

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ С.В. Павлова  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

## ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Витратомір водневого палива на літаку та його метрологічне  
забезпечення»

Виконавець: \_\_\_\_\_ Білявський Дмитро Ігорович \_\_\_\_\_  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: \_\_\_\_\_ проф., Землянський Володимир Михайлович \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ В.В.Левківський \_\_\_\_\_  
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2022

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Павлова С.В.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи**

Білявського Дмитра Ігоровича

1. Тема дипломної роботи: «Витратомір водневого палива на літаку та його метрологічне забезпечення» затверджена наказом ректора від: « 06 » грудня 2021 р. № 2658 /ст
2. Термін виконання роботи : 10.01.2022 по 28.02.2022
3. Вихідні дані до роботи: основні дані про вимірювання тиску і витрати, вимоги до приладів вимірювання, загальна класифікація витратомірних приладів, дефекти, характеристики та метрологічне забезпечення, дані про водень та можливості водневого палива, відомі водневі витратоміри та їх робота, водневе паливо в авіації.
4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Загальні положення про вимірювання тиску і витрати; Розділ 2. Основні типи витратомірних приладів; Розділ 3. Використання водневого палива та способи виміру.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: кінематична схема датчика (миттєвої витрати), кінематична схема датчика сумарної витрати, лічильник рідини, принцип дії мембранного лічильника, ротаційний лічильник газу, турбінний перетворювач витрати, кульковий перетворювач витрати, принципова схема ротаметра, принципова схема електромагнітного перетворювача витрати, ультразвуковий перетворювач витрати, доплерівський перетворювач витрати.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підбір літератури		
2	Підготовка та написання 1 розділу		
3	Підготовка та написання 2 розділу		
4	Підготовка та написання 3 розділу		
5	Перевірка на антиплагіат та отримання рецензії на диплом		
6	Підготовка презентації та доповіді		

7. Дата видачі завдання: “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 202 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: «Витратомір водневого палива на літаку та його метрологічне забезпечення» складає : 104 сторінки, містить 31 рисунки і 24 використаних джерела.

Об'єкт дослідження: процеси, методи та способи вимірювання витрати речовин, в тому числі водню.

Предмет дослідження: принцип дії авіаційних витратомірів, їх склад, характеристики та можливості розвитку у криогенній авіації.

Мета роботи: дослідити та проаналізувати методи вимірювання рідин за допомогою витратомірів, визначити актуальність та можливість використання водневого палива в авіаційній сфері та можливості створення авіаційних датчиків витрати водневого палива.

Методи дослідження: загальнонаукові фізичні методи, методи системного і порівняльного аналізу.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження: на базі даної роботи можливість створення в майбутньому датчиків витрати водневого палива та вивчення матеріалу на тему витратомірних пристроїв.

Ключові слова: ВИТРАТОМІР, ВИТРАТА РЕЧОВИН, ЦИВІЛЬНА АВІАЦІЯ, ПАЛИВО, ТИСК, ВОДЕНЬ, МАСОВА ВИТРАТА, МИТТЄВА ВИТРАТА.

# ЗМІСТ

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

## ВСТУП

### РОЗДІЛ 1. Загальні положення про вимірювання тиску і витрати

- 1.1. Основні поняття
- 1.2. Теперішні вимоги до приладів вимірювання витрат та кількості
- 1.3. Класифікація витратомірів
- 1.4. Різноманітності приладів для вимірювання витрати та кількості
- 1.5. Прилад стандартних діафрагм і сопел
- 1.6. Дефекти, що виникають у процесі експлуатації
- 1.7. Нормуючі метрологічні характеристики витратомірів
- 1.8. Повірка засобів вимірювання витрат

### РОЗДІЛ 2. Основні типи витратомірних приладів

- 2.1. Камерні лічильники рідини
- 2.2. Мембранні лічильники газу
- 2.3. Ротаційні лічильники газу
- 2.4. Турбінні витратоміри та лічильники
- 2.5. Кулькові витратоміри
- 2.6. Ротаметри
- 2.7. Електромагнітні витратоміри
- 2.8. Ультразвукові витратоміри
- 2.9. Кореляційні витратоміри
- 2.10. Коріолісові витратоміри
- 2.11. Теплові витратоміри

## РОЗДІЛ 3. Використання водневого палива та способи виміру

- 3.1. Водень, його фізичні та хімічні властивості
- 3.2. Водневе паливо в авіації
- 3.3. Витрата водню

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АП – авіаційний прилад

АТ – авіаційна техніка

ЕРС – електрорушійна сила

ЕН – електричний нагрівач

ККД – коефіцієнт корисної дії

РЕ – рідинні витратоміри з електричною передачею

РП – рідинні витратоміри з пневматичною передачею

## ВСТУП

Сучасні літаки літають зі швидкістю, близькій до швидкості звуку, і можуть протягом одного польоту покривати відстані, які рівні діаметру земної кулі. Політ можливо здійснювати в будь-який час дня або ночі, незалежно від видимості земних орієнтирів.

Всім цим досягнення авіації в більшій мірі сприяло створення приладів та автоматів, що забезпечують контроль польоту і вирішуючи складні задачі автоматичного управління літаком.

Безперервний процес удосконалення авіаційного устаткування повітряних суден судів (ПС), що диктується сучасними вимогами безпеки польотів, суттєво ускладнює завдання, які вирішуються сучасними авіаційними приладами (АП).

Параметрами які характеризують роботу різних бортових систем та агрегатів, можуть бути: температура, тиск і витрата газів та рідин, положення різних органів управління літального апарату та інші. Ці дані отримуються від приладів які вимірюють ці параметри.

Майже 70 % усіх вимірювань, що виконуються в науці, промисловості та авіаційній сфері, пов'язані з вимірюваннями тиску, витрати, кількості та рівня речовин.

Тиск і витрата є основними робочими параметрами, точність і надійність вимірювання яких визначає цінність результату експериментальних досліджень в гідродинаміці; оптимальні режими роботи об'єктів у ракетній техніці та авіації, енергетиці та транспорті; ефективність систем видобуток та переробки нафти та нафтопродуктів.

Точні вимірювання кількості та рівня речовин лежать в основі обліку та планування продукції, визначають раціональні режими транспортування та розподілу нафти та нафтопродуктів, необхідні для подальшого розвитку хімічної та паливної промисловості.



Розмаїття вимог до техніки вимірювань тиску, витрати кількості та рівня речовин, обумовлене специфікою наукового пошуку та виробництва в різних галузях народного господарства, різні фізико-хімічні властивості вимірюваних засобів сприяють появі, розробці та впровадженню у практику безлічі різних методів та засобів вимірювань цих величин.

Мабуть, у жодних інших галузях вимірювань немає такої великої кількості наукових ідей та технічних рішень, як у галузях вимірювань тиску, витрати, кількості та рівня.

Авіаційні датчики витратомірів є важливою складовою будь-якого літального апарату так, як вони застосовуються для вимірювання витрати палива, що споживається авіаційними двигунами, а також для вимірювання витрати повітря в двигунах. Тому витрати палива необхідно вимірювати з великою точністю. Потужність авіаційних двигунів пропорційна витраті палива за одиницю часу. Оскільки для підтримки заданої швидкості польоту відхилення тяги двигуна не повинно перевищувати  $\pm 2\%$ , то похибка вимірювання миттєвої витрати палива має бути не більшою за  $\pm 2\%$ . Приблизно такі ж вимоги пред'являються точності вимірювання сумарної витрати.

Саме в цій роботі буде розглянуто такий прилад як витратомір, що має неймовірно важливе значення для точної працездатності повітряного судна, його надійності, та безпеки польотів, що є дуже актуально на сьогодні.

## РОЗДІЛ 1.

### ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРО ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ І ВИТРАТИ

#### 1.1. Основні поняття

Майже 70 % усіх вимірювань, що виконуються в науці, промисловості та авіаційній сфері, пов'язані з вимірюваннями тиску, витрати, кількості та рівня речовин.

Тиск і витрата є основними робочими параметрами, точність і надійність вимірювання яких визначає цінність результату експериментальних досліджень в гідродинаміці та газодинаміці; оптимальні режими роботи об'єктів у ракетній техніці та авіації, енергетиці та транспорті; ефективність систем видобуток та переробки нафти та нафтопродуктів.

Точні вимірювання кількості та рівня речовин лежать в основі обліку та планування продукції, визначають раціональні режими транспортування та розподілу нафти та нафтопродуктів, необхідні для подальшого розвитку хімічної та паливної промисловості.

Розмаїття вимог до техніки вимірювань тиску, витрати кількості та рівня речовин, обумовлене специфікою наукового пошуку та виробництва в різних галузях народного господарства, різні фізико-хімічні властивості вимірюваних засобів сприяють появі, розробці та впровадженню у практику безлічі різних методів та засобів вимірювань цих величин.

Мабуть, у жодних інших галузях вимірювань немає такої великої кількості наукових ідей та технічних рішень, як у галузях вимірювань тиску, витрати, кількості та рівня.

Майже всі фізичні явища і закономірності, відкриті давно або нещодавно, втілюються в сучасній техніці вимірювання цих величин.

Зрозуміти фізичні принципи вимірювань, навчитися розпізнавати причини і джерела можливих похибок вимірювань, а отже, навчитися грамотно вимірювати і проводити метрологічне обслуговування засобів вимірювань - таке основне завдання цього розділу.

Витрата – кількість речовин, що протікає через переріз каналу в одиницю часу.

Залежно від того, в яких одиницях вимірюють кількісно речовини, розрізняють об'ємну витрату і масову витрату.

Об'ємна витрата  $Q_o$ . Одиницею об'ємної витрати в Міжнародній системі одиниць СІ є  $\text{м}^3/\text{с}$ . Часто використання цієї одиниці виявляється незручним, тому широко використовуються позасистемні одиниці:  $\text{м}^3/\text{год}$ ,  $\text{д}/\text{хв}$ ,  $\text{л}/\text{год}$  тощо.

Масова витрата  $Q_m$ . Одиниця масової витрати в системі СІ -  $\text{кг}/\text{с}$ . Позасистемні одиниці- $\text{кг}/\text{хв}$ ,  $\text{т}/\text{год}$ .

$$Q_m = Q_o \rho$$

де  $\rho$  - щільність вимірюваного середовища у робочих умовах.

При вимірюванні об'ємної витрати необхідно вказувати робочі параметри тиску і температуру, оскільки вони мають сильний вплив на щільність. Тому для газів і парів вводиться поняття об'ємної витрати, придатної до стандартних умов,  $Q_c$  (абсолютний тиск  $p_c = 101,325 \text{ кПа}$ , температура  $t_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), який відповідає такій же масовій витраті, що і об'ємна витрата за робочих умов. Одиниці вимірювання ті ж, що й для об'ємної витрати,  $-\text{м}^3/\text{с}$ ,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Фактично об'ємна витрата, наведена до стандартних умов, - це масова витрата з якимось коефіцієнтом пропорційності, що визначається за стандартних умов. вимірюваного середовища в стандартних умовах.

$$Q_c = \frac{Q_m}{\rho_c} = Q_o \frac{p}{p_c},$$

де  $\rho_c$  – щільність вимірювального середовища в стандартних умовах.

Щільність газу в робочих і стандартних умовах зв'язана рівнянням стану

$$p = \rho_c \frac{p}{\rho_c} \frac{T_c}{T} \frac{1}{K},$$

де  $p$  і  $T$  – тиск і температура вимірювального середовища в робочих умовах;  $K$  – коефіцієнт стискування.

Витрата газу, приведена до стандартних умов,

$$Q_c = Q_o \frac{p}{\rho_c} \frac{T_c}{T} \frac{1}{K}.$$

Таким чином, об'ємна витрата, приведена до стандартних умов, може бути визначена за результатами вимірювання об'ємної витрати робочих умов, тиску, температури і складу вимірювального середовища.

Строго кажучи, і при зміні об'ємної витрати рідини необхідно вказувати її параметри або наводити результати вимірювання до стандартних умов. Як правило, цього не робиться, тому що у більшості рідин залежність щільності від температури і тиску незначна, і при вимогах нормальної точності вимірювання витрати і кількості можна не враховувати цю залежність. При вимогах високої точності виміру, наприклад, при рахунку нафти і нафтопродуктів, залежність щільності від температури необхідно враховувати, а результати виміру об'ємного. Залежність щільності від температури необхідно враховувати, а результати вимірювання об'ємної витрати потрібно приводити до стандартних умов. При обліку природного газу прийнято використовувати об'ємної втрати потрібно приводити до стандартних умов.

При урахуванні природного газу прийнято використовувати об'єм, приведений до стандартних умов,  $V_c$ . Об'єм при стандартних умовах  $V_c$  містить таку ж масу газу  $M$ , що і об'єм при робочих умовах  $V$ .

$$M = V_c \rho_c = V \rho;$$

$$V_c = V \frac{\rho}{\rho_c}.$$

Перетворювач витрати – вимірювальний прилад, що безпосередньо сприймає вплив потоку вимірюваного середовища і перетворює витрату на величину, зручну для вимірювання.

Перетворювач витрати часто буває однаковим у витратомірів та лічильників, відмінність у тій частині приладів, яка сприймає сигнал від перетворювача витрати. Наприклад, турбінний перетворювач витрати використовується як у витратомірах, так і в лічильниках. В одному випадку прилад реєструє частоту імпульсів, інший кількість імпульсів. Тому часто використовується узагальнений витратовимірювальний пристрій, що включає витратомір, лічильник і перетворювач витрати.

Назва витратомірного пристрою визначається фізичним явищем, на якому заснована робота перетворювача витрати, наприклад: витратомір змінного перепаду тиску, ультразвуковий витратомір. Приведені визначення витратоміра та лічильника показують величину, що вимірюється приладом (витрата або кількість). Однак часто в назві витратомірного пристрою враховується те, з якою величиною (витратою або кількістю) пов'язаний вихідний сигнал перетворювача витрати.

Залежно від методу вимірювання випускаються такі витрати:

- 1) змінного перепаду тиску, що базуються на залежності витрати від перепаду тиску на перетворювач внаслідок часткового переходу потенційної енергії потоку в кінетичну;

2) швидкісного напору для вимірювання витрати по динамічному натиску потоку за допомогою пневмометричних трубок Піто-Прандтля;

3) змінного рівня, засновані на залежності вільному закінченні її через отвір у дні або бічній стінці (витратоміри обтікання, ротометри);

4) постійного перепаду тисків, засновані на залежності витрати речовини від вертикального переміщення тіла (поплавця), що змінює площу прохідного перерізу приладу таким чином, що перепад тисків по обидва боки поплавця залишається постійним.

5) тахометричні (турбінні, кулькові тощо), що перетворюють швидкість потоку в кутову швидкість обертання обтічного елемента (турбінки, кульки);

6) електромагнітні, що перетворюють швидкість електропровідної рідини, що рухається в магнітному полі;

7) ультразвукові витратоміри, засновані на ефекті перенесення звукових коливань рухомим середовищем.

Існує поняття кількості речовини. Кількість речовини можна виміряти в одиницях маси [кг, т], або в одиницях обсягу [м<sup>3</sup>, л]. Прилади застосовувані вимірювання кількості речовини називаються лічильниками речовини (лічильники). У кожному конкретному випадку слід додавати найменування контрольованої фізичної величини. Наприклад: "водолічильник" або "витратомір перегрітої пари".

Найбільш поширеним методом вимірювання витрати рідини, пари та газу є метод змінного перепаду тиску.

Принцип дії заснований на вимірі перепаду тиску ( $\Delta P = P_1 - P_2$ ), який є функцією витрати вимірюваного середовища.

Принцип дії швидкісних витратомірів полягає, безпосередньо в тому, що паливо, яке протікає в магістралі приводить до обертів крильчатку датчика витратоміра, оберти

якої пропорційні швидкості потоку і в кінцевому результаті - кількості палива, що протікає через датчик.

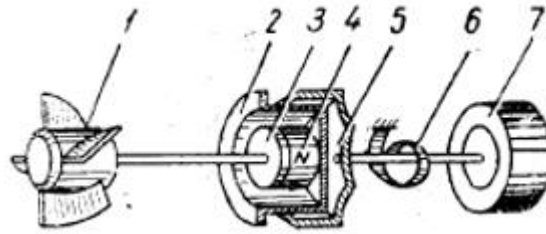


Рис.1.1. Кінематична схема датчика (миттєвої витрати): 1- крильчатка, 2 діамагнітний кожух, 3 – термомагнітний шунт, 4 – постійний магніт, 5 – стакан, 6 – пружина, 7 – сільсин датчик

Крильчатка 1 приводить до обертів постійний магніт 4 з термомагнітним шунтом 3. Герметичність датчика забезпечена діамагнітним кожухом 2. Оберти магніту приводить до повороту стакан 5, внаслідок взаємодій полів магніту та вихрових потоків у стакані. При цьому обертається зв'язаний зі стаканом ротор сільсин датчика. Кут ротора, обмежений пружиною 6 – буде пропорційний швидкості обертів крильчатки, і в наслідок миттєвій витраті. Стрілка на осі сільсин-приймача дозволяє відрахувати цю витрату за шкалою в кілограмах на годину.

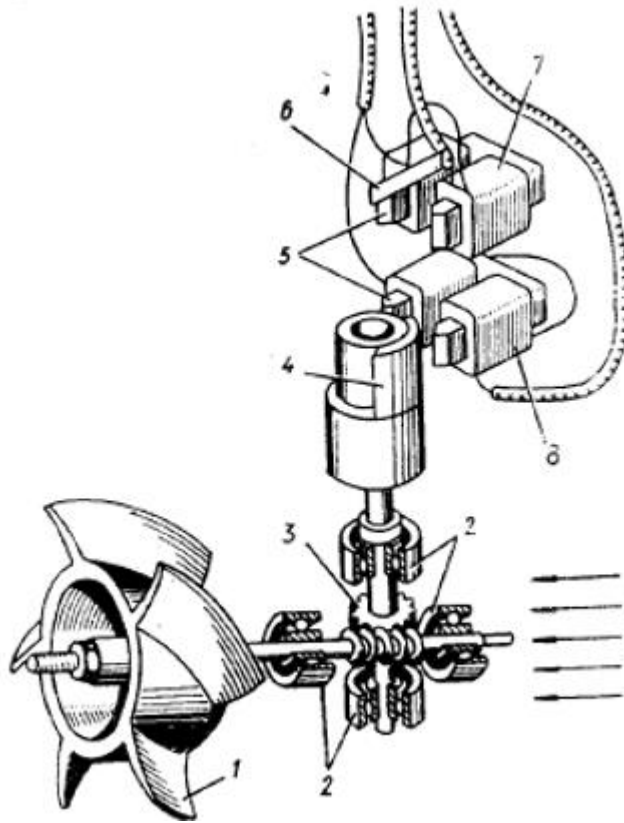


Рис.1.2. Кінематична схема датчика сумарної витрати: 1 – крильчатка, 2 – підшипники, 3 – черв'ячна передача, 4 – сталевий сердечник, 5 – сердечник, 6 – магнітний шунт, 7 – котушка постійної індуктивності, 8 – котушка змінної індуктивності

## 1.2. Теперішні вимоги до приладів вимірювання витрат та кількості

Натепер до витратомірів і вимірювальних приладів витрати та кількості висувається багато вимог, які важко виконати разом і не завжди можливо. Є дві групи вимог. До першої групи належать індивідуальні вимоги до вимірювальних приладів для вимірювання витрати та кількості: висока точність, надійність, незалежність результатів вимірювань від зміни густини речовини, швидкості та широкого спектру вимірювань. До другої групи входять вимоги, що характеризують всю групу витратомірів і лічильників: необхідність вимірювання витрати і кількості різних речовин за різними



властивостями, різні витрати від дуже малих до надзвичайно великих і при різних тисках і температурах.

- 1) Висока точність виміру - одна з основних вимог, що пред'являються особливо до лічильників і дозаторів. Якщо раніше похибка та вимірювання в 1,5-2% вважалася нормальною та досить задовільною, то нині нерідко потрібно мати похибку не більше 0,2-0,5%. Підвищення точності досягається як за рахунок застосування нових прогресивних методів та приладів (тахометричних, електромагнітних, ультразвукових тощо), так і за рахунок удосконалення старих класичних методів. До найбільш точних відносяться камерні лічильники рідини (зокрема, з овальними шестірнями та лопатеві). Похибка перших не більше 0,5%, а інших навіть не більше 0,2% від вимірюваної величини. Витратоміри та лічильники з пристроями, що зі звужуючим ефектом, менш точні. Зниження їх похибки досягається за допомогою зносостійких діафрагм, а також при підвищенні точності дифманометрів і застосуванні обчислювальних пристроїв для врахування зміни щільності речовини.
- 2) Надійність (наряду в точністю) - одна з головних вимог, що висуваються до витратомірів та лічильників кількості. Основним показником надійності є час, протягом якого прилад зберігає працездатність та достатню точність. Цей час залежить як від пристрою, так і від його призначення та умов застосування. Так, у турбінних витратомірів нанесення осі та опор буде тим менше, чим краще змащувальна здатність вимірюваної речовини і чим вона більш чиста. Для підвищення надійної роботи цих витратомірів необхідно використовувати фільтри або інші очисні пристрої. У технічних умовах деякі тахометричні витратоміри турбінного типу вказується шестирічний термін нормальної роботи.
- 3) Незалежність результатів вимірювання від зміни густини речовини. Ця вимога особливо важлива при вимірюванні витрати газу, у якого щільність залежить

від його температури та тиску. У більшості випадків необхідно мати пристрої, що автоматично вводять корекцію у показання приладу при зміні щільності (або температури та тиску) вимірюваної речовини. Лише у теплових і силових витратомірів, що вимірюють масову витрату, зміна щільності вимірюваної речовини дуже мало позначається на результати вимірювання.

- 4) Швидкодія приладу, що визначається його хорошими динамічними характеристиками, необхідна насамперед при вимірюванні швидко мінливих витрат, а також у разі застосування приладу в системі автоматичного регулювання. Швидкодію більшості витратомірів зручно оцінювати значенням його постійної часу  $T$ , тобто часу, протягом якого показання приладу при стрибкоподібній зміні витрати від  $Q_1$  до  $Q_2$ , змінюються приблизно на дві третини від значення  $Q_2 - Q_1$ . Турбінні витратоміри мають дуже малу постійну часу  $T$  (у межах сотих та тисячних часток секунди). У теплових витратомірів час  $T$  вимірюється десятками секунд. Для поліпшення їхньої швидкодії застосовують особливі вимірювальні схеми (диференціюючі). Витратоміри з пристроями, що звужують, займають проміжне положення. У цих витратомірах час  $T$  зменшується зі зменшенням довжини сполучних трубок, а також вимірювального об'єму дифманометра та збільшенням його граничного перепаду тиску.
- 5) Великий діапазон вимірювання ( $Q_{max}/Q_{min}$ ) необхідний, коли значення витрати можуть змінюватись у значних межах. У приладів з лінійною характеристикою, наприклад електромагнітних, цей діапазон дорівнює восьми-десяти. У витратомірів зі звужуючими пристроями він дуже малий і дорівнює трьом. Підвищити його до дев'яти-десяти можна шляхом підключення до звужувального пристрою двох дифманометрів з різними  $\Delta p_{max}$ . У теплових витратомірів можна методом зміни потужності нагрівача отримати багатогранну шкалу з дуже великим загальний діапазон виміру.

- б) Дуже різноманітна номенклатура вимірюваних речовин, які можуть бути не лише однофазними, а й багатфазними. Основні методи вимірювання витрати були розроблені для однофазних середовищ, тобто для рідини, газу і пару. При цьому треба враховувати як параметри (тиск, температуру), так і особливі властивості (агресивність, абразивність, токсичність, вибухонебезпечність тощо) речовин усередині кожного з цих середовищ. Поряд з виміром витрати різних промислових рідин доводиться вимірювати і витрату розплавлених металів-теплоносіїв при високих температурах. Крім того, все частіше виникає необхідність вимірювання витрати двофазних і навіть трифазних середовищ. До них відносяться гідросуміші або пульпи, суміші твердої та газоподібної фаз (пиловугільне паливо), суміші рідини з газом (нафтогазова суміш) або з паром (волога пара) і, нарешті, газувана пульпа, що являє собою суміш усіх трьох фаз.
- 7) Мінімальний гідравлічний супротив. Гідравлічний супротив перетворювача витрати виявляє затрати енергії на вимір. При порівняній оцінці приладів слід враховувати не тільки гідравлічний супротив перетворювача витрати, але і супротив додаткових приладів і прямих ділянок трубопроводу, котрі необхідно враховувати при монтажі перетворювача.
- 8) Простота контролю метрологічних характеристик. Найбільше це вимога для пристроїв, призначених для виміру великих витрат. Еталонні витратомірні установки для перевірки та калібрування при великих витратах є громіздкими, складними та дорогими, що призводить до великих витрат на проведення перевірки і калібрування. Ряд витратомірних пристроїв може повірятися і калібруватися безпроливним методом (без використання еталонних витратомірних установок). Можливість проведення повірки та калібрування безпроливним методом часто є визначальним фактором при виборі того чи іншого типу приладу.
- 9) Необхідність вимірювання витрат різних речовин не тільки у звичайних, а й в екстремальних умовах за дуже низьких та дуже високих тисків та температур.

Так, витрата кріогенних рідин, наприклад зрідженого водню, треба вимірювати при низьких температурах (до  $-255\text{ C}^\circ$ ), а витрата перегрітої пари надвисокого тиску і витрата розплавлених металів теплоносіїв - при температурах, що досягають  $+600\text{ C}^\circ$ . За подібних умов вимірювання створюються певні труднощі у підборі засобів вимірювання, що надійно працюють.

### **1.3. Класифікація витратомірів**

Створити універсальний тип приладу, заснований на одному фізичному явищі, який зміг би охопити всі сфери застосування та задовольнити всі вимоги, певно неможливо. В даний час застосовуються витратомірні пристрої, засновані на різних фізичних принципах, кожен з яких має певні переваги і недоліки.

Фізичний принцип, на якому заснована робота витратомірного пристрою, відображається у його назві, наприклад: ультразвуковий витратомір, електромагнітний витратомір, витратомір перемінного перепаду тиску.

Усі пристрої можна розділити на групи, виходячи з спільності однієї або кількох характеристик. Залежно від цілей класифікації в її основу закладається будь-яка визначальна для цієї мети ознака.

Залежно від того, яка витрата вимірюється - об'ємна або масова, пристрої поділяються на об'ємні та масові. У свою чергу масові витратоміри і лічильники можуть мати утворювачі витрати, вихідний сигнал яких визначається масовою витратою, та перетворювачі, вихідний сигнал яких визначається об'ємною витратою, а масова витрата або кількість розраховуються за результатами вимірювання об'ємної витрати та щільності.

Залежно від стану вимірюваного середовища витратомірні пристрої підподіляються на рідинні та газові. Своєю чергою рідинні пристрої діляться на пристрої, призначені для вимірювання висококиплячих, кріогенних рідин і рідких металів.

За значенням максимальної вимірюваної витрати рідинні пристрої можна розділити на наступні групи:

- пристрої малої продуктивності до  $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- пристрої середньої продуктивності від  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- пристрої великої продуктивності понад  $1 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$ .

По точності можна виділити:

- пристрої високої точності з похибкою менш ніж 0,5%;
- пристрої нормальної точності з похибкою в межах від 0,5 до 1,5%;
- пристрої зниженої точності з похибкою від 1,5 до 2,5%;
- грубі пристрої з похибкою понад 2,5%.

Найбільш широко використовуються прилади нормальної та зниженої точності. Приладами високої точності є турбінні лічильники нафти та нафтопродуктів, камерні лічильники промислових рідин, масові коріолісові витратоміри, а також сучасні багатопроменеві рідкісні та тазові ультразвукові витратоміри.

Залежно від швидкодії прилади поділяються на:

- малоінерційні прилади з часом встановлення показань менше 0,1 с;
- інерційні прилади з часом встановлення більш ніж 0,1 с.

Найбільш швидкодійними є електромагнітні перетворювачі витрати. До швидкодійних приладів належать також турбінні витратоміри. Найбільш інерційними являються теплові і кореляційні перетворювачі.

У залежності від особливостей конструкції перетворювача витрати витратомірні прилади поділяються на:

- пристрої з рухомими елементами у потоці вимірюваного середовища;
- пристрої без рухомих елементів в потоці вимірюваного середовища;

До пристроїв з рухомими елементами відносяться:

- камерні витратоміри (турбінні та кулькові з овальними шестернями, дискові, гвинтові, мембранні, роторні);
- витратоміри обтікання (постійного перепаду тиску – ротаметри і поплавкові витратоміри);
- швидкісні витратоміри (масові коріолісові).

Пристрої без рухомих елементів поділяються на:

- витратоміри з деформацією потоку (витратоміри змінного перепаду тиску та вихрові витратоміри);
- витратоміри без деформації потоку (ультразвукові, електромагнітні, кореляційні, теплові, оптичні).

Залежно від методу контролю метрологічних характеристик витратомірні пристрої можна розділити на дві групи:

- пристрої, перевірка і калібрування яких можливе тільки проливним методом з використанням еталонних витратомірних установок;
- пристрої, повірка і калібрування яких можуть проводитися безпроливним методом.

Безпроливна повірка і калібрування можуть проводитися в тих випадках, коли виконуються наступні умови:

- фізичний процес, що відбувається в перетворювачі витрати;
- відсутні фактори, вплив яких важко безпосередньо проконтролювати;
- розроблені відповідні методика повірки та калібрування;
- є або спеціально розроблені технічні засоби повірки та калібрування

На результат вимірювання приладів, що мають у перетворювачі витрати рухливі елементи, надає вплив протікання через зазори та невизначеність тертя. Повірка та калібрування таких приладів може проводитись лише проливним методом.

У приладах з перетворювачами витрати без рухомих елементів джерелами похибки є відхилення геометричних параметрів перетворювача від номінальних значень, похибка вимірювальних пристроїв, що сприймають сигнал від перетворювача витрати, а також похибка, спричинена недостатнім знанням самого фізичного процесу у перетворювачі витрати. При добре вивченому процесі в перетворювачі витрати контроль метрологічних характеристик приладу в цілому може проводитися елементарно і полягати в контролі геометричних параметрів перетворювача витрати та метрологічних характеристик проміжних перетворювачів та вторинних приладів.

Для низки приладів розроблені методики перевірки та калібрування безпроливним методом. Такими приладами є витратоміри змінного перепаду тиску зі стандартними та спеціальними пристроями, що звужують, а також ультразвукові, електромагнітні, вихрові та кореляційні витратоміри.

#### **1.4. Різноманітності приладів для вимірювання витрати та кількості**

Залежно від того, для вимірювання якої (об'ємної або масової) витрати призначені витратоміри, їх поділяють на об'ємні та масові. Існує багато різних ознак, за якими можна класифікувати витратоміри (наприклад, за точністю, діапазонами вимірювань, видом вихідного сигналу тощо). Однак найбільш загальною є класифікація за принципами вимірювань, за тими фізичними явищами, за допомогою яких вимірювана величина перетворюється на вихідний сигнал первинного перетворювача витратоміра.

За принципом вимірювань витратоміри класифікують за такими основними групами (зазначений для кожної класифікаційної групи витратомірів принцип перетворення відноситься до їх первинних перетворювачів датчиків).

1. Витратоміри змінного перепаду тиску (із звужуючими пристроями; з гідравлічними опорами; відцентрові; з напірними пристроями; струменеві), що перетворюють швидкісний напір у перепад тиску.
2. Витратоміри обтікання (витратоміри постійного перепаду- ротометри, поплавкові, поршневі, гідродинамічні), що перетворюють швидкісний напір у переміщення обтіканого тіла.
3. Тахометричні витратоміри (турбінні з аксіальною або тангенціальною турбіною; кулькові), що перетворюють швидкість потоку на кутову швидкість обертання обтічного елемента (лопат турбінки або кульки).
4. Електромагнітні витратоміри, що перетворюють швидкість рухомої в магнітному полі провідної рідини в ЕРС.
5. Ультразвукові витратоміри, засновані на ефекті захоплення звукових коливань середовищем, що рухається.
6. Інерційні витратоміри (турбосилові; коріолісові; гігроскопічний), що ґрунтуються на інерційному впливі маси, що рухається з лінійним або утловим прискоренням рідини.
7. Теплові витратоміри (калориметричні; термоанемометричні), засновані на ефекті перенесення тепла середовищем, що рухається, від нагрітого тіла.
8. Оптичні витратоміри, засновані на ефекті зникнення світла середовищем, що рухається (Фізо-Френелі) або розсіювання світла частинками, що рухаються (Допплера).
9. Міткові витратоміри (з теплоними, нонізаційними, магнітними, концентраційними, турбулентними мітками), що ґрунтуються на вимірюванні швидкості або стані мітки при проходженні її між двома фіксованими перерізами потоку.

Звичайно, наведена класифікація, не повна і невичерпна, оскільки з кожним роком з'являються нові методи та засоби вимірювання витрати.



У вітчизняній практиці найбільшого поширення набули витратоміри перших п'яти груш (змінного та постійного тиску, тахометричні, електромагнітні та ультразвукові). Ці витратоміри випускаються серійно і знаходять застосування практично у всіх галузях. Витратоміри інших груп використовуються поки що, в основному, для вирішення спеціальних вимірювальних завдань (при наукових дослідженнях, в медицині, кріогеніці, при вимірюваннях агресивних і токсичних середовищ тощо), виготовляються одиничними екземплярами або малими партіями і є на сьогоднішній день нестандартизованими засобами вимірів.

Сучасна вимірювальна практика висуває дедалі більші вимоги до точності, надійності, швидкодії, функціональності витратомірів. Слід зазначити, що здебільшого ці вимоги суперечливі, тобто поліпшення одних характеристик, зазвичай, досягається з допомогою недореалізації можливостей поліпшення інших. Так, збільшення функціональних можливостей приладів за рахунок ускладнення знижує їх надійність внаслідок зростання кількості схильних до відмови елементів. Збільшення швидкодії знижує ефективність систем автоматичної компенсації похибок, що повільно змінюються, спричинених впливом зовнішнього середовища, параметрів вимірюваних об'єктів тощо. При цьому слід мати на увазі, що і "грубі" відносно низькоточні, але недорогі засоби вимірювань завжди будуть мати досить великий промисловий попит, оскільки здатні задовольнити певний клас практичних вимірювальних завдань. Однак різке підвищення точності вимірювань було і залишається найважливішим завданням розвитку витратомірної техніки.

### **1.5. Прилад стандартних діафрагм і сопел**

При досить великих числах Рейнольдса  $Re$ , які зазвичай є в більшості випадків вимірювання витрат, коефіцієнт закінчення діафрагм і сопел (рис. 1.3), а значить і їх коефіцієнт витрати  $a$ , майже не змінюється зі зростанням числа  $Re$ . Ця обставина стала причиною широкого застосування цих звужуючих пристроїв у всіх промислово розвинених країнах.

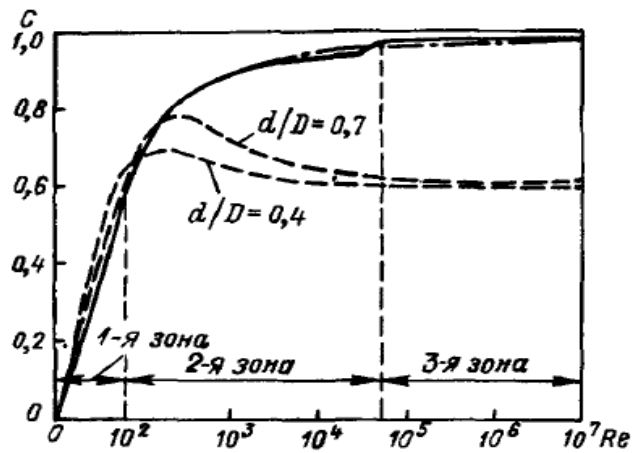


Рис.1.3. Залежність коефіцієнту перетину  $C$  від числа  $Re$  для стандартної діафрагми (-----), стандартного сопла (\_\_\_\_\_) та для параболічного сопла (-.-)

Експериментальні роботи, проведені у двадцяті роки, дозволили з досить високою точністю визначити значення коефіцієнтів витрати діафрагм та сопел для різних  $m$ . Ці роботи були узагальнені Техічним комітетом 30 (ТК-30) при Міжнародній організації зі стандартизації (ІСО) та послужили основою для розробки міжнародних рекомендацій, що завершилися випуском міжнародного стандарту ISO5167, в якому регламентовано застосування цих пристроїв. Пристрій стандартної діафрагми з кутовим способом відбору тиску показано на (рис.1.3) Вона є тонким диском, що має в центрі круглий отвір діаметром  $d$ . Вхідний кут отвору повинен дорівнювати  $90^\circ$ , а ширина циліндричної частини отвору  $e$  повинна бути в межах від  $0,005D$  до  $0,02D$ , де  $D$  - внутрішній діаметр трубопроводу. Товщі на диску  $E$  не повинні перевищувати  $0,05D$ . Якщо  $E$  більше  $0,02D$ , то отвір на стороні звужують має конічну розточку виходу тому ISO5167 допускається кут від  $45^\circ$  до  $60^\circ$ ). Різниця значень  $E$  або  $e$ , виміряних у будь-якому місці, не повинна перевищувати  $0,001D$ . Вхідна та вихідна площини діафрагми повинні бути паралельні один одному. Не перпендикулярність вхідної площини до осі діафрагми повинна бути не більше 1, а шорсткість поверхні площини в межах кола діаметром  $1,5d$  не повинна перевищувати  $10^{-4} d$ .

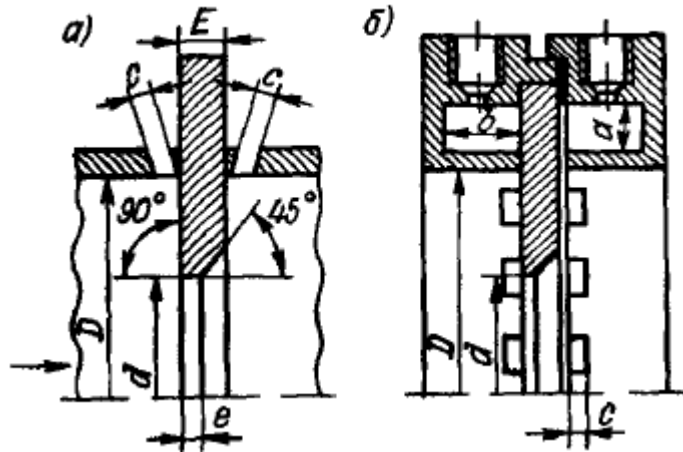


Рис.1.4. Стандартна діафрагма: а – з точковим кутовим відбором  $p_1$  і  $p_2$ , б – з камерним кутовим відбором  $p_1$  і  $p_2$ .

Параметр шоруховатості  $R_a$  (середнє арифметичне відхилення профілю) циліндричного отвору  $e$  не повинно бути не більше 1,25 мкм. Відносна площа отвору ( $m = d^2/D$ ) діафрагм з кутовим відбором допускається в межах від 0,05 до 0,64, а коефіцієнти витрати для цих діафрагм, наведені в нормативних документах, справедливі при установці їх у трубах, які мають  $D$  від 50 до 1000 мм. На (рис. 1.4) показані два способи відбору тисків  $p_1$  і  $p_2$  точковий за допомогою двох отворів, просвердлених у трубопроводі (рис. 1.4, (а)) або в спеціальній кільцевій обоймі, і камерний (рис. 1.4, (б)). Кут нахилу  $\Psi$  біля отворів для відбору (рис. 1.4 (а)) повинен бути не більше  $3^\circ$ , але краще, щоб він дорівнював 0, цього можна досягти за допомогою свердління отворів в обоймі, що охоплює діафрагму. Точковий відбір слід застосовувати при недостатній довжині цієї ділянки значно краще застосувати камерний відбір, що сприяє відбору середніх тисків  $p_1$  і  $p_2$ , які з'єднуються з внутрішнім простором трубопроводу за допомогою групи рівномірно визначених по колу отворів, або кільцевих щілин, що знаходяться безпосередньо біля площин діафрагми. При  $D > 400 \div 500$  мм замість кільцевих камер для отримання середніх значень  $p_1$  та  $p_2$  обмежуються чотирма отворами до і чотирма після діафрагми, розташованими рівномірно по колу, які за допомогою трубок з'єднують у два колектори; із цього колектора і відбирають  $p_1$  і  $p_2$ .

Для ефективного усереднення  $p_1$  і  $p_2$ , треба, щоб площа камери  $F_k = ab$  (рис. 1.4, (б)) була не менше половини площі кільцевої щілини  $\pi Dc$  або площі отворної  $nf$ , де  $n$  — число отворів,  $a$  — площа одного отвору. Враховуючи дуже різку зміну тиску поблизу площин діафрагми, діаметр отворів з (рис. 1.4, (а)), а також ширину з кільцевих щілин або отворів для відбору (рис. 1.4, (б)) треба брати за можливістю менше.

### **1.6. Дефекти, що виникають у процесі експлуатації**

Корозія та ерозія звужувальних пристроїв у процесі експлуатації можуть спричинити значні похибки вимірювань, тому матеріал, з якого виготовляються діафрагми та сопла, має бути антикорозійним та достатньо твердим, щоб забезпечити їх зносостійкість. Але запобігти зносу та затупленню вхідної гострої кромки не вдається. Тому для  $D < 300$  мм значно краще застосовувати сопла або діафрагми, у яких край має фаску або злегка закручений.

Деякі речовини (зокрема, смолоутворюючі) можуть забруднювати звужувальний пристрій і бути причиною великої погрішності. При цьому у сопла збільшуються показання, оскільки опади та нарости зменшують площу його прохідного отвору. Діафрагми показання зменшуються, так як при забрудненні зменшується гострота вхідної кромки. Запобігти забрудненню діафрагм і сопел важко. У цих випадках слід частіше виймати звужувальні пристрої для ревізії та заміни.

Точність вимірювання витрати залежатиме також від стану трубопроводу, тобто від його забруднення та корозії. Обидва фактори призводять до збільшення шорсткості труби та зростання коефіцієнта витрати  $\alpha$ . При значних відкладеннях у трубі відбувається додаткове зростання, а через збільшення швидкості потоку коефіцієнта швидкості входу. При цьому необхідне часте чищення труб.

На горизонтальних лініях перед діафрагмою або соплом можуть накопичуватися опади та конденсат. Для їх видалення роблять отвір діаметром не більше  $0,08D$ ,

розташований на відстані не менше  $0,5D$  від отвору для відбору тисків  $p_1$  або  $p_2$ . Отвори для видалення осадів і для відбору тисків не повинні знаходитись в одній площині, що проходить через вісь труби.

### **1.7. Нормуючі метрологічні характеристики витратомірів**

Нормування метрологічних характеристик витратомірних пристроїв здійснюється відповідно до принципів, викладених у ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормуючі метрологічні характеристики засобів вимірювань». Конкретні метрологічні характеристики, що нормуються для конкретних типів витратомірних вимірювальних пристроїв, встановлюються у відповідних нормативних документах: державних стандартах, методиках інститутів, керівних документах і технічних умовах.

Комплекс нормованих метрологічних характеристик засобів вимірів згідно ГОСТ 8.009 84 включає в себе наступні групи характеристик:

- характеристики, призначені для визначення результатів вимірювання (без ведення поправок);
- характеристики похибок;
- характеристики чутливості до впливових величин;
- динамічні характеристики;
- характеристики, що відображають взаємодіючі з об'єктом виміру;
- неінформативні параметри вихідного сигналу.

До характеристик, які призначені для попередження результатів виміру, відносяться:

- номінальна статична характеристика перетворення;
- діапазон вимірювання;
- інформативний параметр вихідного сигналу.

Номинальна статична характеристика перетворення витратомірного пристрою представляється у вигляді апроксимуючого рівняння, що зв'язує витрату та інформативний параметр вихідного сигналу,  $Q = f(x)$  або у вигляді залежності коефіцієнта перетворення від витрати  $K = f(Q)$ .

Апроксимуюче рівняння  $Q = f(x)$  може мати наступний вигляд:

$$Q = bx; Q = a + bx; Q = bx + cx^2; Q = d\sqrt{x},$$

де  $Q$  – витрата;

$x$  - інформативний параметр вихідного сигналу;

$a, b, c$  і - постійні коефіцієнти.

Коефіцієнт перетворення визначається як відношення  $K = \frac{x}{V}$  для лічильників або  $K = \frac{x}{Q}$  для витратомірів, де  $x$  - інформативний формат вихідного сигналу;  $V$  - кількість речовини, що пропала через лічильник.

Апроксимуюче рівняння визначається при градуюванні. У протоколах випробувань, паспортах наводиться апроксимуюче рівняння у загальному вигляді із зазначенням числових коефіцієнтів. Номинальна статична характеристика перетворення може представлятися окремо для різних піддіапазонів вимірювання.

Коефіцієнт перетворення може прийматися постійним, виражатися у вигляді залежності від витрати, яка представляється поліномом першого або другого ступеня, а також у вигляді таблиці. При абсолютному представленні коефіцієнта перетворення в таблиці вказуються значення або розрахункові формули коефіцієнта переваги для конкретного діапазону витрат.

Діапазон вимірювання нормується шляхом вказівки нижньої (найменшої витрати)  $Q_{min}$  і верхнього (найбільшої витрати)  $Q_{max}$  меж вимірювання. При розбивці всього

діапазону на піддіапазони показують також їх межі. Інформативний параметр вихідного сигналу формують шляхом вказівки фізичної величини меж його зміни.

При вимірюванні витрати інформативним параметром вихідного сигналу можуть бути: частота наслідування електричних імпульсів, сила струму, напруга, цифровий код, перепад тиску, переміщення покажчика шкали і тощо, при змінах кількості – число обертів вимірювального механізму, кількість електричних імпульсів, цифровий код, показання роликового або стрілкового покажчика кількості.

Неінформативні параметри вихідного сигналу нормують шляхом вказівки параметра і меж його зміни. До інформаційних параметрів відносяться: амплітуда коливань покажчика шкали рівень шуму в сигналі напруги або струму; в тому випадку, якщо вихідним параметром є електричні імпульси, - форма імпульсу і амплітуда напруги і тощо.

Основна похибка більшості витратомірних пристроїв нормується межею допустимої основної похибки без розділення на систематичну і випадкову складові. У деяких пристроїв, наприклад ротаметрів, нормується також і варіація показань.

У витратомірів нормують межу основної допусканної відносної  $\sigma$  або наведеної  $\gamma$  похибки. При нормуванні приведеної похибки за нормуючі значення приймають верхню межу виміру  $Q_{max}$  :

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} 100; \gamma = \frac{\Delta}{Q_{max}} 100,$$

де  $\Delta$  - абсолютна похибка.

У лічильників завжди нормують передбачувану відносну похибку  $\sigma$  вимірювання кількості  $V$ .

$$\delta = \frac{\Delta}{V} 100.$$

Допускні значення похибки можуть бути різними для різних піддіапазонів вимірювання.

Витратомірним пристроям можуть надаватися класи точності. При цьому клас точності чисельно дорівнює межі основної відносної або наведеної похибки, що допускається.

У деяких пристроїв залежність абсолютної допустимої похибки допустимих витрати виражається рівнянням

$$\Delta = \Delta_0 + \frac{\delta^*}{100} Q,$$

де  $\Delta_0$  - нестабільність нуля;

$\delta^*$  - «похибка», що включає в себе нелінійність (систематичну похибку), повторюваність (випадкову похибку) і гістерезис (варіацію).

Нестабільність нуля представлена в абсолютних одиницях або відсотках від найбільшої або номінальної витрати.

Основна похибка може бути представлена у вигляді суми систематичної та випадкової складових. У цьому випадку нормують межу систематичної складової похибки і межу середньоквадратичної похибки. При цьому вони також характеризуються наведеними  $\gamma_c$  і  $\sigma_\gamma$ , або відносними  $\delta_c$  і  $\sigma_\delta$  значеннями.

Чутливість витратомірних пристроїв до вимірювання впливових величин нормують окремо для кожної величини. Вона може характеризуватись додатковою похибкою або функцією впливу. Найчастіше нормується межа додаткової похибки. Функцію впливу нормують, як правило, у високоточних пристроїв, оскільки в цих випадках зміна результату вимірювання при зміні впливу величини може значно перевищувати основну похибку. У сучасних засобах вимірювання функція впливу



визначатиметься експериментально під час продукування та враховується обчислювальним пристроєм при визначенні результату вимірювання.

Динамічні властивості нормують час встановлення показань або постійний час.

Взаємодія витратомірного пристрою з об'єктом 1 вимірювання нормуються дією перетворювача витрати на потік і потрібні довжини прямих ділянок трубопроводу до і після перетворювача витрати в залежності від типу місцевих опорів.

Дія перетворювача витрати на потік нормується показником гідравлічного супротиву  $\Delta_p$  перетворювача при якій небудь характерній витраті, частіше всього найбільшим, або наводяться в залежності гідравлічного супротиву від витрати  $\Delta_p = f(Q)$  або від числа Рейнольдса, що характеризує режим течії вимірюваного середовища,  $\Delta_p = f(Re)$ .

Метрологічна надійність нормує міжповірочний інтервал, що залежить від режиму роботи погрішності виміру. У деяких середовищ виміру нормується стабільність. Вказується збільшення похибки залежно від часу та умов експлуатації.

## **1.8. Повірка засобів вимірювання витрат**

Перевірочні схеми визначають порядок, засоби та методи передачі одиниці виміру від еталона робочим засобам вимірів. Державні перевірочні схеми для засобів вимірювань витрати наведені у державних стандартах;

ГОСТ 8.142–2013. ДСП. Державна повірочна схема для засобів вимірювань масової витрати та об'ємної витрати (маси та обсягу) рідини;

ГОСТ 8.373–2012. ДСП. Державна повірочна схема для засобів вимірювань масової та об'ємної витрати (об'єму та маси) нафти та нафтопродуктів;

ГОСТ 8.374–2013. ДСП. Державна повірочна схема для засобів вимірювань об'ємної та масової витрати (об'єму та маси) води;

ГОСТ Р 8.618-2014. ДСІ. Державна повірочна схема для засобів вимірювань об'ємної та масової витрати газу;

ГОСТ Р 8.637-2013. ДСІ. Державна повірочна схема для засобів вимірювання масової витрати багатофазних потоків.

До складу Державних перевірочних схем для засобів вимірювання витрати рідини входять державні первинні зразки, робочі зразки та робочі засоби вимірювань.

Принциповою відмінністю всіх новостворених перевірочних схем для засобів вимірювань витрати є те, що з них виключені зразки (еталонні засоби вимірювань), запозичені з інших перевірочних схем. При такій побудові перевірочних схем має бути забезпечена простежуваність вимірів витрати до первинних державних стандартів. Ця вимога відповідає загальній тенденції у світовій метрології, викладеній у спільній Декларації МБМВ, МОЗМ, ІЛАК та ІСО «Про метрологічну простежуваність» 9 листопада 2011 р. Для отримання надійних результатів при перевірці та калібруванні необхідно забезпечити простежуваність вимірів до первинного державного зразка.

Для забезпечення простежуваності повинні проводитись міжлабораторні звірення еталонних витратомірних установок. Загальні принципи проведення міжлабораторних звірень викладені в ДСТУ ISO 5725-1...6-2002 «Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювань». Для звірення еталонних витратомірних установок можуть бути використані положення, викладені в міжнародному документі OIML D 7 "Evaluation of flow standards and facilities used for testing water meter".

Крім того, так як все більш широко використовуються високоточні робочі засоби вимірювань витрати, у перевірочних схемах відсутня вимога про співвідношення меж похибок еталона, що допускаються, і повірюваного робочого засобу вимірювань 1:3. Це

співвідношення має встановлюватися у конкретному документі, що регламентує проведення перевірки.

Державні первинні зразки масової та об'ємної витрати рідини ГЕТ 63-2013, витрати води ГЕТ 119-2010 та витрати нафти та нафтопродуктів ГЕТ 120-2010 - це масові статичні витратомірні установки з непрямым методом вимірювання поточної витрати з найвищою. Визначення об'ємної витрати забезпечується шляхом вимірювання густини рідини, що входить до складу еталона плотномером.

Вхідні до складу еталона витратоміри призначені для регулювання та контролю стабільності поточної витрати рідини.

Державна повірочна схема для засобів вимірювання витрати рідини ГОСТ 8.142-2013 складається з первинного еталона двох частин: частина 1 - для засобів вимірювань масової витрати; частина 2 – для засобів вимірювань об'ємної витрати.

До складу кожної частини входять вторинні зразки, робочі зразки 1-го та 2-го розрядів та робочі засоби вимірювань.

Державний первинний еталон витрати рідини ГЕТ 63-2013 забезпечує відтворення масової та об'ємної витрати рідини в межах від 2,5 до 500 т/год (м<sup>3</sup>/ч). Як робоча рідина використовується водопровідна вода при температурі від 15 до 25 °С.

Розширена невизначеність відтворення поточної витрати за рівня довіри 0,95 становить  $3,6 \cdot 10^{-4}$ .

Як робочі засоби вимірювань масової витрати повірочна схема передбачає:

- витратоміри і лічильники масові з діапазонами вимірювань від 2,5 до 4500 т/год та межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,05$  до  $\pm 5,0$  %;
- автоматизовані (автоматичні) системи наливу з діапазонами вимірювань від 2,5 до 500 т/год і межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,15$  до  $0,5$  %;

- витратоміри та лічильники об'ємні з діапазонами вимірювань від 2,5 до 15 000 м/год та відносною похибкою від  $\pm 0,07$  до 5,0 %.

Як робочі засоби об'ємної витрати використовуються: витратоміри та лічильники масові (в режимі вимірювання об'ємної витрати та обсягу) з діапазонами вимірювань від 2,5 до 4 500 м<sup>3</sup>/ч і межами відносних похибок, що допускаються від  $\pm 0,05$  до  $\pm 0,5$  %;

- витратоміри та лічильники об'ємні (в режимі вимірювання об'ємної витрати та обсягу) з діапазонами вимірювань від 2,5 до 4 500 м<sup>3</sup>/ч і межами відносних похибок, що допускаються від  $\pm 0,07$  до  $\pm 5,0$  %;
- автоматичні системи наливу з діапазонами вимірювання від 4,5 до 500 м/год та межами допустимих відносних похибок від  $\pm 0,15$  до  $\pm 0,5$  %;
- залізничні та автоцистерни з межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,4$  до  $\pm 1,0$  %;
- резервуари з межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,2$  до  $\pm 1,0$  %.

Державна повірочна схема для засобів вимірювань витрати води ГОСТ 8.374-2013 включає первинний еталон, вторинний еталон, робочі еталони 1-го і 2-го розрядів і робочі засоби вимірювань.

Державний первинний спеціальний еталон витрати води ГЕТ 119-2010 забезпечує відтворення масової та об'ємної витрати рідини в межах від 0,01 до 50 т/год (м/год). Як робоча рідина використовується водопровідна вода при температурі від 15 до 25 °С. Розширена невизначеність відтворення об'ємної та масової витрати при рівні довіри 0,95 становить 3,8-107. Як робочі засоби вимірювань повірочна схема передбачає:

- витратоміри та лічильники об'ємні та масові з діапазон-ми вимірювань від 0,01 до 450 м/год (т/год) і межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,05$  до  $\pm 5,0$  %;

- автоматичні системи наливу з діапазонами вимірювань від 0,01 до 150 м/год (т/год) та межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,15$  до  $\pm 0,5$  %.

Державна повірочна схема для засобів вимірювань витрати нафти та нафтопродуктів ГОСТ 8.373-2012 включає первинний еталон, вторинні еталони, робочі еталони 1-го, 2-го і 3-го розрядів та робочі засоби вимірювань.

Державний первинний спеціальний еталон витрати нафти та нафтопродуктів ГЕТ 120-2010 забезпечує відтворення витрати в межах від 0,01 до 50 м/год. Як робоче середовище використовують середовище, що імітує нафту та нафтопродукти в робочому діапазоні температури від 15 до 25 °С. Розширена невизначеність відтворення об'ємної та масової витрати при рівні довіри 0,95 становить 470 4 .

Як робочі засоби вимірювань повірочна схема передбачає: об'ємні і масові витратоміри і лічильники з межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,1$  до  $\pm 5,0$  %;

- автоматичні системи наливу на базі об'ємних і масових перетворювачів витрати з межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,15$  до  $\pm 0,5$  %;
- резервуари з межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,2$  до  $\pm 0,25$  %;
- паливо- і маслороздавальні колонки з межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,25$  до  $\pm 1,0$  %;
- танкери з межами відносних похибок, що допускаються, від  $\pm 0,4$  до  $\pm 1,0$  %.

До складу Державної перевіркової схеми для засобів вимірювань об'ємного та масового витрат газу входять державний первинний зразок, робочі зразки 1-го розряду та робочі засоби вимірювань.

Державний первинний еталон об'ємної та масової витрати газу ГЕТ 118-2013 складається з вихідної еталонної установки та 3 еталонних установок з набором

еталонних критичних сопел, що попередньо градуються на вихідній еталонній установці.

У вихідній установці державного первинного еталона масової та об'ємної витрати газу ГЕТ 118-2013, принцип дії якого ілюструється на рис 8.1, витрата газу визначається непрямим методом. Як робоче середовище в еталоні використовується повітря з приміщень при атмосферному тиску. Робота установки відбувається в такий спосіб. З газозбірної посудини 1 вакуум-насосом 4 відкачується повітря, в ньому створюється вакуум, достатній для забезпечення критичного режиму закінчення з градуемого (калібрується) сопла 9. Після цього закривається клапан 3 і відкривається клапан 2. Газозбірну посудину заповнюється повітрям. Обчислюється масова витрата повітря.

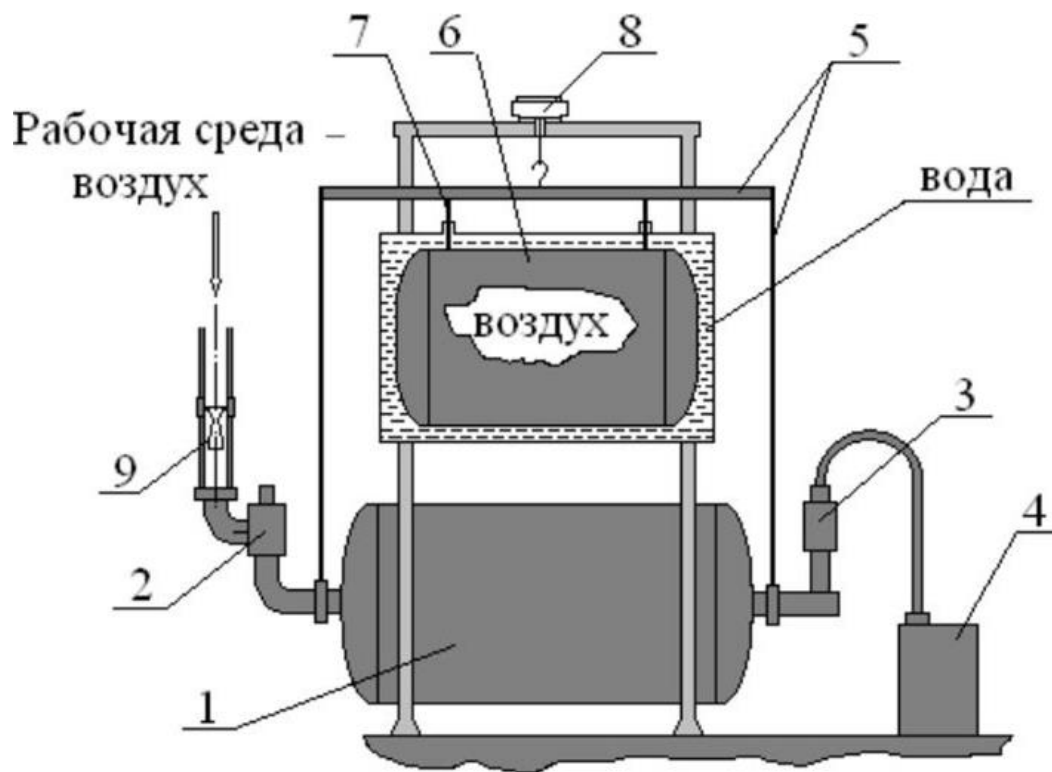


Рис. 1.5. Вихідна еталонна установка державного первинного еталону витрати газу: 1 - газозбірну судину, 2, 3 – клапани, 4 – вакуум-насос, 5 – коромисло, 6 – понтон, 7 – стійка понтона, 8 – ваги, 9 - сопло

З метою підвищення точності в установці забезпечується гідростатична компенсація ваги попередньо вакуумованої газозбірної судини за допомогою понтону б, заповненого повітрям та поміщеного у ванну з водою. Розширена невизначеність відтворення витрати такою установкою 0,084%.

Дві установки з набором еталонних критичних сопел призначені для відтворення витрати при атмосферному тиску забезпечують поточну витрату від  $3 \cdot 10$  до  $1,6 \cdot 10^4$  м/год (від  $3,6 \cdot 10^3$  до  $1,92 \cdot 10^4$  кг/год). Одна установка використовується для відтворення поточної витрати при надмірному тиску до 10 бар у діапазоні від 10 до 2300 м/год (від 12 до 2700 кг/год).

Як робоче середовище в еталоні використовують повітря з приміщення, у якому його експлуатують, за нормальної температури від 15 до 25 °З повагою та відносної вологості від 30 до 80 %. Як робочі засоби вимірювань повірочна схема передбачає об'ємні та масові витратоміри та витратоміри-лічильники з діапазоном вимірювань  $3 \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup>/год (від  $3,6 \cdot 10$  до  $7 \cdot 10$  кг/год) з межами допустимої відносної похибки від 0,3 до 5,0 %. Державна повірочна схема для засобів вимірювання масової витрати багатofазних потоків ГОСТ Р 8.637-2013 включає первинний зразок, робочі зразки 1-го і 2-го розрядів, робочі засоби вимірювань. Державний первинний спеціальний еталон одиниці масової витрати газорідних сумішей ГЕТ 195-2011 складається з наступних вузлів:

- система підготовки двокомпонентної фази;
- система вимірів;
- система подачі повітря;
- пристрій змішування рідкої фази та повітря;
- будову сепарації багатofазної суміші;
- система управління стандартом.

Як робоче середовище використовується газорідина суміш, що складається з ЕХХЗОб ЕКЮ (нафтопродукт), питної води та атмосферного повітря в різних співвідношеннях.

Діапазон значень масової витрати газорідинних сумішей, що відтворюється первинним еталоном, - від 2 до 110 т/год. Розширена невизначеність – 0,46 %.

Діапазон значень масової витрати рідкої суміші у складі газорідинних сумішей, що відтворюється первинним еталоном, - від 2 до 110 т/год. Розширена невизначеність – 0,08 %.

Діапазон значень об'ємної витрати газу, наведеного до стандартних умов, у складі газорідинних сумішей - від 0,1 до 250 м/год. Розширена невизначеність – 0,38 %.

Як робочі засоби вимірювань повірочна схема передбачає:

- багатофазні витратоміри з діапазоном вимірювань масової витрати газорідинних сумішей від 1 до 300 т/год із відносною похибкою до 2,0 % та діапазоном вимірювань об'ємної витрати газу від 0,1 до 2400 м<sup>3</sup>/год із відносною похибкою до 5 %;
- установки вимірювальні сепараційні з діапазоном вимірювань масової витрати газорідинних сумішей від 1 до 150 т/год із відносною похибкою до 2,0 % та діапазоном вимірювань об'ємної витрати газу від 0,1 до 12500 м/год із відносною похибкою до 5 %.

Тож, маючи всі основні дані ми можемо перейти до наступного розділу, в якому будуть розглянуті основні типи витратомірних пристроїв.



## РОЗДІЛ 2.

### ОСНОВНІ ТИПИ ВИТРАТОМІНИХ ПРИЛАДІВ

У практиці вимірювання витрати та кількості використовується більшість найрізноманітніших типів витратомірних пристроїв, що визначається специфічністю вимог, що пред'являються до них у кожному конкретному випадку. Нижче наводиться короткий опис принципи дії пристроїв, які найширше застосовуються.

#### 2.12. Камерні лічильники рідини

Камерними називаються лічильники і витратоміри, рухливі елементи яких починають рухатися (безперервно або періодично) під дією перепаду тиску на перетворювачі витрати і при цьому відмірюють певні об'єми вимірювального середовища. Серед камерних лічильників рідини найбільш широко застосовуються лічильники рідини з овальними шестернями і гвинтові лічильники.

Схематично лічильник рідини з овальними шестернями зображений на (рис.2.1.). Він складається з двох овальних шестерень і корпусу. Шестерні обертаються під дією перепаду тисків на вході і виході лічильника. За кожен оберт шестерні через лічильник проходить чотири вимірювальні обсяги. Оберти однієї з шестерень передається лічильним механізмом.

Похибка лічильника визначається протіканнями через зазори між зубами шестерень і утворюють вимірювальну камеру, а також між стінками камери та торцями шестерні. Для зменшення просічок ці проміжки повинні бути мінімальними. Надання твердих частинок приводить до підвищеного зносу і заклинювання. Тому перед надходженням у лічильник рідини повинна бути ретельно відфільтрована.

На відміну від турбінних перетворювачів вплив в'язкості на результат вимірювання невеликий. Лічильники з овальними шестернями застосовуються

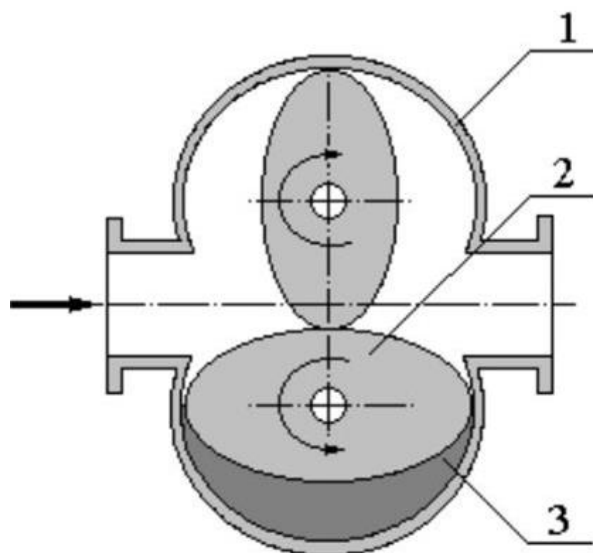


Рис.2.1. Лічильник рідини: 1 – корпус, 2 – шестерня, 3 – вимірювальний об'єм для виміру для зміни кількості рідин, що мають в'язкість від 0,55 до 300 сСт ( $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) і температуру від - 40 до + 120°C. При збільшенні в'язкості зменшуються протікання через зазори, але збільшується опір обертання шестерень. Тому зі збільшенням в'язкості знижуються значення найбільшої витрати, але завдяки скороченню протікань зменшується і найменша витрата. Причому відносний діапазон вимірювання  $Q_{\text{наіб}} : Q_{\text{наім}}$  збільшується.

Випускаються лічильники рідини з овальними шестернями з найбільшою витратою до 40 м<sup>3</sup>/год. При високих витратах (до 420 м<sup>3</sup>/год) застосовуються гвинтові лічильники.

Клас точності гвинтових лічильників та лічильників з овальними шестернями 0,25 та 0,5. Якщо лічильник забезпечений не тільки лічильним механізмом, але й тахометром, що вимірює частоту обертання шестерень, то поряд з об'ємом рідини вимірюватиметься і об'ємна витрата рідини.

Відповідно до ГОСТ 28066-89 для камерних лічильників рідини встановлюються такі характерні витрати:

- номінальна витрата  $Q_{ном}$  - витрата, при якій лічильник працює безперервно необмежений час;
- найменший  $Q_{найм}$  та найбільша витрата  $Q_{найб}$  - граничні значення, при яких витримуються потрібна точність та допустима втрата тиску.

При витратах, що перевищують  $Q_{ном}$  час роботи лічильника обмежується: в діапазоні  $Q_{ном} < Q \leq 1,30 Q_{ном}$  допускається робота не більше 5 годин на добу; в діапазоні  $1,3 Q_{ном} < Q \leq 1,50 Q_{ном}$  - не більше 2 годин на добу.

### 2.13. Мембранні лічильники газу

Мембранні лічильники газу (інші назви: діафрагмові, сильфонні, з вимірювальними міхами) були найпершими промисловими пристроями для вимірювання об'єму газу. Їх конструкція запатентована в Англії в 1844 році, вони і нині є основними приладами обліку споживання природного газу населенням.

Вимірювальні камери (дві або чотири), розділені діафрагмами, періодично заповнюються газом і спустошуються. Рух діафрагм передається через колінчастий вал на клапани, які керують процесами заповнення. Схематично лічильник з двома вимірювальними камерами наведено на (рис.2.2).

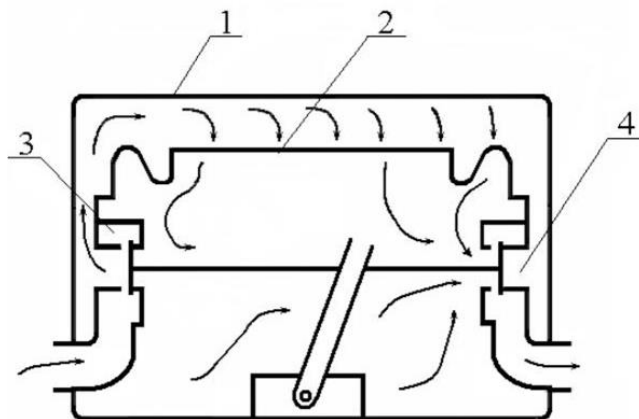


Рис.2.2. Принцип дії мембранного лічильника: 1 – корпус, 2 – мембрана (діафрагма), 3,4 – газорозподільчі камери

Для забезпечення точності вимірювання потрібна повна герметичність і велика швидкість спрацьовування клапанів газорозподільного пристрою.

Особлива перевага діафрагмових лічильників - великий міжперевірочний інтервал (5, 8 або 10 років) і великий діапазон вимірів (для деяких лічильників він досягає 1:160).

Мембранні лічильники поділяються на побутові (до 10 м<sup>3</sup>/год), комерційні (до 40 м<sup>3</sup>/год) та промислові (до 250 м<sup>3</sup>/год). Допустима основна похибка для більшості лічильників 1,5%, при малих витратах (менше 10% від номінального) 3%.

Кількість споживаного природного газу повинна враховуватися в об'ємі, наведеному до стандартних умов (температура 20 °С). Проте більшість побутових мембранних лічильників не мають приладу компенсації температури вимірюваного газу, що призводить до додаткової похибки вимірювання. Наприклад, при температурі вимірювального газу 5 °С виникає негативна похибка приблизно 5%. У сучасних конструкціях лічильників міститься механічний пристрій компенсації температури газу, який вимірюється.

#### 2.14. Ротаційні лічильники газу

Основними елементами ротаційного лічильника (рис. 2.3) є два ротори 2 і корпус 1. Під дією різниці тисків на вході і виході лічильника ротори приходять у обертання. Для синхронізації обертання на валах роторів установлені шестерні. Передача обертання до редуктора та лічильного механізму здійснюється за допомогою магнітної муфти. За один оберт ротора через лічильник проходить чотири вимірювальних обсяги 3.

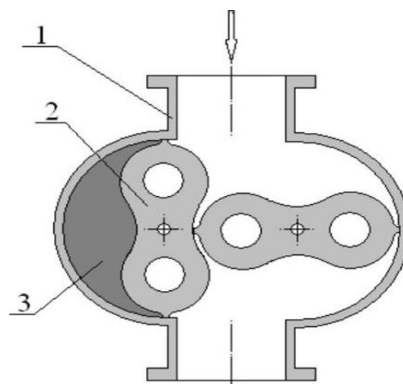


Рис.2.3. Ротаційний лічильник газу: 1 – корпус, 2 – ротор, 3 – вимірювальний обсяг

Похибка вимірювання визначається протічками між роторами і між роторами і корпусом. Зниження протікання забезпечується ретельним виготовленням з малими зазорами між роторами та між роторами та корпусом лічильника, а також малими перепадами тиску на лічильнику при значному моменті опору обертанню роторів, що встановлюються на підшипниках кочення.

Монтаж роторних лічильників призначено проводити у вертикальних трубопроводах. Монтаж у горизонтальних трубопроводах допустимо, якщо газ очищений або використовується фільтр.

Недоліком ротаційних лічильників газу є нерівномірність переміщення газу в межах одного обороту, що призводить до зіткнення пульсацій витрати та тиску в газових трубопроводах.

Ротаційні лічильники застосовуються при витратах газу  $Q_{ном}$  рівних 4 (побутові)... 1000 м<sup>3</sup>/год (іноді до 2500 м<sup>3</sup>/год). Тиск газу до 6 або 100 бар (побутові до 10 або 20 кПа). Діаметр складає 20...200 мм.

Основна похибка ротаційних лічильників газу 1,0... 1,5 % при  $Q = 0,2...1,0 Q_{max}$  та 2...3 % при  $Q = 0,1...0,2 Q_{max}$ .

Як правило, при низьких тисках (до 4 бар) ротаційні лічильники не вимагають при встановленні наявності прямих ділянок трубопроводу. При більш високих тисках зазвичай буває достатньо передбачити прямі ділянки, що дорівнюють 4 діаметрам до та 2 діаметрам після нього.

## **2.15. Турбінні витратоміри та лічильники**

У турбінному перетворювачі витрати вимірюване середовище приводить у обертання турбінку. Частота обертання визначається витратою. У витратомірі вимірюється частота обертання турбінки, у лічильнику загальна кількість обертів.

Лічильники води, в яких вал турбінки пов'язаний через зубчастий редуктор з рахунковим механізмом, давно набули широкого поширення. У таких перетворювачах для приведення в дію лічильного механізму турбінка при обертанні повинна долати значний момент опору. Не дозволяє забезпечити високу точність виміру. У сучасних витратомірах та лічильниках обертання турбінки перетворюється на частоту електричних імпульсів, пропорційну швидкості обертання (рис. 2.4).

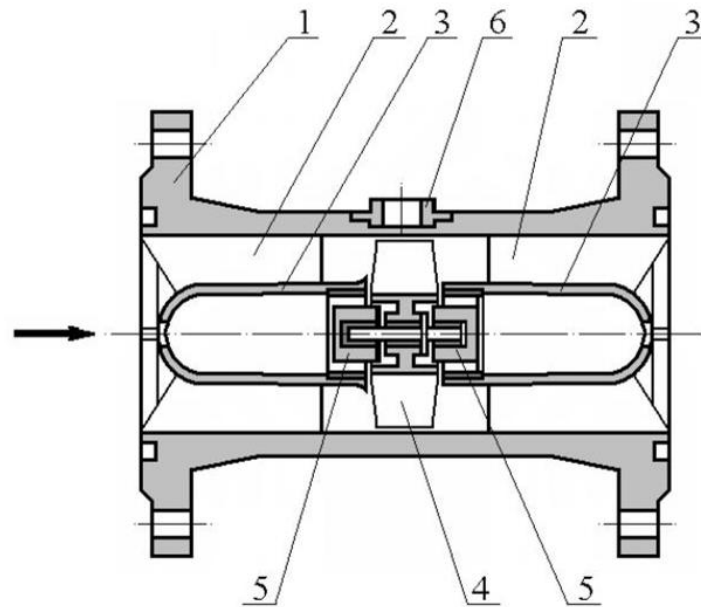


Рис.2.4. Турбінний перетворювач витрати: 1 – корпус; 2 – струменевипрямляч, 3 – обтікач, 4 – турбінка, 5 – підшипник, 6 – фланець для встановлення індукційного перетворювача

Вимірюване середовище проходить через струменевипрямляч, приводить у оберти турбінку (лопаті турбінки виконуються з феромагнітного матеріалу). При проходженні магнітної лопаті в котушці перетворювача наводиться ЕРС (в індукційних перетворювачах) або модулюється за амплітудою височастотний сигнал (в індуктивних перетворювачах). Частота електричних імпульсів пропорційна частоті обертання турбінки.

Необхідність у струменевипрямлячі та обтічнику спричинена тим, що на частоту обертання турбінки великий вплив здійснює деформація потоку, що викликається

місцевим супротивом в трубопроводі. Найбільший вплив мають закрутка потоку і одностороння нерівномірність розподілу осевої швидкості. Закрутка потоку подавляється радіальними лопатями струменевипрямляча. Плавне зменшення площі прохідного перерізу за рахунок відповідної форми обтічника забезпечує вирівнювання осевої швидкості та зниження великомасштабних турбулентних обурень у потоці.

Проте повністю виключити вплив збурень у трубопроводі за рахунок встановлення струменевипрямляча неможливо. Тому при монтажі турбінного перетворювача витрати необхідно передбачати прямі ділянки трубопроводу до та після перетворювача для стабілізації перебігу вимірюваного середовища. При потрібній похибці вимірювання 0,5...1,0 % довжина прямих ділянок трубопроводу зазвичай становить 10 діаметрів до і 5 діаметрів після перетворення. Для скорочення довжини прямих ділянок перед перетворювачем може бути встановлений струменевипрямляч.

В ідеальному випадку, коли на турбіку не діють моменти опору, швидкість обертання і частота електричних імпульсів  $f_0$  пропорційні витраті:

$$f_0 = K_0 Q_0,$$

де  $K_0$  — коефіцієнт пропорційності.

Насправді на турбіку при обертанні діють моменти опору: момент тертя в підшипниках, момент тертя, створюваний вимірюваним середовищем на циліндричній частині турбінки і в зазорі між турбіною і корпусом та момент, створюваний рахунковим пристроєм.

За рахунок цього швидкість обертання турбінки та частота імпульсів  $f$  відрізняються від ідеальних. Ця різниця оцінюється коефіцієнтом ковзання  $S$

$$S = \frac{f_0 - f}{f_0}.$$

Реальна частота електричних імпульсів  $f$  визначається наступним чином:

$$f = (1 - S)f_0 = (1 - S)K_0Q_0 = KQ_0,$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення.

На (рис. 2.5) приведена залежність коефіцієнта перетворення  $K$  від витрати, вираженого в відсотках від максимального значення. Коефіцієнт перетворення

$$K = \frac{f}{Q_0} = \frac{n}{V},$$

де  $f$  – частота електричних імпульсів;

$n$  – кількість електричних імпульсів;

$Q_0$  – об'ємна витрата;

$V$  – об'єм вимірюваного середовища, пройшовши через перетворювач.

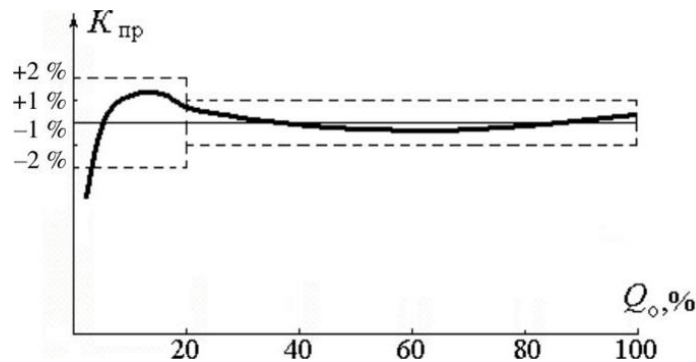


Рис.2.5. Залежність коефіцієнта перетворення від витрати

Для турбінних витратомірів та лічильників, що мають похибку 0,5...1,0 % і більше, номінальна статична характеристика перетворення представляється у вигляді  $K = const$ . У цьому випадку відхилення коефіцієнта перетворення від постійного значення є відносною похибкою вимірювання. У витратомірів та лічильників з похибкою менше 0,5% враховується залежність коефіцієнта перетворення від витрати.

На роботу турбінного перетворюється сильний вплив здійснює в'язкість вимірюваного середовища. Можливі три режими течії у проточній частині турбіни: ламінарний, перехідний та турбулентний (автомодельний). В області ламінарного



режиму (при малих витратах) коефіцієнт перетворення зростає з погіршенням витрати (див. рис. 2.5). В автомобільній області коефіцієнт перетворення постійний (в межах 0,5%). При перехідному режимі на графіку залежності коефіцієнта перетворення від витрати обернеться характерний «горб». При збільшенні в'язкості відбувається зміщення «горба» у бік великих витрат і змінюється значення  $K$  в автомобільній області. Тому при точних вимірах необхідно враховувати функцію впливу в'язкості.

Велике значення для стабільності коефіцієнта перетворення та тривалого терміну служби перетворювача має надійна робота опор турбінки. Поступове зношування підшипників призводить до зміни тертя, моменту опору обертанню та коефіцієнта перетворення. Наявність домішок призводить до виходу підшипників з ладу. Крім того, при тривалій експлуатації та наявності абразивних частинок у потоці може відбуватися зміна геометрії проточної частини перетворювача механічні домішки в потоці вимірювального середовища є допустимими.

Турбінні перетворення є одним з найбільш точних засобів вимірювання витрати і кількості. Набори турбінних витратомірів входять до складу державних перевірочних схем як вторинних еталонів. Середньоквадратичні відхилення результатів перевірки вторинних стандартів не перевищують 0,03...0,05%.

Робочі турбінні перетворювачі витрати забезпечують можливість виміру витрати і кількості рідини з похибкою, що не перевищує 0,5...1 %, газу 1 %. Щоб виконати вимірювання з більш високою точністю, необхідно враховувати нелінійність залежності коефіцієнта перетворення від витрати. Крім того, градування має проводитися у реальному вимірюваному середовищі і за реальних умов експлуатації. При виконанні цих умов похибка вимірювання робочих турбінних лічильників нафти та нафтопродуктів становить 0,1; 0,15 та 0,25%.

Випускаються рідинні турбінні перетворювачі витрати діаметром 4...600 мм, найбільша витрата  $Q_{max}$  складає 0,04...10000 м<sup>3</sup>/год.

Турбінні перетворювачі витрати широко використовуються для вимірювання витрати і кількості газу. Конструкція турбінного лічильника газу (рис.2.6).

Конструкції турбінних перетворювачів витрати газу і рідини близькі. Для приведення результату вимірювання до стандартних умов необхідно додатково вимірювати тиск і температуру газу. Вимір тиску і температури може виникати в трубопроводі або безпосередньо в самому перетворювачі витрати, як показано на (рис.2.6).

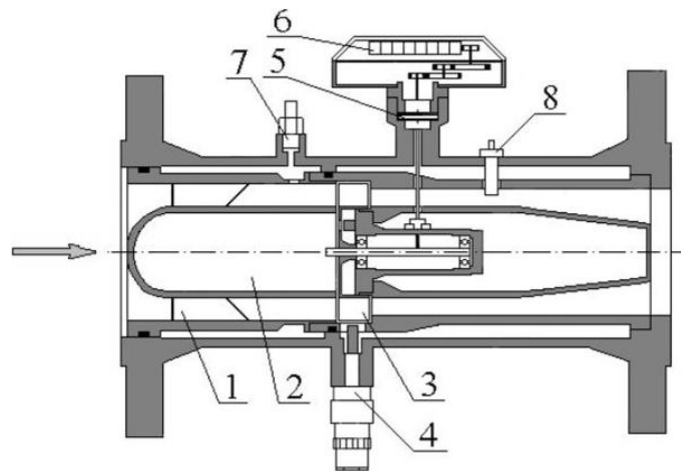


Рис.2.6. Турбінний лічильник газу: 1 – струменевипрямляч, 2 – обтікач, 3 – турбінка, 4 – датчик імпульсів, 5 – магнітна муфта, 6 – лічильний механізм, 7 – відбір тиску, 8 – термоперетворювач супротиву

Крім того, при зміні параметрів газу змінюється залежність коефіцієнта перетворення від витрати. При зміні тиску та температури газу змінюються щільність та в'язкість. Зі зростанням тиску збільшується щільність і зменшується в'язкість. За рахунок цього розширюється діапазон вимірювання, і залежність коефіцієнта перетворення стає більш пологою.

Перевірка лічильників проводиться на повітрі за низького тиску. Щільність і динамічна при однаковому тиску майже вдвічі менше, ніж у повітря. Таким чином, значення коефіцієнта перетворення та похибки при реальній експлуатації відрізнятимуться від результатів, отриманих під час перевірки. Під час роботи на відносно низьких тисках газу (до 6...10 бар) зміна коефіцієнта перетворення не

перевищує кількох десятих відсотка. Застосовуються газові турбінні лічильники діаметром 50...600 мм, вимірювана витрата 5...25 000 м<sup>3</sup>/год. Динамічний діапазон вимірювання для більшості моделей 10:1 або 20:1. Похибка 1 і 1,5% у діапазоні 20...100%  $Q_{max}$ , 2 та 2,5% у діапазоні 10...20%  $Q_{max}$ , 4% у діапазоні 5... 10 %  $Q_{max}$ . У деяких моделей динамічний діапазон вимірювання 30:1, погрішність 1 %, в обмеженому діапазоні.

Для обліку кількості води вже багато років широко застосовуються лічильники, турбінка яких через шестерний редуктор пов'язана з рахунковим механізмом. Такі лічильники виконуються з тангенціальною турбікою (вони називаються крильчастими) по (діаметр умовного проходу  $D_y = 10...50$  мм, номінальна витрата  $Q_{ном} 1,0...15$  м<sup>3</sup>/год) і з аксіальною турбіною за ГОСТ 6019-83 ( $D_y = 50...250$  мм,  $Q_{ном} = 35...500$  м<sup>3</sup>/год). Пристрій лічильника води з аксіальною турбіною показано на (рис.2.7).

Потік рідини вирівнюється в струменевипрямлячі і направляються на лопаті турбіни. Оберти турбіни через черв'ячну пару і передаточний механізм передається стічному пристрою. Лічильний пристрій має покажчик з розподілами, відцифрованими в літрах і «кубічних метрах». Можливість відліку безпосередньо в одиницях об'єму забезпечується регулюванням передавального числа, підбором змінних шестернь та регулюванням швидкості обертання турбіни. Для цього одна з радіальних лопатей струменевипрямляча виконується поворотною відносно напрямку потоку. Поворотом лопаті змінюється кут надходження частини рідини на турбіну таким чином, щоб похибка вимірювання знаходилася в допустимих межах.

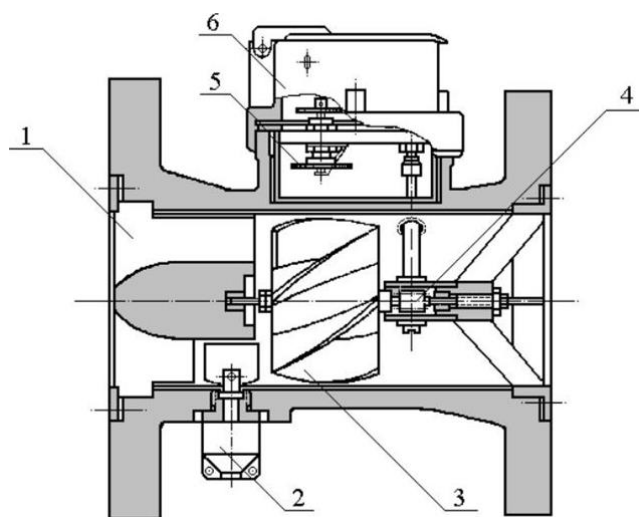


Рис.2.7. Лічильник з аксіальною турбінкою: 1 – струменевипрямляч, 2 – регулювальний пристрій, 3 – турбінка, 4 – черв'ячна пара, 5 – передаточний механізм, 6 – лічильний пристрій

Прилад лічильників з тангенціальною турбінкою показано на (рис.2.8, 2.9 і 2.10). Вони виконуються одноструменевими та багоструменевими.

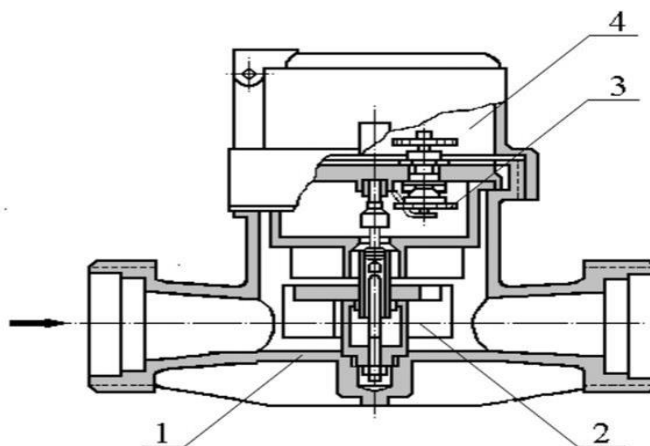


Рис.2.8. Лічильник з тангенціальною турбінкою: 1 – корпус, 2 – турбінка, 3 – передаточний механізм, 4 – лічильний пристрій

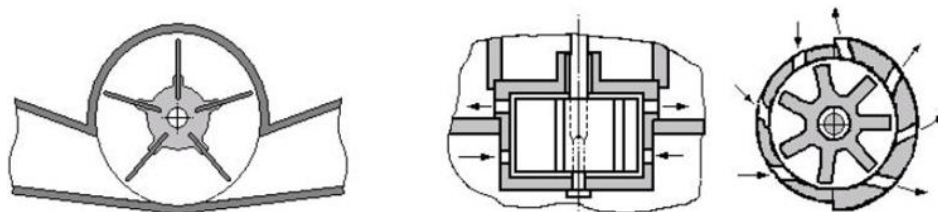


Рис.2.9. та 2.10. Турбінка одноструменевого лічильника та камера багатоструйного лічильника відповідно

Одноструменеві лічильники простіші за конструкцією і мають менші втрати тиску. Але вони менш надійні в роботі внаслідок одностороннього зношування опор. Для лічильників води встановлені наступні характерні витрати:

- найбільша витрата  $Q_{max}$  - найбільша витрата, при якій лічильник може працювати короткочасно, не більше 1 години на добу;
- номінальна витрата  $Q_{ном}$  витрата, при якій лічильник може працювати безперервно (цілодобово), що дорівнює половині максимального;
- перехідна витрата  $Q_n$ , витрата, при якій допустима погрішність лічильника дорівнює 12 %, а при меншій витраті  $\pm 5$  %;
- найменша витрата  $Q_{min}$  - найменша витрата, при якій вона похибка лічильника дорівнює  $\pm 1$  % і нижче якого похибка не нормується;
- поріг чутливості  $Q_c$  - мінімальна витрата, при якій турбінка нерухома.

### **2.16. Кулькові витратоміри**

У кулькових перетворювачах рухомий елемент - кулька безперервно рухається по колу. Цей рух забезпечується або гвинтовим направляючим апаратом, або тангенціальним підведенням вимірюваного середовища. Більш широко застосовуються перетворювачі з гвинтовим напрямним апаратом (рис. 2.11).

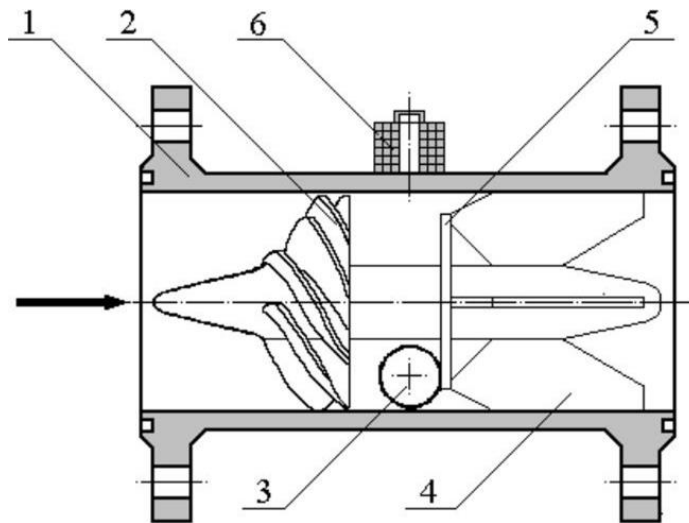


Рис.2.11. Кульковий перетворювач витрати: 1 – корпус, 2 – гвинтовий направляючий апарат, 3 – кулька, 4 – струменевипрямляч, 5 - обмежувальне кільце, 6 – індукційний перетворювач

Закручений потік приводить кульку в круговий рух по внутрішній поверхні корпусу. Кулька має вставку з магнітного матеріалу. Частота обертання кульки перетворюється на електричний частотний сигнал індукційним або індуктивним перетворювачем.

Випускаються кулькові перетворювачі витрати з  $D_y = 32...150$  мм, найбільша вимірювана витрата  $Q_{max} = 4... 400$  м<sup>3</sup>/год.

Основною перевагою кулькових витратомірів у порівнянні з турбінними - можливість вимірювання забруднених рідин з твердими включеннями. Це зумовлено відсутністю підшипників та простотою конструкції. Проте похибка у них більша. Межа основної допустимої наведеної похибки 1,0 ...1,5 %. Діапазон виміру вужчий, ніж у турбінних перетворювачів. Показання сильно залежить від в'язкості рідини. При зношуванні кульки і доріжки кочення вимірюється коефіцієнт перетворення.

## 2.17. Ротаметри

Ротаметри є витратомірами обтікання. У витратомірах даного типу чутливий елемент уловлює динамічний тиск потоку і зміщується під його дією. Крім них, до цього типу перетворювачів витрати відносяться поплавкові та поршневі витратоміри, а також

витратоміри з поворотною лопаттю. Найбільш широко застосовуються серед витратомірів цього типу ротаметри. Поплавкові та поршеневі витратоміри часто називають також ротаметрам з дистанційним вихідним сигналом.

Принципова схема ротаметра наведена на (рис.2.12). Основними елементами ротаметра є конічна трубка, що розширюється догори по ходу потоку, і поплавок, що знаходиться в трубці. Вимірне середовище протікає в трубці знизу догори. Поплавок під дією виміряного середовища під впливом вимірюваного середовища піднімається. Висота підйому поплавка залежить від витрати.

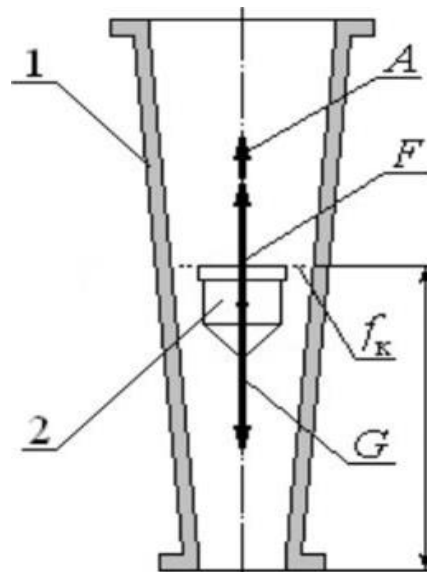


Рис.2.12. Принципова схема ротаметра: 1 – конічна трубка, 2 - поплавець

На поплавок діють знизу догори:

- сила гідродинамічного тиску  $F$ ;
- відштовхуюча сила Архімеда  $A$ ;

Дія цих сил врівноважується вагою поплавця:

$$G - A = F;$$

$$V_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)g = C_{\Pi}f_{\Pi}\rho \frac{v^2}{2},$$

де  $V_n$  - обсяг поплавця;  $\rho_n$  - густина матеріалу поплавця;  $\rho$  - щільність вимірюваного середовища;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $C_n$  - коефіцієнт гідродинамічного опору поплавця;  $f_n$  - площа поперечного перерізу поплавця;  $V$  - швидкість вимірюваного середовища в кільцевому проміжку між поплавком і трубкою.

Швидкість у кільцевому зазорі

$$v = \frac{Q_0}{f_k},$$

де  $Q_0$  - об'ємна витрата;

$f_k$  - площа кільцевого проміжку між поплавком і трубкою.

Звідси

$$Q_0 = \alpha_p f_k \sqrt{\frac{2gV_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)}{f_{\Pi}\rho}},$$

де  $\alpha_p = \sqrt{C_{\Pi}}$  - коефіцієнт витрати ротаметра.

Площа кільцевої щілини в конічній трубці залежить від висоти підйому поплавця  $h$ . При збільшенні витрати поплавки піднімається по трубці, збільшується площа кільцевої щілини до значення, що відповідає положенню рівноваги. Таким чином, висота підйому поплавця визначається витратою:

$$h = f(Q_0).$$

Вага поплавця і архімедова сила  $A$  постійні, тому й перепад тиску на поплавці, тобто різниця тисків вимірюваного середовища до (знизу) і після (згори) залишається



постійною. Це є підставою для використання терміну «витратомір постійного перепаду тиску». При зміні витрати змінюється площа кільцевої щілини, тому в технічній літературі зустрічається інша назва витратомірів постійного перепаду тиску – «витратоміри змінного перерізу».

Щоб виключити перекидання поплавця та тертя між поплавцем та трубкою, потрібно забезпечити стійке положення поплавця по центру трубки. Крім того, необхідно зменшити його коливання у вертикальному напрямку. Спочатку для цього на бічній поверхні поплавця наносилися косі канавки, що викликали обертання поплавця, яке відбилося в назві «ротаметр». Надалі з'ясувалося, що у обертанні немає потреби, і в сучасних ротаметрах канавки на поплавці не роблять, але назва засобу вимірювань «ротаметр» залишилася.

Застосовуються поплавці різної форми, деякі показані на (рис. 2.13).

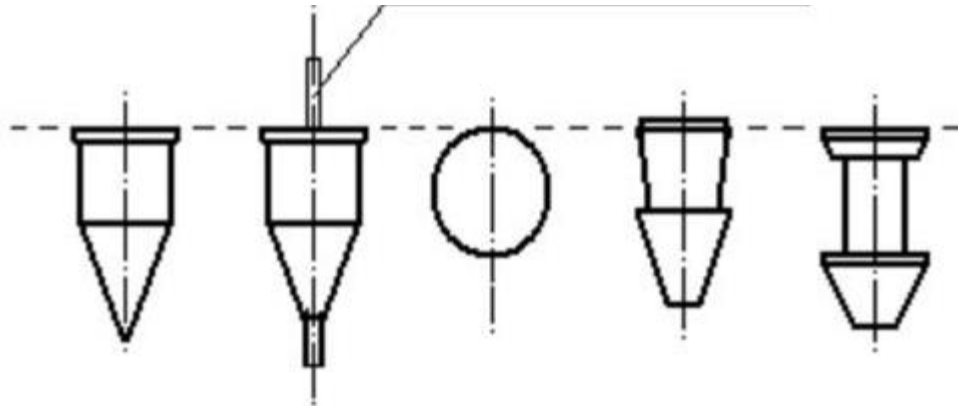


Рис.2.13. Форми поплавців ротаметрів

Конічна трубка ротаметра зазвичай виконується зі скла. На зовнішній поверхні трубки наноситься умовна шкала. Під час градуювання ротаметра визначається положення поплавця щодо шкали в залежності від витрати. Залежність висоти підйому поплавця від витрати близька до лінійної.

Конічна трубка може бути виготовлена з металу. У цьому випадку положення поплавця передається на прилад, що показує магнітним або індукційним методом.

Коефіцієнт витрати ротаметра  $a_p$  залежить від форми поплавця, геометричних розмірів поплавця і трубки, висоти підйому поплавця та властивостей вимірюваного середовища. Тому кожен ротаметр на заводі - виробнику градує на воді (рідкісні ротаметри) або на повітрі (газові ротаметри). При використанні ротаметра для вимірювання витрати інших середовищ необхідно провести градуювання на реальному робочому середовищі або перерахувати градуювальну характеристику. Перерахунок призводить до збільшення похибки вимірювань через наявність значної методичної похибки перерахунку.

Вітчизняні ротаметри випускаються з  $D_y = 4 \dots 40$  мм. Найбільш значення витрати  $Q_{max}$  рідини (по воді)  $0.0025 \dots 2,5$  м<sup>3</sup>/год, газу (по повітрю)  $0.063 \dots 40$  м<sup>3</sup>/год. Найменша витрата  $Q_{min}$  не більше 20% від максимального. Допустима приведена похибка  $\pm 4\%$  ( $D_y = 4$  мм) і  $2,5\%$  ( $D_y \geq 6$  мм).

Перевагами ротаметрів є простота і можливість вимірювання малих витрат, недоліками - низька точність і необхідність градуювання на реальних середовищах. В силу цього застосування ротаметрів обмежене. У той самий час виміри витрати ротаметрами характеризуються досить високої збіжністю. Тому ротаметри, що градує на воді або повітрі, часто використовуються як пристрої індикаторного типу для контролю сталості витрати та якісної характеристики зміни витрат різних середовищ.

Принцип дії поплавкових витратомірів відносно такий самий, як і у ротаметрів. Від них поплавкові витратоміри відрізняється лише конструктивно, відсутня скляна трубка, хід поплавця незначний (близько  $40 \dots 70$  мм), також зовнішня форма інакша. Поплавець цих приладів жорстко пов'язаний зі стрижнем, що має магнітний сердечник або магніт для дистанційної передачі сигналу.

Випускаються рідинні поплавкові витратоміри РЕ з електричною передачею сигналу та РП з пневматичною передачею сигналу РЕ мають умовний діаметр  $D_y = 6 \dots 100$  мм, найбільша витрата  $Q_{max} = 0,025 \dots 16$  м<sup>3</sup>/год, РП мають  $D_y = 15 \dots 100$  мм, найбільша

витрата  $Q_{max} = 0,16 - 16,0 \text{ м}^3/\text{год}$ . Наведена похибка  $\pm 2,5\%$ . Під час монтажу ротаметрів необхідно забезпечити вертикальне положення конусної трубки.

У поршневих витратомірах роль поплавця виконує поршень, що розміщується у втулці з вікнами особливої форми. Вимірюване середовище надходить під поршень, піднімає його і виходить через віконце. Чим більше витрата, тим вище піднімається поршень, відкриваючи більшу частину вихідного вікна у втулці. На поршні перепад тиску залишається постійним.

За кордоном випускаються ротаметри і поплавкові витратоміри класів точності 4; 2,5; 1,6; і 1, градуйовані на воді або повітрі, і класу точності 0,4, градуйовані на реальному вимірюваному середовищі абсолютна похибка ротаметра  $\Delta$  розраховується за формулою

$$\Delta = (0,25Q_{max} + 0,75 Q) \frac{K}{100} ;$$

де  $Q_{max}$  верхня межа вимірювання;  $Q$  - вимірна витрата;  $K$  - клас точності ротаметра.

Найбільша витрата таких поплавкових витратомірів по воді  $150 \text{ м}^3/\text{год}$ , повітря  $3000 \text{ м}^3/\text{год}$ . Відносний діапазон виміру  $Q_{max} : Q_{min} = 10:1$ .

## 2.18. Електромагнітні витратоміри

Перші промислові зразки електромагнітних витратомірів було випущено 1952 р. Принцип дії заснований на законі електромагнітної індукції. У провіднику, що переміщається у магнітному полі, виникає електричний струм. Рідина, що має навіть незначну електропровідність, є провідником електричного струму. Тому при русі електропровідної рідини в магнітному полі виникає електрорушійна сила ЕРС. Значення ЕРС залежить від швидкості руху рідини.

Схематично електромагнітний перетворювач витрати зображено на (рис.2.14). Ділянка трубопроводу 1 з немагнітного матеріалу з нанесеним зсередини електроізоляційним покриттям 2 розміщується між полюсами магніту (індуктора

збудження магнітного поля) 3. У напрямку, перпендикулярному напрямку магнітних силових ліній, розташовуються електроди 4.

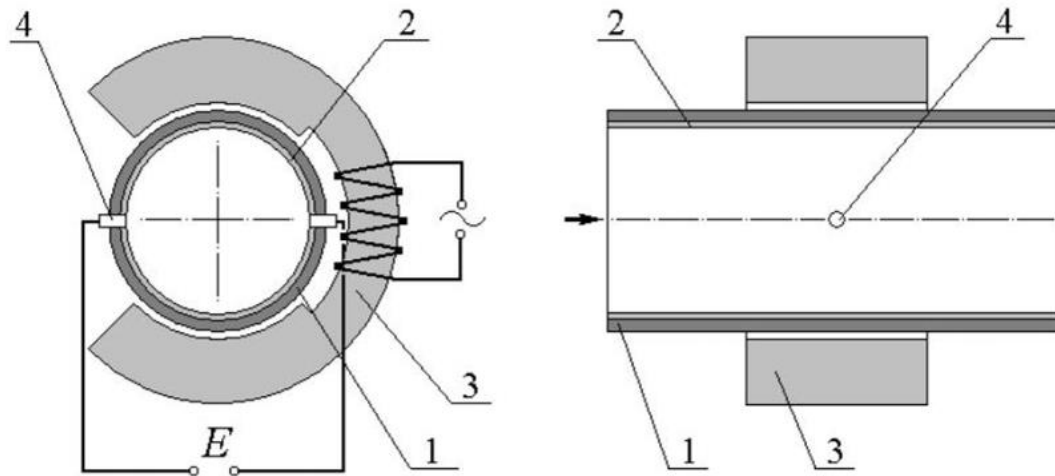


Рис.2.14. Принципова схема електромагнітного перетворювача витрати: 1 – трубопровід, 2 – електроізоляційне покриття, 3 – магніт, 4 - електроди

Під час руху електропровідної рідини виникає різниця потенціалів  $E$ , яка сприймається електродами. Значення різниці потенціалів визначається виразом

$$E = kBD_e v = k \frac{4D_e}{\pi D_{тр}^2} BQ_o,$$

де  $k$  - коефіцієнт пропорційності;  $B$  – індукція магнітного поля;  $D_e$  - відстань між електродами;  $D_{тр}$  – внутрішній діаметр трубопроводу;  $v$  – середня швидкість рідини;  $Q_o$  – об'ємна витрата.

При  $D_e = D_{тр} = D$

$$E = k \frac{4}{\pi D} BQ_o.$$

Різниця потенціалів сприймається та посилюється вимірювальним перетворювачем.

При вимірюванні витрати рідини з електронною провідністю (рідкі метали) можна використовувати постійне магнітне поле. При вимірюванні витрати рідин з іонною

провідністю при постійному магнітному полі відбувається поляризація електродів, що послаблює та спотворює вихідний сигнал. Тож таких рідин, тобто, для більшості рідин, що зустрічаються на практиці, застосовується змінне магнітне поле.

Застосування змінного магнітного поля промислової чи вищої частоти призводить до появи численних перешкод. Тому в більшості електромагнітних витратомірів частота змінного магнітного поля нижче 50 Гц. У цьому застосовуються різні закони зміни магнітного поля.

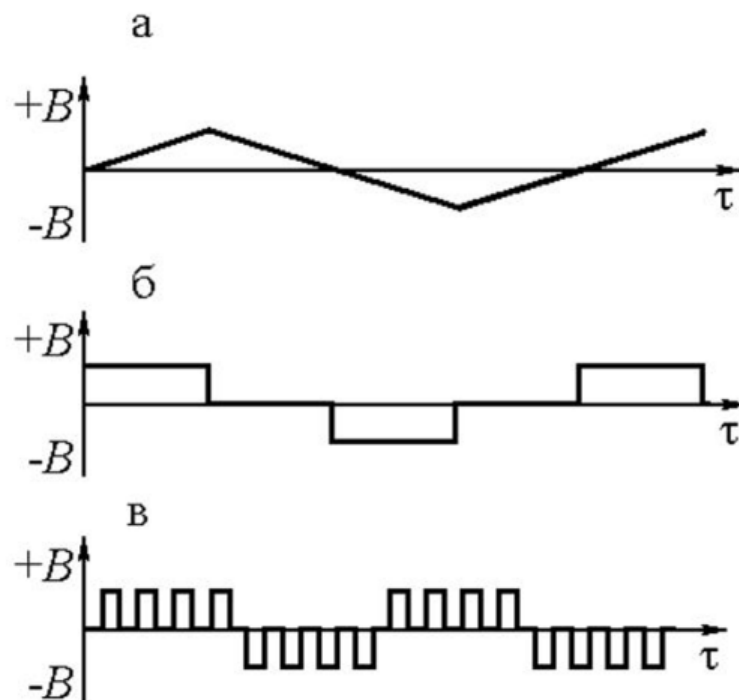


Рис. 2.15. Зміна магнітного поля: а, б - одночастотне, в - двочастотне

На (рис.2.15 (а)) наведено трикутний закон зміни магнітного поля з монотонним підвищенням та зниженням магнітної індукції  $B$ , на (рис. 2.15 (б)) – ступінчастий закон, який досягається шляхом імпульсного живлення електромагніту від джерела постійного струму із зміною полярності. Двочастотний закон зміни магнітної індукції наведено на (рис. 2.15 (в)). Живлення електромагніту здійснюється послідовними імпульсами низької частоти, на які накладені імпульси, що мають частоту вище за промислову. При цьому низькочастотне живлення електромагніту сприяє стабілізації нуля, а

високочастотне захищає від гідродинамічних шумів, викликаних турбулентними пульсаціями витрати та наявністю включень у потоці рідини, що вимірюється.

Електромагнітні витратоміри придатні для рідин, що мають хоча б мінімальну електропровідність - порядку  $10^{-5}$  См/м. Вони непридатні для вимірювань витрати газу та парів, а також рідин-діелектриків, наприклад, як спирти та нафтопродукти.

Електромагнітні витратоміри мають низку переваг у порівнянні з іншими засобами вимірювання витрати. Результати вимірювань не залежать від температури, в'язкості, концентрації та тиску рідини. Результати виміру не залежать від напрямку потоку. Розташування первинного перетворювача у просторі не впливає на результат вимірювання. Відсутність встановлених у трубопроводі механічних елементів, що впливають на потік, забезпечує малі втрати тиску. Установка перетворювача не змінює профіль трубопроводу та характеру потоку.

Як правило, потрібна пряма ділянка до перетворювача, що дорівнює 5 діаметрам, після перетворювача - 2...3 діаметрам. При монтажі перетворювача витрати після регулюючого клапана групи колін у різних площинах і трійника відстань повинна бути не менше 10 Д.

У деяких випадках фірми - виробники допускають скорочення прямих ділянок до 3 Д та 1 Д відповідно.

Електромагнітні витратоміри застосовні для вимірювання витрати як турбулентних, так і ламінарних потоків.

Електромагнітні витратоміри застосовуються й у виміру витрати агресивних, абразивних, в'язких рідин і пульп, розплавлених металів, тобто, середовищ, вимір витрати яких становить суттєві труднощі.

Наявність в потоці сторонніх частинок не істотно впливає на результат вимірювання, тому електромагнітні витратоміри застосовуються для вимірювання витрати з твердими струмопровідними частинками.

Застосовуються електромагнітні витратоміри з діаметрами умовного проходу від 2,5 до 3000 мм, витрата рідини до 3-10 м/год. Основна похибка більшості електромагнітних витратомірів знаходиться в межах  $\pm (0,5... 1,0) \%$ , у найбільш точних витратомірів, які часто використовуються як робочі еталони у складі еталонних витратомірних установок,  $\pm (0,15...0,3) \%$ .

Істотною перевагою електромагнітних витратомірів є можливість досить простої безпроливної (імітаційної) повірки та наявність спеціальних установок для такої повірки.

### **2.19. Ультразвукові витратоміри**

Ультразвукові витратоміри були розроблені і почалося їх промислове застосування в 1963 р. Принцип їх дії заснований на вимірі того чи іншого ефекту, що виникає при проходженні акустичних коливань через потік середовища. Ультразвукові витратоміри включають витратоміри, засновані на переміщенні акустичних коливань рухомим середовищем, і перетворювачі, засновані на ефекті Доплера. Єдиним обмеженням застосування ультразвукових перетворювачів витрати є акустична прозорість вимірюваного середовища.

Як випромінювачі та приймачі акустичних коливань використовуються п'єзоелементи. Під впливом акустичних коливань відбувається стискування-розширення кристала, на його поверхнях утворюються електричні заряди. Робота приймача акустичних коливань заснована на прямому п'єзоэффекті, робота випромінювачів - на зворотному п'єзоэффекті: при додатку до поверхонь кристала змінної напруги п'єзоелемент буде розтягуватися і стискатися, порушуючи у вимірюваному середовищі акустичні коливання. Частота ультразвукових коливань при вимірі витрати чистих рідин зазвичай становить кілька мегагерц.

Найбільшого поширення знайшли витратоміри, засновані на вимірі різниці швидкості проходження акустичних коливань, спрямованих потоком і проти потоку.

При напрямку ультразвукових коливань потоку швидкість звуку складається зі швидкістю потоку, при напрямку проти потоку швидкість потоку віднімається зі швидкості звуку. Такі витратоміри застосовуються при вимірюваннях витрат як рідин, так і газів.

Випромінювачі та приймачі акустичних коливань розташовуються під деяким кутом до осі труби. Перші ультразвукові перетворювачі витрати виконували з двома випромінювачами та двома приймачами акустичних коливань. Між однією парою випромінювач-приймач акустичні коливання прямували у напрямку руху потоку, між іншим - проти напрямку руху потоку.

У сучасних ультразвукових перетворювачах п'єзоелементи поперемінно виконують функції випромінювача та приймача (рис. 2.16). Спочатку акустичні коливання від випромінювача прямують потоком і сприймаються приймачем. Потім приймач стає випромінювачем, акустичні коливання прямують проти потоку і сприймаються приймачем. За принципом дії вимірювальної схеми ультразвукові перетворювачі поділяються так:

- часоімпульсні;
- частотно-імпульсні;
- диференційно-фазові.

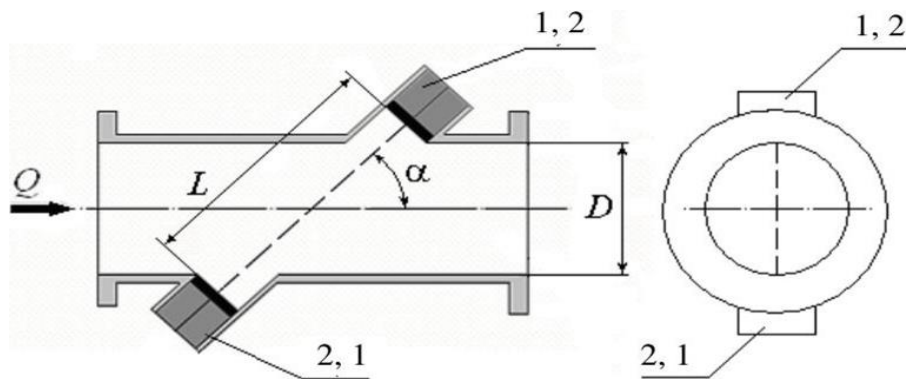


Рис.2.16. Ультразвуковий перетворювач витрати: 1,2 – п'єзоелементи: випромінювач і приймач акустичних коливань



Під час імпульсних перетворювачах відбувається безпосередній вимір часу проходження коротких імпульсів від випромінювача до приймача, спрямованих потоком і проти потоку.

Час проходження імпульсу від випромінювача до приймача при напрямку потоком

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v_L \cos \alpha},$$

проти потоку

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v_L \cos \alpha},$$

де  $\tau$  – довжина акустичного каналу;  $c$  - швидкість звуку у вимірюваному середовищі;  $v_L$  – середня швидкість середовища по довжині акустичного каналу;  $\alpha$  – кут нахилу акустичного каналу.

$$v_L = \frac{L}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2}.$$

У частотно-імпульсних перетворювачах поперемінно подаються серії коротких імпульсів, спрямованих і проти потоку. При надходженні акустичного сигналу приймач посилається наступний імпульс. Виникає послідовність імпульсів, частота яких обернено пропорційна часу проходження імпульсу від випромінювача до приймача.

Різниця частот імпульсів, спрямованих по потоку та проти потоку, визначається швидкістю вимірюваного середовища. Швидкість акустичних коливань, спрямованих по потоку,

$$c + v_L \cos \alpha = \frac{L}{\tau_1},$$

частота імпульсів

$$f_1 = \frac{1}{\tau_1} = \frac{c + v_L \cos \alpha}{L}.$$

Швидкість акустичних коливань, спрямованих проти потоку,

$$c - v_L \cos \alpha = \frac{L}{\tau_2},$$

частота імпульсів

$$f_2 = \frac{1}{\tau_2} = \frac{c - v_L \cos \alpha}{L}.$$

Різниця частот

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2 \cos \alpha}{L} v_L.$$

Швидкість потоку

$$v_L = \frac{L}{2 \cos \alpha} \Delta f.$$

У диференціально-фазових перетворювачах вимірюється різниця фазових зрушень ультразвукових коливань, що виникають на приймачах при проходженні коливань проти потоку і також потоком,

$$\Delta \varphi = 2\pi f \Delta \tau = \frac{2L\omega \cos \alpha}{c^2} v_L,$$

де  $\Delta\varphi$  - різниця фазових зрушень;  $\Delta T$  - різниця часу протікання акустичних коливань, спрямованих проти та по потоку;  $f$  і  $\varphi$  - частота та кругова частота акустичних коливань.

У диференціально-фазових перетворювачах вихідний сигнал залежить від швидкості звуку серед. Для усунення похибки, викликаної зміною швидкості звуку, необхідно запровадити спеціальні схеми корекції. Під час імпульсних та частотно-імпульсних перетвореннях вихідний сигнал практично не залежить від швидкості звуку. Наявність цієї залежності визначається лише часом затримки сигналу в електронно акустичному тракті, не пов'язаного з проходженням сигналу вимірюваної рідини.

Основні схеми розташування п'єзоелементів та поширення акустичних коливань в ультразвукових перетворювачах витрати наведено на (рис. 2.17).

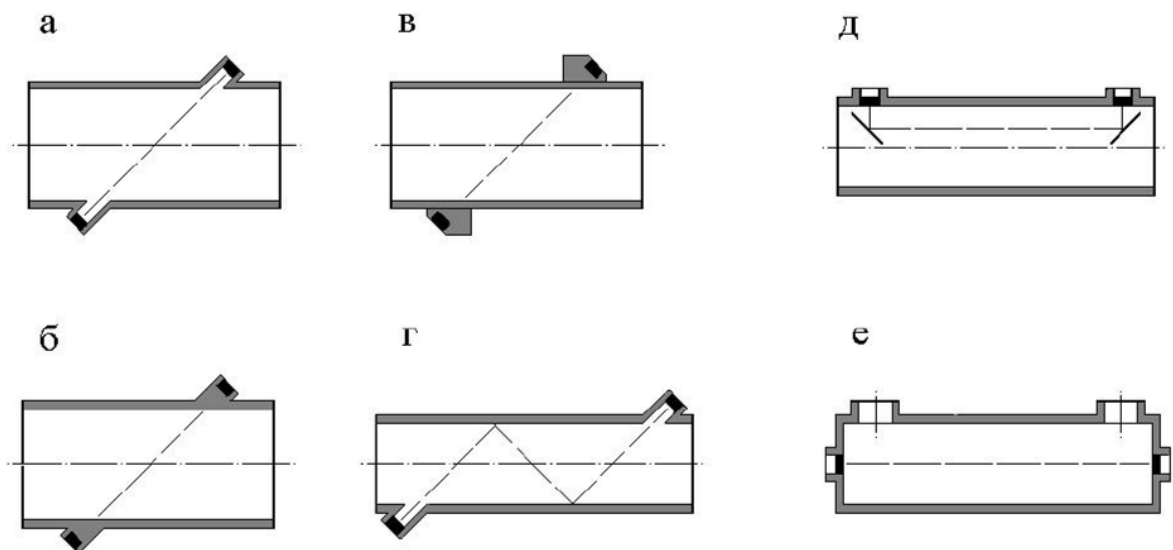


Рис.2.17. Схеми ультразвукових перетворювачів витрати: а - схема із вільними кишнями для розміщення п'єзоелементів, б - схема із заповненням кишень, в - схема із зовнішнім розташуванням п'єзоелементів, г – схема з багаторазовим відображенням акустичних коливань від стінки труби, д - схема з відбивачами акустичних коливань, е - схема з випромінюванням, спрямованим уздовж осі труби, і бічним підведенням рідини

Перетворювачі з вільними кишнями (рис. 2.17(а)), щоб уникнути їх засмічення, застосовують для чистих і неагресивних середовищ. Інший їх недолік - можливість появи виховання та вплив на профіль швидкостей. Для виключення цього застосовують перетворювачі з кишнями, заповненими звукопровідним матеріалом з металу або органічного скла (рис. 2.17 (б)), та перетворювачі із зовнішнім розташуванням п'єзоелементів (рис. 2.17(в)).

Перевага зовнішнього розташування п'єзоелементів - відсутність контакту з вимірюваною речовиною і збереження цілісності трубопроводу при монтажі. Однак при цьому зростає рівень перешкод, викликаних проходженням акустичних коливань по стінці труби, і знижується точність вимірів.

У трубах малого діаметра при напрямі акустичних коливань під кутом до осі труби важко отримати більшу довжину акустичного каналу. Для цього використовуються багаторазове відображення акустичних коливань від стінки труби (рис. 2.17 (г)), спеціальні встановлені всередині труби відбивачі (рис. 2.17 (д)) та бічний підведення рідини в трубу (рис. 2.17 (е)).

В ультразвукових перетворювачах витрати вихідний сигнал пропорційний середній швидкості потоку  $V$ , по довжині акустичного каналу (лінії між випромінювачем та приймачем акустичних коливань). Таким чином, відбувається осереднення швидкості по всьому перерізу трубопроводу з внутрішнім діаметром  $D$  лише по лінії акустичного каналу. Відмінність середніх швидкостей по перерізу і лінії враховується гідродинамічним коефіцієнтом  $B_2$ .

Для сформованої течії розподіл швидкості визначається числом Рейнольдса та шорсткістю трубопроводу.

Розглянемо доплерівські ультразвукові перетворювачі витрати

Принцип дії ультразвукового доплерівського перетворювача витрати заснований на зміні частоти акустичних коливань, відображених від неоднорідностей, присутніх в потоці. Схема перетворювача наведено на (рис.2.18).

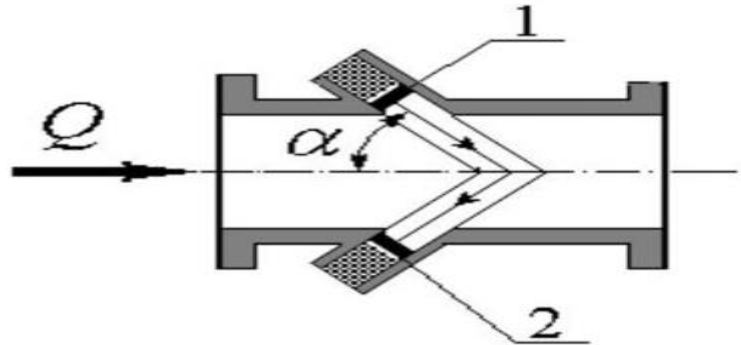


Рис. 2.18. Доплерівський перетворювач витрати: 1 – випромінювач, 2 – приймач

Різниця частот акустичних коливань  $\Delta f$ , що посиляються випромінювачем 1 і приймаються приймачем 2, відповідно до ефекту Доплера пропорційна швидкості потоку:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2f_1 \cos \alpha}{c} v,$$

де  $f_1$  - частота акустичних коливань, що посиляються випромінювачем;  $f_2$  - частота акустичних коливань, що сприймаються приймачем;  $c$  – швидкість звуку;  $V$  – швидкість потоку.

Доплерівські ультразвукові перетворювачі застосовуються переважно для вимірювання витрати забруднених середовищ. Відносна похибка не більше  $\pm (2...3) \%$ . Багато конструкціях випромінювач і приймач розташовуються зовні труби.

## 2.20. Кореляційні витратоміри

Принцип роботи кореляційного витратоміра заснований на вимірі часу проходження неоднорідностей у потоці між двома перерізами трубопроводу. Такими неоднорідностями можуть бути бульбашки газу, тверді частинки, а також будь-які турбулентні збурення, які завжди присутні у турбулентному потоці. Кореляційні

витратоміри за принципом впливу близькі до міткових. У міткових витратомірах в потік вводиться мітка (оптична, теплова, іонізаційна тощо) і фіксується час проходження мітки між двома контрольними перерізами. У кореляційному перетворювачі фіксується час проходження природних неоднорідностей, що є в потоці.

Схематично кореляційний витратомір зображено на (рис. 2.19).

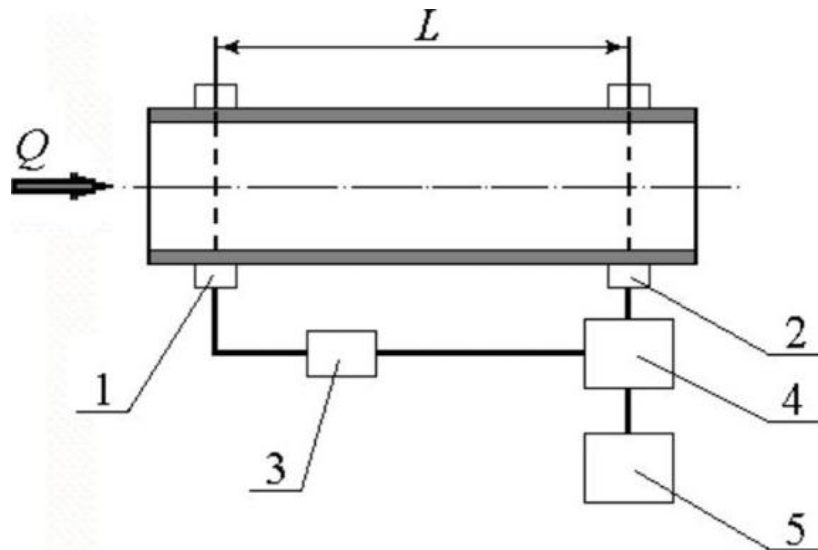


Рис.2.19. Схема кореляційного витратоміра: 1,2 - датчики неоднорідностей, 3 – блок затримки, 4 - обчислювальний пристрій (корелятор), 5 - пристрій індикації

Датчики неоднорідностей виробляють безперервні сигнали, що відповідають характеру зміни випадкових процесів у контрольних перерізах; датчик 1 - сигнал  $x(t)$ ; датчик 2 - сигнал  $y(t)$ . Сигнали датчиків 1 і 2 (рис. 2.19 (а)) мають випадковий характер, але за рахунок невеликої відстані між перерізами вони мають тісний кореляційний зв'язок.

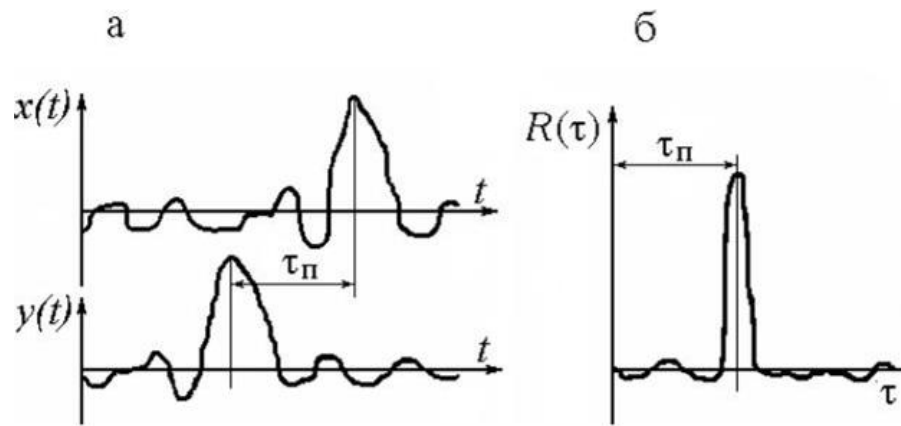


Рис.2.19. Принцип дії кореляційного витратоміра: а - сигнали датчиків 1 і 2, б - вид кореляційної функції

Залежно від виду та способу контролю параметрів потоку існують різні кореляційні перетворювачі витрати: ультразвукові, діелектричні (ємнісні), кондуктометричні, оптичні тощо.

Найбільше застосування знайшли ультразвукові кореляційні перетворювачі з врізними та накладними п'єзоперетворювачами. В обох контрольних перерізах розміщуються випромінювачі акустичних коливань. Коливання спрямовані перпендикулярно до потоку і сприймаються приймачами, що знаходяться на протилежній стороні труби. Наявність у потоці неоднорідностей призводить до поглинання та розсіювання акустичних коливань, що у свою чергу викликає зміну сигналів, що надходять на приймачі.

Кореляційні витратоміри використовуються для вимірювання малов'язких рідин трубопроводах діаметром 50...3600 мм. Найбільша витрата - не більше 35...5,4-10' м /год. Похибка вимірювань витрати та кількості  $\pm(1,5...2,5)$  %. При монтажі кореляційного перетворювача витрати рекомендується передбачати прямі ділянки трубопроводу: не менше 5 діаметрів до місця розташування датчиків та не менше 1 діаметра після. В останні роки кореляційні ультразвукові витратоміри застосовуються з врізними та накладними п'єзоперетворювачами також і для вимірювання витрати газу.

Принцип дії кореляційних витратомірів дозволяє використовувати їх для вимірювання витрати багатофазних багатокомпонентних потоків, наприклад, суміші нафти, води і газу, що надходять зі свердловин або поточних по трубопроводах.

До складу такого витратоміра входять радіоактивний гамма-щільномір, датчики ємнісних та кондуктометричних характеристик потоку, розміщені у двох перерізах трубопроводу. Ємнісний датчик використовується рівня вмісту води приблизно 60...70 %. У кожному вимірювальному перерізі розташовуються електроди, які працюють як ємнісний детектор, що фіксує зміну електричної ємності потоку, що протікає між ними.

Якщо вміст води стає вищим, потік стає переважно водяним. Утворюються безперервні водяні контури між електродами. При цьому використання ємнісних властивостей потоку стає неможливим і використовуються кондуктометричні датчики. До їх складу входять котушки індуктивності та вимірювальні електроди. Котушки створюють електричне поле, яке індукує струм, що проходить через середовище, що вимірюється. Значення струму залежить від електричної провідності.

Малі газові міхури рухаються зі швидкістю рідини. У той самий час основна частина газової фази перебуває у великих міхурах і рухається зі швидкістю, що відрізняється від швидкості рідини. Сигнали, що знімаються з електродів, змінюються у часі відповідно до зміни складу суміші. Рідина, що містить велику кількість газу (вільний газ, газові пробки), і рідина, що містить тільки малі бульбашки газу, генерують різні сигнали: сигнали низької частоти з великою амплітудою та сигнали з більш високою частотою та меншою амплітудою. Обчислювальний пристрій розраховує взаємні кореляційні функції для сигналів різної частоти, визначає швидкості течії великих та малих міхурів, які відповідають швидкостям руху вільного газу та рідини.

Датчик ємнісних властивостей використовується для визначення об'ємного вмісту нафти та води у потоці. Проводиться вимірювання діелектричної проникності суміші. Діелектричні проникності кожного із трьох компонентів нафтовогазової суміші різні, тому сумарна величина діелектричної проникності суміші визначається її складом.



## 2.21. Коріолісові витратоміри

Масові засоби вимірювання витрати можуть бути виконані на основі об'ємних перетворювачів витрати. У цьому випадку до їх складу входять пристрій автоматичного визначення густини та обчислювач.

Із засобів вимірювань, у яких вихідний сигнал первинного перетворювача витрати визначається масовою витратою, у промисловості застосовуються коріолісові та теплові витратоміри.

Принцип дії коріолісових витратомірів заснований на виникненні коріолісового прискорення та коріолісової сили при складному русі тіла. Поява коріолісового прискорення пояснюється взаємним впливом відносного та переносного руху у тому випадку, коли переносний рух не є поступальним.

Коріолісова сила виникає за рахунок інерції руху тіла. Вона враховує вплив обертання рухомої системи відліку відносного руху. Коріолісова сила чисельно дорівнює добутку маси, що рухається, на її коріолісове прискорення і спрямована в бік, протилежний цьому прискоренню. Ефект, що враховується введенням сили Коріоліса, зводиться до того, що в системі відліку, що обертається, тіло буде або відхилятися у напрямку, перпендикулярному його відносної швидкості, або чинити відповідний тиск на зв'язок.

У коріолісовому витратомірі середовище, що вимірюється, тече по вимірювальній трубці (відносний рух). Вимірювальна трубка приводиться у вимушений коливальний рух (переносний рух). Характер деформації трубки при коливальному русі залежить від масової витрати. Особливістю коріолісових витратомірів є те, що їх принцип дії не залежить від властивостей вимірюваного середовища (в'язкості, теплопровідності), тиску та температури.

Коріолісові витратоміри можуть вважатися найсучаснішими із застосовуваних нині засобами вимірювань витрати. Серійний випуск витратомірів з коливальним рухом

вимірювальної трубки (вібраційних) розпочався лише наприкінці 70-х років. XX століття. На (рис. 2.20) ілюструється принцип дії коріолісового витратоміра з I-подібною трубкою. Вимірювальна трубка за допомогою електромагнітної котушки приводиться у вимушений коливальний рух щодо осі  $X$  із частотою власних коливань. За відсутності витрати на трубку впливає лише привід.

За наявності витрати вимірюване середовище за рахунок інерції руху чинить опір переміщенню трубки. При русі трубки вгору середовище, що вимірюється, що втікає в трубку, тисне на трубку вниз. На виході з трубки середовище, що вимірюється, додатково сприяє руху вгору. Під час другого періоду коливань (при русі трубки вниз) трубка закручується у зворотний бік. Кут закручування  $\alpha$  пропорційний чинному моменту та масовій витраті.

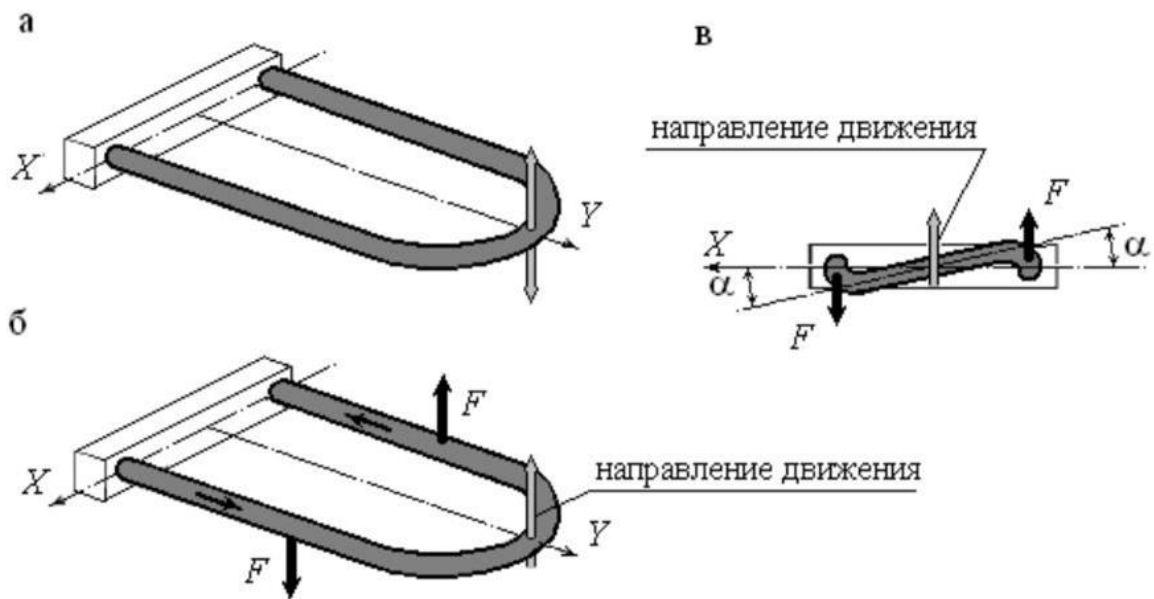


Рис. 2.20. Принцип дії коріолісового витратоміра з U-подібною трубкою: а - витрата дорівнює нулю, б - коріолісові сили  $F$ , в – деформація трубки за наявності витрати

Більш широко застосовуються коріолісові витратоміри з двома розташованими паралельно трубками (прямими, U-подібними, S-подібними), які при коливаннях рухаються у протилежні сторони. Датчики руху сприймають відносний рух цих трубок. За рахунок цього при практично незмінних габаритах і однакою амплітуді коливань

трубок вимірювана витрата і вихідний сигнал датчиків збільшуються вдвічі порівняно з витратомірами, що мають одну трубку.

Коріолісові витратоміри, що випускаються в даний час, охоплюють дуже широкий діапазон витрат. Верхні межі вимірів - від сотень г/год до сотень т/год. Максимальна витрата рідини, яка в даний час може бути виміряна витратоміром фірми Endress & Hauser, в одному корпусі якого розташовані чотири трубки, дорівнює 4100 т/год.

Коріолісові витратоміри забезпечують можливість вимірювання витрати двофазного потоку при вмісті газу в рідині до 10..20% при його рівномірному розподілі за обсягом рідини без значного збільшення похибки. Для вимірювання двофазного потоку застосовують тільки витратоміри з однією вимірювальною трубкою (переважно прямою трубкою). При перебігу двофазного потоку через витратомір із двома трубками відбувається нерівномірний розподіл газової фази по трубках, що призводить до збільшення похибки. Власна частота коливань вимірювальної трубки залежить від її геометрії, характеристик конструкційних матеріалів та маси всієї конструкції (маси трубок та маси рідини всередині трубки). Маса рідини визначається її густиною. Таким чином, частота власних коливань залежить від щільності вимірюваного середовища. Вимірювання частоти коливань трубки забезпечує можливість визначення густини. За рахунок цього коріолісові витратоміри додатково дозволяють вимірювати щільність рідини. Похибки виміру залежно від модифікації - в межах  $\pm(0,5...2,0)$  кг/м .

Коріолісові витратоміри застосовуються також і для вимірювання витрати газу переважно високого тиску. В силу меншої щільності газу і, отже, великих втрат тиску при однаковому з рідиною масовому витраті вимірювання проводяться в початковій області діапазону вимірювання масової витрати. Тому похибка вимірювання при цьому більша, ніж при вимірюванні витрати рідини, і становить  $\pm(0,35... 1,0)\%$ .

## **2.22. Теплові витратоміри**

Принцип дії теплових витратомірів ґрунтується на залежності теплового впливу на потік від витрати. На цьому принципі заснована робота термоанемометрів. Термоанемометри є одним з найбільш поширених засобів вимірювання швидкості різних середовищ і використовуються в занурювальних витратомірах. Повнопрохідні теплові витратоміри застосовуються в основному для вимірювання невеликих витрат рідини та газу. Серед них найчастіше використовуються калориметричні витратоміри та витратоміри прикордонного шару.

Принцип дії калориметричного витратоміра ілюструється на (рис. 2.21). Витратомір складається з нагрівача ЕН та двох термоперетворювачів  $T_1$  та  $T_2$ , розташованих до та після нагрівача по ходу потоку (рис. 2.21(а)). Розподіл температур по обидва боки від нагрівача залежить від масової витрати: за відсутності витрати температурне поле навколо нагрівача симетричне. Різниця температур, що сприймаються термоперетворювачами, дорівнює нулю.

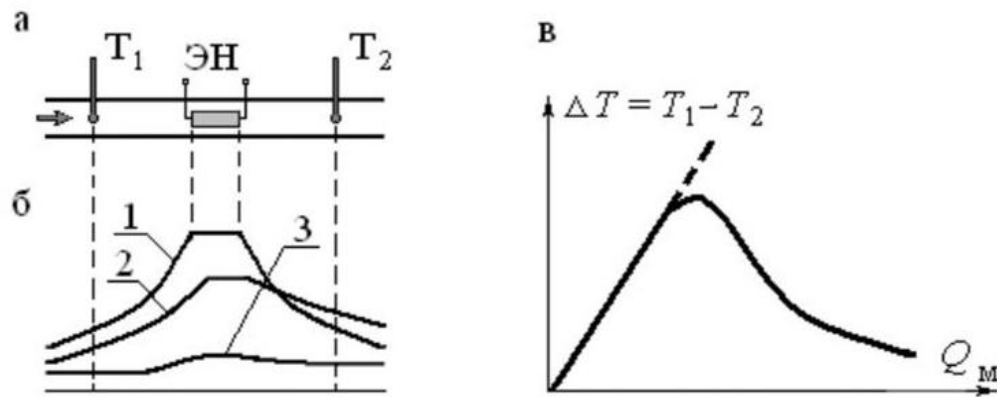


Рис.2.21. Принцип дії калориметричного витратоміра: а - схема витратоміра: ЕН - електронагрівач,  $T_1$  та  $T_2$  – термоперетворювачі, б - розподіл температури за довжиною труби: 1 - витрата дорівнює нулю, 2 - мала витрата, 3 - велика витрата, в - залежність різниці температур від масової витрати

При подальшому збільшенні витрати температура  $T$  стає постійною і рівною температурі речовини, що припливає, а температура  $T_2$  знижується. У цьому діапазоні залежність між потужністю нагрівача та масовою витратою визначається рівнянням

теплового балансу. У промислових витратомірах, як правило, нагрівач та термоперетворювачі розміщуються на зовнішній поверхні труби.

Для вимірювання малих і дуже малих витрат рідини в діапазоні від сотих часток г/год до кількох кг/год використовуються витратоміри, принцип дії яких ґрунтується на рівнянні теплового балансу. На (рис. 2.22) наведено приклад конструктивного виконання такого витратоміра. Шляхом зміни потужності підтримується постійне значення різниці температури рідини до і після нагрівача. Масова витрата середовища визначається за значенням потужності, що підводиться. Різниця температур рідини після та до нагрівача становить приблизно  $1^{\circ}\text{C}$  і контролюється термобатареею, складеною з декількох тисяч термопар.

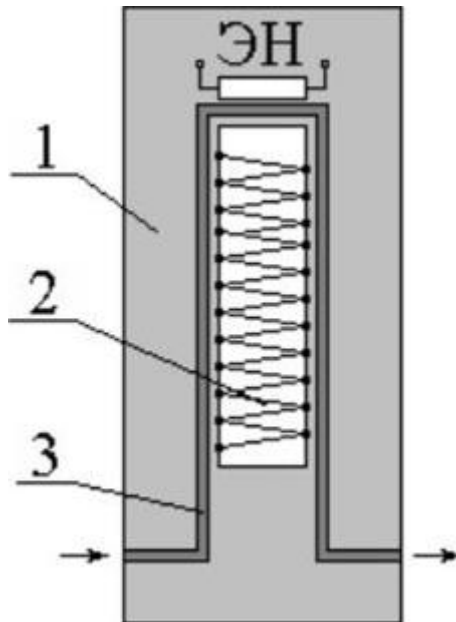


Рис. 2.22. Схема калориметричного витратоміра: 1 – корпус, 2 – термобатареея, ЕН – електронагрівач, 3 - рідина у трубці

У деяких витратомірах, принцип дії яких заснований на рівнянні теплового балансу, як вихідний сигнал використовується відношення потужності нагрівача до різниці температур. У витратомірах з пропорційною залежністю різниці температур від витрат для вимірювання використовуються терморезистори, включені в бруківку, яка забезпечує високу чутливість і точність при вимірюванні малих різниць температур.

Застосування принципу парціального витратоміра дозволяє значно розширити діапазон вимірювання. У парціальному витратомірі вимірюється частка основного потоку, що протікає в трубі обвід, підключеної паралельно до основного трубопроводу. Витрата через обвідну трубку має бути суворо пропорційна витраті через основний трубопровід.

Схема теплового витратоміра з парціальним калориметричним перетворювачем витрати наведено на (рис. 2.23). Парціальний калориметричний перетворювач витрати є капілярною трубкою, на поверхні якої розміщені: електронагрівач ЕН, термоперетворювачі опору  $R_n$  і  $Y_n$ . Термоперетворювачі включені в бруківку вимірювальну схему.

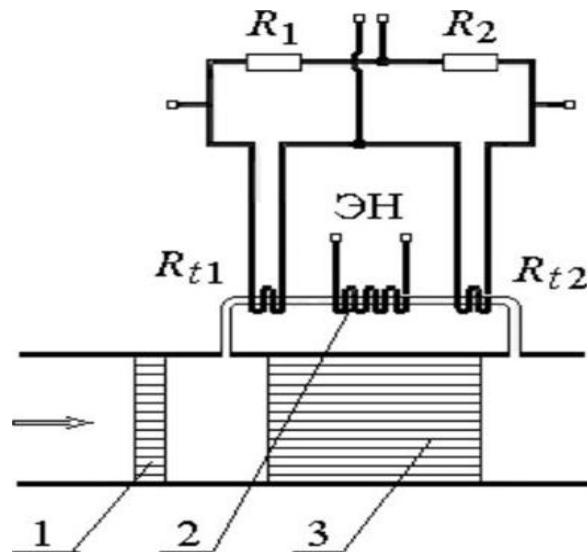


Рис. 2.23. Схема парціального теплового витратоміра: 1 – ламінізатор, 2 – капілярна трубка, 3 – пропорційний дільник потоку, ЕН - електронагрівач

Вимірюване середовище спочатку проходить через ламінізатор - пристрій, який пригнічує турбулентні обурення, що є в потоці. Частина потоку, яка суворо пропорційна до загальної витрати, проходить через капілярну трубку. Пропорційність забезпечується тим, що в дільнику потоку, як і в капілярній трубці, забезпечується ламінарний режим течії. Дільник потоку може виконуватися як набору дисків з отворами. У випадках, коли потрібно забезпечити малі втрати тиску, дільник потоку виконується шляхом установки

в центрі трубопроводу циліндричного тіла. При цьому утворюється вузька щілина між цим тілом та внутрішньою поверхнею труби.

Парціальні теплові витратоміри дозволяють проводити вимірювання значних витрат – до кількох тон на годину. Такі парціальні витратоміри використовуються насамперед для вимірювання витрати газів.

Для більших витрат рідини, ніж ті, вимірювання яких можуть бути забезпечені калориметричними витратомірами, знаходять застосування теплові витратоміри прикордонного шару. Принцип дії таких витратомірів заснований на залежності інтенсивності перенесення теплоти від стінки труби, що нагрівається, до рідини від її швидкості і витрати. Час встановлення показань менше 1...2 с.

У витратомірів вищої точності нормується межа допустимої відносної похибки, значення якого розраховується за формулою, аналогічною формулою 4.3. У цьому випадку значення  $D_n$  становить  $\pm(0,1...0,2)$  % від верхньої межі вимірів,  $S^* = \pm(0,4...0,8)$  %.

Отже, залежно від фазового стану вимірюваного середовища засоби вимірювань витрати поділяються на рідинні та газові. У свою чергу, рідинні засоби діляться на пристрої, призначені для вимірювання висококиплячих, криогенних рідин і рідких металів.

Залежно від того, яка витрата вимірюється - об'ємна або масова, засоби вимірювань поділяються відповідно на об'ємні та масові.

При цьому засоби вимірювань масової витрати можуть мати первинні перетворювачі, вихідний сигнал яких визначається безпосередньо масовою витратою, і первинні перетворювачі, вихідний сигнал яких визначається об'ємною витратою, а значення масової поточної та сумарної витрати розраховуються непрямым методом за результатами вимірювань об'ємної витрати та щільності.

Класифікацію засобів вимірювань за цією ознакою прийнято здійснювати на основі властивостей первинного перетворювача витрати. До об'ємних перетворювачів витрати відносяться камерні, швидкісні, вихрові, струменеві, електромагнітні, ультразвукові, оптичні, до масових - коріолісові та теплові.

Перетворювачі витрати витратомірів змінного та постійного перепаду тиску не можна віднести ні до об'ємних, ні до масових. Вихідний сигнал первинного перетворювача витрати витратомірів змінного перепаду тиску (перепад тиску) пропорційний добутку об'ємного та масового витрат.

Тому в наступному розділі розберемо що таке водневе паливо, як його застосовують в авіації та як відбувається його безпосередній вимір.



## РОЗДІЛ 3.

### ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА ТА СПОСОБИ ВИМІРУ

#### 3.4. Водень, його фізичні та хімічні властивості

Водень — хімічний елемент із порядковим номером 1. Атом водню складається з одного протону та одного електрона. Така будова зумовлює унікальні властивості водню. У періодичній системі водень займає особливе місце: подібно до лужних металів водень має здатність віддавати один електрон, тому він може бути поміщений в головну підгрупу *I* групи; однак, як і галогени, водень здатний приєднувати один електрон, тому можна помістити в головну підгрупу *VII* групи. У сполуках водень завжди одновалентний. Для нього характерні два ступені окислення: +1 і - 1.

Існують три ізотопи водню: протій  ${}^1_1\text{H}$ , дейтерій  ${}^2_1\text{H}$  (*D*) та тритій  ${}^3_1\text{H}$  (*T*). У природному водні міститься 99,985% протію та 0,015% дейтерію. Тритій - нестійкий радіоактивний ізотоп, у природі міститься лише у слідових кількостях. Хімічні властивості ізотопів водню практично однакові, а фізичні властивості є різними.

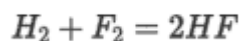
Водень є найпоширенішим елементом у Всесвіті. Він становить близько 90% маси Сонця та багатьох зірок та міжгалактичного газу. На відміну від кисню, водню в земній корі небагато - 1% за масою, що пояснюється легкістю атомів. На Землі водень присутній лише як сполуки — як неорганічних (вода), і органічних (вуглеводні нафти, глюкоза, сахароза, білки). У вигляді простої речовини водень мало зустрічається. У невеликій кількості водень може входити до складу вулканічних газів.

Проста речовина водень є двоатомною молекулою  $\text{H}_2$ , в якій атоми пов'язані між собою ковалентним неполярним зв'язком.

За звичайних умов водень — безбарвний газ, що не має запаху, майже не розчиняється в жодних розчинниках. При сильному стисканні та охолодженні переходить у рідкий стан. Рідкий водень кипить при  $-253^{\circ}\text{C}$  твердий водень утворюється при охолодженні до  $-259^{\circ}\text{C}$ . Газоподібний водень має низку унікальних властивостей. Завдяки маленькому радіусу атоми та молекули водню можуть проникати через гуму, скло та навіть через метали. Деякі метали, такі як платина, паладій, нікель здатні розчиняти водень. Це дозволило створити високоефективні нікель-метал-гідридні акумулятори, що використовуються у телефонах, комп'ютерах, плеєрах.

Водень — найлегший газ, легший за повітря в 14,5 раз. Легкість водню дозволила використовувати його для наповнення дирижаблів та аеростатів, проте через вибухонебезпечні властивості застосування водню для цих цілей припинилося.

За звичайних умов водень через велику міцність молекули малоактивний. При нормальній температурі водень реагує лише з фтором з утворенням фтороводню  $\text{HF}$ :



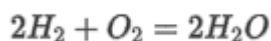
З хлором водень реагує тільки світла, реакція протікає з вибухом. З бромом реакція протікає менш енергійно, з йодом реакція оборотна і не йде до кінця навіть за високих температур:



Чистий водень згорає в кисні з характерним тихим звуком «па», що нагадує легку бавовну. Забруднений повітрям водень вибухає з характерним звуком, що «гавкає». Водень, змішаний з повітрям, у жодному разі не можна підпалювати, тому що це обов'язково призведе до вибуху. Суміш водню з киснем в об'ємному співвідношенні 2:1

називають «гримучим газом», під час її запалювання відбувається сильний вибух. Перед проведенням експериментів з воднем його обов'язково слід перевіряти на чистоту, щоб уникнути вибуху.

Полум'я водню практично безбарвне. При згорянні водню утворюється вода:



Водень горить у кисні з виділенням великої кількості тепла, температура воднево-кисневого полум'я досягає 2800 °С.

У лабораторії водень отримують дією кислот (соляної або розведеної сірчаної) на активні метали, наприклад, на цинк:



Реакцію зазвичай проводять в апараті Кіппа, а для отримання малих кількостей водню - у приладі Кірюшкіна. Водень збирають методом витіснення повітря, тримаючи пробірку денцем вгору, або методом витіснення води:

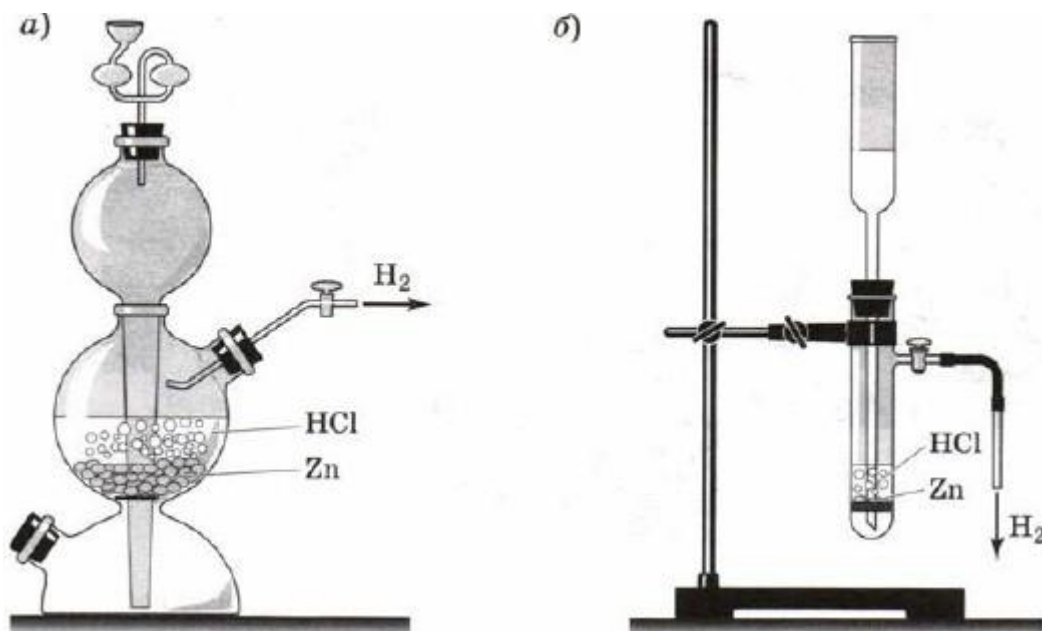


Рис.3.1. Прилади для отримання водню : а) апарат Кіппа, б)прилад Кірюшкіна

Водень утворюється також при дії розчинів лугів на цинк, кремній та алюміній, при реакції лужних та лужноземельних металів та їх гідридів з водою.

Промислові способи одержання водню відрізняються від лабораторних способів його одержання. У промисловості водень одержують за такими реакціями:

- газопарова конверсія вугілля:  $C + H_2O = CO + H_2$ ;
- взаємодія метану з водяною паром:  $CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$ ;
- розкладання метану:  $CH_4 = C + 2H_2$ ;
- електроліз води:  $2H_2O = 2H_2 + O_2$ .

Водень застосовується:

- для одержання аміаку, необхідного для виробництва азотних добрив, пластмас, синтетичних волокон, ліків;
- для одержання хлороводню;

- для отримання метилового спирту та інших органічних речовин із синтез-газу - суміші водню з чадним газом;
- у виробництві маргарину;
- для отримання металів (наприклад, вольфраму) з оксидів;
- рідкий водень використовують як ракетне паливо.

Платина та її родичі (шляхетні метали платинової групи: паладій, родій, іридій, рутеній, осмій) мають сукупність суперечливих властивостей. З одного боку вони не утворюють міцних хімічних зв'язків з реагентами та продуктами хімічних реакцій, ведуть себе по відношенню до них інертно, самі не змінюються у хімічних перетвореннях і водночас прискорюють ці перетворення. А з іншого боку, платина добре адсорбує, добре утримує на своїй поверхні всілякі хімічні речовини, що полегшує зближення речовин, що вступають у хімічну реакцію. Таким чином, платина та члени її підгрупи одночасно і активні та пасивні.

Крім цих властивостей, платина не боїться ні кислот, ні лугів, не розчиняється у електроліті. Має вона і яскраво виражені металеві властивості: легко підводить і відводить електрони від межі електрод-розчин, де протікає реакція.

Ось ця гама властивостей і зумовила унікальний стан платини серед електрокаталізаторів.

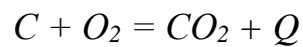
Вчені всього світу працюють над проблемою заміни дорогих каталізаторів на дешевші, але з такими ж властивостями, як у платини.

Перебираючи різні речовини та їх комбінації, електрохіміки випадково виявили чудові властивості карбіду вольфраму. Ця сполука чудово адсорбує водень і не боїться кислотних електролітів (до карбіду вольфраму справлялася тільки платина).

Успішними були й дослідження німецьких учених щодо заміни платини у воднево-кисневому паливному елементі на особливі «скелетні каталізатори». Їх отримують, сплаваючи метал-каталізатор з алюмінієм. Потім алюміній видаляють розчиненням

сплаву в лугу: залишається високопористий, з розвиненою внутрішньою питомою поверхнею порошок каталізатора, що має високу каталітичну активність.

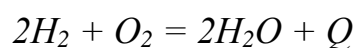
Паливо (дрова в багатті, вугілля, нафта) складається здебільшого з вуглецю. При горінні атоми втрачають електрони; атоми кисню (окислювач) навпаки, набувають їх. Так у процесі окислення атоми вуглецю та кисню з'єднуються у продукти горіння – молекули вуглекислого газу:



Цей процес йде енергійно: атоми і молекули речовин, що беруть участь у горінні, набувають більших швидкостей, а це означає дуже значне підвищення їх температури. Вони починають випромінювати світло, з'являється видиме нами полум'я.

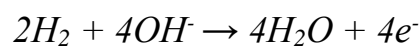
Передача електронів під час горіння відбувається хаотично, невпорядковано. Вся хімічна енергія системи перетворюється на теплову енергію.

Горіння – обмін електронів між атомами. Адже електричний струм - теж рух електронів, тільки впорядкований. Чи не можна так організувати горіння, щоб одразу отримати електричний струм? Чи можливе «холодне» горіння, організоване та впорядковане? Згадаймо досвід Грова. Він спалював у кисні водень. Напишемо хімічну реакцію звичайного горіння водню:



Дві молекули водню, з'єднавшись із молекулою кисню, утворили дві молекули води. Перед нами приклад хімічної реакції, що супроводжується виділенням тепла.

Але чи можна повернути справу так, щоб під час реакції генерувався електричний струм? Чи можна забезпечити перебіг такого процесу?

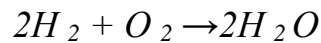


Для цього треба звести разом три фактори: газ (водень), джерело іонів ВІН - (електроліт – розчин гідроксиду у воді) та електрод, який прийме електрони, що

утворюються в реакції. Щоб реакція (2) йшла довго, до межі розділу «метал-електроліт-газ» необхідно безперервно підбивати іони  $\text{OH}^-$  і відводити електрони  $e^-$ . Отже, потрібен другий електрод. Потрібний замкнутий ланцюг. До спеціально підбраного електрода необхідно підводити кисень або повітря, щоб там протікала реакція:



У сумі реакції дають таку реакцію:



Тобто рівняння  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  це реакція горіння водню, однак, у воднево-кисневому паливному елементі, енергія хімічної реакції перетворюється вже в основному не на тепло, яке важко використовувати, а безпосередньо на електричну енергію.

В 1893 німецький фізик і фізикохімік Нернст (1864-1941) вивів теоретично рівняння (воно носить його ім'я), що визначає величину електрорушійної сили ( $E$ ) електрохімічного елемента. За допомогою цієї формули Нернст чисельно розрахував кількість електричної енергії, що утворюється при електрохімічному з'єднанні вугілля з киснем.

Результат був приголомшливим. Нернст показав, що якби вдалося перетворити хімічну енергію вугілля на електрику електрохімічним шляхом (мається на увазі, у паливних елементах), то максимальний теоретичний коефіцієнт корисної дії (ККД) такого процесу становив би 99,75%. Майже 100%, ось воно перше з багатьох переваг паливних елементів.

У них, на відміну від парової та інших теплових машин, енергія начебто практично не втрачається.

Для порівняння, у сучасних паротурбінних блоках теплових та атомних електростанцій ідеальний ККД становить 64%. Реальні цифри виявляються значно

меншими. Для сучасних поршневих парових машин та двигунів внутрішнього згоряння реальний ККД (в середньому) не перевищує 30%, а для більш досконалих пристроїв – парових та газових турбін – 40%.

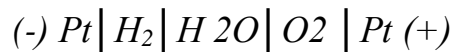
Воднево-кисневий паливний елемент – хімічне джерело струму. Він складається із двох напівелементів. В одному відбувається напівреакція окиснення, в іншому – напівреакція відновлення.

У цій системі ми маємо справу з двома газовими електродами: водневим та кисневим. Газові електроди є напівелементами, що складаються з інертного металу, насиченого даним газом і занурені в електроліт, що містить іони цього газу.

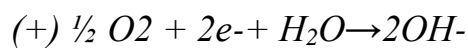
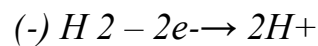
Електрод, на якому відбувається окислювальний процес, називається анодом, у нашому випадку це водневий електрод:  $H^+ | H_2 | Pt (-)$

Електрод, на якому відбувається відновлювальний процес, називається катодом, у нашому випадку це кисневий електрод:  $OH^- | O_2 | Pt (+)$

Киснево-водневий паливний елемент запишемо таким чином:



Напишемо струмоутворюючу реакцію (сумарну реакцію, що протікає в системі):



Скористаємося термодинамічною формулою Нернста для написання формули електрорушійної сили киснево-водневого паливного елемента.



$$E = E_o + (RT/2F) \cdot \ln (pH_2 \cdot pO_2^{1/2}/aH_2O)$$

Де,  $E_o = \varepsilon_{oO} - \varepsilon_{oH} = 1.228 \text{ В}$

$\varepsilon_{oO} = 1,228$  – стандартний потенціал кисню для даного електродного процесу.

$\varepsilon_{oH} = 0 \text{ В}$  – стандартний водневий потенціал.

$aH_2O$  – активність молекул води, тому що вода погано проводить струм, приймаємо рівною 1.

$pH_2$  та  $pO_2$  – концентрації газів.

Тоді формула набуде вигляду:

$$E = 1,228 + (RT/2F) \cdot \ln(pH_2 \cdot pO_2^{1/2})$$

З формули слід, що електрорушійна сила киснево-водневого паливного елемента залежить, за певної температури, від концентрації газів, що у електрохімічній реакції. Так як, підвищити концентрацію газів можна тільки при збільшенні тиску в газах, отже, електрорушійна сила даного паливного елемента залежить від величини тиску водню і кисню. Чим вище тиск газів, що подаються в систему, тим вище значення електрорушійної сили.

Ще один момент, вода – поганий електроліт, вона погано проводить електричний струм, тому електрорушійна сила витрачається на подолання омичного опору всередині електрохімічної системи. У систему необхідно вводити речовини, які проводять електричний струм. Чим вище концентрація молекул води, тим вище буде омичний опір, тим нижче значення ЕРС, отже, надлишки води потрібно видаляти із системи. Погляньмо ще раз на формулу. Значення ЕРС залежить і від температури  $T$  системи, чим вище значення температури, тим вище значення ЕРС. Підіб'ємо підсумок зробленим нами висновкам. Електрорушійна сила воднево-кисневого паливного елемента повинна підвищуватися:

- при використанні вищих температур у системі;

- при підвищенні тиску компонентів, що вводяться в систему: водню (палива) і кисню (окислювача);
- зі збільшенням електропровідності системи.

Перше практичне застосування паливні елементи знайшли не на землі, а в космосі, там його переваги заблищали яскравими фарбами.

У 1963-1964 роках лише у США на дослідження з паливних елементів щороку йшли десятки мільйонів доларів. І такі дослідження велися у всіх розвинених країнах світу. У 1960-х років 20 століття США проблемою паливного елемента займалися близько 60 організацій. Наприклад, у великій американській промисловій фірмі «Пратт – Вітні», що працювала тоді на космос, над створенням електрохімічних генераторів (ЕХГ). Так називають паливні елементи, якщо їх розглядати разом з автоматикою, системами відведення тепла, продуктів хімічних реакцій та іншими речами, неминучими, якщо йдеться про потужні автономні джерела енергії. Над ЕХГ працювали тисячі вчених та інженерів. Для виготовлення паливних елементів ця фірма мала спеціальний завод площею 16 тисяч квадратних метрів. А за участь у проекті Аполлон фірма отримала від НАСА 100 мільйонів доларів.

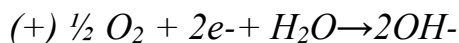
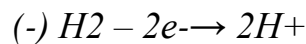
У космос, крім самої батареї паливних елементів, необхідно брати ще й паливо – водень та окислювач – кисень. Чи велика витрата палива та окислювача при роботі паливних елементів? І скільки водню та кисню треба взяти в космос?

Використовуючи об'єднану формулу I та II законів Фарадея, зробимо розрахунок потреби водню та кисню при роботі воднево-кисневого паливного елемента.

$$m = (M/n F) I t$$

де  $m$  - маса речовини, що прореагував на електроді;  $M$  – молярна маса цієї речовини,  $n$  - число електронів, що беруть участь у процесі,  $I$  – сила струму (А),  $t$  - час електролізу (с);  $F$  – постійна фарадея (96500 Кл/моль).

Ще раз запишемо процеси, що протікають на електродах паливного елемента:



$$MH_2 = 2 e$$

$$MO_2 = 32: 2 = 16 e$$

$n = 2$  електронів

При виділенні кількості електрики рівного  $IF$ , за силою струм 1А за 1сек, на аноді прореагує:  $mH_2 = 2:2 = 1$  г водню; на катоді:  $mO_2 = 16:2 = 8$  г кисню

У паливному елементі водень, кожен його атом, перетворюючись на аніон, посилає до зовнішнього ланцюга один електрон. Тому, коли прореагує 1 грам водню, по ланцюгу пройде рівно 6 1023 електронів, що еквівалентно 96 500 ампер-секунд (кулонам) або 26,8 ампер-годин (в 1 годині 3600 секунд, то  $96500: 3600 = 26,8$ ). Така кількість електрики на честь Фарадея названа фарадеєм та позначається символом  $F$ . Це події на водневому електроді (аноді). На кисневому електроді (катоді) - у воднево-кисневому паливному елементі - кожна молекула кисню захоплює 4 електрони. Тому для отримання  $IF$  електрики потрібно витратити  $\frac{1}{4}$  молячи кисню, або, що теж, вісім грамів. Витрата кисню за вагою вийшов у вісім разів більше за витрати водню.

Якщо узагальнити міркування, можна сказати, що з отримання  $IF$  електрики з будь-якої речовини треба витратити в електрохімічному пристрої  $M/n$  грамів цієї речовини, де  $M$  означає молярний вага речовини, а  $n$  - число електронів, що у окисленні чи відновленні одного моля речовини.

Тепер оцінимо витрату палива та окислювача не на певну кількість електрики, а на певну кількість електричної енергії, наприклад, на 1 кіловат-годину.

Кількість виробленої електроенергії – потужність ( $W$ ) – це добуток кількості електрики на напругу джерела.

$$W = I U t \text{ (Ват)}, \text{ де } t - \text{ час (с)};$$

$I$  - Струм (А);

$U$  – напруга джерела (У).

$$1 \text{ кВт-год} = 1\,000 \cdot 3\,600 = 3\,600\,000 \text{ Вт (Джоуль)}$$

Отже, якщо припустити, що напруга джерела дорівнює 1, то на 96 500 Ватт буде витрачено: 1 грам водню і 8 грам кисню.

Для вироблення 1 до Ватт-години електроенергії при напрузі джерела 1 потрібно:

$$\text{Водню } 3600000 \cdot 1 : 96500 = 37,3 \text{ грама.}$$

$$\text{Кисню } 3600000 \cdot 8 : 96500 = 298,4 \text{ грама.}$$

Тому  $W/U=It$ , то  $It = 3\,600\,000/0,7$  (при напрузі джерела 0,7). Підставимо значення  $It$  у формулу для розрахунку потреби водню та кисню.

Для вироблення 1 до Ватт-години електроенергії при напрузі джерела 0,7 потрібно:

$$\text{Водню } m_{H_2} = (2/2)(1/96\,500)(3\,600\,000/0,7) = 53,3 \text{ грама.}$$

$$\text{Кисню } m_{O_2} = (16/2) (1/96500) (3600000/0,7) = 426,4 \text{ грама.}$$

Тому витрата активних речовин залежить ще й від робочої напруги елемента: чим вона вище при тому самому струмі, тим менша питома витрата активних речовин.

Якщо воднево-кисневий паливний елемент працюватиме при напрузі 1 вольт, витрата водню у ньому становитиме 37,3 г/кВтч, а при напрузі 0,7 вольт – 53,3 г/кВтч. Витрата кисню, як ми вже відзначали всього в 8 разів більше за витрати водню.

Отже, провівши оцінки, отримуємо кінцевий результат. На 1 кіловат-годину енергії у воднево-кисневому паливному елементі необхідно витратити близько 0,5 кілограма пального та окислювача. Таким чином, для енергоустановки космічного корабля «Джеміні», розрахованої на вироблення 200 кіловат годин електроенергії, необхідно було захопити в космос приблизно 100 кілограмів водню і кисню. Якщо

врахувати, що розрахункова вага установки оцінювалася фахівцями в 225 кілограмів, то, значить, половина цієї ваги припадала на паливо та окисник.

Газоподібні водень і кисень зайняли б величезний обсяг, тому вони зберігалися в спеціальних відсіках космічного корабля в рідкому стані. А це – нова проблема. Щоб зберегти скраплені гази тривалий час (двотижневий політ) з дуже незначними втратами на випаровування, потрібно було створити спеціальні ємності.

Перед подачею в паливні елементи водень і кисень необхідно було в потрібному дозуванні рідкого стану перевести в газоподібний стан. Для цього гази підігрівалися у спеціальному теплообміннику, де гріючим середовищем був циркулюючий теплоносій. І нагріти потрібно було до строго певної температури – робочої температури паливних елементів. До робочого значення доводилося (за допомогою редукторів) та тиск газів. Інакше через некондиційну температуру та тиск газів паливні елементи могли «впасти в шоківий стан».

Тож, на даний момент найбільш економічно вигідним вважається виробництво водню з викопної сировини і в даний момент найбільш доступним і дешевим процесом є парова конверсія (згідно з прогнозами, вона використовуватиметься в початковій стадії переходу до водневої економіки для спрощення подолання проблеми «курки та яйця», коли з -за відсутності інфраструктури немає попиту на водневі автомобілі, а через відсутність водневих автомобілів не будується інфраструктура. У довгостроковій перспективі, однак, необхідний перехід на відновлювані джерела енергії, оскільки однією з головних цілей впровадження водневої енергетики є зниження викиду парникових газів; джерелами може бути енергія вітру чи сонячна енергія, що дозволяє проводити електроліз води). Знизити рівень викидів вуглецю у виробничих галузях можна за рахунок водню, отриманого з використанням низьковуглецевих технологій, для цього можна застосовувати технології уловлювання та зберігання вуглекислого газу, а також електролізу води, «насамперед за допомогою енергії об'єктів атомної, гідро-, вітряної та сонячної енергетики».

Колірна градація водню залежить від способу його вироблення та вуглецевого сліду, тобто кількості шкідливих викидів:

- "зелений" - вироблений за допомогою енергії з відновлюваних джерел методом електролізу води, вважається найчистішим;
- "блакитний" - виготовлений з природного газу; у цьому випадку вуглекислий газ накопичується у спеціальних сховищах;
- "жовтий" - вироблений за допомогою атомної енергії.
- при виробництві сірого водню шкідливі викиди йдуть в атмосферу.

Собівартість «зеленого» водню близько 10 доларів за кг (що «абсолютно нерентабельне», на думку голови Фонду національної енергетичної безпеки); «блакитний» і «жовтий» водень у кілька разів дешевший за «зелений» — від 2 доларів за кілограм.

Виробництво водню може бути зосереджено на централізованих великих підприємствах, що знижує собівартість виробництва, але потребує додаткових витрат на доставку водню до водневих автозаправних станцій. Іншим варіантом є маломасштабне виробництво безпосередньо на спеціально обладнаних водневих автозаправних станціях.

У грудні 2013 року німецький інститут Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR) завершив будівництво пілотної установки з виробництва водню з води в сонячних концентраторах. Потужність встановлення 100 кВт.

У 2019 р. у Німеччині розпочалося будівництво найбільшої у світі установки з виробництва 1300 тонн водню щорічно методом електролізу.

Водень уже давно визнаний спеціалістами перспективним паливом для транспорту. На основі цього газу можна створити паливні елементи, які за своїм КПД могли б бути більш ефективними, ніж двигуни внутрішнього згорання. Його використання у паливному елементі також усуває проблему токсичних вихлопів,

негативно що впливають на довкілля. Але, на жаль, за нормальних умов у чистого водню досить низька щільність енергії на одиницю об'єму. Здавалося б, рішення очевидно – стиснути газ. Але це легше побажати, ніж зробити.

Проблема використання водню в тому і полягає, що його обсяг, потрібний для поїздки на відстань у кілька сотень кілометрів, практично неможливо стиснути до обсягу стандартного бака – бак виходить куди більше за самого судна.

Розв'язання задачі американські хіміки побачили у використанні класу речовин, відомих як хімічні гідриди, які за певної реакції вивільняють водень. Гідриди у цьому випадку виступають у ролі «хімічних паливних баків», що зберігають необхідний запас водню в стислому стані до активізації двигуна.

У національній лабораторії Лос-Аламосу та Центру водневих досліджень при Міністерстві енергетики США розроблено новий метод переробки хімічних сполук, що містять водень, який обіцяє зробити водне паливо вигідним не тільки з екологічної, але й економічного погляду.

У Національній laboratory у Лос-Аламо і в центрі hydrogen researches at the Energy Відділ США новим методом процесування хімічних речовин містить водень which promises to make hydrogen fuel як favorable not only with ecological, and also with the economic point of view is developed.

Найбільш привабливим прикладом такого «охоронця» водню експерти вважають боран аміаку, містить близько 20% водню від загальної ваги. Крім того, боран аміаку здатний вбирати і вивільняти водень при температурі менше 80 °C.

Недолік цього матеріалу – низька швидкість виходу водню. Крім того, для повторної «зарядки» воднем боран аміаку потребує дуже багато енергії.

Нова технологія, розроблена дослідниками, дозволяє підвищити ефективність рециркуляції цього з'єднання. Виявлено, що одна з форм борану аміаку, названа

поліборазиленом, бути перероблена назад у вихідну речовину з відносною легкістю та при скромних витратах енергії. "Результати дослідження є прорив у живленні зберігання водню і мають величезне практичне значення» заявив доктор Гін Петерсон, керівник хімічного відділу лабораторії Лос-Аламосу.

В даний час вчені щільно співпрацюють із колегами з компанії Dow Chemical, щоб перейти від теоретичних розробок до великомасштабного випуску палива

Зазначимо, що модифікацією борану аміаку не менш успішно займаються інші наукові центри. Так, дослідники з американської Тихоокеанської північно-західної національної лабораторії виявили, що у масштабі наночастинок боран аміаку «випускає» водень у 100 разів швидше, ніж у звичайному своєму стані. Цілком імовірно, що, поєднавши розроблені методики, дослідники незабаром створюють високоефективне водневе паливо - екологічне, економічне та з високим КПД.

### **3.5. Водневе паливо в авіації**

Європейський Союз представив доповідь Hydrogen-powered aviation: Preparing for take-off (Воднева авіація: готуючись до зльоту). Доповідь була підготовлена консультантами з McKinsey на замовлення двох європейських приватно-державних спільних підприємств Clean Sky 2 JU та Fuel Cells & Hydrogen 2 JU. У підготовці доповіді брали участь численні авіаційні, хімічні та нафтогазові компанії.

Декарбонізація є серйозним викликом авіації. Галузь викидає понад 900 млн. тонн вуглекислого газу ( $CO_2$ ) на рік. За умови зростання перевезень на 3-4 відсотки на рік та підвищення ефективності на 2 відсотки на рік до 2050 року викиди збільшаться більш ніж удвічі. Однак перед галуззю стоїть протилежне завдання. Група дій з повітряного транспорту (АТАГ) зобов'язалася скоротити викиди  $CO_2$  на 50 відсотків (порівняно з 2005 р), а Європейський Союз поставив за мету досягти вуглецевої нейтральності до того ж терміну.



Крім  $CO_2$ , літаки впливають на клімат через викиди оксидів азоту ( $NO_x$ ), сажі та водяної пари. «Повний» внесок авіації у глобальне потепління значно вищий, ніж викиди  $CO_2$ .

Нагадаю, частка авіації у глобальному споживанні нафти становить приблизно 8%.

Загальний попередній висновок: водневий потяг потенційно може стати основною частиною авіаційних технологій майбутнього та значною мірою забезпечити декарбонізацію галузі.

У роботі розглядаються три основні типи літаків, що дозволяють значно знизити викиди:

- Працюючі на синтетичних видах палива (Synfuel). Їхня перевага – відсутність істотних змін у технологіях та інфраструктурі (а недолік – дороге паливо).
- Працюючих на водні з водневою турбіною.
- Працюючих на водні з водневим паливним елементом та електричним двигуном.

Також досліджуються гібридні варіанти, наприклад, комбінація турбіни та паливних елементів.

Розрахунки показують, що воднева турбіна дозволяє знизити кліматичну дію на 50-75%, паливні елементи – на 75-90%. Найскромніші кліматичні переваги дає синтетичне паливо: 30-60%.

Для впровадження водневих технологій в авіації необхідно вирішити низку технічних завдань. Йдеться про підвищення загальної ефективності за допомогою легших баків (мета: 12 кВт \* год / кг / гравіметричний показник 35%) та систем паливних елементів (мета: 2 кВт / кг, включаючи охолодження); системі розподілу рідкого водню усередині літака; турбіни, здатні спалювати водень з низьким рівнем викидів  $NO_x$ , і т.д. Експерти галузі прогнозують, що відповідні рішення будуть, ймовірно, створені протягом п'яти-десяти років.

Автори приходять до висновку, що водневі технології найкраще підходять для приміських (до 500 км), регіональних (до 1000 км), близько- та середньомагістральних літаків/перельотів. До речі, 50% авіаційних викидів та 90% рейсів припадає на польоти завдовжки до 3000 кілометрів.

Силові установки на паливних елементах є найбільш енергоефективним, екологічно чистим та економічним варіантом для найкоротших дистанцій – приміських та регіональних літаків. Порівняно зі звичайними літаками експлуатаційні витрати збільшуються лише на 5-10 доларів США (приблизно на 10%) на пасажира. Такі повітряні судна можуть з'явитися над ринком через 8-15 років.

Для близькомагістральних літаків найкраще підходить гібридна силова установка (воднева турбіна та паливний елемент), що збільшує витрати на одного пасажира на 20-30 відсотків.

Наступний сегмент, літак середньої дальності, вимагає значно розширених фюзеляжів для зберігання рідкого водню і витратить на 25% більше енергії, ніж звичайний літак. Витрати пасажира збільшуються на 30-40%.

Далекомагістральні літаки на водні технічно (теоретично) можливі, проте вийдуть дуже дорогими. Найбільш ефективним варіантом є використання синтетичного палива. Принципово інша конструкція літака (комбінація крило-фюзеляж), ймовірно, зможе змінити розклад на користь водню, проте такі літальні апарати можуть з'явитися щонайменше через двадцять років.

Техніко-економічне обґрунтування та економічний аналіз показують, що водень може стати важливою частиною майбутнього технологічного комплексу авіації. Якщо літаки, що працюють на H<sub>2</sub>, будуть використовуватися в сегментах, де вони є найефективнішим засобом декарбонізації, їхня частка в парку повітряних суден до 2050 може досягти 40 відсотків, а після 2050 зрости ще більше.

При припущенні, що решта 60 відсотків літаків працюватимуть на синтетичному та біологічному паливі, завдання декарбонізації, тобто зниження саме вуглецевого сліду авіації буде значною мірою (практично повністю) вирішено. Вказані цілі і ЄС, і АТАГ будуть досягнуті. Однак, як ми бачили вище, кліматичний слід галузі набагато більший, ніж просто викиди  $CO_2$ . Викиди парникових газів у  $CO_2$  еквіваленті можуть бути знижені до 2050 на 45-50%, тобто вплив авіації на клімат залишиться значним. Автори приходять до висновку, що нульова дія авіації на клімат не може бути досягнута за допомогою водневої тяги, але при цьому не існує (навіть у проекті) будь-якої іншої технології, яка могла б гарантувати цю нульову дію.

Автори пропонують «терміново зробити сміливі кроки, щоб розпочати шлях до декарбонізації за допомогою водню». Сьогодні галузі авіабудування необхідно змінити траєкторію, оскільки комерціалізація та сертифікація літаків можуть зайняти понад 10 років, а заміна значної частини парку – ще 10 років. Для переходу на нові технології потрібна галузева дорожня карта щодо зниження впливу на клімат, зростання активності та фінансування в галузі досліджень та інновацій (R&I), а також довгострокові політичні установки.

У середині 1980-х років спеціалісти ОКБ А.Н. Туполева приступили до створення літака майбутнього, намагаючись попередити час – літальну лабораторію, яка працює на криогенному паливі. Базою для такого літака став Ту-154.

Як авіаційне паливо був використаний рідкий водень – майже ідеальне екологічно чисте паливо виділяє при згорянні в основному воду та незначну кількість оксидів азоту. За теплотворною здатністю водень утричі перевершує традиційний авіаційний гас. Але водень вибухонебезпечний, зберігати і транспортувати його можна тільки в рідкому стані за дуже низьких температур, близьких до абсолютного нуля ( $-273$  °C). І це є серйозною проблемою.

«При проектуванні літаючої лабораторії довелося суттєво змінити компонування Ту-154 і вирішити цілу низку найскладніших технічних завдань. У хвостовій частині

фюзеляжу, де розташовувався пасажирський салон, обладнано герметичний відсік, і в ньому встановлено кріогенний бак на 20 куб. метрів рідкого водню з екранно-вакуумною теплоізоляцією, яка тривалий час зберігає в баку температуру нижче мінус 253 градусів за Цельсієм», – розповідає заступник генерального директора ПАТ «Туполєв» з проектування, НДР та ДКР Валерій Солозобов, який брав безпосередню участь у створенні Ту-155.

Літаюча лабораторія була оснащена експериментальним двигуном НК-88 для кріогенного палива, та двома іншими двигунами на звичайному керосині. Була повністю змінена паливна система, кріогенні баки були оснащені апаратурою вимірювання витрати палива і рівня, його температури та тиску. Основний кріогенний бак був ємністю 13 тон, виготовлений з алюмінієвого сплаву та покритий теплоізоляцією з пінополіура. Була встановлена дренажна система, яка випрацьовувала пари метану в нештатних і аварійних ситуаціях.

Цей досвід став непоганою базою для майбутнього створення авіаційної техніки на базі водневого палива. Експерти зійшлися на думці, що, незважаючи на всі нинішні труднощі з використанням рідкого водню як палива, за ним майбутнє: рано чи пізно з'являться нові технології його отримання, а запаси нафти, що вичерпуються, змусять витратити гроші на нову інфраструктуру.

### **3.6. Витрата водню**

На даний момент масовий витратомір Коріоліса та масовий витратомір теплового газу є найнадійнішими та найнадійнішими застосуваннями для вимірювання витрати водню. Обидва вони є витратомірами для прямого вимірювання масового витрати, і жоден з них не має рухомих частин і має великий діапазон.

Вимірювання витрати водню затребуване у різних галузях промисловості, де технологія виробництва передбачає застосування цього газу. Наприклад, на нафтопереробних заводах його використовують для отримання палива із

високосірчистої важкої сировини. Це паливо в майбутньому використовується в авіа паливній області.

Для вимірювання водню за стандартами комерційного обліку відомо три типи приладів, що мають водневе виконання. Це вихрові витратоміри, коріюлісові витратоміри та ротаметри. Вибір тієї чи іншої типу приладу залежить від особливостей технологічних процесів для установки витратоміра на певний тип літака.

В окрему специфікацію нових витратомірів для водневого палива одночасно з реалізацією дослідно-конструкторських робіт з удосконалення метрологічних та експлуатаційних характеристик приладу. В результаті оновлення лічильник-витратомір, крім «водневого виконання» отримав можливість обчислення масової витрати та маси рідин, природної та вологої нафтової газів, насиченої та перегрітої пари, а також об'ємної витрати та обсягу газу, наведеного до стандартних умов із нормованою похибкою.

У вторинному перетворювачі вихрового витратоміра було впроваджено алгоритми обчислення витрати водню, азоту, аргону, ацетилену та аміаку. В даний час дані алгоритми проходять процедуру атестації, внаслідок чого функція обчислювача приладу буде можлива до застосування на комерційному обліку водню.

Зазначимо, що функція приведення вимірювань газів до стандартних умов відповідно до типових методик ГСССД та ГОСТ доступна для вторинного перетворювача витратоміра з розширеною версією електроніки з вбудованим обчислювачем та можливістю підключення зовнішніх датчиків тиску та температури.



Рис.3.2. Зображення водневих витратомірів на

Зокрема, спеціальні фільтри дозволили мінімізувати вплив промислової вібрації при вимірюванні водню на охолодних установках турбогенераторів.

Одна з кращих точностей вимірювання для вихрового витратоміра за кордоном:

- $\pm 0,5\%$  для рідких середовищ та  $\pm 0,7\%$  для газових середовищ;
- вбудована функція обчислювача - обчислення масової витрати та маси рідин, газів, насиченої та перегрітої пари, а також об'ємної витрати та об'єму газів, наведеної до стандартних умов з нормованою похибкою відповідно до типових методик на основі ГСССД;
- можливість підключення зовнішніх датчиків тиску та температури до електронного блоку витратоміра;
- виконання з двопровідною схемою підключення (одночасне живлення та передача сигналу по струмовій петлі);
- струмовий вихід без додаткової похибки;

- збереження класу точності 0,5% при вмісті рідини газових включень до 2,5%; класу точності 1% та 1,5% за наявності газової фази до 4%, збереження працездатності з похибкою  $\pm 6,5\%$  при вмісті газу в рідині до 15%;
- можливість експлуатації при температурі навколишнього середовища до  $-60^{\circ}$  без додаткових засобів обігріву;

Спеціальне «водневе виконання» доступне для приладів компактного виконання з діаметром умовного проходу 10, 15 та 25 мм.

На даний момент масовий витратомір Коріоліса та масовий витратомір теплового газу є найнадійнішими та найнадійнішими застосуваннями для вимірювання витрати водню. Обидва вони є витратомірами для прямого вимірювання масового витрати, і жоден з них не має рухомих частин і має великий діапазон. Поверхня контакту з рідиною виготовлена з 316L сталі, що покращує довговічність і безпеку застосування.

Датчики масового витратоміра Коріоліса та масового витратоміра теплового газу всі зварені. Оскільки інтерфейс датчика тиску та датчик температури не потрібні, щоб коригувати показання витрати до об'ємного потоку в стандартному стані. Таким чином, використовуване з'єднання труби системи зводиться до мінімуму.

Коріолісові масові витратоміри та теплові газові масові витратоміри можуть забезпечити точність до 0,5% завдяки своїй чудовій технології виявлення, яка має величезні переваги в торгових розрахунках та вимірюваннях.

Ці два типи витратомірів мають передову технологію вимірювання, хорошу довгострокову стабільність застосування та надзвичайно низькі витрати на технічне обслуговування на місці. Вони є дуже популярними вимірювальними приладами.

Недоліки масових витратомірів Коріоліса: труби великого діаметру громіздкі, незручні в установці і надзвичайно дорогі в придбанні. Він поступається тепловому газовому масовому витратоміру за характеристиками малого витрати.

Недоліки масових витратомірів теплового газу: великий діапазон витрат не такий хороший, як у вимірювачів масової витрати Коріоліса. Щоб точно виміряти витрату водню, необхідно використовувати калібрування реального потоку для калібрування витратоміра.



Рис.3.3. Зображення водневих витратомірів

Тож, перспективність застосування водню в якості додатку до основного палива двигуна, або в цілому заміна на водневе паливо з метою вдосконалення показників робочого циклу обумовлено: можливістю зниження токсичності газів, що відпрацювали, зниженням шкідливих викидів у відпрацьованих газах, що досягається при підвищенні його паливної економічності, практичною реалізацією запропонованого способу без значних конструктивних змін, і все це має великий потенціал для збереження екології.



## ВИСНОВКИ

Авіаційні датчики витратомірів є важливою складовою будь-якого літального апарату так, як вони застосовуються для вимірювання витрати палива, що споживається авіаційними двигунами, а також для вимірювання витрати повітря в двигунах. Тому витрати палива необхідно вимірювати з великою точністю. Потужність авіаційних двигунів пропорційна витраті палива за одиницю часу. Оскільки для підтримки заданої швидкості польоту відхилення тяги двигуна не повинно перевищувати  $\pm 2\%$ , то похибка вимірювання миттєвої витрати палива має бути не більшою за  $\pm 2\%$ . Приблизно такі ж вимоги пред'являються точності вимірювання сумарного витрати.

Сучасна вимірювальна практика висуває дедалі більші вимоги до точності, надійності, швидкодії, функціональності витратомірів. Слід зазначити, що здебільшого ці вимоги суперечливі, тобто поліпшення одних характеристик, зазвичай, досягається з допомогою недореалізації можливостей поліпшення інших. Так, збільшення функціональних можливостей приладів за рахунок ускладнення знижує їх надійність внаслідок зростання кількості схильних до відмови елементів. Збільшення швидкодії знижує ефективність систем автоматичної компенсації похибок, що повільно змінюються, спричинених впливом зовнішнього середовища, параметрів вимірюваних об'єктів тощо.

Перспективність застосування водню в якості додатку до основного палива двигуна, або в цілому заміна на водневе паливо з метою вдосконалення показників робочого циклу обумовлено: можливістю зниження токсичності газів, що відпрацювали, зниженням шкідливих викидів у відпрацьованих газах, що досягається при підвищенні його паливної економічності, практичною реалізацією запропонованого способу без значних конструктивних змін, і все це має великий потенціал для збереження екології.

Проте на даний час є низка проблем. Наприклад, при використанні паливних елементів у літальному апараті на висоті понад дев'ять кілометрів виникатиме несприятливий вплив води. При спалюванні водню утворюються оксиди азоту. Електрохімічні джерела струму на сьогоднішній день потребують великої кількості обладнання. Проте застосування водневмісних сумішей, зокрема твердооксидних паливних елементів, у складних циклах дозволяє отримати досить високий ККД. З огляду на вибухонебезпечність водню процес дозаправки в повітрі перетворюється на такий собі «смертельний номер», який навряд чи взагалі буде можливий. Далека авіація на водневому паливі, таким чином, є абсолютно нежиттєздатною. Не врятують у разі і звані паливні елементи, використовують водень. Передавати подібні елементи з літака на літак при дозаправці повітря ще менш реально. Незважаючи на посилене і добре помітне лобіювання водню як авіаційного палива, реальних шансів у водневої авіації сьогодні немає жодних.

Отже, провівши досить обширне дослідження у вивченні витратомірів, їх класифікації, роботи та можливості, можна прийти до висновку, що створення водневого витратоміра для авіаційної техніки досить клопітливий та технічно важкий процес, з огляду на вищезазначені властивості водню. Його метрологічне забезпечення має бути точним та надійним. Деякі нинішні компанії вже створили водневі витратоміри, що в цілому придатні для авіаційної сфери, проте їх випробування в даній сфері не застосовувались.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексашин И.Ю., Настольный справочник школьника. 5 – 11 класс: Том 1. – СПб: ИГ «Весь», 2006 – 528 с.
2. Багоцкий В.С., Скундин А.М., Химические источники тока. – М.: «Энергоиздат», 1981.
3. Белик Э.В., Водолазская Т.И. и др., 1000 новых современных рефератов. – М.: ЗАО «БАО-ПРЕСС», 2004 – 896 с.
4. Блум Г., Гутман Ф.: перевод с английского, Электрохимия: Прошедшие 30 и будущие 30 лет. – М.: «Химия», 1982 – 392 с.
5. Большой справочник школьника. 5 – 11 классы. – 3-е изд., стереотип. – М.: «Дрофа», 2000 – 1104 с.
6. Рабинович В.А., Хавин З.Я., Краткий химический справочник. Изд. 2-е, испр. и доп., - Ленинград: «Химия», 1978 – 392 с.
7. Сулейманов Е.В., Справочное пособие по химии. – М.: ЗАО «Центрполиграф», 2004 – 462 с.
8. Чирков Ю.Г., Любимое дитя электрохимии. – М. «Знание», 1985 – 176 с.
9. Авраменко А.Н., Левтерова А.М., Бганцев В.Н., Гладкова Н.Ю., Киреева В.Н. Перспективы применения микродобавок водорода для улучшения экологических показателей дизельного двигателя // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 22. No. 2.
10. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наукова думка, 1984. 143 с.
11. Бортников Л.Н., Русаков М.М. Оценка экономических и экологических показателей поршневых ДВС с искровым зажиганием при их работе на смеси «бензин – водород» // Автомобильная промышленность. 2008. No 2. С. 12–15.

12. Певнев Н.Г., Понамарчук В.В. Анализ свойств водорода с целью возможности его применения в качестве добавки к основному топливу // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. тр. конф. Оренбург, 2015. С. 304–
13. Боднер, В.А. Авиационные приборы / В.А. Боднер. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 456с.
14. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ / П.П. Кремлевский. СПб: Политехника, 2014. 716с.
15. Щепетов, А.Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств / А.Г. Щепетов. М.: Стандартинформ, 2006. 613с.
16. Щепетов, А.Г. Основы проектирования приборов и систем / А.Г. Щепетов. М.: Академия, 2011. 428с.
17. Зиновьев, Д. Основы проектирования в КОМПАС-3D / Д. Зиновьев. ДМК-Пресс, 2017. 329 с.
18. Иванова, Н.Ю. Технология проектирования печатных плат в САПР P-CAD-2006 / Н.Ю. Иванова, А.С. Петров, В.И. Поляков, Е.Б. Романова. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 168 с.
19. ГОСТ 2.105-95 ЕСКД Общие требования к текстовым документам
20. ГОСТ 2.201-80 ЕСКД Обозначение изделий и конструкторских документов
21. ГОСТ 2.109-73 ЕСКД Основные требования к чертежам
22. ГОСТ 2.701-84 ЕСКД Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
23. ГОСТ 2.702-2011 ЕСКД Правила выполнения электрических схем
24. ГОСТ 2.710-81 ЕСКД Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах