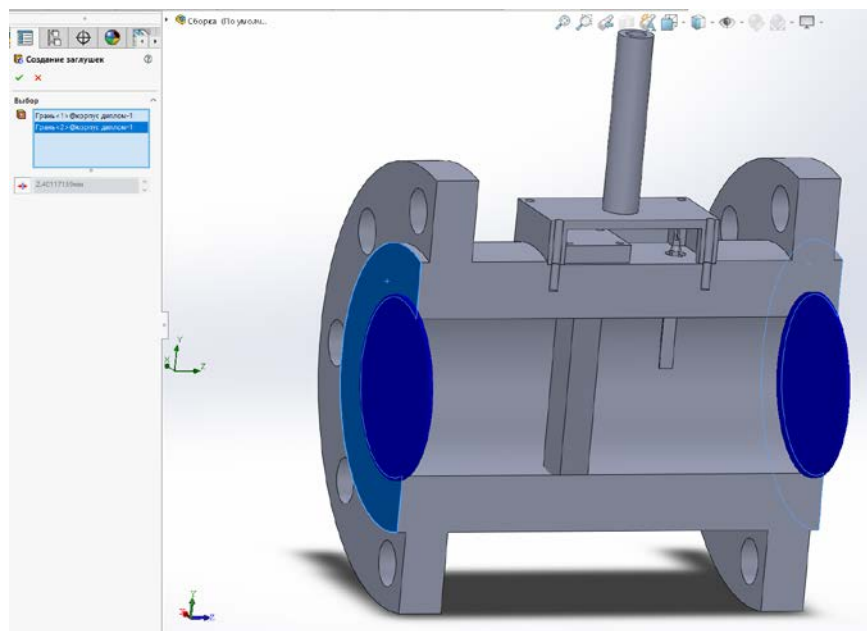


Рисунок 2.37 - Створення заглушок до витратоміра.

Зараз наш проєкт сформовано, тому залишається задати наступні граничні умови згідно вихідних даних:

1. Об'ємна витрата на вході витратоміра  $Q = 0.001 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
2. На виході атмосферний тиск  $P = 101325 \text{ Па}$ .

Також, для роботи з вихорами, важливим параметром є деталізація сітки моделі, тому встановлюємо її в автоматичному режимі зі значення 3 на 6 (рис. 2.38).

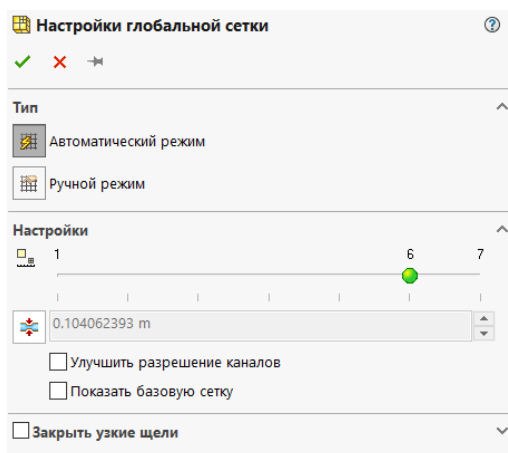


Рисунок 2.38 - Налаштування сітки

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Після цього значно зросте час обробки результатів дослідів, але їх точність, в нашому випадку, також підвищиться.

Отже, запустивши моделювання потоку, отримуємо утворення вихорів після тіла обтікання, які зображено на рисунках 2.39 та 2.40 . Для зручності перегляду результатів зробили поперечний переріз приладу по осі XZ.

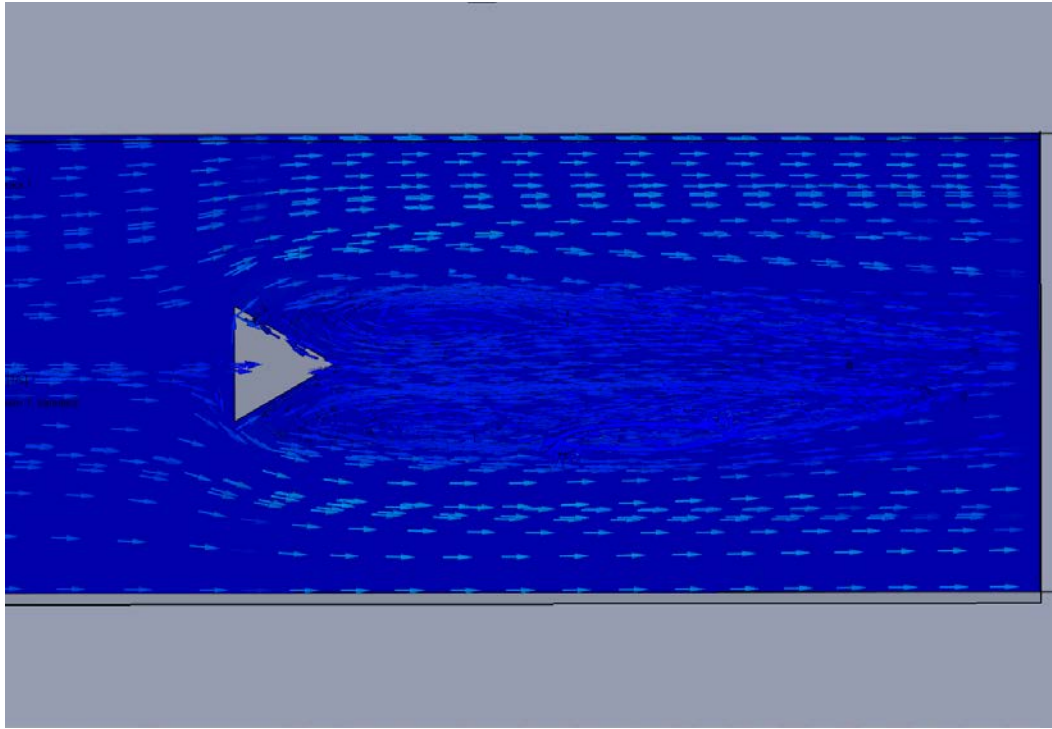


Рисунок 2.39 - Результат моделювання у вигляді частинок.

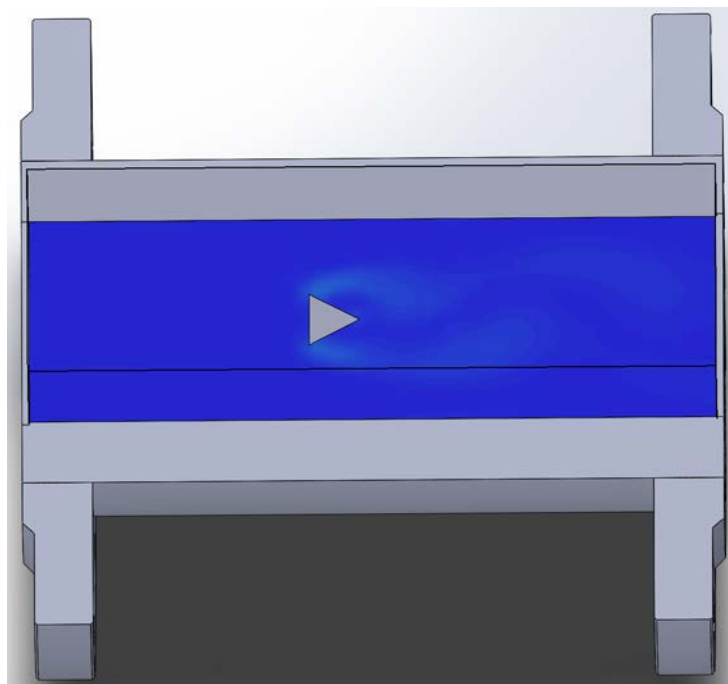


Рисунок 2.40 - Результат моделювання у вигляді завихорювань

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Загалом, сконструйований вихоровий витратомір у програмному середовищі SolidWorks показано на рисунку 2.41.

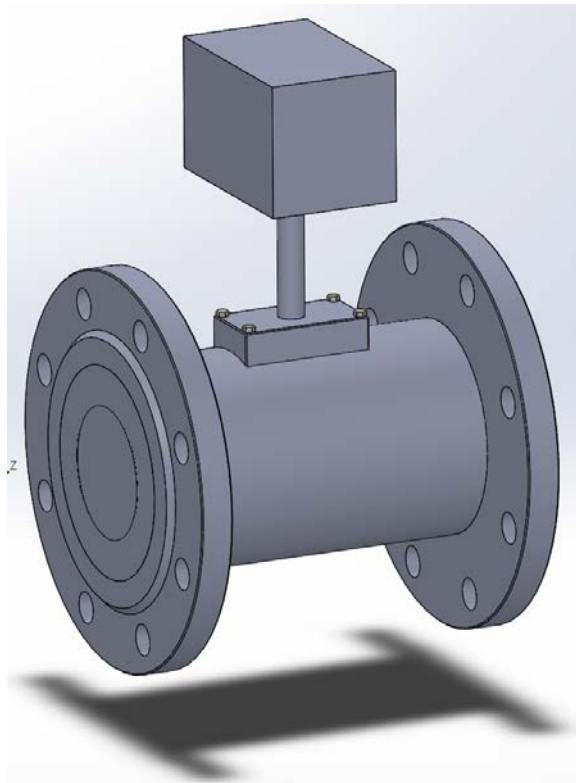


Рисунок 2.41 - Загальний вигляд змодельованого витратоміра ззовні

## 2.6 Розрахунок метрологічних характеристик витратоміру

Для того, щоб виявити недоліки та переваги вихорового ВП в порівнянні з іншими витратомірами, необхідно провести порівняння за певними ознаками. Однією із таких ознак є сукупність критеріїв, які відносять до метрологічних характеристик.

До основних метрологічних характеристик можна віднести:

- діапазон вимірювань
- похибка вимірювань
- стабільність показів в роботі та надійність
- втрата тиску

Таким чином, витратомір буде тим краще, чим менша у нього похибка вимірювань, втрата тиску та чим більший діапазон вимірювань і стабільність показів.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

**Стабільність характеристик.** Даний параметр зручно оцінювати по інтегральному показнику – часу міжповірного інтервала. Чим більший допускається міжповірочний інтервал для даного типу приладів, тим більшу надійність роботи він має і тим довше зберігаються незмінними його характеристики і тим більша стабільність показів приладу [6].

Метрологічний критерій порівняння  $K_m$  може бути записаний так [6]:

$$K_m = \frac{Q}{\Delta\%} (1 + \ln T), \quad (2.14)$$

де  $Q = Q_{\max}/Q_{\min}$  – діапазон вимірювань, тобто відношення максимальної вимірюваної витрати до мінімальної витрати, що може реєструвати витратомір;  $\Delta\%$  - середня величина відносної похибки приладу, що виражається у відсотках;  $T$  – міжповірочний інтервал.

У рівнянні (2.14) враховується, що мінімальна тривалість міжповірного інтервалу складає 1 рік і його зменшення призведе до різкого зниження якості приладу. Згідно загальним положенням теорії надійності, вірогідність безвідмовної роботи  $P$  пов'язана з інтенсивністю відказів  $\lambda$  у співвідношенні [6]:

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (2.15)$$

де  $t$  – час роботи.

Досконалість конструкції приладу та якість виготовлення напряму пов'язані з показником інтенсивності відказів  $\lambda$ . При заданій вірогідності  $P(t) = \text{const}$ , час роботи (2.16) зворотно пропорційний інтенсивності відказів  $\lambda$  [6]:

$$t = \frac{1}{\lambda}, \quad (2.16)$$

Тому критерій якості повинен бути пропорційний часу міжповірного інтервалу, який відповідає певній вірогідності безвідмовної роботи теплолічильників, самописців і т.п., правила експлуатації обладнання, для якого призначений витратомір, та ін.. Тому проста пропорційність між критерієм метрологічної якості та терміном перевірки недопустима. Наприклад, прилад, що має достатню стабільність характеристик для 2-4 років роботи без перевірки, може

мати встановлений міжповірочний інтервал 1 рік тому, що він встановлюється в комплекті з самописцем, який має такий міжповірочний інтервал. Дана обставина дозволяє рахувати, що найбільш припустимим є логарифмічна залежність між критерієм метрологічної якості витратоміра  $K_m$  та тривалістю міжповірочного інтервалу [6].

**Мінімальна об'ємна витрата.** Необхідною умовою для визначення мінімальної витрати вихоровим витратоміром є утворення самих вихорів, які реєструє ВП. Для того, щоб за тілом обтікання утворювалися вихори, необхідно, щоб у трубі протікала течія у турбулентному режимі. Перехід речовини з ламінарного режиму до турбулентного визначається критичним числом Рейнольдса  $Re_{кр}$ . Для рідин це значення складає 2300. Проте, з появою турбулентного режиму, не відразу можна вимірювати витрату вихоровим методом, адже при невеликих значеннях числа Рейнольдса, число Струхаля є нестабільним та швидко змінюється, тому вимірювання можливе лише при досягненні числа Рейнольдса певного значення. У роботі [15], багатьох виданнях, дослідженнях та статтях, а також у документаціях до існуючих вихорових витратомірів (наприклад [8]) сказано, що для стійкого утворення вихорів та для постійності числа Струхаля, необхідно, щоб число Рейнольдса досягло значення приблизно  $10^4$ . Отже, з рівняння (2.2) можна визначити мінімальну витрату, яку може реєструвати витратомір:

$$Q_{min} = \frac{v_{кін} \cdot S \cdot Re_{min}}{D}, \quad (2.17)$$

$$v_{кін} = \frac{\eta}{\rho} = \frac{1,19 \cdot 10^{-3}}{790,5} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = S = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

$$Q_{min} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{0,1} = \frac{11,77 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 10^{-1}} = 0,00117 \text{ м}^3/\text{с}.$$

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Перевіримо правильність розмірності знайденої величини:

$$\frac{\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \text{м} = \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Розмірність вірна. Переведемо значення витрати в звичні для документацій витратомірів  $\text{м}^3/\text{год}$ :

$$0,00117 \cdot 3600 = 4,2 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Отже, мінімальна об'ємна витрата, яку може фіксувати даний витратомір, становить  $4,02 \text{ м}^3/\text{год}$ .

**Максимальна об'ємна витрата.** Щоб визначити максимальну об'ємну витрату, яку може вимірювати вихоровий ВП, потрібно знати максимальне значення числа Рейнольдса, при якому число Струхалія є стабільним та не сильно виходить за рамки середнього значення, яке ми беремо як константу. Краще це зрозуміти дає змогу рис. 2.42, на якому зображена залежність числа Струхалія від числа Рейнольдса.

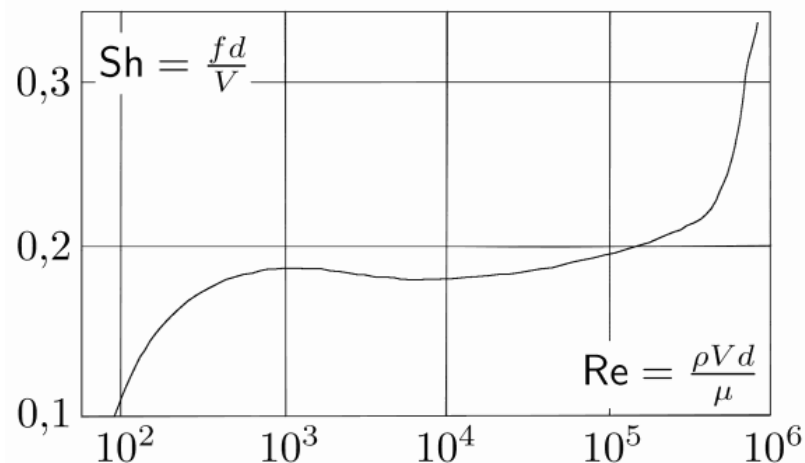


Рисунок 2.42 – Залежність числа Струхалія від числа Рейнольдса

Таким чином, для стабільного вимірювання витрати з похибкою числа Струхалія не більше 2%, можна брати максимальне число Рейнольдса рівним  $4 \cdot 10^5$  [6]. Отже, максимальну об'ємну витрату, яку може реєструвати витратомір, можна знайти за наступною формулою:

$$Q_{max} = \frac{v_{кин} \cdot S \cdot Re_{max}}{D}, \quad (2.18)$$

$$Q_{max} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^5}{0,1} = \frac{47,1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-1}} = 0,047 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$0,047 \cdot 3600 = 169,2 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Отже, сконструйований витратомір може вимірювати значення витрати до 169,2 м<sup>3</sup>/год.

**Діапазон вимірювання витрати.** Діапазон вимірювання об'ємної витрати витратоміра це відношення максимальної та мінімальної об'ємної витрати, які ВП здатний реєструвати. Знаходимо це значення за наступною формулою:

$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} = \frac{169,2}{4,2} = 40,2 \approx 40 \quad (2.19)$$

Отже, діапазон вимірювання у розробленого витратоміра складає 1:40.

**Втрата тиску.** Для того, щоб визначити втрату тиску після проходження рідини трубопроводу витратоміра, скористаємося формулою, яка наведена у роботі [8]:

$$\Delta P = \frac{2,16 \cdot 10^{-5} \cdot (\zeta_{то} + \zeta_{ппп}) \cdot \rho \cdot Q_{max}^2 \cdot T}{(P_a + P) \cdot D^4}, \quad (2.20)$$

де  $P_a$  – атмосферний тиск, що складає 101325 Па;

$\zeta_{то}, \zeta_{ппп}$  – коефіцієнти втрати тиску на тілі обтікання та приладі підготовки потоку, що беруться з довідникової таблиці.

$$\Delta P = \frac{2,16 \cdot 10^{-5} \cdot (0,95 + 1,8) \cdot 790,5 \cdot 160^2 \cdot 293,2}{(101325 + 4 \cdot 10^6) \cdot 0,1^4} = \frac{3,5 \cdot 10^6}{4,1 \cdot 10^2} = 8536,6 \text{ Па}$$

Отже, максимальна втрата тиску складає 8536,6 Па, що є немалим числом, але цілком нормальним для вихорових витратомірів.

Згідно формули (2.20), а також розрахованих значень найменшої та найбільшої об'ємної витрати, що може вимірювати даний витратомір, побудуємо графік залежності втрати тиску від витрати. Результати зображені на рисунку 2.43.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64



Рисунок 2.43 – Графік залежності втрати тиску від витрати

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

### 3. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Опис конструкції приладу

Основою конструкції вихорового витратоміра зі статичним тілом обтікання (рисунок 3.1) є корпус, на який по обидва боки труби приварюються два фланці, щоб мати змогу приєднатись до труби з протікаючим вимірювальним середовищем. Зверху корпусу вставляється тіло обтікання у спеціально відведений отвір та кріпиться за допомогою чотирьох болтів М5 х 25 х 16. У другий спеціальний отвір встановлюється датчик згинального моменту на прокладку, та притискається зверху закручуванням ніпеля. Зафіксовані тіло обтікання та датчик закриваються зверху стійкою блока електроніки, яка прикручується до корпусу чотирьома болтами М5 х 40 х 16. На стійку встановлюється блок електроніки, що виконує всі обчислення.

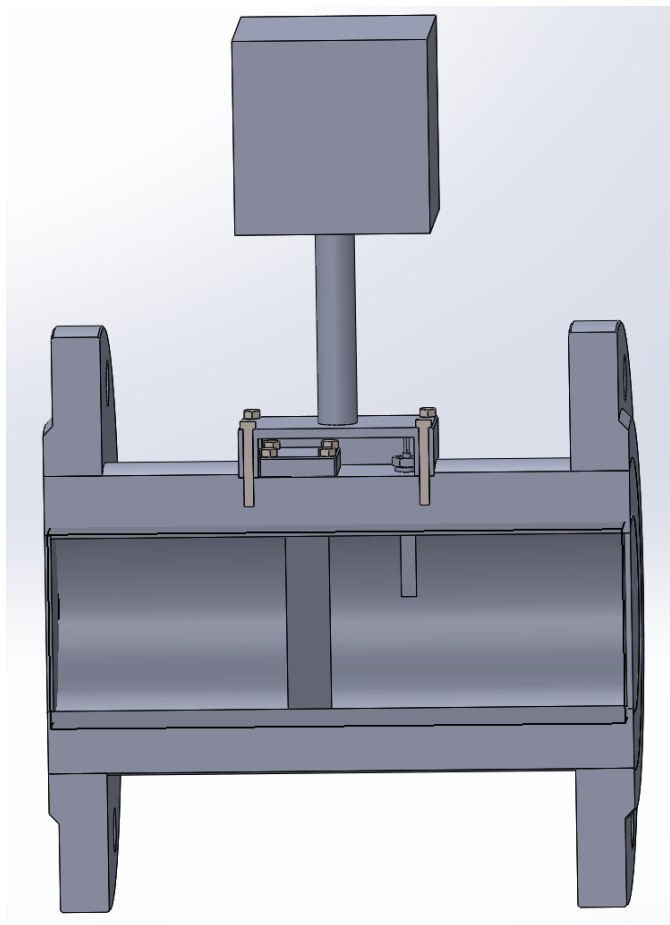


Рисунок 3.1 - Конструкція вихорового витратоміра у розрізі

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

### 3.2 Розрахунок технологічності приладу

Технологічність приладу це поняття, що включає в себе такі фактори, як складність складання виробу загалом та окремих його складальних одиниць без доробок, пригонки, селективного складання. Це досягається використанням доцільних допусків у розмірних, електричних та кінематичних ланцюгах. Таким чином, технологічним приладом є такий виріб, що забезпечує найбільшу уніфікацію на нормалізацію деталей, можливість автоматизації процесів складання, причому з паралельністю та диференціацією, використання найменшої необхідної кількості матеріалів та обладнання для виготовлення, загалом скорочення часу і матеріальних витрат виробничого циклу.

Опис уніфікації деталей, складальних одиниць та операцій показано у таблицях 3.1, 3.2 та 3.3.

Таблиця 3.1 – Уніфікація деталей витратоміра

№	Назва деталі	Кількість деталей	Уніфікація
1	Корпус	1	не уніф.
2	Тіло обтікання	1	не уніф.
3	Стійка блоку електроніки	1	не уніф.
4	Блок електроніки	1	не уніф.
5	Фланець ГОСТ 33259-2015, DN-160	2	уніф.
6	Болт з шестигранною головкою DIN EN 24016 – M5 x 25 x 16 NC	4	уніф.
7	Болт з шестигранною головкою DIN EN 24016 – M5 x 40 x 16 NC	4	уніф.
8	Датчик згинального моменту	1	уніф.
9	Ніпель - ГОСТ 13956-74	1	уніф.
10	Прокладка - ГОСТ 15180-86	1	уніф.

Таблиця 3.2 Уніфікація складальних одиниць приладу

Назва складальної одиниці	Кількість деталей	Уніфікація
Корпус в зборі	17	не уніф.

Таблиця 3.3. Уніфікація операцій приладу

№	Назва операції	Уніфікація
1	Приварити	уніф.
2	Встановити	не уніф.
3	Загвинтити	уніф.

### Критерій складності виробу.

Критерій складності виробу можна знайти за наступною формулою:

$$K_{скл} = \frac{N_{\Sigma}}{n_{\Sigma}}, \quad (3.1)$$

де  $N_{\Sigma}$  - число складальних одиниць виробу;

$n_{\Sigma}$  - число деталей виробу по специфікації;

Значення критерія складності виробу лежать в наступних діапазонах:

- $K_{скл} < 0,2$  – технологічність незадовільна;
- $0,2 < K_{скл} < 0,4$  – технологічність задовільна;
- $K_{скл} > 0,4$  – технологічність добра.

Підставивши значення в формулу (3.1) для знаходження критерію складності виробу отримуємо:

$$K_{скл} = \frac{1}{17} = 0,06.$$

Критерій складності виробу менше значення 0,2, тому технологічність за критерієм складності – незадовільна.

### **Критерій уніфікації виробу.**

Критерій уніфікації приладу можна знайти за наступною формулою:

$$K_y = \frac{(N_y + n_y)}{(N\Sigma + n\Sigma)}, \quad (3.2)$$

де  $N_y$  – число уніфікованих складальних одиниць;

$n_y$  – число уніфікованих деталей;

Значення критерія уніфікації виробу лежать в наступних діапазонах:

- $K_y < 0,25$  – технологічність незадовільна;
- $0,25 < K_y < 0,5$  – технологічність задовільна;
- $K_y > 0,5$  – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (3.2), отримуємо критерій уніфікації:

$$K_y = \frac{(0 + 6)}{(1 + 17)} = \frac{6}{18} = 0,33.$$

Значення критерію уніфікації лежить в діапазоні  $0,25..0,5$ , тому технологічність за критерієм уніфікації вибору – задовільна.

### **Показник уніфікації складальних одиниць.**

Показник уніфікації складальних одиниць можна знайти за наступною формулою:

$$K_{yco} = \frac{N_y}{N\Sigma}, \quad (3.3)$$

Значення показника уніфікації складальних одиниць лежать в наступних діапазонах:

- $K_{yco} < 0,2$  – технологічність незадовільна;
- $0,2 < K_{yco} < 0,4$  – технологічність задовільна;
- $K_{yco} > 0,4$  – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (3.3), отримуємо показник уніфікації складальних одиниць:

$$K_{yco} = \frac{0}{1} = 0.$$

Значення показника уніфікації складальних одиниць менше за  $0,2$ , тому технологічність за показником уніфікації складальних одиниць – незадовільна.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

### Показник уніфікації деталей.

Показник уніфікації деталей можна знайти за наступною формулою:

$$K_{уд} = \frac{n_{у}}{N_{\Sigma}}, \quad (3.4)$$

Значення показника уніфікації деталей лежать в наступних діапазонах:

- $K_{уд} < 0,3$  – технологічність незадовільна;
- $0,3 < K_{уд} < 0,6$  – технологічність задовільна;
- $K_{уд} > 0,6$  – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (3.4) отримуємо показник уніфікації деталей:

$$K_{уд} = \frac{6}{1} = 6.$$

Значення показника уніфікації деталей складає більше 0,6, тому за цим показником добра технологічність.

### Показник уніфікації технологічного процесу.

Показник уніфікації технологічного процесу можна знайти за наступною формулою:

$$K_{утп} = \frac{K_{ун.опер}}{K_{заг.опер}}, \quad (3.5)$$

де  $K_{ун.опер}$  – кількість уніфікованих операцій;

$K_{заг.опер}$  – загальна кількість операцій.

Значення показника уніфікації технологічного процесу лежать в наступних діапазонах:

- $K_{утп} < 0,5$  – технологічність незадовільна;
- $0,5 < K_{утп} < 0,75$  – технологічність задовільна;
- $K_{утп} > 0,75$  – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (3.5) отримуємо показник уніфікації технологічного процесу:

$$K_{утп} = \frac{2}{3} = 0,66$$

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення показника уніфікації технологічного процесу лежить в діапазоні 0,5..0,75 , тому технологічність за показником уніфікації технологічного процесу – задовільна.

### **Комплексний показник уніфікації виробу.**

Комплексний показник уніфікації виробу можна знайти за наступною формулою:

$$K\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad (3.6)$$

де  $n$  – загальна кількість показників технологічності;

Значення комплексного показника уніфікації виробу лежать в наступних діапазонах:

- $K\Sigma < 0,3$  – технологічність незадовільна;
- $0,3 < K\Sigma < 0,5$  – технологічність задовільна;
- $K\Sigma > 0,5$  – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (3.6) отримуємо комплексний показник уніфікації виробу:

$$K\Sigma = \frac{0,06 + 0,33 + 0 + 6 + 0,66}{5} = 1,41$$

Значення комплексного показника уніфікації виробу складає більше 0,5, тому технологічність за комплексним показником уніфікації виробу – добра.

Отже, в результаті проведених розрахунків було досліджено, що прилад має добру технологічність. Проте є окремі незадовільні показники, що негативно вплинуть на швидкість та легкість виготовлення та складання приладу.

### 3.3 Розрахунок параметричної точності складання

#### **Методи забезпечення точності в процесі складання.**

Під час виробництва виробу повинні бути досягнуті всі показники точності відносного розміщення поверхонь виробу у відповідності з вимогами, які

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

встановлені в конструкторській документації. Щоб досягти цієї мети, дієвим засобом є розрахунок та дослідження розмірних ланцюгів.

Розмірний ланцюг – це сукупність розмірів, які утворюють замкнутий контур і які безпосередньо беруть участь у вирішенні поставленого завдання. На кресленнях розмірний ланцюг оформлюється незамкненим, без позначення розмірів і відхилень однієї з ланок. У реальному об'єкті, правильно складений розмірний ланцюг завжди замкнутий. Останній (замикаючий) розмір і поле допуску цього розміру є функцією інших розмірів. Всі розміри ланцюга функціонально взаємопов'язані і зміна будь-якої з ланок тягне за собою необхідність зміни як мінімум ще однієї ланки [23].

Відповідно до визначення, цільове призначення розмірного ланцюга залежить від розв'язуваної задачі: забезпечення працездатності конструкції (конструкторський ланцюг), забезпечення точності виготовлення (технологічний ланцюг), забезпечення точності вимірювання (вимірювальний ланцюг). В одному об'єкті можуть бути різні розмірні ланцюги, причому деякі з них можуть включати одні і ті ж ланки. Ланки розмірної ланцюга – це розміри, що утворюють розмірний ланцюг. Всі ланки, що входять в ланцюг, називають складовими ланками розмірного ланцюга. Ланка, яка технологічно виходить останньою у розмірному ланцюзі (при виготовленні або складанні), називають замикаючою ланкою [23].

Розрахунок розмірних ланцюгів виконується для розв'язання прямої і зворотної задачі:

1. Пряма задача (відноситься до проектного розрахунку). Задані параметри ланки замикання визначають параметри складових ланок. Отже, на основі деяких відомих значень граничних відхилень та номінального розміру ланки замикання, яку у даному випадку називають вихідною ланкою, розраховують граничні відхилення і допуски складових ланок.

2. Зворотна задача (відноситься до перевірного розрахунку). Параметри ланки замикання визначають дивлячись на задані параметри складових ланок.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		72

Можна сказати, що на основі відомих значень допусків, номінальних розмірів та граничних відхилень розраховують номінальний розмір, граничні відхилення та допуски ланки замикання.

Загалом, для розрахунку розмірних ланцюгів, користуються наступними методами:

- повної взаємозамінності;
- групової взаємозамінності;
- неповної взаємозамінності;
- регулювання;
- припасовування.

### Розрахунок параметричної точності складання витратоміра

Нехай при складанні вихорового витратоміра (рис. 3.2) необхідно забезпечити достатній зазор між болтами, що кріплять тіло обтікання, та стійкою блока електроніки, що покриває всі кріплення внутрішніх деталей витратоміра та електричні дроти.

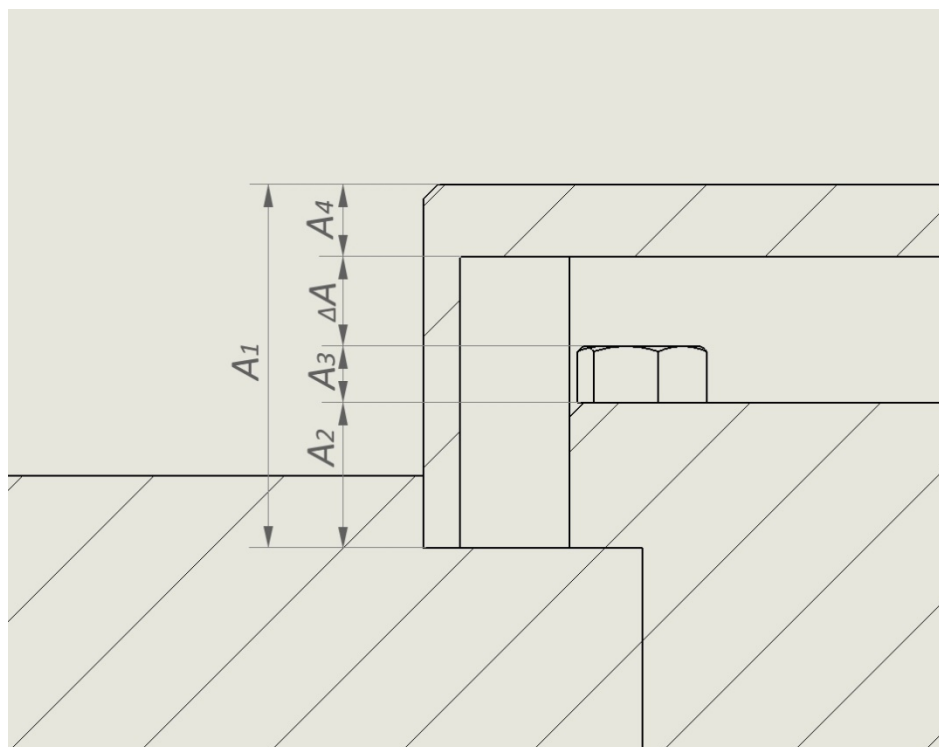


Рисунок 3.2 - Розмірні ланки

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

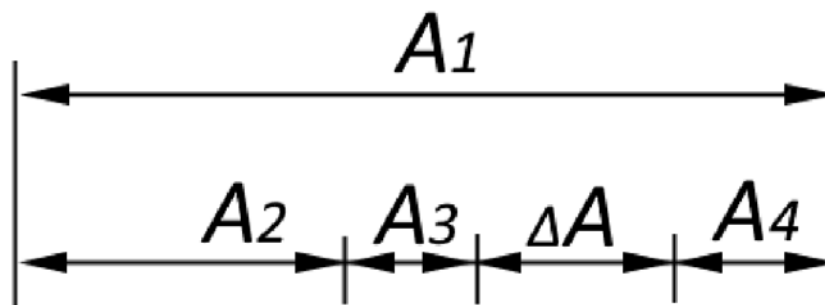


Рисунок 3.3 - Схема розмірної ланки

У таблиці 3.2 наведено номінальні значення ланок розмірного ланцюга та їх допустимі відхилення, які взяті з креслення ультразвукового витратоміра.

Таблиця 3.2 – Дані розмірного ланцюга

Ланка	Номінальний розмір, мм	Допуск, мм	Координати середини допуску, мм	Тип ланки
A1	25	+0,4 0	+0,4	Збільшуюча
A2	10	+0,2 -0,2	0	Зменшуюча
A3	4	+0,15 -0,15	0	Зменшуюча
A4	5	+0,1 -0,1	0	Зменшуюча

Розв'яжемо пряму задачу, яка полягає в визначенні допуску та номінального розміру замикаючої ланки.

В даному розмірному ланцюзі ланка  $A_1$  - збільшуюча ланка, а ланки  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  – зменшуючі. Через те, що всі ланки нашого ланцюга паралельні, то номінальний розмір замикаючої ланки дорівнює:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n A_{i30} - \sum_{i=1}^p A_{i3M}, \quad (3.7)$$

де  $n$  і  $p$  – число збільшувальних і зменшувальних розмірних ланок.

$$A_{\Delta} = 25 - (10+4+5) = 25 - 19 = 6 \text{ мм.}$$

### Метод повної взаємозамінності

Сутність методу повної взаємозамінності полягає в тому, що необхідні показники точності ланки замикання забезпечуються без припасовування, регулювання або підбору, якщо на ділянку складання виробу надходять деталі, розміри яких знаходяться в межах поля допуску [23].

Перевагами даного методу є:

- невисока технологічна собівартість складання та простота, адже деталі поєднуються між собою без використання підбору, припасовування та регулювання;
- можливість кооперування широкого профілю підприємств;
- можливість впровадження потокового складання;
- проста система поставки запасних частин для процесу ремонтування машин, які перебувають в експлуатації.

До недоліків методу можна віднести те, що допуски складових ланок є вужчими, ніж під час використання інших методів. Це збільшує технологічну собівартість механічної обробки деталей і за жорстких вимог точності до ланки замикання може зробити застосування методу повної взаємозамінності економічно недоцільним [23].

Метод повної взаємозамінності використовується переважно в серійному і масовому виробництві для забезпечення точності ланок замикання розмірних ланцюгів, які мають або незначну кількість складових ланок (не більше трьох), або нежорсткі вимоги точності до ланки замикання. В одиничному виробництві повна взаємозамінність використовується лише для спряжень деталей вузла з уніфікованими або стандартизованими виробами – підшипниками кочення, нормалізованими кріпильними деталями тощо [23].

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Знайдемо допуск замикаючої ланки у випадку повної взаємозамінності:

$$\delta_3 = \sum |\delta_i| = 0,4 + 0,2 + 0,15 + 0,1 = 0,85 \text{ мм.}$$

Координати середини поля допуску замикаючої ланки:

$$K_3 = \sum K_1 - \sum K_{2,3,4} . \quad (3.8)$$

$$K_3 = 0,4 - (0 + 0 + 0) = 0,4 \text{ мм.}$$

Верхнє відхилення розміру замикаючої ланки:

$$(BB)_3 = K_3 + 0,5 \cdot \delta_3. \quad (3.9)$$

$$(BB)_3 = 0,4 + 0,5 \cdot 0,85 = 0,4 + 0,425 = 0,825.$$

Нижнє відхилення розміру замикаючої ланки:

$$(NB)_3 = K_3 - 0,5 \cdot \delta_3 . \quad (3.10)$$

$$(NB)_3 = 0,4 - 0,5 \cdot 0,74 = 0,4 - 0,425 = -0,025.$$

Отже, у випадку повної взаємозамінності, замикаюча ланка  $\Delta A$  дорівнює:

$$\Delta A = \left( 6_{-0,025}^{0,775} \right) \text{ мм.}$$

### Метод неповної взаємозамінності

Сутність методу неповної взаємозамінності полягає в тому, що під час складання необхідні показники точності ланки замикання забезпечуються зазвичай без припасовування, регулювання або підбору, але не в усіх зібраних виробках, а у заздалегідь встановленої їх кількості. Метод неповної взаємозамінності, у порівнянні з методом повної взаємозамінності, дозволяє призначати ширші допуски складових ланок, але допускає появу незначної регламентованої кількості виробів, у яких дійсні значення ланок замикання виходитимуть за межі поля допуску [23].

В основу методу покладене те положення теорії імовірностей, згідно з яким сукупності значень складових ланок, близькі до граничних, трапляються значно

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

рідше, ніж значення, близькі до середніх. Тому частка виробів, у яких величина ланки замикання виходить за межі допуску є незначною. Додаткові витрати на виправлення цих виробів можуть бути значно меншими, ніж економія від зменшення трудовитрат і ресурсів на виготовлення деталей з ширшими допусками [23].

Переваги методу неповної взаємозамінності такі ж, як і методу повної взаємозамінності плюс економічність виготовлення деталей завдяки розширенню полів допусків (у порівнянні з методом повної взаємозамінності). Недоліком методу є необхідність додаткових витрат на заміну або припасовування деяких деталей тих виробів, у яких значення ланок замикання вийшли за встановлені межі [23].

Метод неповної взаємозамінності зазвичай використовується у масовому та серійному видах виробництва задля надавання високої точності ланок замикання, які мають більше ніж три складових ланок, а також дотримання порівняно жорсткої точності до ланки замикання.

Визначимо допуск замикаючої ланки даним методом неповної взаємозамінності:

$$\delta_{зам} = K\sqrt{\sum(\delta_i)^2}. \quad (3.11)$$

Припускаючи, що закони розподілу складових розмірів ланцюга є нормальними, то поле розсіювання замикаючої ланки дорівнює

$$\delta_{зам} = \sqrt{0.85} = 0.922 \text{ мм.}$$

З урахуванням коефіцієнтів відносного розсіювання розмірів  $a_i$ , значення яких для ланок розмірного ланцюга дорівнюють  $a_1 = 0$ ,  $a_2 = 0$ ,  $a_3 = 0$ ,  $a_4 = 0$ , визначаємо координату середини поля розсіювання за наступною формулою:

$$\Delta K_{замнеп} = \sum(\Delta K_i + 0,5\alpha_i\delta_i) - \sum(\Delta K_i + 0,5\alpha_i\delta_i), \quad (3.12)$$

$$\Delta K_{замнеп} = 0,4 \text{ мм.}$$

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Верхня границя поля розсіювання замикаючої ланки дорівнює:

$$(BB)_{\text{замнеп}} = \Delta K_{\text{замнеп}} + \frac{\delta_3}{2}. \quad (3.13)$$

$$(BB)_{\text{замнеп}} = 0,4 + \frac{0,922}{2} = 0,4 + 0,461 = 0,861.$$

Нижня границя поля розсіювання замикаючої ланки дорівнює:

$$(HB)_{\text{замнеп}} = \Delta K_{\text{замнеп}} - \frac{\delta_3}{2}. \quad (3.14)$$

$$(HB)_{\text{замнеп}} = 0,4 - \frac{0,922}{2} = 0,4 - 0,461 = -0,061.$$

Отже, у випадку неповної взаємозамінності замикаюча, ланка  $\Delta A_{\text{неп}}$  дорівнює:

$$\Delta A_{\text{неп}} = (6_{-0,061}^{0,861}) \text{ мм.}$$

### 3.4 Проєктування технологічного процесу складання

Проєктування технологічного процесу складання це поняття, що поєднує в собі вибір найбільш раціональних процесів і способів збірки, визначення послідовності з'єднання елементів і складальних одиниць, контролю виробу з призначенням відповідного для цього устаткування, робочого і вимірювального інструменту.

Важливим є приділення уваги наступним особливостям під час аналізу об'єкту складання:

- ступінь подрібнення виробу (або як ще називають розчленування виробу);
- характер з'єднання конкретних деталей.

Важливість подрібнення приладу на окремі складальні одиниці викликане в першу чергу умовами роботи та експлуатації, можливістю виготовлення і з'єднання деталей. Подрібнення виробу на складальні одиниці може проводитися і з технологічних міркувань – кількість складальних одиниць у виробі, визначає можливість зменшення трудомісткості і тривалості циклу

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

складання за рахунок створення умов для виконання складальних операцій, розділення процесу складання на паралельні потоки, автоматизації і механізації процесу [24].

Після такого аналізу приладу проводиться розробка послідовності складання. На послідовність виконання збірки впливають: конструкція, маса і розміри виробу, що збирається, і його складових частин; тип виробництва і програма випуску виробів; функціональний взаємозв'язок елементів виробу і ступінь їх взаємозамінності; точність складання і методи її досягнення; ступінь подрібнення виробу на окремі вузли; число мало жорстких і легко пошкоджуваних елементів та ін.. При складанні невзаємозамінних деталей і виробів, на послідовність складання значний вплив мають необхідність виконання прогоночних робіт, проміжного розбирання та збирання, додаткової обробки і контролю і т.п.[24].

При визначенні послідовності складання по конструкторській документації, виявляють всі складові вузли, що входять у виріб, і подрібнюють їх за рівнями складального складу з метою розробки послідовностей загальної і вузлової збірки. Після цього для виробу і кожного окремо вузла, що збирається, виявляються базові деталі (компоненти), що визначають відносне положення вхідних до даного виробу інших деталей і вузлів [24].

Загальна збірка виробу та збирання вузлів (вузлова збірка) починається з установки на складальному обладнанні базової деталі (компонента), яка повинна володіти достатньою точністю відносного розташування базових поверхонь та поверхонь, що сполучаються, необхідною стійкістю, твердістю і міцністю, а також можливістю виконання максимального числа складальних операцій без зміни баз. Після виявлення базових деталей, визначаються положення, які вони повинні займати на позиціях збірки. Положення базової деталі вибирається з умови забезпечення максимальної зручності і простоти виконання операцій складання, які можуть здійснюватися при вертикальному, горизонтальному або похилому положенні осі збірки [24].

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

При виконанні збірки, повинна дотримуватися така послідовність установки, при якій змонтовані в першу чергу деталі і вузли не повинні заважати встановленню наступних деталей і вузлів. Спочатку встановлюються деталі і вузли, що виконують найбільш відповідальні функції в виробі. При цьому наявності паралельно пов'язаних розмірних ланцюгів у виробі, встановлення звичайно треба починати з тих деталей і вузлів, розміри поверхонь яких є загальними ланками і належать більшій кількості розмірних ланцюгів [24].

Послідовність складання може бути розроблена в декількох можливих варіантах. Вибір найбільш раціонального варіанту послідовності складання здійснюється на основі проведення розрахунків економічної ефективності наявних варіантів [24].

Загалом, проектування технологічного процесу складання складається з наступних етапів:

- на основі аналізу конструкторської документації розробляється схема складального складу і технологічна схема складання;
- визначається організаційна форма складання з урахуванням конструктивних особливостей виробу, річної програми випуску, умов взаємозамінності тощо;
- виконується вибір методу складання виходячи з вимог взаємозамінності і прийнятою організаційною формою складання;
- розробляється технологічний маршрут складання;
- вибирається обладнання робочих місць у відповідності до призначених складальних операцій;
- підбирається універсальна (та проектується спеціальна) технологічна оснастка;
- для виконання складальних операцій підбираються допоміжні матеріали (припій, флюс, клей тощо);
- проводиться нормування та визначається розряд роботи для кожної операції.[5]

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		80

### Схема складального складу.

Впорядкування схеми складального складу є початковим етапом на шляху створення технології складання, яка показує найменування та число деталей виробу, число складальних одиниць виробу, слугує комплектуючою картою, за якою можна відслідковувати процес складання виробу. Однак схема складального складу виробу не дає повної уяви про послідовність складання та засоби забезпечення всіх з'єднань.

На схемі складального складу можуть бути показані джерела надходження тих чи інших елементів, терміни готовності різних операцій складання і виробу загалом. Дану схему можна використовувати як диспетчерський документ, що допомагає зручно відстежувати процес виробництва та вживати певних заходів, якщо відбувається відставання готовності окремих елементів складання всупереч запланованого графіку.

На рисунку 3.4 зображена схема складального складу вихорового вимірювального перетворювача.

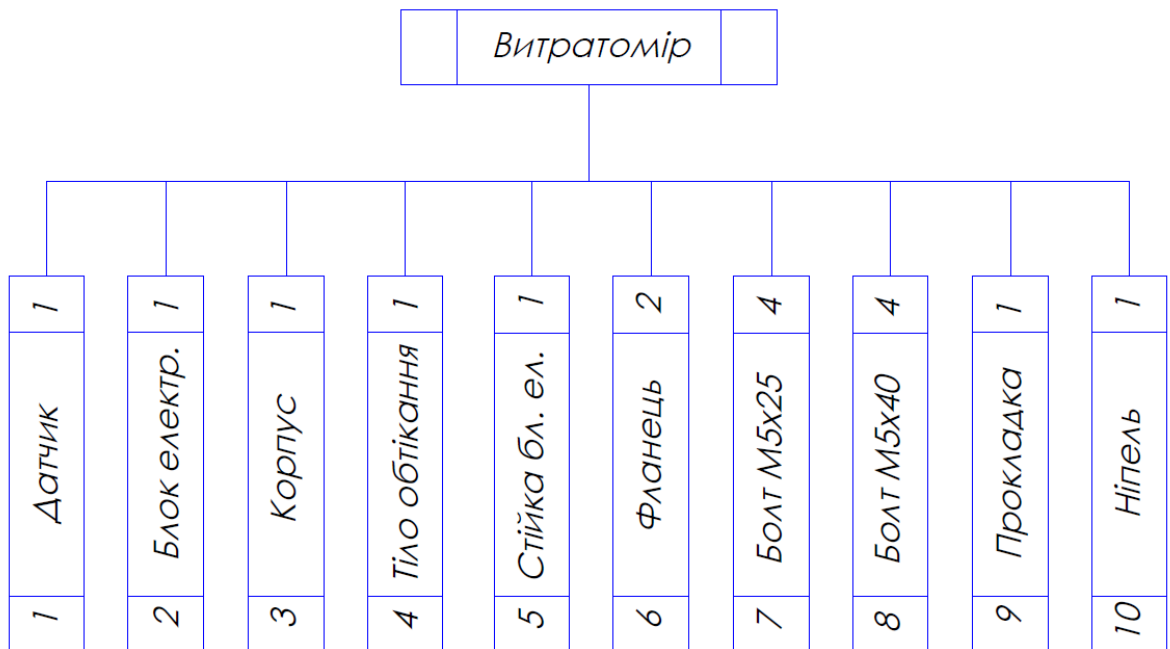


Рисунок 3.4 - Схема складального складу вихорового витратоміра

**Технологічна схема складання.** Технологічну схему складання виробу використовують для повного уявлення про всі етапи послідовності складання, а також про засоби забезпечення з'єднань, про періодичність процесу регулювання, досліджень приладу та контролю. Дана схема необхідна для технолога-складальника, який визначає базову деталь, із якої розпочинається повне складання виробу. У відповідності з обраним порядком подачі складальних одиниць та деталей на складання виробу, призначаються операції технологічного процесу, що і формує технологічний процес.

Процес складання зображують горизонтальною лінією, яку проводять від базової деталі до результуючого об'єкта збирання. Вузлові складання на схемі позначаються вертикальними лініями, від яких можуть йти інші нижні горизонтальні лінії. Деталі та складальні одиниці позначаються у вигляді прямокутників, які розділені на три частини. Першій частина прямокутника містить в собі номер позиції деталі, що вказана у специфікації. Друга частина, найбільша за розміром, містить назву елемента. Третя частина - кількість деталей даного найменування, які необхідні для складання в даний момент.

Схема складання дозволяє краще проаналізувати саму конструкцію виробу, внести зміни в будову приладу, щоб спростити весь технологічний процес і оптимізувати час та швидкість складання. Технологічна схема складання є головним документом, що відображає технологічний процес складання.



Рисунок 3.5 - Технологічна схема складання вихорового витратоміра

## ВИСНОВОК

У даному дипломному проєкті було розроблено вимірювальний перетворювач витрати вихорового типу для рідкого вимірювального середовища етилового спирту. Для досягнення цієї мети було проаналізовано вихоровий метод вимірювання витрати, розглянуті різновиди вихорових витратомірів, підсумовані їх переваги та недоліки, визначені фізичні характеристики вимірюваного середовища, розглянуті технічні характеристики сучасних вихорових витратомірів, розроблено математичну модель вимірювання витрати, структурну та принципову схеми витратоміра, проаналізовано різні форми тіл обтікання та їх вплив на результат, досліджено метрологічні та технологічні характеристики, змодельовано та досліджено роботу витратоміру у програмному середовищі Solidworks, складено технологічну карту складального складу та технологічну схему складання.

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [Електронний ресурс] : Законодавство України [Веб-сайт].– <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/318-20> Режим доступу: Вільний
2. Н.И.Ткаченко. Гидрогазодинамика: учебное пособие/ Н.И.Ткаченко. - пос. Персиановский: Донской ГАУ, 2015. - 7 с.
3. Standard conditions for gases // IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the «Gold Book») / Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. — Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1997. — ISBN 0-9678550-9-8.
4. Стабников В.Н. Этиловый спирт Текст. / В.Н. Стабников, И.М. Ройтер, Т.Б. Процюк. - М.: Пищевая промышленность, 1976.
5. Кремлевский П.П., Расходомеры и счетчики количества веществ : Справочник: Кн. 2 / Под общ. ред. Е. А. Шорникова. - 5-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Политехника, 2015. - 289, 293 с. - ISBN 5-7325-0709-4
6. Лурье М.С. Вихревые расходомеры и счетчики количества жидкости с контактно-кондуктометрическим приемником-преобразователем вихревых колебаний: Монография.-Красноярск: СибГТУ, 1999.-196 с.
7. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Л.: Машиностроение, 1989. – 412с.
8. Emerson. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступу: <https://www.emerson.com/documents/automation/техническое-описание-вихревой-расходомер-rosemount-8800-с-адаптивной-обработкой-цифровых-сигналов-ru-ru-79026.pdf>
9. [Електронний ресурс] : ЭМИС-ВИХРЬ [Веб-сайт].– [https://emis-kip.ru/ru/prod/vihrevoj\\_rashodomer/](https://emis-kip.ru/ru/prod/vihrevoj_rashodomer/) Режим доступу: Вільний
10. Emis. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступу: [https://emis-kip.ru/upload/iblock/354/EV200\\_205\\_PPD\\_Rukovodstvo\\_po\\_ekspluatatsii.pdf](https://emis-kip.ru/upload/iblock/354/EV200_205_PPD_Rukovodstvo_po_ekspluatatsii.pdf)

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

11. [Електронний ресурс] : DigitalYEWFO [Веб-сайт].–  
[http://www.yokogawa.ru/products/kip/vortex\\_flowmeters/digitalyewflo/](http://www.yokogawa.ru/products/kip/vortex_flowmeters/digitalyewflo/) Режим доступу: Вільний
12. Yokogawa. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступу:  
<http://www.yokogawa.ru/upload/iblock/229/229d64290637fcf0b64da7bf485e9404.pdf>
13. Ирвис. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступу:  
[http://www.gorgaz.ru/products/ir-k-300/documentation/download/manual\\_k300\\_16atm.pdf](http://www.gorgaz.ru/products/ir-k-300/documentation/download/manual_k300_16atm.pdf)
14. [Електронний ресурс] : Універсальний вихоровий витратомір [Веб-сайт].–  
<https://findpatent.ru/patent/219/2192623.html> Режим доступу: Вільний
15. Киясбейли А. Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые счетчики-расходомеры. М.:«Машиностроение», 1974. 160 с.
16. [Електронний ресурс] : Solidworks [Веб-сайт].–  
<https://www.solidworks.com/> Режим доступу: Вільний
17. [Електронний ресурс] : Корозія металів у спиртовій промисловості [Веб-сайт].– <https://www.ru-ecology.info/article/683632/> Режим доступу: Вільний
18. [Електронний ресурс] : SteelService [Веб-сайт].–  
<https://steelservice.com.ua/aisi-304/> Режим доступу: Вільний
19. [Електронний ресурс] : Розрахунки на міцність [Веб-сайт].–  
[http://www.stresscalc.ru/stress/sigma\\_sosud.php?mat=12%D518%CD10%D2&get=1](http://www.stresscalc.ru/stress/sigma_sosud.php?mat=12%D518%CD10%D2&get=1) Режим доступу: Вільний
20. Шорников Е.А. Расходомеры и счетчики газа, узлы учета. – СПб.: Политехника, 2003. – 127 с.
21. [Електронний ресурс] : Едрид [Веб-сайт].–  
<https://edrid.ru/rid/219.017.5de6.html> Режим доступу: Вільний
22. П'єзоелектрик. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступу:  
[https://piezo.nt-rt.ru/images/showcase/Catalog\\_glava3.pdf](https://piezo.nt-rt.ru/images/showcase/Catalog_glava3.pdf)

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

23. Солонін, І. С. Розрахунок складальних і технологічних розмірних ланцюгів / І.С. Солонін, С.І. Солонін. - М.: Машинобудування, 1980. -110 с
24. [Електронний ресурс] : Studme [Веб-сайт].–  
[https://studme.org/97106/tehnika/metodika\\_posledovatelnost\\_proektirovaniya\\_tehnologicheskikh\\_protsesov\\_sborki](https://studme.org/97106/tehnika/metodika_posledovatelnost_proektirovaniya_tehnologicheskikh_protsesov_sborki) Режим доступу: Вільний

					<i>ДП ПМ61.09.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

# Додатки



Имя	Инициалы	№ докум.	Подп.	Дата
Разработ	Исполн			
Проект				
Т. контр.				
И. контр.				
Учте				

**Схема складального**

Лист \_\_\_\_\_ Масса \_\_\_\_\_ Масштаб 1:1

Лист 1 \_\_\_\_\_ Листов 1

КПІ ім. Ізидора Сікорського  
ар. ПМ-61

Формат А2



6	Фланець	2
---	---------	---

Приварити

5	Тіло обтікання	1
---	----------------	---

Загвинтити

7	Болт М5х25	4
---	------------	---

Встановити

9	Прокладка	1
---	-----------	---

1	Датчик	1
---	--------	---

Загвинтити

10	Ніпель	1
----	--------	---

Загвинтити

6	Сійка бл. ел.	1
---	---------------	---

8	Болт М5х40	4
---	------------	---

Встановити

3	Блок електр.	1
---	--------------	---

Име	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разроб.	Дручик			
Проєк.				
Т. контр.				
Н. контр.				
Умв.				

Технологічна схема складання		Лист	Маса	Масштаб
		1		1:1

КПІ ім. Григорія Скірянського  
вул. П'ятиквітної  
ар. 104-В

Формат А2