

Міністерство освіти і науки України  
Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет автоматизації та енергетики  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного  
менеджменту

Балабан Роман Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.536.6

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення лічильника холодної і гарячої води

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Балабан Р.Р.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Боднар Роман Тарасович, к.т.н., доцент

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

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

доц. В. С. Цих

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2025**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології -

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІВТЕМ

к.т.н. , доц. Цих В.С.

«     »     2025 року

**ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Балабану Роману Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи «Розроблення лічильника холодної і гарячої води»

керівник роботи Боднар Роман Тарасович , к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “30”квітня 2025 року № 270/7

2. Строк подання студентом роботи 16.06.2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Досліджуваний об'єкт – гаряча і холодна вода. Діапазон зміни температури гарячої води: від 15 до 95°C. Діапазон вимірювання витрати: до  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{год}$ .

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз основних характеристик води і визначення їх впливу на покази вимірювань витрати лічильниками різних типів. 2. Аналіз існуючих методів та засобів вимірювання витрати та кількості рідин. 3. Розроблення конструкції лічильника холодної і гарячої води . Метрологічний аналіз та метрологічне забезпечення лічильника. 5. Розроблення заходів з охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу ( з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1.Математичне моделювання процесу роботи швидкісного лічильника. 2. Структурна схема удосконаленого лічильника. 3. Блок-схема алгоритму роботи лічильника. 4. Класи точності лічильників води. 5.Калібрування лічильників

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Лютак З.П. проф. каф.		
Консультант з охорони праці	Кривенко Г.М, к.т.н.,		

7. Дата видачі завдання 09.05.2025 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз характеристик води	20.05.2025	
2	Аналіз існуючих методів та засобів вимірювання та кількості рідин.	31.05.2025	
3	Розроблення конструкції лічильника холодної і гарячої води	05.06.2025	
4	Метрологічний аналіз розробленого лічильника	08.06.2025	
5	Розроблення заходів з охорони праці при використанні лічильника	12.06.2025	
6	Оформлення бакалаврської роботи	15.06.202	

Здобувач

\_\_\_\_\_  
(підпис)Балабан Р.Р. .  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)Боднар Р.Т.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота : с.92, 18 ілюстрацій, 12 таблиць, 25 використаних джерел інформації, 3 додатків.

Тема роботи – «Розроблення лічильника холодної гарячої води».

Метою роботи є розроблення удосконаленої конструкції лічильника холодної і гарячої води.

Методи дослідження – математичне моделювання процесів протікання холодної і гарячої води через лічильник и різних типів .

У роботі проаналізовано існуючі основні методи та засоби вимірювання кількості та витрати рідини, обґрунтовано доцільність розроблення удосконаленої конструкції швидкісного лічильника для вимірювання кількості холодної та гарячої води, а також з дистанційною передачею показів.

Здійснено метрологічний аналіз та розроблено метрологічне забезпечення удосконаленого лічильника.

Розроблено заходи безпечних умов роботи при використанні розробленого лічильника холодної і гарячої води.

**ВОДА, КІЛЬКІСТЬ ТА ВИТРАТА РІДИНИ, ПЕРЕДАЧА ПОКАЗІВ ЛІЧИЛЬНИКА ДИСТАНЦІЙНО, ПОХИБКА, ОХОРОНА ПРАЦІ.**

## ABSTRACT

Bachelor's thesis: pp., illustrations, tables, sources of information used.  
Appendices n.

The topic of the work is "Development of a cold and hot water meter".

The purpose of the work is to develop an improved design of a cold and hot water meter.

Research methods - mathematical modeling of the processes of cold and hot water flow through the meter and various types.

The paper analyzes the existing basic methods and means of measuring the amount and flow of liquid, justifies the feasibility of developing an improved design of a high-speed meter for measuring the amount of cold and hot water, as well as with remote transmission of readings.

A metrological analysis has been carried out and metrological support for the improved meter has been developed.

Metrological analysis was carried out and metrological support for the improved meter was developed.

Measures for safe working conditions when using the developed cold and hot water meter were developed.

**WATER, QUANTITY AND FLUID CONSUMPTION, REMOTE  
TRANSMISSION OF METER READINGS, ERROR, LABOR SAFETY.**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ВИМІРЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДИ .....	11
1.1 Вода та фізичні властивості .....	12
1.2 Теплові процеси у водному середовищі .....	15
1.3 Густина води у середовищі.....	19
1.4 В'язкість води у середовищі.....	21
2. ІСНУЮЧІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ВОДИ .....	23
2.1 Витратомір та його основні характеристики.....	23
2.2 Лічильники ультразвукового вимірювання води.....	24
2.3 Лічильники механічні .....	27
3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЛІЧИЛЬНИКА ХОЛОДНОЇ ГАРЯЧОЇ ВОДИ.....	35
3.1 Обґрунтування теоретичне гідродинаміки у витратомірах.....	35
Основні властивості рівнянь Нав'є–Стокса .....	36
Застосування.....	37
3.2 Режими руху рідини.....	37
3.3 Розроблення конструкції удосконалення лічильника холодної і гарячої води.....	40
3.4 Блок схема .....	41
3.5 Водяний турбогенератор.....	43
3.6 Генерація напруги .....	46
3.7 Трифазний повно-хвильовий випрямляч .....	50
3.8 Обробка сигналів .....	50
3.9 Мережа бездротова .....	51
3.10 Алгоритм обліку .....	52
4. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ	

КОНСТРУКЦІЇ ВИТРАТОМІРА ТА МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ .....	55
4.1 Види похибок та їх загальний аналіз .....	55
4.2 Межа похибок вимірювання лічильників холодної та гарячої води та метрологічні класи .....	58
4.3 Калібрування лічильників .....	64
5. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ РОБОТИ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ГАРЯЧОЇ ВОДИ .....	67
5.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів та потенційно небезпечних..	67
5.2 Забезпечення нормальних умов праці.....	71
5.3 Забезпечення безпеки монтажу, експлуатації вихрового витратоміра та налагодження .....	75
5.4 Розрахунок вентиляції приміщення.....	77
ВИСНОВКИ .....	81
Список використаної літератури .....	82
Додатки.....	86

## ВСТУП

У сучасних умовах все більш актуальним стає питання раціонального використання ресурсів. Серед найважливіших ресурсів, які потребують ретельного контролю й обліку, вирізняється вода. Особливо загострюється проблема ефективного споживання гарячої води, адже вона значною мірою впливає як на економіку, так і на стан навколишнього середовища.

Звичні способи обліку водоспоживання поступово втрачають свою ефективність через низку недоліків, серед яких можна виокремити обмежену точність вимірів, складність експлуатації та відсутність можливості оперативного відстеження витрат.[1]

На фоні технологічного прогресу з'являються нові методи розв'язання зазначених проблем. Зокрема, перспективним напрямом є застосування лічильників гарячої води з автономним джерелом живлення. Такі пристрої дозволяють здійснювати високоточний облік водоспоживання, а також передавати дані в режимі реального часу, що дає змогу своєчасно виявляти відхилення та оптимізувати витрати.

Очікується, що результатом стане створення функціонального зразка лічильника холодної і гарячої води, придатного для використання в побутових і комерційних приміщеннях. Запровадження такого пристрою сприятиме ефективнішому використанню гарячої води, зменшенню витрат і збереженню природних ресурсів.

Не менш важливою є роль температури води у точності вимірювання її витрати. Це зумовлює потребу у створенні вдосконаленого лічильника, здатного забезпечити достатню точність у різних умовах експлуатації — як у побуті, так і в промисловості. Для цього слід проаналізувати сучасні конструкції приладів та визначити, як властивості води впливають на показники витратомірів.

У контексті зростаючих вимог суспільства до точності обліку ресурсів постає необхідність розвитку інтелектуальних систем, зокрема у сфері обліку води.

Отже, мета цієї бакалаврської роботи полягає в проектуванні вдосконаленої конструкції лічильника гарячої води, який відповідатиме вимогам точності, безпеки та буде інтегрований в інформаційно-вимірвальні системи витратометрії.

Таким чином, представлена бакалаврська робота має суттєве практичне значення й може стати внеском у процес інтелектуалізації контролю природних ресурсів.

## 1. ВИМІРЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДИ

У рамках даної роботи розглядається розроблення вдосконаленої конструкції лічильника холодної і гарячої води. Проте передусім доцільно звернутися до аналізу ключової речовини, що лежить в основі життя на Землі — води.

Вода ( $H_2O$ ) є однією з найважливіших сполук на нашій планеті, без якої існування живих організмів було б неможливим. Молекули води складаються з одного атома кисню та двох атомів водню, поєднаних ковалентними зв'язками. Геометрія молекули зумовлює кут між атомами водню близько  $104,45^\circ$ , що визначає унікальні фізико-хімічні властивості цієї речовини.

У залежності від температури та тиску вода може перебувати в трьох агрегатних станах: рідкому, твердому (лід) або газоподібному (пара). Зазвичай під терміном «вода» розуміється її рідкий стан при стандартних умовах, характерних для поверхні Землі.

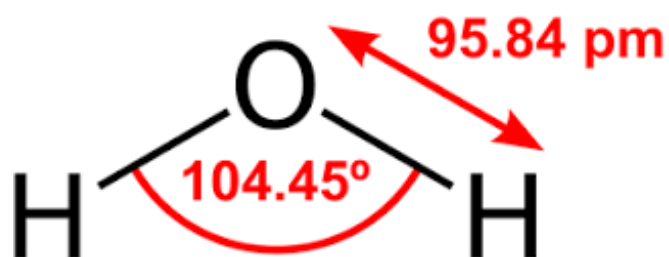


Рисунок 1.1 – Молекула води –  $H_2O$

Вода відіграє визначальну роль у глобальних природних процесах, таких як гідрологічний цикл, підтримання життєдіяльності біосфери, а також у господарській діяльності людини. Близько 71% поверхні Землі

вкрито водою, яка постійно циркулює у природі: випаровується з поверхні, утворюючи хмари, і повертається у вигляді опадів.

У повсякденному житті вода використовується в різних сферах: для пиття, сільського господарства, промисловості, енергетики та побутових потреб. Проте лише 2,6% загального обсягу водних ресурсів становить прісна вода, придатна для споживання. Такий дефіцит води може стати однією з найгостріших глобальних проблем у найближчому майбутньому.

Окрім практичного значення, вода має і глибоке символічне та культурне значення. Вона фігурує у творах мистецтва, літератури, релігії різних народів як символ життя, чистоти, оновлення та гармонії.

### **1.1 Вода та фізичні властивості**

Вода — це прозора, безбарвна рідина, яка не має ані запаху, ані смаку. На поверхні Землі вона може перебувати в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому та газоподібному. За нормального атмосферного тиску вода замерзає при 0 °C, утворюючи лід, а при 100 °C переходить у стан водяної пари. Примітно, що навіть за температури нижче 0 °C сніг і лід можуть поступово випаровуватись — цей процес відомий як сублимація.[2]

У рідкому стані вода майже не змінює свого об'єму, проте під час замерзання розширюється приблизно на 1/11 частину. Найбільшу густину вона має при температурі +4 °C. Об'єм 1 см<sup>3</sup> чистої води при цій температурі приймається за одиницю ваги — один грам. Цікавим є те, що при охолодженні з +4 до 0 °C вода знову розширюється, завдяки чому лід має меншу густину, ніж рідка вода приблизно на 8%, і тому плаває на поверхні. Ця особливість запобігає повному промерзанню водойм, дозволяючи підтримувати життя у їх глибинах.

Унікальною є і те що потрійна точка води — стан, за якого вода може одночасно існувати в усіх трьох агрегатних формах. Ця точка досягається за температури  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  і тиску  $611,73$  Паскалів.

Фізичні властивості води значною мірою зумовлені її молекулярною структурою. Молекули води мають високий дипольний момент, що сприяє утворенню водневих зв'язків між ними. Саме ці зв'язки визначають багато незвичних характеристик води, зокрема її теплоємність, поверхневий натяг і температуру кипіння, що значно вищі порівняно з іншими подібними за складом сполуками.[3]

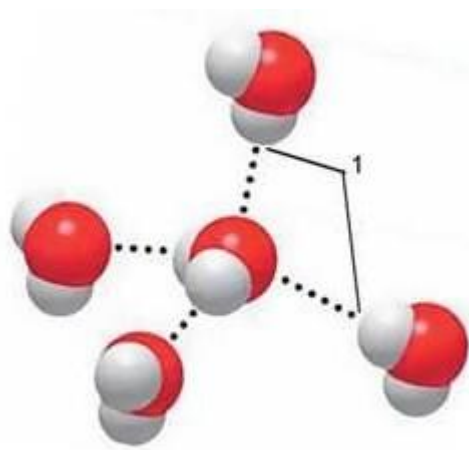


Рисунок 1.2 - Просторова модель формування водневих зв'язків між молекулами води

Однією з унікальних фізичних властивостей води є її висока питома теплоємність — кількість теплоти, необхідна для нагрівання  $1$  грама води на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Саме ця властивість дозволяє океанам і морям довготривало зберігати температуру, що, в свою чергу, відіграє важливу роль у

регулюванні клімату на земній кулі. Завдяки цьому, острови мають більш стабільний клімат, ніж материкові території.

Фізико-хімічні властивості води обумовлені її молекулярною структурою, зокрема наявністю значного дипольного моменту — 1,844 Дебая. Внаслідок вищої електронегативності атома кисню порівняно з воднем, у молекулі води спостерігається перерозподіл електронної густини. Це спричиняє формування часткових електричних зарядів: негативного ( $2\delta^-$ ) на кисні та позитивного ( $\delta^+$ ) на водні, що призводить до утворення водневих зв'язків між сусідніми молекулами.

Утворення водневих зв'язків — це причина того, що вода конденсується за вищих температур, ніж деякі інші молекули з більшою молекулярною масою, як-от кисень або вуглекислий газ, які залишаються в газоподібному стані за аналогічних умов.

У рідкому стані молекули води постійно утворюють та руйнують водневі зв'язки. Тривалість існування одного зв'язку становить лише 1–20 пікосекунд, після чого він миттєво замінюється новим. Такі динамічні структури, що тимчасово об'єднують молекули, отримали назву "маячки". Незважаючи на відносно невелику енергію водневого зв'язку (близько 23 кДж/моль), їх велика кількість суттєво впливає на властивості води.

Кожна молекула води потенційно може утворювати до чотирьох водневих зв'язків з іншими молекулами, що призводить до формування регулярних кристалічних структур у твердому стані (лід). У рідкому стані така впорядкованість зберігається частково: у середньому кожна молекула бере участь у 3,6 зв'язках.

Когерентні взаємодії між далекими диполями у рідкій воді свідчать про наявність структури, схожої до кристалічної решітки льоду, що суперечить

раніше усталеним уявленням. Це підтверджує існування динамічної мережі водневих зв'язків, властивої великим молекулярним кластерам

Акустичні властивості води. Вода є ефективним провідником звуку. Швидкість поширення звукових хвиль у воді становить 1400–1600 м/с, що у 4–5 разів перевищує швидкість звуку в повітрі. Ця швидкість зростає за умов:

- підвищення температури (на 3–3,5 м/с на кожні 10 °С),
- збільшення солоності (на 1,0–1,3 м/с на 1‰);
- зростання тиску (на 1,5–1,8 м/с на кожні 100 метрів глибини).

Електропровідність води. Хімічно чиста вода має дуже низьку електропровідність. Її питома електропровідність при 18 °С становить  $3,8 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Для порівняння, лід проводить струм у 10 разів гірше, ніж рідка вода. Підвищення температури та мінералізація (наявність іонів) значно підвищують електропровідність. Крім того, на великих океанічних глибинах (понад 10 км) підвищення тиску зумовлює зростання електропровідності на приблизно 12% порівняно з поверхневою водою.

Оптичні властивості води. У тонкому шарі вода здається безбарвною, однак за збільшення товщини шару набуває блакитно-зеленого відтінку. Ступінь прозорості води у природних водоймах значно варіюється залежно від вмісту завислих частинок, їх кількості та хімічного складу (див. табл. 1.1).

## **1.2 Теплові процеси у водному середовищі**

Теплові процеси, що відбуваються у водному середовищі, мають ключове значення для функціонування гідросфери. Вони є невід'ємною складовою загальних гідрологічних механізмів, які впливають на кліматичні умови, природні явища та екологічні системи.

Таблиця 1.1 – Фізичні властивості води

Властивості	Порівняльна характеристика
Питома теплоємність, 4190 Дж/(кг·°C) при 15 °C	Найвища серед усіх рідких і твердих речовин, за винятком НЗ (аміаку)
Питома теплота плавлення льоду, 333 000 Дж/кг	Найвища, за винятком НЗ (аміаку)
Питома теплота випаровування, $2,5 \cdot 10^6$ при 0 °C і $2,26 \cdot 10^6$ Дж/ кг при 100 °C	Найвища серед усіх речовин
Температура максимальної густини, 4 °C	Настає не в період замерзання, а під час більшої температури
Коефіцієнт поверхневого натягу води, $75,6 \cdot 10^{-3}$ Н/м при 0 °C і $60,8 \cdot 10^{-3}$ Н/м при 90 °C.	Найвищий серед усіх рідин (окрім ртуті в рідкому стані)
Коефіцієнт в'язкості, $1,14 \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с при 15 °C	Малий
Коефіцієнт теплопровідності, 0,57 Вт/(м·°C) при 0 °C	Дуже малий
Прозорість	Відносно велика
Густина льоду, 917 кг/м <sup>3</sup>	Густина рідкої води більша за густину льоду
Температура плавлення (замерзання), 0 °C	Дуже висока
Температура кипіння, 100 °C	Дуже висока

Зокрема, теплові обміни у воді відіграють важливу роль у формуванні океанських течій, перемішуванні водних мас, а також у процесах танення і

формування льодовиків, снігових і льодових покривів. Ці процеси впливають на живлення річок талою водою, підтримання сезонної водності та виникнення інших гідрологічних явищ (дод. А.).

Гідротерміка — це наука, що досліджує теплові процеси в гідросфері, зокрема такі характеристики, як теплоємність, теплопровідність, теплота фазових переходів та інші теплові властивості води.

Теплоємність — це кількість тепла, необхідна для підвищення температури певної маси речовини на  $1^{\circ}\text{C}$ . Вона визначається за формулою:

$$C = \frac{Q}{\Delta t^{\circ}} \left[ \frac{\text{кал}}{\text{град}} \right], \quad (1.1)$$

де  $Q$  — кількість теплової енергії;  $\Delta t^{\circ}$  — температура тіла відображає рівень його нагрятості. Теплоємність тіла залежить від його маси і складу матеріалу. Теплова енергія може бути отримана з інших джерел енергії.

Для порівняння теплових характеристик різних речовин використовується поняття питомої теплоємності, яка вимірюється на одиницю маси.

$$c = \frac{Q}{\Delta t^{\circ} \cdot m} \left[ \frac{\text{кал}}{\text{г.град}} \right]. \quad (1.2)$$

Вода є еталоном питомої теплоємності (води =  $1 \frac{\text{кал}}{\text{г.град}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$  при нагріванні в інтервалі  $19,5^{\circ} - 20,5^{\circ}\text{C}$ ). Це дуже високий показник. Вищу питому теплоємність мають лише аміак ( $1,20 \frac{\text{кал}}{\text{г.град}}$ ) та водень ( $3,41 \frac{\text{кал}}{\text{г.град}}$ ). Для ґрунтів та порід питома теплоємність складає приблизно  $0,2 \frac{\text{кал}}{\text{г.град}}$ . Завдяки цьому вода виступає природним акумулятором тепла, пом'якшуючи клімат, особливо в межах Світового океану.[3]

Зі збільшенням солоності та тиску питома теплоємність води зменшується. У льоду вона приблизно вдвічі нижча, а в сухому снігу — у 7 разів нижча, ніж у рідкої води. Найвища питома теплоємність спостерігається при температурі  $3,6^{\circ}\text{C}$ , найнижча — близько  $37^{\circ}\text{C}$ .

Для кількісної характеристики та порівняння цих процесів у різних матеріалів використовується поняття коефіцієнта теплопровідності.

$$\lambda = \frac{Q}{\Delta t \cdot F \cdot \frac{dt}{dl}} \left[ \frac{\text{кал}}{\text{см.с.град}}; \frac{\text{Дж}}{\text{м.с.}^\circ\text{C}} \right], \quad (1.3)$$

де  $Q$  — передана кількість тепла (кал, Дж);  $\Delta t$  — час передачі тепла (с);  $F$  — площа перетину, нормального до загального напрямку передачі тепла ( $\text{см}^2$ ,  $\text{м}^2$ );  $\frac{dt}{dl}$  — градієнт температур в районі перетину ( $\frac{\text{град}}{\text{см}}; \frac{^\circ\text{C}}{\text{м}}$ ). Для хімічно чистої води  $\lambda$  складає  $0,001412 \frac{\text{кал}}{\text{см.с.град.}} \approx 0,6 \frac{\text{Дж}}{\text{м.с.}^\circ\text{C}} = 0,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м.}^\circ\text{C}}$ . Для щільного льоду  $\lambda \approx 0,0053 \text{кал/см.с.град.}$

Теплопровідність описує здатність речовини передавати тепло. У води вона досить низька через молекулярну структуру

Низька молекулярна теплопровідність обмежує переохолодження глибоких шарів водойм. Основним механізмом передачі тепла у воді є турбулентне перемішування.

Особливу роль у гідротермічних процесах відіграє теплота фазових переходів:  $L_{\text{вип}}$  — це кількість тепла, яка потрібна для перетворення одиниці маси рідкої води у пар при стандартному тиску та визначеній температурі.  $0^\circ\text{C}$   $L_{\text{вип}} = 597 \frac{\text{кал}}{\text{г}} = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . Якщо враховувати залежність від температури, то:

$$L_{\text{вип.}} = 2,5 \cdot 10^6 - 2,4 \cdot 10^3 t^\circ \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]. \quad (1.5)$$

При конденсації виділяється та сама кількість тепла. Теплота пароутворення розподіляється на два види роботи:

При конденсації виділяється та сама кількість тепла. Теплота пароутворення розподіляється на два види роботи:

Руйнування міжмолекулярних (водневих) зв'язків в середині даного об'єму води та формування плівки поверхневого натягу — внутрішня (захована) теплота пароутворення  $L_1$ .

Робота, пов'язана зі збільшенням об'єму води, тобто проти сил зовнішнього тиску  $L_2$ .

$$L_{\text{вип}} = L_1 + L_2. \quad (1.6)$$

Їх співвідношення при  $10^\circ\text{C}$  таке:  $L_1 = 95\%$ ;  $L_2 = 5\%$ .

Питома теплота танення льоду складає  $79,9 \frac{\text{кал}}{\text{г}} = 333 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . Стільки ж тепла виділяється при замерзанні (кристалізації) води.

Для визначення загальної кількості тепла, що бере участь у фазових переходах води використовують наступні формули:

$$Q_{\text{крис.}} = Q_{\text{пл.}} = mL_{\text{пл.}} [\text{кал, Дж}], \quad (1.7)$$

$$Q_{\text{конд.}} = Q_{\text{вип.}} = mL_{\text{вип.}}, \quad (1.8)$$

$$Q_{\text{субл.}} = Q_{\text{возг.}} = m(L_{\text{пл.}} + L_{\text{вип.}}), \quad (1.9)$$

де  $m$  — маса води (льоду), що приймає участь у процесі.

Усе це свідчить, що гідросфера виконує важливу теплову регулюючу функцію. Без цього біосфера, ймовірно, не змогла б існувати в сучасному вигляді.

### 1.3 Густина води у середовищі

Густина речовини — це фізична величина, що визначається як відношення маси до об'єму:

$$\rho = \frac{m}{v} [\text{г/см}^3; \text{кг/м}^3]. \quad (1.10)$$

Для чистої води при температурі 4°C прийнято стандартне значення густини. Зі зміною температури густина води також змінюється. При зниженні температури зростає вплив тетраедричних структур, які "розпушують" молекулярне упакування. Особливо це проявляється в льоді, густина якого становить лише 0,917 г/см<sup>3</sup>. Через це при таненні льоду густина не зменшується, як зазвичай, а навпаки — зростає. Це пояснюється тим, що молекули води в рідкому стані, втративши кристалічні зв'язки, щільніше зближуються. Внаслідок цього лід плаває на поверхні води, а водойми замерзають зверху, утворюючи теплоізоляційний льодовий покрив.

Густина води також зростає із підвищенням солоності (мінералізації), оскільки розчинені речовини мають вищу питому масу та зменшують надмолекулярну впорядкованість структури води. Залежність густини морської води від температури та солоності за нормального атмосферного тиску описується рівнянням стану:

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha_1 t^\circ + \alpha_2 S), \quad (1.11)$$

де  $\rho_0$  — густина води при  $t^0 = 0$  та  $S = 0$ ,  $t^0$  — температура ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $S$  — солоність ( $\%$ ), та  $\alpha$  — параметри.

Для аналізу здатності води до стискування використовується питомий об'єм, що є оберненою величиною до густини:

Величину стиснення води в кількісному вираженні визначають за допомогою відповідного коефіцієнта, який називають коефіцієнтом об'ємної стискуваності.

$$\beta_v = -\frac{dv}{v} \frac{1}{dP} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dP} \quad (1.12)$$

де  $v$  — об'єм,  $P$  — тиск,  $\rho$  — густина. Знак мінус показує, що збільшенню тиску відповідає зменшення об'єму.

Величина, зворотна до коефіцієнту об'ємної стискуваності, називається модулем об'ємної пружності:

$$K_{\text{пруж.}} = \frac{1}{\beta_v}. \quad (1.13)$$

При нормальних умовах  $K_{\text{пруж.}} \approx 220^{\text{кН}}/\text{см}^2 = 22 \cdot 10^5 \text{кПа}$ . Пружність води збільшується при підвищенні температури, тиску та солоності.

Зміна густини води також залежить від температури та солоності, тому використовуються коефіцієнти температурного розширення та соленосного стиснення. У гідрофізиці переважно враховують температурний вплив:

Цей коефіцієнт показує, як змінюється об'єм води (а отже й густина) при зміні температури. Такі зміни важливі, зокрема, в процесах підйому або занурення водних мас. У фізиці ці явища описують як адіабатичні процеси, тобто такі, що відбуваються без теплообміну з оточенням. У цьому випадку зміна внутрішньої енергії речовини відбувається за рахунок механічної роботи — стиснення або розширення.

В океанології ці процеси враховуються через адіабатичний температурний градієнт, який дозволяє визначити потенційну температуру та потенційну густину води — характеристики, що широко застосовуються в дослідженні руху водних мас.

Аналіз змін густини води за цими параметрами дозволяє простежити вертикальні переміщення води, ідентифікувати шари з різними фізичними властивостями, що є ключовим для розуміння стійкості та вертикальної

циркуляції в гідросфері.

#### 1.4 В'язкість води у середовищі

В'язкість води, або її внутрішнє тертя, характеризує здатність молекул опиратися відносному переміщенню. Вода має низьку в'язкість, яка знижується зі зростанням температури. Наприклад, кінематичний коефіцієнт в'язкості становить  $1,78 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при 0 °С і зменшується до  $0,55 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при 50 °С.

Незважаючи на низьку в'язкість, вода чинить значний опір стискуючим силам, тобто майже не змінює об'єм навіть під великим тиском. Ця властивість свідчить про її високу об'ємну пружність.

Поверхневий натяг води — один з найвищих серед рідин, поступається лише рідкій ртуті. За температури 0 °С коефіцієнт поверхневого натягу становить  $75,6 \cdot 10^{-3}$  Н/м, а при 90 °С знижується до  $60,8 \cdot 10^{-3}$  Н/м. Високий поверхневий натяг надає краплям води кулястої форми, наприклад, при вільному падінні чи в умовах невагомості, що дозволяє мінімізувати поверхню при заданому об'ємі.

Вода має здатність змочувати більшість твердих поверхонь, що забезпечує її капілярне підняття в порах ґрунту і тканинах рослин. Це явище має велике значення для зволоження ґрунтів вище рівня ґрунтових вод і транспортування розчинених поживних речовин до рослин.

Проникнення світла у воду обмежене: у чистій воді на глибині 1 м залишається 90 % інтенсивності світла на поверхні, на 2 м — 81 %, на 3 м — 73 %, а на глибині 100 м — лише близько 1 %. Світлопроникність залежить від наявності домішок і зважених частинок.

Звук у воді поширюється набагато швидше, ніж у повітрі — зі швидкістю 1400–1600 м/с (у 4–5 разів швидше, ніж у повітрі). Ця швидкість зростає зі збільшенням температури, тиску та солоності води.

У хімічно чистому вигляді вода є слабким провідником електрики. Її питома електропровідність при 18 °С становить  $3,8 \cdot 10^{-6}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Лід має в

10 разів меншу електропровідність, ніж рідка вода. Електропровідність води зростає з підвищенням температури, мінералізації та тиску. Наприклад, на глибинах понад 10 км у океані електропровідність може бути на 12 % вищою, ніж на поверхні.

У тонких шарах вода виглядає безбарвною, однак при збільшенні товщини набуває голубувато-зеленого відтінку. Прозорість природної води у водоймах залежить від кількості та складу зважених часток, які можуть суттєво знижувати проникність світла.

## 2. ІСНУЮЧІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ВОДИ

### 2.1 Витратомір та його основні характеристики

Витрата — це кількість маси або об'єму речовини, що проходить через певний отвір за одиницю часу. Прилад для вимірювання витрати називається витратоміром, а пристрій для обліку маси або об'єму — лічильником кількості або просто лічильником. Існують також прилади, що одночасно вимірюють і витрату, і загальну кількість речовини — їх називають витратомірами з лічильником.

Кількість речовини може бути виражена у одиницях маси (грамах, кілограмах тощо) або об'єму (кубічних метрах), тому відповідно й витрата вимірюється у масових одиницях за одиницю часу (наприклад, кг/с) або об'ємних одиницях за одиницю часу ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

Масова витрата — це маса речовини, що проходить через визначену площу за одиницю часу. В системі SI її вимірюють у кілограмах за секунду (кг/с). Для її обчислення використовують середню швидкість потоку — усереднену величину швидкості руху речовини в перерізі потоку.

Масова витрата може бути обчислена через густину речовини, площу перетину потоку і середню швидкість потоку у цьому перетині [4]:

$$Q_M = \rho VS, \quad (2.1)$$

Через об'ємну витрату масову витрату можна записати як:

$$Q_0 = u \cdot S \cdot \cos(\theta). \quad (2.2)$$

При розрахунку витрати, потрібно використовувати середню швидкість потоку. Це усереднена характеристика інтенсивності процесу протікання речовини.

Середня швидкість — це уявна величина, однакова для всіх точок перерізу, при якій через цей переріз пропускається така ж кількість рідини, як і при дійсних швидкостях руху речовини.

Лічильник води — це пристрій, який вимірює і фіксує кількість води, що проходить через нього. Його основне призначення — точний облік

споживання води для побутових, комерційних та промислових потреб. Лічильники встановлюються на водопровідних мережах для контролю витрат, що сприяє справедливому розподілу витрат між споживачами і економії водних ресурсів.

Лічильник гарячої води розроблений для роботи в умовах високих температур (до 90–95 °С) і призначений для обліку води, що використовується для опалення та гарячого водопостачання.

Робоча температура :

- лічильник гарячої води: здатний працювати при високих температурах, зазвичай до 90-95°C;
- лічильник холодної води: розрахований на роботу при температурах до 30-40°C.

Матеріали :

- лічильник гарячої води: використовує матеріали, стійкі до високих температур і корозії, такі як латунь або спеціальні термостійкі пластики;
- лічильник холодної води: виготовляється з матеріалів, менш стійких до температур, але все одно стійких до корозії.

Існують різні типи лічильників води: механічні, електричні, смарт-лічильники.

Одним із важливих завдань при розробці нових моделей лічильників гарячої води є всебічний аналіз сучасних технологій обліку та існуючих моделей пристроїв. Це дозволяє виявити ключові тенденції, оцінити переваги й недоліки, а також визначити шляхи подальшого вдосконалення. Далі також розглянемо історію виникнення лічильника води.

## **2.2 Ультразвукові лічильники води**

Ультразвукові водолічильники функціонують на основі використання ультразвукових хвиль для визначення швидкості водяного потоку, що дає змогу точно обчислити об'єм споживаної води. Ці пристрої вирізняються високою точністю вимірювання, стабільністю роботи й тривалим терміном служби.

Ультразвукові лічильники води — це сучасні високоточні електронні пристрої для обліку водоспоживання. Завдяки своїм технічним особливостям, вони значно перевершують механічні аналоги за точністю та якістю вимірювань. Зокрема, їхня конструкція забезпечує оптимальні гідродинамічні характеристики — такі лічильники не створюють перешкод для потоку та мають ширший діапазон вимірювання витрат у порівнянні з механічними моделями. Як правило, їх метрологічна класифікація відповідає класу «С», з показником співвідношення витрат від R 250 і більше.[5]

Ці прилади є електронними за своєю природою, тому вже у стандартному виконанні вони обладнані цифровими інтерфейсами зв'язку. На передній панелі зазвичай розміщується оптичний порт, а також передбачена можливість підключення додаткових модулів, як-от імпульсний вихід, радіомодуль або модуль інтерфейсу типу MODBUS RS485 тощо.

Такі лічильники легко включаються до систем із дистанційною передачею показань. Однією з їхніх характерних особливостей є наявність вбудованої пам'яті, яка зберігає інформацію про витрату води за останні 36 місяців У додатку Б подано зовнішній вигляд лічильника і позначене наступне маркування : 1 – знак відповідності; 2 – додаткове метрологічне маркування; 3 – номер органу оцінки відповідності; 4 – номер сертифікату затвердження типу; 5 – Термін служби батареї; 6 – Серійний номер; 7 – Оптична кнопка; 8 – Тримач оптоголовки; 9 – Назва виробника; 10 – Клас захисту корпусу; 11 – Температурний клас; 12 – Класи точності, навколишнього та електромагнітного середовища; 13 – Максимальний тиск; 14 – Співвідношення Q3/Q1; 15 – Клас втрати тиску; 16 – Номінальна витрата; 17 – Виконання; 18 – Позначення типу; 19 – Пломба.

Ультразвукове вимірювання витрати базується на трьох основних методах визначення швидкості потоку, з подальшим розрахунком витрати рідини:

1. Імпульсно-часовий метод (метод фазового зсуву) — передбачає вимірювання різниці фазових зсувів ультразвукових сигналів, що

проходять по напрямку руху рідини та проти нього. Метод визначення зсуву частоти (доплерівський принцип) — використовує ефект зміни частоти ультразвукових коливань через рух середовища. Вимірюється різниця частот імпульсів, що передаються в обидва боки потоку. Вихідна частота визначається за формулою:

$$f_d = f_0 - f_r, \quad (2.4)$$

де  $f_0$  — частота випромінюваного сигналу, а  $f_r$  — прийнятого.

Частотна різниця прямо пропорційна швидкості потоку. Через малі розміри ультразвукових кристалів порівняно з діаметром труби, такий метод дає локальні, а не усереднені показники швидкості, що вимагає обов'язкової калібровки приладів з урахуванням температури та в'язкості рідини.

2. Метод вимірювання часу проходження сигналу (метод зносу) заснований на визначенні різниці часу, необхідного сигналам для подолання відстані в напрямку потоку та проти нього. Ефективна швидкість звуку при цьому дорівнює сумі швидкості звуку в середовищі та швидкості самого потоку. У напрямку потоку сигнал долає відстань швидше, а проти — повільніше. Відповідно, різниця в часі дозволяє обчислити швидкість середовища:

У конструкції таких пристроїв зазвичай використовують два ультразвукових генератори, розміщених на кінцях ділянки труби. Генераторами можуть виступати п'єзокристали, що працюють як передавачі та приймачі хвиль. Їх розташовують або під певним кутом  $\beta$ , або прямо по осі потоку (при  $\beta = 0$ ). Час проходження звукової хвилі між двома датчиками залежить від середньої швидкості потоку, що дозволяє визначити її точне значення.

Серед основних переваг акустичних витратомірів [6] можна відзначити:

- можливість експлуатації у складних середовищах — забруднених або хімічно активних;
- швидке реагування без інерційності;
- безконтактний принцип дії;

- відсутність обертових або рухомих елементів у потоці;
- мінімальний опір потоку та відсутність втрат тиску в трубопроводах.

### 2.3 Лічильники механічні

Серед усіх наявних на ринку аналогів механічні водоміри вважаються найбільш популярними та затребуваними. Їхня робота ґрунтується на використанні рухомих елементів — крильчаток або турбін, які починають обертатися під тиском водяного потоку. Кількість обертів прямо пропорційна об'єму води, що протікає через прилад, а самі оберти перетворюються у цифрові значення за допомогою лічильного механізму.

Цей тип лічильників ідеально підходить для монтажу у житлових приміщеннях. Вони відзначаються невисокою вартістю та простотою в експлуатації. Швидкісні або, як їх ще називають, відцентрові водоміри — це окремий різновид механічних приладів, що використовуються для вимірювання витрати води.

Принцип дії таких приладів базується на обертанні роторного елемента крильчатки, яка обертається під впливом водяного потоку (дод. Б). Ротор, який має форму крила або вітряка, обертається під тиском води, а кількість обертів фіксується механічною частиною пристрою для визначення загального об'єму води, що пройшла.

Типові моделі для обліку холодної води працюють при температурах до 30 °С (максимально — до 50 °С), а для гарячої — до 90 °С (іноді до 130 °С). Робочий тиск зазвичай становить 1,6 МПа. Такі пристрої застосовують як у побуті, так і на підприємствах — залежно від потужності систем, лічильники поділяють на індивідуальні та промислові.

Сучасні моделі можуть додатково комплектуватися імпульсними виходами або модулями дистанційного передавання даних, що дозволяє знімати показники без фізичного доступу до приладу [7].

До переваг швидкісних водомірів належать висока точність, стабільність показників та здатність працювати з великими об'ємами води. Проте їх робота може ускладнюватися за наявності у воді забруднень, що здатні вплинути на обертання елементів. Такі пристрої потребують регулярного технічного обслуговування для забезпечення стабільної роботи.

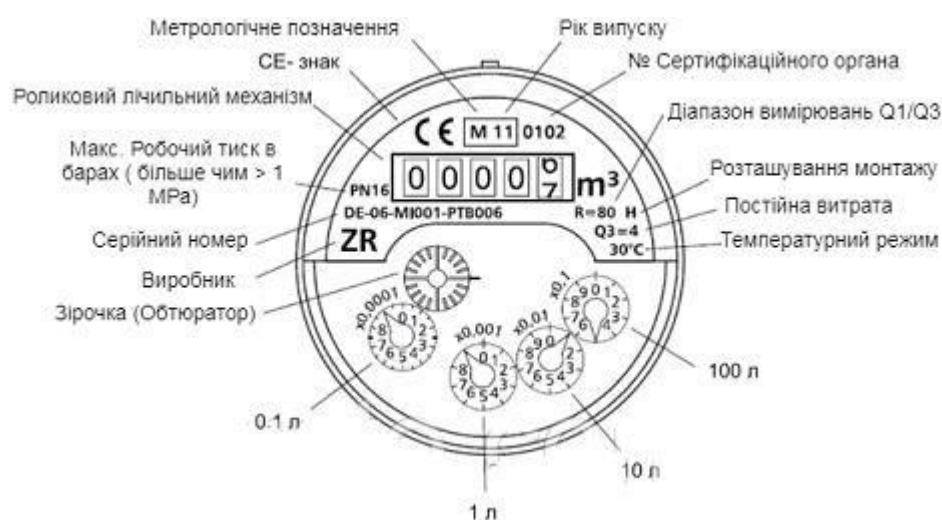


Рисунок 2.1 – Розшифрування написів на передній панелі лічильника

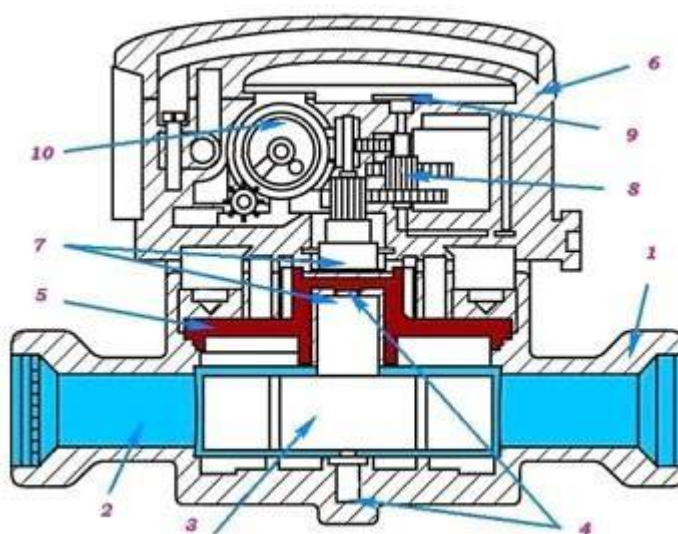


Рисунок 2.2 – Конструкція швидкісного лічильника

Пристрій типової моделі показано на рисунку 2.1.

Основна частина — корпус нижньої частини (1) — зазвичай виготовляється з немагнітних сплавів, таких як латунь або алюмінієві сплави. У деяких моделях також використовують полімерні матеріали. Всередині корпусу розташовані канали для руху води (2), що ведуть до центральної камери, в яку встановлена крильчатка (3). Вісь крильчатки у якісних водолічильниках встановлюється на спеціальних каменях (4), що знижують тертя, підвищуючи точність вимірювань.

Робоча частина лічильника герметично ізольована полімерною перегородкою (5), яка фіксується гайкою або стопорним кільцем. У моделях із захистом від магнітного втручання на цьому ж місці знаходиться спеціальна муфта, яка нейтралізує вплив зовнішнього магнітного поля.

Над корпусом монтується герметичний лічильний модуль (6), зазвичай з прозорого пластику. Він фіксується кільцем, що дозволяє його повертати по осі, та обов'язково опломбовується на заводі-виробнику.

Передача обертального руху від крильчатки до механізму здійснюється завдяки парі магнітних кілець (7), одне з яких встановлено на крильчатці, а інше — на осі облікового механізму.

У такий спосіб обертання крильчатки синхронізується з рухом лічильного механізму. Далі цей обертальний рух через систему зубчастих передач (8) передається на стрілочний індикатор витрат (9) і цифровий роликівий механізм (10), який фіксує витрату води з точністю до літра. Зазвичай три червоні цифри на табло вказують на частки кубометра, а п'ять чорних — на повні кубічні метри, дозволяючи рахувати до 99 999 м<sup>3</sup> спожитої води.

Новітні моделі обладнані вбудованим зворотним клапаном, який запобігає поверненню води назад у систему, запобігаючи втратам. Усі

лічильники мають механізм обліку з магнітним з'єднанням з крильчаткою. Для підвісу крильчатки використовуються агатові (ПАС) або корундові (ПКС) камені.

Моделі лічильників варіюються за параметрами: температурою води, номінальними діаметрами трубопроводу, діапазоном вимірюваної витрати, габаритами, масою, типорозмірами, допуском до похибки та методами зчитування показів.

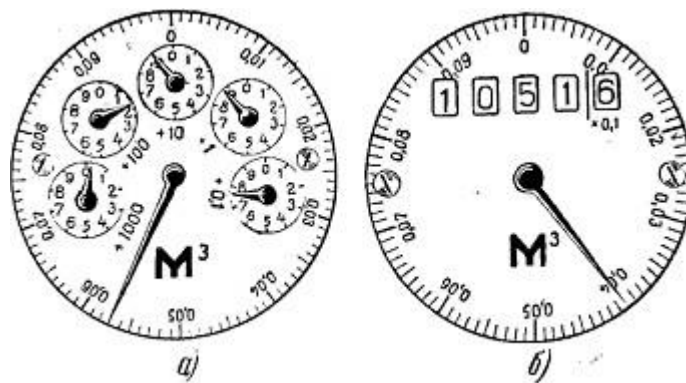
Матеріали, що стикаються з водою, виготовлені з поліпропілену 01020-16 і не погіршують її якість, а також стійкі до дії водного середовища. Корпус зазвичай виготовлений з латуні ЛЦ40См відповідно до ДСТУ EN 14154-1:2015.

Найважливішим елементом облікової системи є сам вимірювальний пристрій, який безпосередньо взаємодіє з потоком середовища. Саме він визначає основні експлуатаційні характеристики всього облікового вузла.

Визначення призначення і умов використання лічильників та витратомірів для рідких енергоносіїв дає змогу встановити базовий перелік характеристик приладу, який відповідає експлуатаційним умовам. Ці умови враховують цілу низку факторів, що впливають на точність реєстрації витрат і можуть спричинити збої в роботі пристрою.

Регламентовані умови експлуатації лічильників включають допустимий температурний діапазон води, тиск у системі, вологість і температуру навколишнього середовища, а також клас чутливості пристрою до турбулентності потоку до і після місця встановлення (визначається необхідною довжиною прямої ділянки трубопроводу).

Швидкісні водоміри виготовляють у варіантах з одним або декількома струменями.



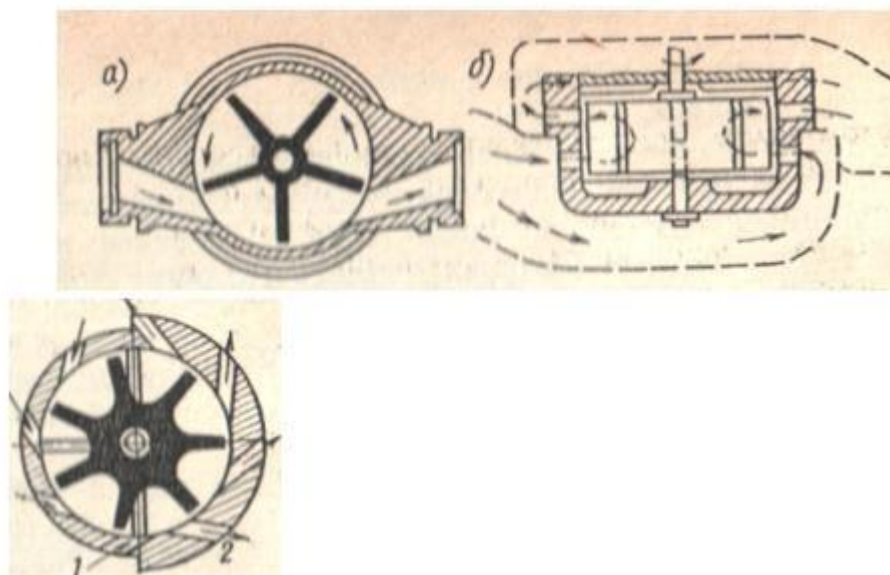
а – багатоструменевий лічильника; б – одноструменевий лічильник

Рисунок 2.3 – Циферблат лічильника

Це тип водолічильників, принцип дії яких базується на підрахунку кількості обертів крильчатки, що обертається під дією водяного потоку в трубопроводі. Обертальний рух крильчатки передається на лічильний механізм за допомогою магнітної муфти. Сам механізм обліку є сухоходного типу, тобто ізольований від контакту з водою, що сприяє збереженню точності вимірювань протягом тривалого часу.

Конструкція лічильника передбачає наявність антимагнітного захисту, який запобігає впливу зовнішніх магнітних полів на обліковий механізм.

Відмінною рисою багатоструменевих моделей є те, що водяний потік перед потраплянням на крильчатку розділяється на декілька окремих струменів. Така конструктивна особливість дозволяє мінімізувати похибки, спричинені турбулентністю потоку, та суттєво підвищує точність обліку.

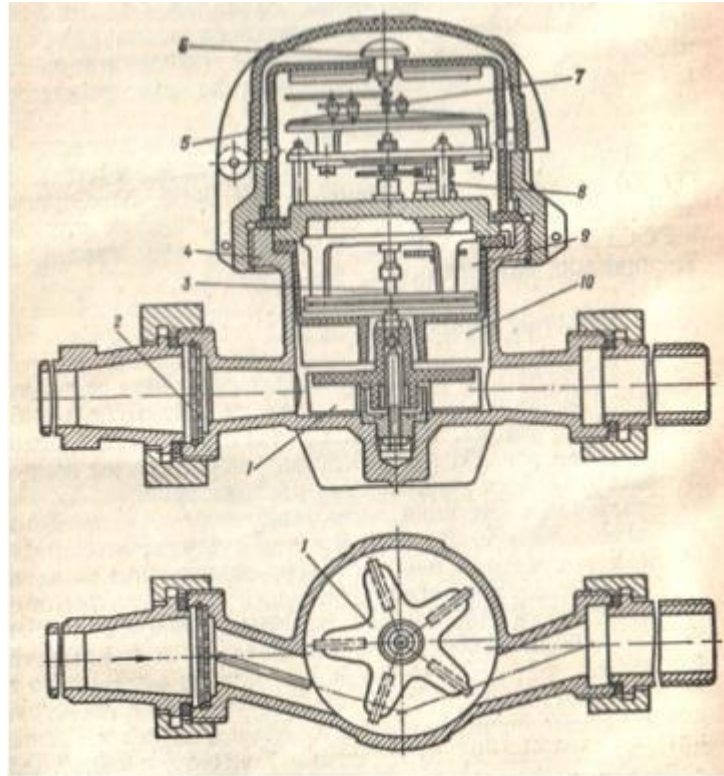


а- одноструменевий; б- багатоструменевий; 1- канали, що підводять; 2 - канали, що відводять.

Рисунок 2.4 – Схема руху потоку в швидкісних лічильниках води

І одноструменеві, і багатоструменеві лічильники можуть бути виконані у варіантах «мокрохід» або «сухохід». У мокрохідних моделях лічильний механізм безпосередньо контактує з водою, тоді як у сухохідних — він відділений від води герметичною перегородкою.

Мокроходи, на відміну від сухоходів, зазвичай мають вищий ступінь захисту від впливу зовнішнього середовища (ступінь захисту IP68) та демонструють кращі метрологічні характеристики [8].



1- крильчатка; 2- сітка; 3- вісь крильчатки; 4- корпус; 5- кришка; 6- склоочисник; 7- рахунковий механізм; 8- сальник; 9- редуктор; 10- регулювальна чашка.

Рисунок 2.5 – Одноструменевий швидкісний лічильник води

Короткі висновки та постановка задач бакалаврської роботи:

- Описано принципи роботи витратомірів, зокрема масові та об'ємні витрати.
- Розглянуто три основні типи лічильників: механічні, ультразвукові та електронні (смарт-лічильники).
- Визначено переваги ультразвукових пристроїв: висока точність, відсутність рухомих частин, збереження даних, дистанційна передача.
- Механічні лічильники — надійні й дешевші, але потребують регулярного обслуговування та менш точні при зміні параметрів води.

Тому необхідно вирішити наступні задачі

- Розробити математичну модель гідродинамічних процесів, що відбуваються під час вимірювання витрати гарячої води швидкісними лічильниками.

- Дослідити вплив режимів руху рідини на швидкість обертання механізму лічильника
- Розробити конструкцію лічильника холодної і гарячої води з автономним живленням, який є складовою частиною інформаційно-вимірювального комплексу для дистанційної передачі та обробки показів.
- Провести метрологічний аналіз та розробити метрологічне забезпечення удосконаленого лічильника.
- Розробити заходи для забезпечення безпечних умов експлуатації побутового лічильника гарячої води.

### 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЛІЧИЛЬНИКА ГАРЯЧОЇ ВОДИ

#### 3.1 Обґрунтування теоретичне гідродинаміки у витратомірах

Рівняння Нав'є–Стокса — це система диференціальних рівнянь у частинних похідних, яка описує рух і теплопередачу в'язкої ньютонівської рідини. Ці рівняння є одними з найважливіших у гідродинаміці й широко застосовуються в математичному моделюванні як природних явищ, так і інженерних задач. Названі на честь французького фізика Луї Нав'є та британського математика Джорджа Стокса.

Система складається з двох рівнянь:

- рівняння руху,
- рівняння нерозривності.

В векторному виді для нестисливої рідини вони записуються в такий спосіб [9]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (3.2)$$

де  $\nabla$  - оператор Гамільтона,  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $t$  - час,  $\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\rho$  - щільність,  $p$  - тиск,  $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$  - векторне поле швидкостей,  $\vec{f}$  - векторне поле масових сил.

Невідомими величинами є  $p$  та  $\mathbf{V}$ , які є функціями часу  $t$  та координат  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ , де  $n = 2$  або  $3$  — для плоскої або просторової області відповідно. Зазвичай систему рівнянь Нав'є–Стокса доповнюють початковими та крайовими умовами, наприклад:

$$\vec{v}|_{\partial\Omega} = 0, \quad (3.3)$$

$$\vec{v}|_{t=0} = \vec{v}_0. \quad (3.4)$$

У деяких випадках до системи додають рівняння теплопровідності та рівняння стану.

З урахуванням стисливості рівняння набувають вигляду:

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,k} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \zeta \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{i,k} \right), \quad (3.5)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості;  $\zeta$  - кінематична в'язкість

Однією з нерозв'язаних задач сучасної математики є питання існування та гладкості глобального розв'язку задачі Коші для тривимірних рівнянь Нав'є–Стокса. За розв'язання цієї проблеми Математичний інститут Клея оголосив премію у розмірі 1 млн доларів США. Свої премії також заснували деякі корпорації, наприклад *Boeing*.

Наразі точні аналітичні розв'язки існують лише для окремих випадків, зокрема:

- стаціонарні течії в простих геометричних областях: течія Пуазейля, течія Тейлора–Куетта тощо;
- солітони й нелінійні хвилі — рішення для складних граничних умов (вперше спостерігав інженер Рассел);
- кінцевочасові рішення — режими з “загостренням”, наприклад, при падінні краплі на поверхню води або при утворенні вихору після вибуху;
- звукові коливання — при малих амплітудах нелінійні члени зникають, і рішенням стають гармонійні функції (синус, косинус).

### Основні властивості рівнянь Нав'є–Стокса:

При перевищенні певного критичного числа Рейнольдса ( $Re$ ), рішення набувають хаотичного характеру — це явище турбулентності. Перехід до турбулентності описується, зокрема, сценаріями Фейгенбаума.

- Рішення надзвичайно чутливі до початкових умов і зміни параметрів (наприклад, зміна  $Re$  на 0,05 % може докорінно змінити результат).
- Є гіпотеза, що рівняння Нав'є–Стокса є наближеними, оскільки при їх виведенні використовуються спрощення, зокрема для тиску  $p$ .

## Застосування

Система рівнянь Нав'є–Стокса використовується для:

- моделювання течій у мантії Землі (т. зв. “проблема динамо”);
- опису руху повітряних мас в атмосфері (під час прогнозування погоди);
- аналізу реальних течій у технічних пристроях (наприклад, трубопроводах, турбінах, камерах згоряння).

Оскільки для отримання адекватної точності потрібно, щоб розрахункова сітка мала елементи меншого розміру, ніж найдрібніші вихори, чисельне моделювання вимагає колосальних обчислювальних ресурсів. З цієї причини застосовуються моделі турбулентності, які спрощують обчислення, жертвуючи частиною точності.

### 3.2 Режими руху рідини

На основі теоретичних досліджень і експериментальних спостережень Осборн Рейнольдс встановив умови, за яких можливі різні режими течії рідини — ламінарний, турбулентний, а також перехід між ними. Виявлено, що характер руху рідини в трубопроводі залежить від величини безрозмірного параметра, пізніше названого числом Рейнольдса. Цей параметр враховує такі основні фізичні характеристики: середню швидкість потоку  $v$ , діаметр труби  $d$ , щільність рідини  $\rho$  та її динамічну в'язкість  $\mu$ . Формула для обчислення числа Рейнольдса має вигляд:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vd}{\nu} \quad (3.6)$$

У цій формулі діаметр  $d$  можна замінити на будь-який характерний лінійний розмір, що визначає геометрію течії (наприклад, довжину пластини або діаметр тіла, яке обтікається рідиною).

Число Рейнольдса дозволяє встановити режим руху рідини. Якщо  $Re < Re_{кр}$ , потік ламінарний, якщо  $Re > Re_{кр}$  — турбулентний. Критичне число Рейнольдса  $Re_{кр}$  залежить від низки чинників, зокрема: шорсткості труб, форми та плавності входу, початкових збурень і конвекційних струмів.

Зазвичай для переходу від ламінарного до турбулентного режиму в трубах круглого перерізу беруть середнє критичне значення  $Re_{кр} \approx 2000$ , а для зворотного переходу — до 200. При цьому:

- у звужених трубах  $Re_{кр}$  збільшується через зменшення поперечного перемішування частинок рідини;
- у розширених — зменшується, бо уповільнення потоку сприяє турбулізації.

Знаючи критичне число Рейнольдса, можна розрахувати критичну швидкість, за якої ще зберігається ламінарний режим:

$$v_{кр} = \frac{Re_{кр} \nu}{d} = \frac{2000 \nu}{d} \quad (3.7)$$

У практиці інженерних розрахунків, наприклад, в опалювальних або вентиляційних системах, найчастіше маємо справу з турбулентним режимом. Це пов'язано з низькою в'язкістю робочих середовищ (вода, повітря, газ), у результаті чого числа Рейнольдса сягають таких значень:

- побутові газопроводи: не менше 3000;
- міські мережі: не менше 200000;
- вентиляційні системи: не менше 150000;
- стиснене повітря: від 400000;
- паропроводи ЦО: понад 30000;
- на ТЕЦ — до 3–5 млн.

Ламінарний режим можливий лише за невеликих швидкостей у вузьких трубках або для рідин з великою в'язкістю (олії, гліцерин, нафта).

Фізичний зміст числа Рейнольдса можна трактувати як співвідношення сил інерції до сил в'язкості. З енергетичної точки зору:

- кінетична енергія елемента рідини  $\sim \rho v 2l 3 \sim \rho v^2 l^3 \sim \rho v 2l 3$ ,
- робота сил тертя  $\sim \mu l 2v \sim \mu l^2 v \sim \mu l 2v$ .

Відношення цих величин визначає число Рейнольдса:

$$\frac{\rho^3 v^2}{\mu^2 v} = \frac{v \rho l}{\mu} = \frac{v l}{\nu} = Re \quad (3.8) \quad \mu \quad u$$

Таким чином:

- при малих значеннях  $Re$  домінують сили в'язкості, і потік упорядкований (ламінарний);
- при великих значеннях  $Re$  переважають сили інерції, і виникає турбулентність.

Історично вперше на існування різних режимів руху звернули увагу Хаген, Дарсі та Менделєєв. Однак саме Осборн Рейнольдс у 1883 р. наочно продемонстрував експериментально і теоретично наявність двох режимів: ламінарного (від лат. *lamina* – шар) і турбулентного (*turbulentus* – безладний). Ламінарний потік — це шаруватий рух без перемішування між шарами. Характерний для повільного руху або дуже в'язких рідин. Турбулентний потік — це хаотичний рух з пульсаціями тиску та швидкості, інтенсивним перемішуванням частинок. Такий режим переважає в більшості інженерних трубопроводів.

У випадку труб нестандартного перерізу (не круглих), використовують гідравлічний радіус  $R=PA$  — відношення площі поперечного перерізу до змоченого периметра, і число Рейнольдса обчислюється за формулою:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (3.9)$$

$$Re_{кр} = \frac{u_{кр} d}{\nu} = 2320 \quad (3.10)$$

$$Re_{кр} = \frac{ud}{\nu} < Re_{кр} = 2320 \quad (3.11)$$

$$Re = \frac{4uR_r}{\nu} \quad (3.12)$$

де  $\nu = \mu\rho = \frac{\mu}{\rho}$  — кінематична в'язкість рідини.

### **3.3 Розроблення конструкції удосконалення лічильника гарячої води**

У цій бакалаврській роботі представлено розробку автономного лічильника гарячої води з функцією дистанційного зчитування показань. Запропонована конструкція базується на використанні водяного турбогенератора, який виконує дві основні функції:

- забезпечує вимірювання витрати води шляхом аналізу напруги, що генерується під час її протікання;
- виробляє електроенергію для підзарядки акумуляторів, необхідних для роботи системи.

Ключовим елементом конструкції є мікро-гідрогенератор, який виконує одночасно роль датчика витрати та джерела автономного живлення. Такий підхід дозволяє уникнути необхідності зовнішнього електроживлення або регулярної заміни батарей, що підвищує зручність експлуатації та зменшує витрати на обслуговування.

У розроблену систему інтегровано мікроконтролер, який обробляє сигнал з гідрогенератора для розрахунку швидкості потоку і об'єму спожитої води. Для забезпечення функції автоматичного зняття показань передбачено модуль бездротового зв'язку (Bluetooth), що передає інформацію про потік води у реальному часі на смартфон або інший пристрій користувача.

Конструкція є масштабованою: можливість адаптації розмірів водяного турбогенератора до різних діаметрів труб дозволяє використовувати лічильник у широкому діапазоні побутових і комерційних застосувань. Крім того, алгоритм цифрової обробки сигналу може бути оновлений дистанційно, що спрощує процес калібрування і забезпечує високу точність вимірювань у динамічних умовах експлуатації.

Така система може працювати всюди, де є водопостачання, і здатна в реальному часі збирати та передавати дані про споживання води. Це відкриває нові можливості для впровадження розумних рішень у сфері енергоефективності, обліку ресурсів і автоматизації житлово-комунального господарства.

### **3.4 Блок схема**

На рисунку 3.1 наведено структурну схему інтелектуального лічильника води, реалізованого в рамках даного проєкту. Основним джерелом енергії в системі є водяний турбінний генератор (ВТГ), який генерує електричний сигнал напруги при протіканні води через нього.

Згенерований сигнал спочатку подається на випрямляч, після чого — на програмований однополюсний двопозиційний перемикач. Цей перемикач виконує функцію керування напрямом подачі сигналу:

- у режимі вимірювання витрати сигнал перенаправляється до мікроконтролера, який здійснює відбір проб і обчислення витрати води;
- у режимі зарядки — сигнал подається на стабілізатор напруги, а потім — на зарядний модуль, що забезпечує підзарядку акумуляторної батареї.

Живлення мікроконтролера здійснюється від акумуляторів. У разі повного заряджання батарей, вони автоматично відключаються від зарядного кола для запобігання перенавантаженню.

Інтелектуальний лічильник оснащено бездротовим передавачем, який передає дані про витрату води у реальному часі до зовнішнього приймача або хмарного сервісу. Для підвищення енергоефективності система може включати модуль керування живленням, який переводить мікроконтролер у сплячий режим у періоди бездіяльності.

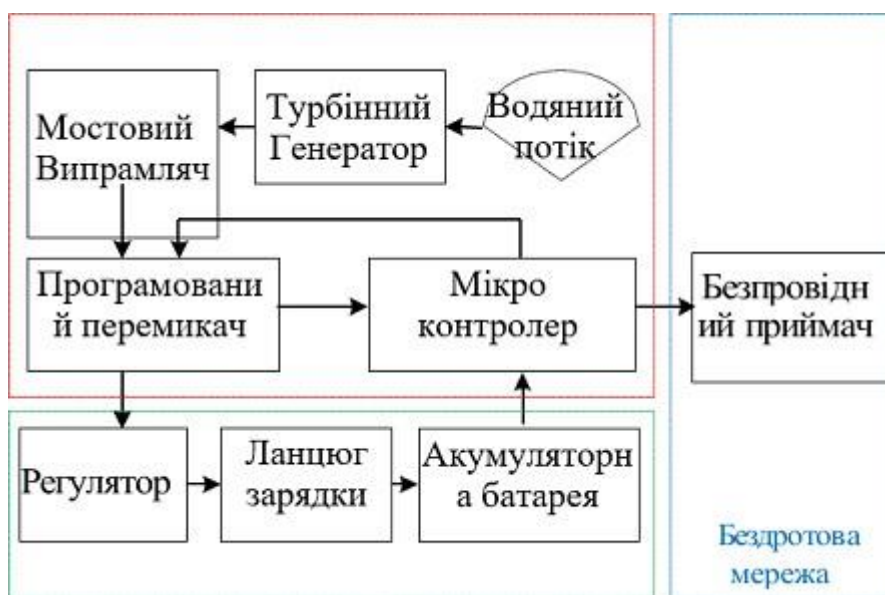


Рисунок 3.1 - Структурна схема лічильника

На початковому етапі проєктування було визначено ключові компоненти вводу/виводу (I/O). Для реалізації бездротового обміну даними

обрано технологію Bluetooth через її низьке енергоспоживання. Типові параметри споживання модуля Bluetooth:

- 40 мА у режимі з'єднання (132 мВт),
- 8 мА у нормальному режимі (26,4 мВт),
- 2 мА у сплячому режимі (6,6 мВт).

Для обробки даних використано мікроконтролер, який працює при напрузі 3–5 В і споживає приблизно 5 мВт. Таким чином, загальне енергоспоживання системи становить близько 137 мВт у піковому режимі.

В ході аналізу було встановлено, що добова витрата води у домогосподарствах є нерівномірною, з періодами низького водоспоживання (менше 5 л/год). Тому для стабільної роботи системи незалежно від режиму витрати було обрано гідротурбінний генератор номіналом 12 В, 10 Вт, що забезпечує достатній енергетичний резерв для заряджання акумуляторів та живлення всіх компонентів лічильника.

### **3.5 Водяний турбогенератор**

На рисунку 3.2(а) показано зовнішній вигляд турбінного генератора, що складається з двох основних частин: ротора та статора (рис. 3.2(б)). Ротор герметично ізольований від статора. В центрі ротора розміщено магнітний стрижень, навколо якого магнітне поле перебуває у стані рівноваги. Це дає змогу магніту "плавати" в підшипнику (рис. 3.2(в)), забезпечуючи обертання ротора без тертя, що значно підвищує енергоефективність пристрою.

Типовий трифазний генератор має три обмотки, але в даній конструкції статор містить дев'ять котушок, згрупованих у три набори. Кожен набір котушок з'єднано послідовно, причому один кінець кожного набору виведено як фазний вихід, а інші кінці об'єднані в загальну нейтраль

(заземлення). Така конфігурація дозволяє збільшити довжину проводу на фазу, що підвищує рівень генерованої напруги. Варто зауважити, що при цьому зменшення діаметра дроту через обмеження простору призводить до зниження максимально допустимого струму.[9]



а - вигляд гідро-турбогенератора; б - ротор; в - статор і відповідні дротяні обмотки у вигляді дев'яти котушок; г - підшипник ротора.

Рисунок 3.2 – Конструктивні складові гідро-турбогенератора

За допомогою гауссметра було виміряно індукцію магнітного поля в генераторі. Максимальне значення склало 115,8 мТл. Для візуалізації розташування магнітів було застосовано залізну тирсу, результати експерименту подано на рисунку 3.2(а). Магніт у генераторі розділено на сегменти з чергуванням протилежних полюсів, що сприяє ефективному генеруванню змінного струму.

Всередині кожної котушки статора розміщено феритове осердя, яке концентрує потік магнітного поля через обмотки. Під час обертання магніта

змінюється полярність потоку в котушках, що призводить до індукції синусоїдального струму.

Для підвищення щільності потоку та, відповідно, збільшення генерованої напруги, можна використовувати потужніші магніти. Щільність магнітного потоку залежить не лише від матеріалу, а й від геометрії магніта. Розрізняють чотири основні типи форм магнітів: блочні, циліндричні, кільцеві та сферичні. У даному випадку використовується кільцевий магніт, який складається з кількох елементів, що за формою наближені до блочних магнітів (рис. 3.2(б)).

Магнітне поле блочного магніта моделюється згідно з виразом:

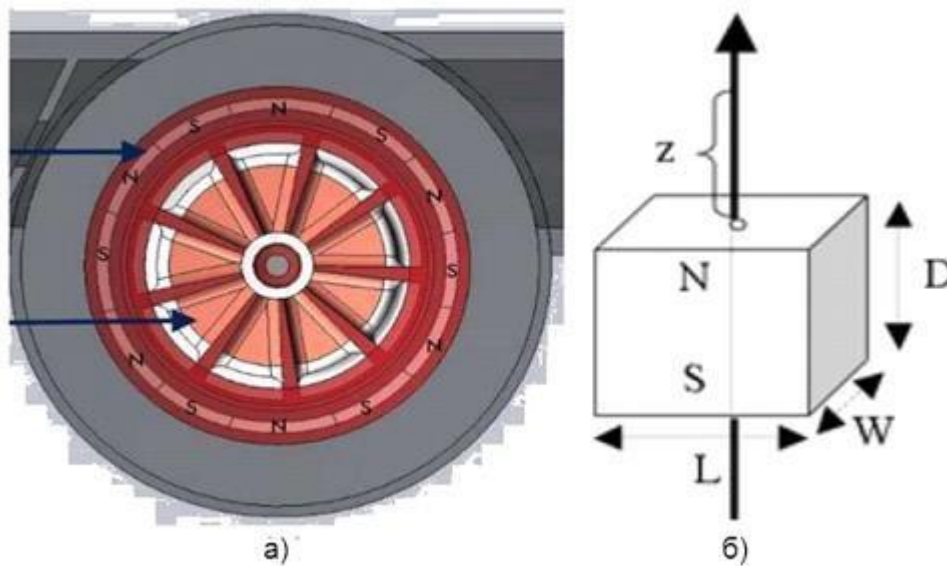
$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[ \begin{array}{l} \tan^{-1} \left( \frac{LW}{2z\sqrt{L^2+W^2+4z^2}} \right) \\ - \tan^{-1} \left( \frac{LW}{2(D+z)\sqrt{L^2+W^2+4(D+z)^2}} \right) \end{array} \right], \quad (3.13)$$

де:  $B_r$  — залишкова індукція (реманентність),  $z$  — відстань від полюсної грані вздовж осі симетрії,  $L, W, D$  — довжина, ширина та товщина магніта відповідно.

Для даного генератора розміри одного сегмента магніта становлять:  $L=6,83$  мм,  $W=11$  мм,  $D=1$  мм.

При  $z=0,1$  мм і  $B=115,8$  мТл, за формулою визначено значення  $B_r \approx 1,09$  Тл. Це вказує, що використаний магніт найімовірніше належить до типу спеченого неодим-залізо-бору (NdFeB), самарій-кобальту (SmCo) або алюміній-нікель-кобальту (AlNiCo).

Хоча підрахунки містять похибки через обмеження вимірювального обладнання, вони дозволяють зробити орієнтовну оцінку характеристик магніта, а також надати рекомендації щодо його заміни на більш ефективний аналог для підвищення продуктивності генератора.



а - макет магніту гідротурбінного генератора; б - модель блочного магніту.

Рисунок 3.3 – Будова магніту генератора

### 3.6 Генерація напруги

Згідно із законом електромагнітної індукції Фарадея, індукована напруга в провіднику прямо пропорційна кількості витків щільно намотаної котушки та швидкості зміни магнітного потоку через один виток. Таким чином, швидкість обертання турбіни безпосередньо впливає на амплітуду генерованої напруги: що вища швидкість — то вищий рівень напруги.

Кількість електричної потужності, яку може забезпечити турбіна, можна оцінити за рівнянням:

$$P = \eta \rho g h Q \quad (3.14)$$

де:  $P$  — механічна потужність, що доступна з потоку води,  $\eta$  — коефіцієнт корисної дії турбіни (для малої турбіни прийнято  $\eta=0,5$ ),  $\rho$  — густина води (приблизно  $1000\text{--}1030 \text{ кг/м}^3$ ),  $g$  — прискорення вільного падіння ( $9,8 \text{ м/с}^2$ ),  $h$  — гідравлічний напір (сума статичного і динамічного тиску),  $Q$  — витрата води ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

Конструкція корпусу турбіни передбачає наявність пластикової оболонки з внутрішнім трубопроводом діаметром 15 мм. На вході до

робочої камери формується сопло, що концентрує потік і підвищує швидкість води перед її подачею на лопаті турбіни.

Вплив швидкості водяного потоку на енергію, що передається турбіні, описується імпульсною формулою:

$$p = \rho Av^2 \quad (3.15)$$

де:  $p$  — тиск, створений потоком (імпульсний компонент),  $A$  — площа поперечного перерізу каналу,  $v$  — швидкість потоку води.

Виходячи з закону збереження імпульсу, більша швидкість води забезпечує більший обертальний момент на робочому колесі, що позитивно впливає на генерацію електроенергії.

У конструкції використано одноструменеву турбіну з робочим колесом. Як зображено на рисунку 6, дросельна заслінка встановлена під фіксованим кутом, що сприяє зміні напрямку потоку та ефективному захопленню води лопатями оптимальної аеродинамічної форми. Така форма забезпечує максимальну передачу імпульсу за рахунок подовженого часу контакту між водою та лопатями.

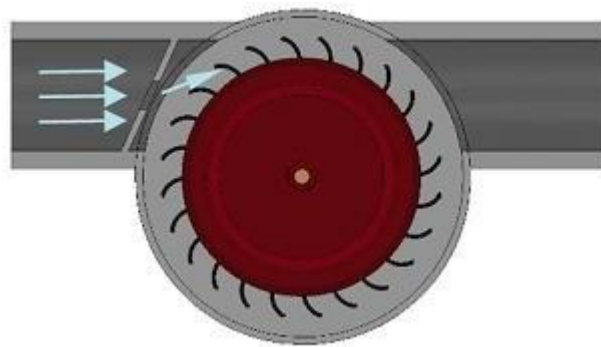


Рисунок 3.4 – Потік води

Для оцінки роботи турбінного генератора використовувався профіль водоспоживання (табл. 3.1), на основі якого визначено середню тривалість роботи кожного сантехнічного пристрою. Знаючи витрату та час роботи, було обчислено середню швидкість потоку, яка далі використана для розрахунку потенційно доступної потужності за формулою (3.14).

Таблиця 3.1 – Процент використання води для різних цілей від загального об'єму

	Літо	Зима
Середній показник	179 л/добу	174 л/добу
Пральна машина	21%	24%
Душ	24%	30%
Туалет	18%	19%
Натисніть	11%	16%
Витік	4%	2%
На відкритому повітрі	17%	6%
Ванна	2%	1%
Посудомийна машина	1%	1%
Різне	0%	1%
*Л/добу означає літри на добу		

Таблиця 3.2 - Час щоденного використання води для різних функцій (секунди).

Особливість	Літо	Зима
Ванна	11,93	34,8
Душ	429,6	261
Раковина	98,5	92,8
Ванна для прання	35,8	17,4
Машина бажань	187,95	208,8
Посудомийна машина	8,95	8,7
<i>Туалет</i>	<i>161,1</i>	<i>165,3</i>

Таблиця 3.3 - Доступна потужність від використання побутової води

Особливість	Літо	Зима
Потужність	32,87 Вт	32,92 Вт
Енергія	30,685,5 Дж	29,841 Дж

На основі цих даних побудовано енергетичний баланс (табл. 3.2), що дозволив встановити — обсяг енергії, який генерується впродовж доби, є достатнім для живлення лічильника води. Водночас, профіль водокористування (рис. 3.5) свідчить про періоди низького або нульового водоспоживання, зокрема між 00:00 та 6:00, коли генерація енергії є недостатньою для підтримки безперервної роботи системи.

Тому до системи включено акумуляторну батарею. Оптимальним вибором є літій-іонна батарея, що має високу щільність енергії, компактні розміри та тривалий ресурс циклів перезарядки. Незважаючи на обмежену кількість згенерованої енергії, можливо підтримувати рівень заряду батареї на стабільному рівні близько 63%, що забезпечує надійну роботу системи з невеликим енергоспоживанням. Довгий термін служби акумулятора виправдовує вищу початкову вартість такого рішення.

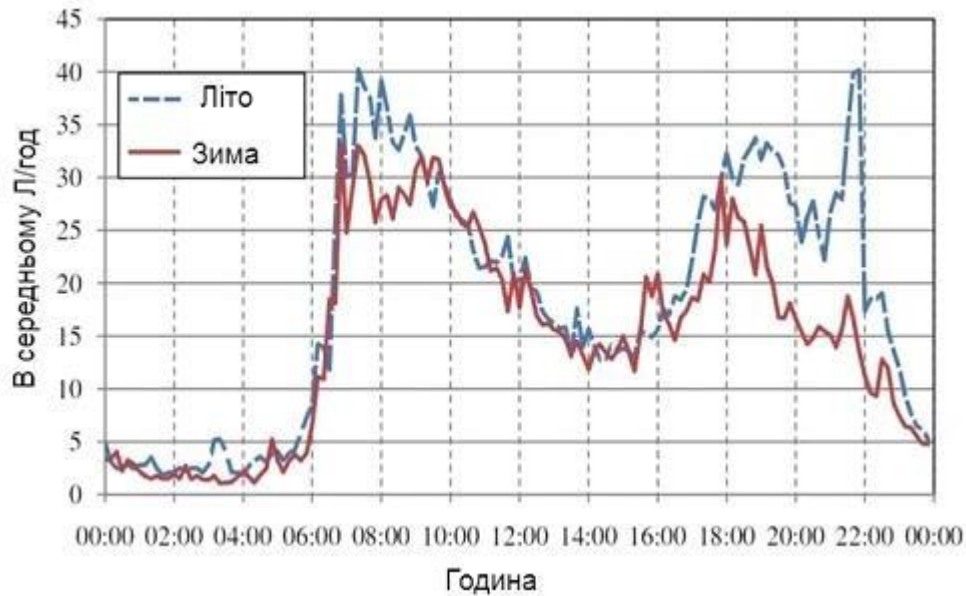


Рисунок 3.5 - Середньодобовий профіль використання води домогосподарства

### 3.7 Трифазний повно-хвильовий випрямляч

Польові МОП-транзистори використовуються у повнохвильовому трифазному випрямлячі завдяки їх швидкому часу перемикання та низькому опору в відкритому стані (RON). При максимальному очікуваному струмі, що не перевищує 70 мА, і типових значеннях RON від 1 до 50 Ом, падіння напруги на транзисторах складає приблизно від 70 мВ до 350 мВ. Це значення менш ніж удвічі перевищує падіння напруги, що виникає на діодах.

### 3.8 Обробка сигналів

Створювана напруга знаходиться в прямій залежності від частоти обертання турбіни. Її можна вимірювати як до, так і після випрямляча. У разі вимірювання після випрямлення відбувається втрата напруги, що може вплинути на точність результатів. Якщо ж вимірювання здійснюється до випрямлення, тоді сигнал не має постійної складової, що ускладнює точне вимірювання. Частота генерованої напруги вітротурбінного генератора (ВТГ) пропорційна числу обертів за хвилину.

З урахуванням кількості полюсів  $N_p$ , вихідна частота турбінного генератора розраховується за формулою:

$$f = \frac{\text{об/хв} \times N_p}{60} \quad (3.16)$$

Через наявність шумів і завад для точного визначення основної частоти згенерованої напруги необхідно застосовувати складні методи фільтрації. Тому використання частоти як засобу вимірювання витрати води пов'язане з певними труднощами.

Випрямлену напругу вимірюють з урахуванням її постійної складової. Завдяки високій частоті дискретизації (порядку мегагерців) сигналу з частотою близько 100 Гц можна точно зчитати його форму. Випрямлена напруга надходить як на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), так і на батарею. Для зменшення складності схеми та економії енергії аналогові фільтри для усунення змінної складової напруги не застосовуються.

Щоб отримати коректні дані на вході АЦП, доцільно використовувати цифрову фільтрацію. Її головне завдання — зменшення пульсацій випрямленої напруги і забезпечення стабільного рівня напруги незалежно від коливань частоти обертання турбіни.

Внутрішній опір батареї може змінюватися залежно від її рівня заряду, що впливає на навантаження і силу струму. Згідно з законом Ленца [16], різні значення струму створюють магнітне поле різної інтенсивності, що потребує різної сили для обертання турбіни, змінюючи її швидкість.

Будь-який вплив на роботу турбіни негативно позначається на точності вимірювань і змінює співвідношення між обертальною швидкістю і витратою води. Одним з можливих рішень є моделювання реакції на різні типи навантажень і калібрування системи за допомогою сенсора в алгоритмі. Інший варіант — від'єднання акумулятора від турбіни під час зчитування АЦП. У нашій конструкції реалізовано саме цей підхід.

### 3.9 Мережа бездротова

Лічильник обладнано Bluetooth-приймачем на базі модуля HC-06. Цей модуль характеризується низьким рівнем енергоспоживання та підтримує

з'єднання зі смартфонами, забезпечуючи обмін даними з мікроконтролером через протокол UART (універсальний асинхронний приймач-передавач).

Швидкість передачі даних у Bluetooth-модулі можна налаштовувати в межах від 1200 бод/с до 1 382 400 бод/с, при цьому типовим значенням є 9600 бод/с. У режимі очікування пристрій споживає приблизно 0,5 мА, під час активної роботи — близько 8,5 мА, а в процесі встановлення з'єднання — орієнтовно 35 мА. Для оптимізації енергоспоживання доцільно встановити нижчу швидкість обміну, оскільки передача невеликої кількості даних, наприклад, одного вимірювання на годину, є цілком достатньою для водоміра. Також доцільно закріпити модуль безпосередньо на лічильнику, щоб уникнути зайвих витрат енергії через часті повторні підключення.

Bluetooth має обмежену дальність зв'язку, проте забезпечує економне використання енергії. У випадках, коли потрібно передавати дані на більшу відстань, кращим вибором буде використання Wi-Fi. Більшість сучасних “розумних” лічильників використовують мобільний зв'язок, однак це тягне за собою додаткові витрати у вигляді щомісячних платежів телекомунікаційним компаніям.

### **3.10 Алгоритм обліку**

На рисунку 3.11 зображено процес інтелектуального вимірювання. Він отримує аналоговий сигнал з АЦП, перетворює його у числове значення напруги, після чого застосовує два рівні ковзного усереднення для фільтрації високочастотних складових. Оброблене значення використовується для визначення швидкості потоку. Далі ця швидкість інтегрується за часом для обчислення сумарного об'єму спожитої води.

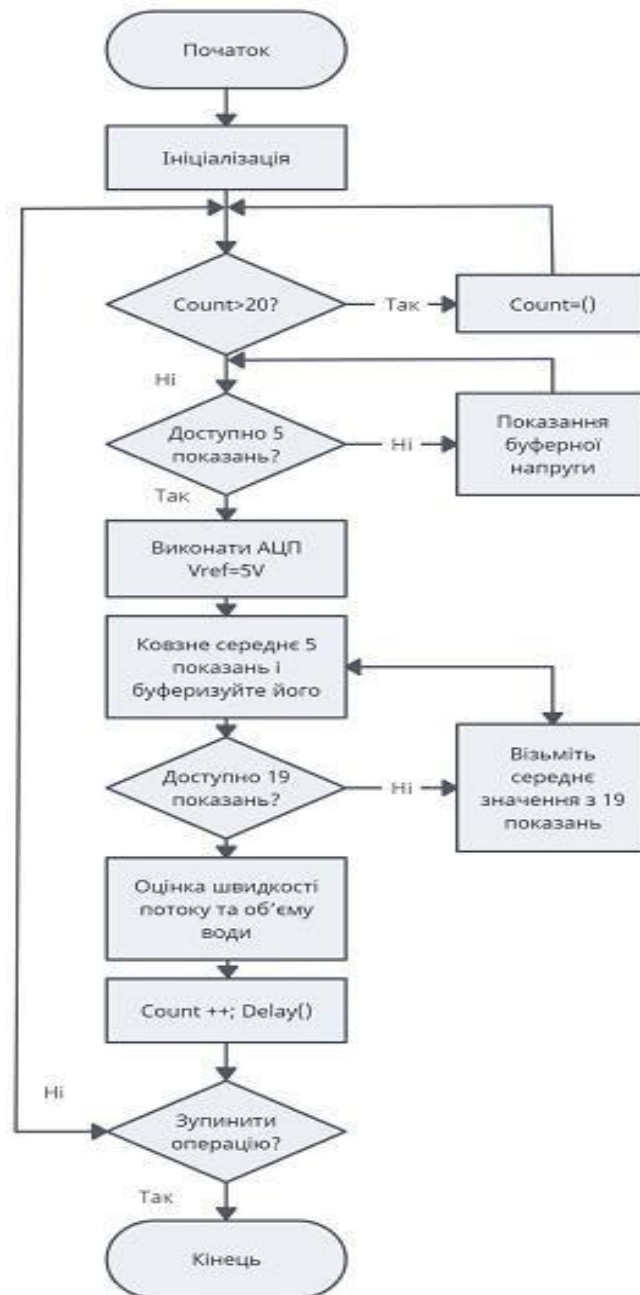


Рисунок 3.11 – Блок-схема алгоритму роботи лічильника

Таблиця 3.4 - Порівняння розробленого лічильника та існуючого механічного лічильника води.

Тип	Переваги	Недоліки
Механічний лічильник води	Проста конструкція Надійна робота Великий діапазон вимірювань	Вимагає ручного читання Немає функції АЗПЛ Немає віддаленого моніторингу
Удосконалений лічильник води	Автономний Масштабований дизайн Функціональність АЗПЛ Моніторинг у реальному часі	Вимагає вологозахисту Вузький діапазон вимірювання

Споживання води не повинно перевищувати 5 м<sup>3</sup>, щоб не погіршити стабільність водопостачання по всій міській мережі. Запропонована в цьому дослідженні конструкція орієнтована на використання в побутових умовах, де допускається трохи більша втрата тиску. Проте для запобігання надмірному зниженню напору води можливе регулювання положення дросельного елемента турбогенератора, що дозволяє змінювати кут подачі водяного потоку.

Крім того, альтернативою одноструменею крильчатій турбіні може слугувати багатоструменева крильчата турбіна, що також сприятиме зменшенню втрат напору.

Висновки до розділу:

- Використано рівняння Нав'є–Стокса та теорію числа Рейнольда для опису гідродинаміки.
- Запропоновано конструкцію витратоміра з власним джерелом живлення (турбогенератором).
- Реалізовано блок-схему обліку з трифазним випрямлячем, обробкою сигналів і бездротовою мережею.
- Визначено алгоритм розрахунку об'єму витрати .

## 4. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИТРАТОМІРА ТА МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

### 4.1 Види похибок та їх загальний аналіз

**Похибка вимірювання** — це відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної фізичної величини:

$$\Delta = x - x_{ист.} \quad (4.1)$$

Тут  $x$  — результат вимірювання величини  $X$ ;  $x_{ист.}$  — її істинне значення.

Похибка вимірювання є кількісною характеристикою точності вимірювання.[10]

На практиці істинне значення вимірюваної величини зазвичай невідоме, тому точно визначити похибку неможливо. Замість цього використовують оцінки похибки, тобто наближені значення:

$$\Delta \approx x - x_d. \quad (4.2)$$

Де  $x_d$  — дійсне значення вимірюваної фізичної величини, тобто її значення, знайдене експериментально і настільки близьке до істинного, що може бути використане замість нього. Фактично за таке значення приймають значення міри фізичної величини, еталона або визначене за допомогою точнішої методики.

В залежності від класифікаційної ознаки похибки поділяють на різні типи:

За формою вираження:

Абсолютна похибка — різниця між результатом вимірювання та істинним значенням; має ту ж розмірність, що й вимірювана величина.

Відносна похибка — відношення абсолютної похибки до результату вимірювання:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} . \quad (4.3)$$

де  $x$  — результат вимірювання.

За джерелами виникнення:

- Інструментальні — пов'язані з недосконалістю засобів вимірювання.
- Методичні — виникають через обмеження або неточність методики вимірювання.
- Особисті (операторські) — спричинені суб'єктивними діями оператора.

За закономірностями виникнення:

- Систематичні похибки — залишаються постійними або змінюються закономірно при багаторазових вимірюваннях тієї самої величини.

Основні причини:

- неточність або зношення приладів;
- зміна зовнішніх умов (температура, вологість тощо);
- похибки градуйованих шкал;
- деформації, відхилення геометрії елементів тощо.

Систематичні похибки поділяються:

- за формою вираження;
- за джерелами виникнення;
- за характером зміни (постійні, змінні).
  - Випадкові похибки — змінюються випадковим чином (за

знаком і величиною). Основні причини:

- флуктуації зовнішніх умов;
- коливання напруги живлення;
- шумові перешкоди;
- людський фактор;
- вібрації;
- теплові шуми в електроніці тощо.

Повна похибка вимірювання є сумою систематичної та випадкової складових.

Важливо: випадкові похибки можна виявити повторними вимірюваннями, у той час як систематичні часто залишаються непоміченими без додаткового аналізу.

Оскільки похибка має випадкову складову, її можна розглядати як випадкову величину. Для її опису використовують:

- Точкову характеристику — середнє квадратичне відхилення (стандартне відхилення). Це число, що відображає розкид результатів навколо середнього значення.

- Інтервальну характеристику — довірчий інтервал, в межах якого похибка перебуває з певною ймовірністю  $P$ . Типове значення  $P$  для технічних вимірювань — 0,95; для критичних — до 0,99 і вище.

Чим вище  $P$ , тим ширший довірчий інтервал, але водночас і вища надійність оцінки похибки.

Існують певні обмеження при оцінюванні похибок:

- Відсутність точного еталона або методики високої точності.
- Висока вартість експериментів для визначення точності.
- Неможливість узагальнення випадкових похибок одного вимірювання на інші вимірювання.[19]

Таким чином, хоча оцінка похибки вимірювання є критично важливою, на практиці вона потребує компромісу між точністю, витратами та допустимістю похибки в контексті конкретного застосування.

#### **4.2 Межа похибок вимірювання лічильників холодної та гарячої води та метрологічні класи**

Згідно з вимогами [17], допустима відносна похибка технічно справних лічильників води повинна відповідати наступним значенням:

- $\pm 5\%$  у піддіапазоні витрати  $Q_{\min} \leq Q < Q_t$ ;
- $\pm 2\%$  для лічильників холодної води та  $\pm 3\%$  для лічильників гарячої води у піддіапазоні  $Q_t \leq Q \leq Q_{\max}$ .

Таким чином, перехідна витрата ( $Q_t$ ) є критичною точкою, яка визначає початок діапазону, в якому похибка істотно зменшується. Поріг чутливості ( $Q_{st}$ ) визначає здатність лічильника реагувати на наявність потоку води. У діапазоні  $Q_{st} \leq Q < Q_{\min}$  похибка взагалі не нормується й може досягати значень  $\pm(20\dots 50)\%$ .

Значення мінімальної ( $Q_{\min}$ ) та перехідної ( $Q_t$ ) витрат є основою для визначення класу точності лічильника.

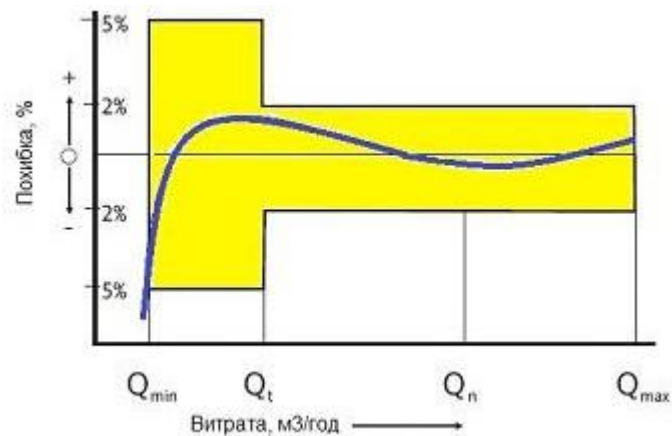


Рисунок 4.1 – Межа похибок вимірювань витратомірів

Відповідно існують три класи точності лічильників води : А, В та С (найбільш точними є лічильники класу С, найменш точними - класу А), які регламентуються ще й просторовою орієнтацією приладу .

Вибраний водомір необхідно перевірити на:

- пропуск максимальної розрахункової секундної витрати води для господарсько-питних, виробничих та інших потреб. У цьому випадку втрати напору не повинні перевищувати:
  - 2,5 м — для швидкісних водомірів;
  - 1 м — для турбінних водомірів.
- пропуск максимальної витрати для внутрішнього пожежогасіння, при якому втрати напору не повинні перевищувати 10 м.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики швидкісних водомірів

Діаметр умовного проходу, мм	Витрати води, м <sup>3</sup> /год			Поріг чутливості м <sup>3</sup> /год	Макс. об'єм води за добу, м <sup>3</sup>	Гідрравлічний опір (л/с) <sup>2</sup> (м <sup>3</sup> /год) <sup>2</sup>
	мінімальні	експлуатаційні	максимальні			
1	2	3	4	5	6	7
Швидкісні водолічильники ВСКМ (ГОСТ 6019-83)						
15	0,03	1,2	3	0,015	45	14,4 1,11
20	0,05	2	5	0,025	70	5,18 0,4
25	0,07	2,8	7	0,035	100	2,64 0,204
32	0,1	4	10	0,05	140	1,30 0,1
40	0,16	6,4	16	0,08	230	0,50 0,039

Продовження табл. 4,1						
1	2	3	4	5	6	7
50	0,3	12	30	0,15	450	0,143 0,011
Швидкісні водолічильники ВСТ-U (ТУУ 24597020.002-97)						
15	0,03	0,9	3	0,01	-	-
20	0,06	1,5	5	0,02	-	-
25	0,14	2,1	7	0,05	-	-
32	0,24	3,6	12	0,1	-	-
40	0,3	6	20	0,1	-	-
Турбінні водоміри СТВ (ГОСТ 14167-83)						
65	1,5	17	70	0,6	610	8,10 10- 3
80	2	36	110	0,7	1300	2,07 10- 3
100	3	65	1 50	1, 2	235 0	6,75 10-4

Втрати напору у водомірі при розрахункових секундних витратах  $Q$ , л/с, визначаються за формулою:

$$h_B = S \cdot q^2, \quad (4.4)$$

де  $S$  - гідравлічна характеристика водоміра, яка приймається за даними табл. 3.1.

Якщо втрати напору виявляються меншими за 25% від допустимих значень, необхідно розглянути можливість встановлення водоміра меншого калібру, що дозволить враховувати малі витрати води.

Для будинків зі середньою витратою води менш ніж 0,1 м<sup>3</sup>/год, встановлення водоміра не є обов'язковим.

Класи точності лічильників залежно від монтажу

Залежно від просторової орієнтації приладу, лічильники води поділяють на такі метрологічні класи точності:

Клас А — при горизонтальному монтажі лічильника. Якщо прилад має маркування 'V', з'єднувальний трубопровід під час випробувань має знаходитися у вертикальній площині відносно осі потоку.

Класи В і С — також при горизонтальному монтажі відповідно до технічних умов. Якщо лічильник має маркування 'H', трубопровід повинен бути горизонтальним відносно осі потоку.

Таблиця 4.2 - Класи лічильників води,  
регламентовані ISO 4064

Класи лічильників води	$Q_n < 15$ м <sup>3</sup> /год	$Q_n \geq 15$ м <sup>3</sup> /год
Клас А Значення $Q_{min}$ Значення $Q_t$	Клас А $0,04 Q_n$ $0.10 Q_n$	Клас А $0.08 Q_n$ $0.30 Q_n$
Клас В Значення $Q_{min}$ Значення $Q_t$	Клас В $0.02 Q_n$ $0.08 Q_n$	Клас В $0.03 Q_n$ $0.20 Q_n$
Клас С Значення $Q_{min}$ Значення $Q_t$	Клас С $0.01 Q_n$ $0.015 Q_n$	Клас С $0.006 Q_n$ $0.15 Q_n$

У сучасних моделях, що застосовуються переважно для вимірювання невеликих витрат рідини, механічна система передачі замінюється на: електромагнітну, оптичну або з використанням радіоактивних елементів.

Тиск води у лічильнику — це сила, з якою потік діє на внутрішні елементи приладу. Його зміни суттєво впливають на точність вимірювань:

Низький тиск може призводити до недостатньої активації рухомих елементів;

Надмірний тиск може зумовити додаткові зсуви та деформації деталей, що спричиняє похибки у показаннях, особливо у механічних лічильниках.

### 4.3 Калібрування лічильників

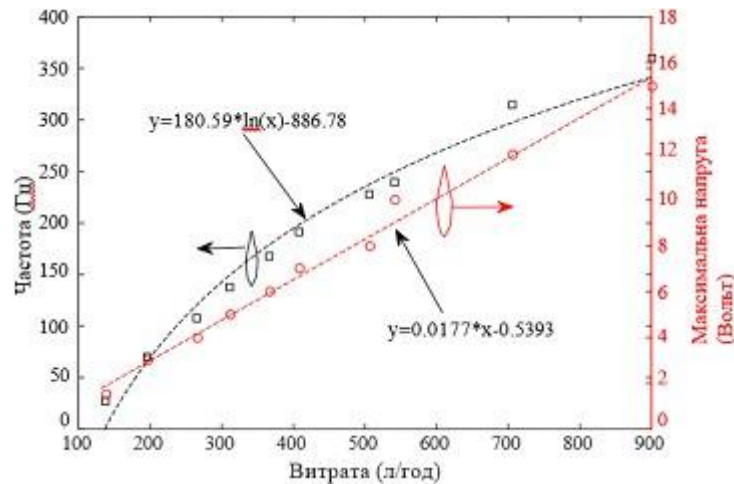


Рисунок 4.2 – Частота генерованої напруги та поведінка напруги

Як зображено на рисунку 4.4, конструкція приладу передбачає використання двигуна постійного струму з присоскою для обертання турбіни. Швидкість обертання турбіни вимірюється тахометром у обертах за хвилину (об/хв). На рисунку 4.5 наведено графік залежності швидкості обертання від генерованої напруги, що демонструє лінійний характер зв'язку.

Невелике від'ємне зміщення на графіку пояснюється втратами енергії на тертя, внутрішній опір системи, а також механічним гальмуванням рухомих частин.

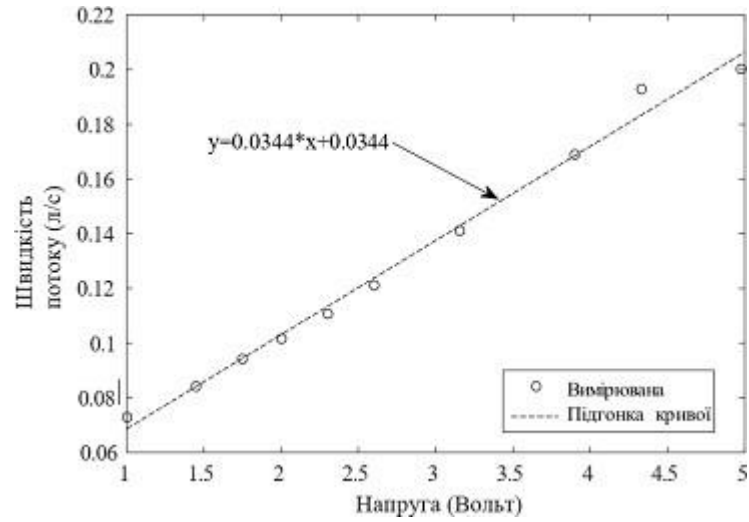


Рисунок 4.3 – Залежність між напругою та витратою

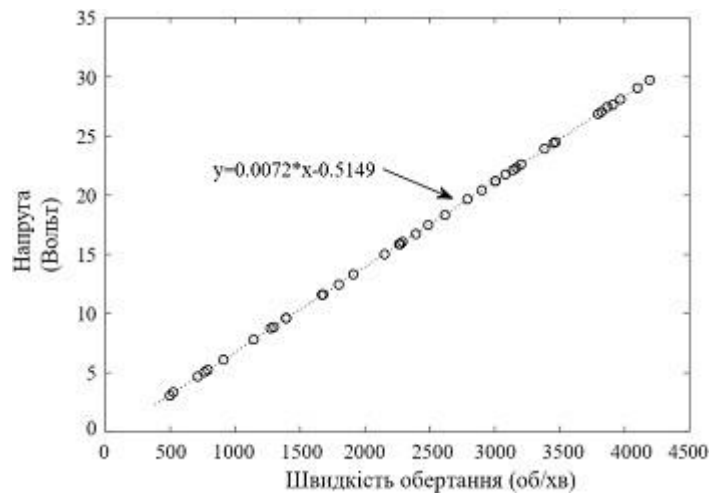


Рисунок 4.4 – Результати тестування напруги та частоти обертання

Отримане лінійне рівняння зв'язку між напругою та витратою закладено в програмний алгоритм пристрою. Для підвищення точності проводиться калібрування: Вода пропускається через водяну турбіну протягом заданого інтервалу часу в вимірювальний резервуар (наприклад, мірний глечик). Об'єм фактично зібраної води порівнюється з показанням приладу. Алгоритм автоматично коригується, щоб мінімізувати розбіжність між реальним і розрахунковим значенням витрати.

Процес повторюється доти, доки похибка не стане меншою за встановлений поріг точності.

Розроблений удосконалений побутовий лічильник холодної і гарячої води має низку переваг:

- Можливість дистанційної передачі показань у складі інформаційно-вимірювальних комплексів;
- Автономне живлення, що забезпечує безперебійну роботу при відсутності зовнішнього електроживлення;
- Висока точність у вимірюванні навіть при нестабільних параметрах потоку.

Короткі висновки:

- Проведено класифікацію похибок за джерелами, формою та характером виникнення.
- Надано аналіз допустимих меж похибок та метрологічних класів лічильників.
- Розглянуто процедуру калібрування та її значення для забезпечення точності обліку води.
- Вказано, що правильне калібрування — ключовий етап забезпечення достовірності обліку в умовах тиску та температури.

## **5. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ РОБОТИ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ГАРЯЧОЇ ВОДИ**

### **5.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів та потенційно небезпечних**

У процесі трудової діяльності людина взаємодіє з предметами та знаряддями праці, іншими працівниками, а також зазнає впливу параметрів виробничого середовища. До таких параметрів належать: температура, вологість, рухливість повітря, рівень шуму, вібрації, наявність шкідливих речовин, випромінювань тощо. Від умов праці значною мірою залежать здоров'я, працездатність, ставлення до роботи та результати трудової діяльності. За несприятливих умов істотно знижується продуктивність праці, створюються передумови для виробничого травматизму та професійних захворювань.

Особливу увагу слід приділяти умовам праці осіб розумової праці, зокрема операторів, диспетчерів, користувачів електронно-обчислювальної техніки. Їхня діяльність супроводжується високим рівнем нервово-психічного навантаження, що, за даними медичних досліджень, може призводити до порушень нервово-ендокринної регуляції, захворювань нервової системи, органів травлення та органів чуття [20].

Ускладнення функціональної структури трудових процесів унаслідок широкого впровадження електронно-обчислювальних систем (ЕОС) та візуальних дисплейних терміналів (ВДТ) висуває підвищені вимоги до фізіологічних і психоемоційних можливостей працівника. Недостатній урахування людського фактора на етапі проєктування обчислювальних центрів (ОЦ) призводить до зниження продуктивності, уповільнення прийняття рішень і зростання частоти помилок.

ВДТ залишаються основним засобом взаємодії людини з ЕОМ. Швидке впровадження персональних комп'ютерів у всі сфери діяльності обумовило масове створення робочих місць з ВДТ, як у виробничих, так і в адміністративно-громадських приміщеннях.

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, тривала робота за ВДТ може негативно впливати на функціональний стан центральної нервової системи, нервово-м'язовий апарат верхніх кінцівок (при роботі з клавіатурою), зорову систему. Нераціональна конструкція та розташування елементів робочого місця змушують працівника тривалий час перебувати у змушеній робочій позі, що викликає локальну м'язову напругу, гіпокінезію, загальне стомлення та зниження працездатності.

Під час тривалої взаємодії з ВДТ у користувачів фіксується перевантаження зорового аналізатора та поява скарг на:

- головний біль;
- роздратованість;
- порушення сну;
- втомлюваність;
- біль у попереку, шиї, руках;
- неприємні відчуття в очах.

Дослідження умов праці в обчислювальних центрах України свідчать, що більшість робочих місць з ВДТ експлуатуються в умовах несприятливого мікроклімату (перегрівання, знижена вологість), підвищеного шуму, нераціонального освітлення. Хоча фізичні фактори впливу, зокрема електромагнітне випромінювання від електронно-

променевих трубок (ЕПТ), зазвичай не перевищують встановлених нормативів, сукупний вплив багатьох факторів може бути відчутним для здоров'я.

Серед основних шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища, які впливають на працівників ОЦ, виділяють:

- електромагнітні поля радіочастотного діапазону;
- статичну електрику;
- шум;
- незадовільні метеоумови (температура, вологість);
- недостатню освітленість;
- високий рівень психоемоційного навантаження [22].

Аналіз шкідливих та потенційно небезпечних факторів представлено в таблицях 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Аналіз виробничих шкідливостей

Назва шкідливої речовини	ГДК даної речовини, мг/м <sup>3</sup>		Перша допомога при отруєнні
	У робочій зоні	В атмосфері	
Природний газ	300	-	Свіже повітря
Аерозоль свинцю	0,9	0,05	Чай, кава з додавання
Каніфоль	0,2	0,03	валеріанки
Ацетон	200	0,35	

Таблиця 5.2 – Потенційно небезпечні виробничі фактори

Виробничий об'єкт	Небезпечний фактор	Фактичне значення	Нормоване значення	Характер дії на людину
Газопроводи	Робочі тиски,	0,1-10 МПа	-	При аваріях можливі випадки травматизму працівників
	Рентгенівське випромінювання	10-20 мкР/год	75	Загальна втома, головний біль
	Ультрафіолетове випромінювання	0,02 Вт/ м <sup>2</sup>	0,01	Різь в очах
	ІЧ випромінювання	2 Вт/ м <sup>2</sup>	100	
Робота з електропристроями	Електростатичне поле	15 КВ/м	20-60	Ураження електричним струмом
	Яскравість	80 кд/ м <sup>2</sup>	35	
	Електричний струм	I=1 А, U=220 В, F=50 Гц		

## 5.2 Забезпечення нормальних умов праці

Аналізуючи отримані дані, нами було розроблено комплекс заходів для збереження працездатності користувачів ЕОМ та профілактики загальних і зорових порушень. Рекомендації полягають у наступному:

– У дисплейних класах слід забезпечити температуру повітря в межах 19–21°C, відносну вологість 55–65%, швидкість руху повітря — не більше 0,2 м/с, відповідно до вимог «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» № 4088-86 для категорій робіт 1а–1б.

– Рівень звуку в приміщеннях, де працюють математики-програмісти та оператори ЕОМ, не повинен перевищувати 50 дБА; у лабораторіях, де виконується алгоритмічна робота та обробка документації — 60 дБА; у машинному залі — 65 дБА. На робочих місцях поруч із шумними агрегатами рекомендований рівень шуму — не більше 75 дБА.

– Для боротьби зі статичною електрикою доцільно підтримувати відносну вологість на рівні 55–65%, чого можна досягти за допомогою побутових зволожувачів повітря типу «ІОН». Підлогу дисплейних класів слід покривати антистатичним лінолеумом. Працівникам рекомендується носити одяг з натуральних матеріалів, особливо першого шару. Полімерні елементи обладнання (чохли) необхідно розміщувати якомога далі від робочих місць.

З огляду на характер зорової роботи з відеотерміналами, першочерговим завданням є забезпечення належних умов візуального сприйняття: оптимального розподілу яскравості в полі зору, мінімізації прямих і відбитих відблисків, усунення ефекту мерехтіння зображення та інших чинників, що сприяють зоровій втомі.

—

– Необхідно дотримуватися встановлених якісних та кількісних параметрів освітлення. Виробничі приміщення мають проектуватися згідно з вимогами ДБН В.2.2-28-2010 «Адміністративні та побутові будівлі підприємств»

– Приміщення для розміщення робочих місць повинні мати однобічне природне освітлення та обладнуватися сонцезахисними пристроями (штори, жалюзі тощо). Площа засклення не повинна перевищувати 25% площі віконної стіни. Рекомендується орієнтувати вікна на північ, північний захід або північний схід.

– Поверхні в інтер'єрі приміщення не повинні мати високої яскравості або блиску, щоб уникнути відблисків. Коефіцієнти відбиття світла для поверхонь мають бути наступними: робочий стіл, корпус і клавіатура — 0,2–0,5; стеля — 0,6–0,7; стіни — 0,2–0,5; підлога — 0,1–0,2; шафи і стелажі — 0,25–0,35. Всі оздоблювальні матеріали мають бути матовими.

– Площа приміщення на одного працівника має становити не менше 6,0 м<sup>2</sup>, а об'єм — не менше 10,5 м<sup>3</sup> з урахуванням максимальної кількості одночасно присутніх осіб у зміні.

– У приміщеннях з надлишком тепла необхідно передбачити регульовану подачу теплоносія для підтримки нормованих параметрів мікроклімату. Як опалювальні прилади рекомендуються гладкотрубні реєстри або панелі променистого опалення. Забороняється використовувати електронагрівальні прилади та парове опалення в машинних залах і приміщеннях для зберігання магнітних носіїв.

– Освітлення має бути загальним або загально-локалізованим. Тип світильників і схема їх розташування залежать від висоти приміщення, кількості робочих місць і їхнього розташування. Робочі місця з відеотерміналами слід розмішувати рядами, паралельно до стіни з вікнами, при цьому площина екрана має бути перпендикулярною до вікон. Оптимальним варіантом є використання дзеркальних світильників з параболоциліндричними відбивачами, наприклад, вітчизняні люмінесцентні дволампові моделі.

– Забезпечення належного загального освітлення можливе лише за умов жорсткої регламентації розміщення робочих місць. Вони повинні знаходитися в глибині приміщення. При використанні світильників прямого світла робочі місця обов'язково розміщують у ряди, паралельно до віконної стіни. Розташування екранів обличчям або спиною до вікон є неприпустимим. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями НПАОП 0.00-7.15-18.

– Робоче місце з Вт вимагає значної площі — близько 4,6–7,0 м<sup>2</sup>, оскільки при середній площі устаткування 0,8 × 1,2 м<sup>2</sup> навколо нього має залишатися щонайменше 1 м вільного простору з кожного боку.

– З метою зниження напруженості праці необхідно рівномірно розподіляти навантаження операторів і раціонально чергувати види діяльності — введення та виведення даних, робота за пультом тощо. У нічний час не рекомендується виконання робіт, що потребують підвищеної концентрації або прийняття відповідальних рішень.

Значення оптимальних параметрів мікроклімату, характеристик штучної вентиляції та освітлення робочих місць наведено у відповідних таблицях нижче.

Таблиця 5.3 – Оптимальні значення метеорологічних умов

Назва приміщення	Категорія робіт	Період року	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Операторна	1а (л)	X	22-24	40-60	0,1
		T	23-25	40-60	0,1
	2б (л)	X	17-19	40-60	0,2
		X	20-22	40-60	0,3
		T			

Таблиця 5.4 – Характеристика штучної вентиляції

Назва приміщення	Тип вентиляції	Вентиляційне обладнання	Кратність повітряного обміну, 1/год
Операторна	Притічно-витічна	Центробіжний вентилятор типу ВЦ-4-70 №2	6

Таблиця 5.5 – Характеристика штучної освітленості

Назва приміщення	Освітленість, Лк		Тип світильника
	Загальне освітлення	Аварійне освітлення	
Операторна	400	10	ЛДОР-220-2*40-5м

### **5.3 Забезпечення безпеки монтажу, експлуатації витратоміра та налагодження**

Експлуатація та технічне обслуговування вихрових витратомірів, встановлених на технологічному обладнанні, що працює під тиском активного середовища (газ, конденсат тощо), повинні виконуватися з дотриманням правил безпеки, затверджених для відповідного обладнання [21]. При роботах, пов'язаних із порушенням герметичності, відповідна частина обладнання має бути від'єднана від мережі надлишкового тиску за допомогою перекривної арматури, а активне середовище — видалене.

Монтаж і демонтаж витратомірів, які вмонтовані в технологічні лінії та пов'язані з газонебезпечними роботами, здійснюються персоналом, що обслуговує дане обладнання.

Роботи на віддалених об'єктах періодичного обслуговування мають виконуватися виїзними бригадами або пересувними лабораторіями, оснащеними засобами індивідуального та колективного захисту згідно з встановленими нормами.

Монтаж, демонтаж і ремонт обладнання проводяться відповідно до експлуатаційної та ремонтної документації (зокрема, «Настанови з експлуатації» та «Інструкції з монтажу, пуску, регулювання і обкатування»). Виконавець повинен розробити і погодити з замовником «Проект виконання монтажних робіт».

Пристрої, що встановлюються на обладнанні під тиском, не повинні порушувати його герметичності. Після демонтажу та перевірки під час монтажу необхідно застосовувати герметизуючі деталі, передбачені конструкцією.

Монтаж і демонтаж витратомірів на працюючих установках дозволяються лише після повної зупинки технологічного обладнання

(агрегатів, компресорів тощо) і перекривання трубопроводів. Після ремонту забороняється залишати кінці проводів або кабелів на поверхнях (стінах, підлогах, колонах).

До самостійної роботи з електротехнічним обладнанням напругою до 1000 В допускаються особи з групою електробезпеки не нижче 3. Електрообладнання і прилади мають бути заземлені [22]. Перед заземленням слід переконатися у відсутності напруги між корпусами обладнання, проводами та землею за допомогою перевіреного індикатора напруги.

Перед видачею електроінструменту працівникові необхідно перевірити його справність на стенді або за допомогою спеціального приладу, щоб упевнитися у наявності заземлення і відсутності короткого замикання. Напруга переносного інструменту у приміщеннях без підвищеної небезпеки не повинна перевищувати 220 В, у приміщеннях із підвищеною небезпекою — 42 В.

Режим роботи вихрових витратомірів має забезпечувати безперебійну роботу технологічного обладнання.

Конструктивна надійність: Лічильники води повинні бути сконструйовані таким чином, щоб витримувати робочий тиск системи без пошкоджень чи витоків. Зазвичай вони сертифіковані для роботи при тиску до 16 бар (1,6 МПа), проте конкретні параметри залежать від виробника.

Безпека експлуатації: Підтримання стабільного тиску у водопостачальній системі запобігає аварійним ситуаціям, таким як розриви труб або вихід з ладу лічильників через надмірний тиск.[23]

## 5.4 Розрахунок вентиляції приміщення

Оцінити ефективність природної вентиляції приміщення з габаритами: довжина-8м, ширина-6м, висота-3,2м, кількістю працюючих-5 співробітників, розміром квартирки-0,25м<sup>2</sup>, розміром дверей - 1,6м<sup>2</sup>, висотою від центру дверей до центру квартирки 1,7м.

Для оцінки ефективності природної вентиляції приміщення де проходиться калібрування лічильників необхідно порівняти фактичний повітрообмін  $L_{\phi}$  з необхідним –  $L_{н}$

Якщо об'єм робочого приміщення, що припадає на кожного працюючого  $L1$ , менше 20 м<sup>3</sup>, необхідний повітрообмін повинен складати не менше  $L' = 30$  м<sup>3</sup>/год на одну особу. При об'ємі 20 м<sup>3</sup> і більше на одного працюючого повітрообмін повинен складати не менше  $L' = 20$  м<sup>3</sup>/год. При об'ємі 40 м<sup>3</sup> і більше на одного працюючого за наявності в приміщенні вікон та дверей повітрообмін не лімітується.

Таким чином, необхідний повітрообмін  $L_{н}$  обчислюється за формулою

$$L_{н} = L' \cdot n, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (5.1)$$

де  $n$  - кількість працюючих.

В нашому випадку об'єм робочого приміщення, що припадає на кожного працюючого складає:

$$L1 = 8 \cdot 6 \cdot 3,2 / 5 = 30,72 \text{ м}^3$$

Тому:

$$L_{н} = 20 \cdot 5 = 100 \text{ м}^3/\text{год}$$

Фактичний повітрообмін у відділі здійснюється за допомогою природної вентиляції як неорганізовано – через різні нещільності у віконних і дверних прорізах, так і організовано - через квартирку у віконному прорізі.[24]

Фактичний повітрообмін  $L_{\phi}$ , м<sup>3</sup>/год, обчислюється за формулою

$$L_{\phi} = F_{кв} \cdot V_{п} \cdot \mu \cdot 3600, \quad (5.2)$$

де  $F_{кв}$  - площа квартирки, через яку буде виходити повітря, м<sup>2</sup>;

$\mu$  – в'язкість повітря.

$V_{\text{п}}$  - швидкість виходу повітря через кватирку, м/с. Її можна розрахувати за формулою:

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta H_2}{\gamma_{\text{вн}}}}, \quad (5.3)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;

$\Delta H_2$  - тепловий напір, під дією якого буде виходити повітря з кватирки, кг/м<sup>2</sup>:

$$\Delta H_2 = h_2 \cdot (\gamma_3 - \gamma_{\text{вн}}), \quad (5.4)$$

де  $h_2$  - висота від площини рівних тисків до центру кватирки (рис. 5.1).

Її можна визначити з наступного співвідношення: відстані від площини рівних тисків до центрів нижніх і верхніх прорізів відповідно  $h_1$  та  $h_2$ , обернено пропорційні квадратам площ цих прорізів  $S_{\text{дв}}$  та  $F_{\text{кв}}$ , тобто

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{F_{\text{кв}}^2}{S_{\text{дв}}^2}.$$

З геометричних розмірів приміщення  $h_1 + h_2 = h$ ,

де  $h = 1,7$  - висота між центрами нижніх та верхніх прорізів.

Таким чином, з системи двох рівнянь з двома невідомими знаходимо  $h_2$  (дивись рис. 5.1).

$$h_1 = h - h_2$$

$$\frac{h - h_2}{h_2} = \frac{F_{\text{кв}}^2}{S_{\text{дв}}^2} \quad \text{Звідки:} \quad h_2 = \frac{h \times S_{\text{дв}}^2}{F_{\text{кв}}^2 + S_{\text{дв}}^2} = \frac{1,7 \times 1,6^2}{0,25^2 + 1,6^2} = 1,66 \text{ м}$$

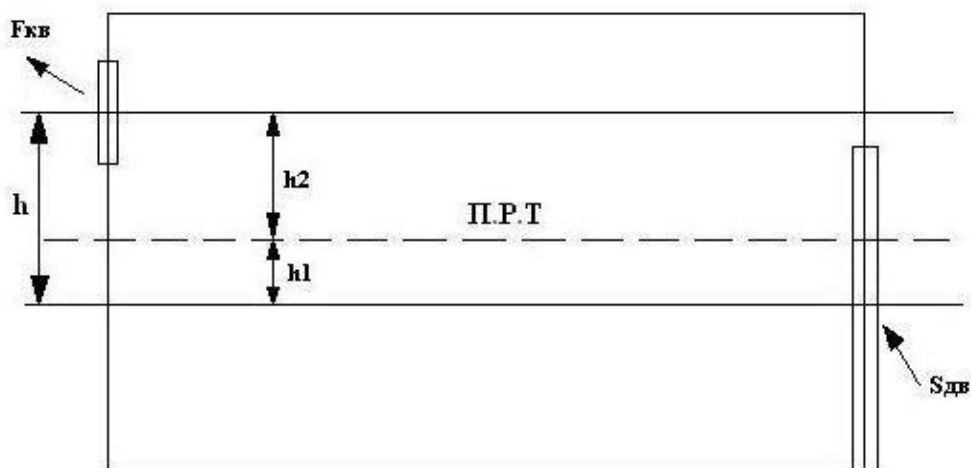


Рисунок 5.1 – Схема розрахунку природної вентиляції

$\gamma_3$  та  $\gamma_{вн}$  - відповідно об'ємна вага повітря зовні та з середини приміщення, кг/м<sup>3</sup>.

Об'ємна вага повітря визначається за формулою

$$\gamma = 0.465 \cdot \frac{P_6}{T}, \quad (5.5)$$

де  $P_6$  - барометричний тиск, мм рт.ст., в розрахунках береться таким:  $P_6 = 750$  мм рт.ст.;

$T$  - температура повітря у градусах Кельвіна.

Для приміщення, в якому виконується калібрування лічильників, температура повітря повинна бути не вище +28°C, або  $T=301$  К, для холодного періоду року відповідно  $t=17^\circ\text{C}$ , або  $T=290$  К.

Для повітря зовні приміщення температура визначається:

для теплого періоду:  $t = 24^\circ\text{C}$ ,  $T = 297$  К;

для холодного періоду:  $t = -11^\circ\text{C}$ ,  $T = 262$  К.

Об'ємна вага повітря зовні приміщення, кг/м<sup>3</sup> буде складати:

$$\gamma_3 = 0,465 \cdot 750 / 262 = 1,33$$

Об'ємна вага повітря з середини приміщення, кг/м<sup>3</sup> буде складати:

$$\gamma_{вн} = 0,465 \cdot 750 / 290 = 1,2$$

$\Delta H_2$  - Тепловий напір, під дією якого буде виходити повітря з квартирки, кг/м<sup>2</sup>:

$$\Delta H_2 = 1,66(1,33 - 1,2) = 0,216$$

$V_{п}$  - швидкість виходу повітря через квартиру, м/с: розрахувати

$$V_{п} = \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 0,216}{1,2}} = 1,88$$

Фактичний повітрообмін  $L_{\phi}$ , м<sup>3</sup>/год, у відділі складе:

$$L_{\phi} = 0,25 \cdot 1,88 \cdot 0,5 \cdot 3600 = 846$$

Визначивши фактичний повітрообмін і порівнявши його з необхідним, можна зробити висновок про ефективність природної вентиляції у відділі. У холодному періоді року фактичний повітрообмін набагато перевищує необхідний (846 проти 100), що може викликати переохолодження працюючих. Для усунення цього недоліку можна рекомендувати скорочення часу провітрювання приміщення пропорційно перевищенню фактичного повітрообміну над необхідним:

Фактичний повітрообмін складає 846 м<sup>3</sup>/год, або/60хв.

Необхідні 100 м<sup>3</sup>/год фактично можна досягти за:

$$\frac{100 \times 60}{846} = 7,1 \text{ хв.}$$

Тобто для ефективної роботи природної вентиляції достатньо провітрювати приміщення економічного відділу протягом 7,1хв. кожної години.

Висновок до розділу:

У розділі проаналізовано умови праці та запропоновано способи зробити роботу безпечнішою — це стосується вентиляції, освітлення, розміщення обладнання й дотримання техніки безпеки. Завдяки цим заходам працівникам буде зручніше та безпечніше працювати.

## ВИСНОВКИ

- Проведено аналіз основних характеристик води та встановлено їх вплив на результати вимірювання витрати лічильниками різних типів, зокрема виявлено відмінності між характеристиками холодної та гарячої води.
- Описано існуючі методи та засоби вимірювання витрати і кількості рідин, а також проаналізовано їхні переваги і недоліки.
- Розроблено математичну модель гідродинамічних процесів, що відбуваються під час вимірювання витрати гарячої води швидкісними лічильниками.
- Досліджено вплив режимів руху рідини на швидкість обертання механізму лічильника.
- Створено конструкцію лічильника гарячої води з автономним живленням, який є складовою частиною інформаційно-вимірювального комплексу для дистанційної передачі та обробки показів.
- Проведено метрологічний аналіз та розроблено метрологічне забезпечення удосконаленого лічильника.
- Запропоновано заходи для забезпечення безпечних умов експлуатації побутового лічильника гарячої води.

## Список використаної літератури

1. • Вода, загальний опис води, фізичні властивості води [Електронний ресурс]. <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%B0>

• Акустичні властивості води, електропровідність води [Електронний ресурс]. [https://phizikaa.blogspot.com/2019/03/blog-post\\_41.html](https://phizikaa.blogspot.com/2019/03/blog-post_41.html)

2. • Ющенко Ю.С., Гринь Г.І., Масікевич Ю.Г., Моїсеєв В.Ф., Солодкий В.Д., Змарада А.О., Байрачний В.Б. Загальна гідрологія: Навчальний посібник. — Чернівці: Зелена Буковина. — 2005. — 368 с.

3. • Масова витрата [Електронний ресурс]. [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B0)

4. • Ультразвуковий лічильник <https://ectc.com.ua/schetchiki-vody/ultrazvukovyj-lichylnyk-vody/> [Електронний ресурс].

5. • Класифікація за принципом роботи ультразвукового витратоміра [Електронний ресурс]. [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9\\_%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%80](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%80)

6. • Лічильник води, принцип дії [Електронний ресурс]. <https://antap.com.ua/produksiia/schetchiki-vody>

7. • Тахометричні витратоміри [Електронний ресурс]. <https://studfile.net/preview/9934619/page:6/>

8. • Кісінь І.С. Основи вимірювальної техніки. Конспект лекцій // І.С. Кісінь, Л.А. Витвицька, О.Є. Середюк ., – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – 156 с. МВ 022070855-737-2000.

9. • Поліщук Є. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. – Львів: Вид-во державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 359 с.

10. • Основи метрології та вимірювань / Д.Б. Головка, К.Г. Реґо, Ю.О. Скрипник.- К.: Либідь, 2001.-408 с.

11. • Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: у 2-х томах / М.К.Дорожовець, В.С.Мотало, Б.М. Стадник, В.Б.Василюк, Р.В. Борек, А.В.Ковальчик. – Львів: Львівська політехніка, 2005. – 1529 с.

12. • Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості. –навч. пос./ під ред. Чеховського С.А. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 534 с.

13. • Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник/ М.П.Андрішин, С.О.Даневський, Є.Ф.Марчук, О.М.Карпаш, І.С.Петришин, О.Є.Середюк, С.А.Чеховський. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2004. – 160 с.  
[https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4177#fig\\_body\\_display\\_sensors-19-04177-f008](https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4177#fig_body_display_sensors-19-04177-f008) Розробка та впровадження лічильника води з автономним живленням [Електронний ресурс].

14. • Закон Ленца [Електронний ресурс].  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%BE\\_%D0%9B%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%BE_%D0%9B%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B0)

15• Похибка вимірювання [Електронний ресурс].  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F)

16• Абсолютна похибка вимірювання [Електронний ресурс].  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B1%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%82%D0%BD%D0%B0\\_%D0%BF%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B1%D1%81%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%82%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F)

17• Систематична похибка [Електронний ресурс].  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0\\_%D0%BF%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0)

18• Випадкові похибки [Електронний ресурс].  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BF%D0%B0%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0\\_%D0%BF%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BF%D0%B0%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0)

• Характеристики похибок вимірювання [Електронний ресурс].  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F)

19• Технічні характеристики лічильників води [Електронний ресурс].  
<https://www.ter-en.com/ua/kharakteristiki/vdm>

20• Князевський Б.А. та ін. Охорона праці в електроустановках.-К.: Енергія, 2003.

21. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. – Львів: Афіша, 2010. – 140с.

22. Шевченко В.І. Правові питання охорони праці. Навч. посібник, Харків: ХНАМГ, 2004. , 184 с.

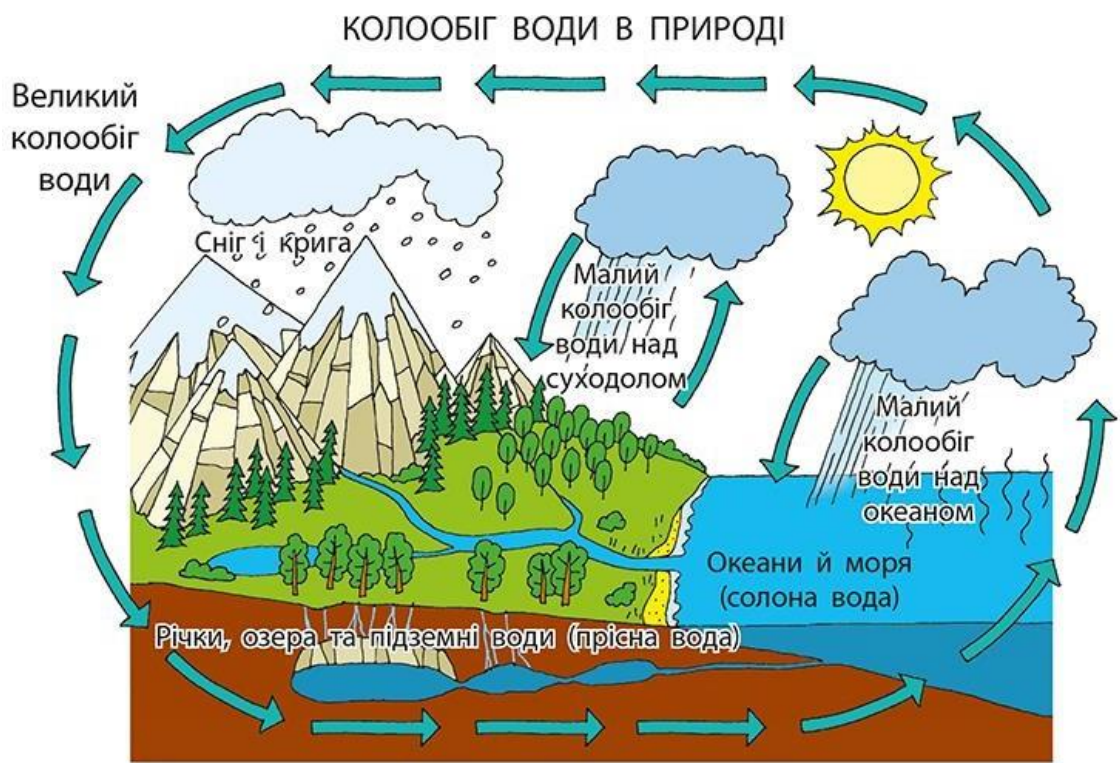
23. ДБН В.25-28-2006 “Природне і штучне освітлення”.

24. Бедрій, Я. І. Охорона праці та пожежна безпека [Текст] : навч. посіб. / Я. І. Бедрій. – Тернопіль : Навч. книга-Богдан, 2014. – 184 с.

## ДОДАТКИ

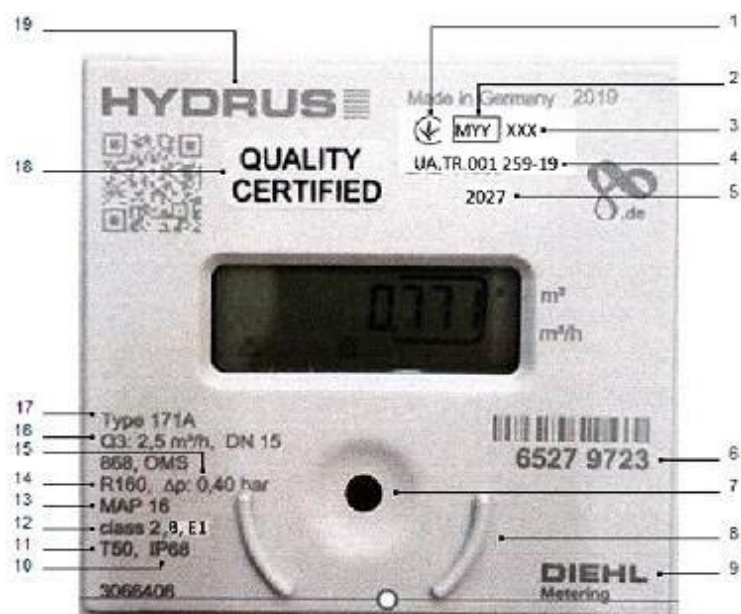
## ДОДАТОК А

### Кругообіг води в природі



## ДОДАТОК Б

Зовнішній вигляд приладу ультразвукового лічильника



## ДОДАТОК В

Швидкісні лічильники холодної та гарячої води



