

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Є.А. Манідіна

## **СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ НЕБЕЗПЕЧНИХ ТА ШКІДЛИВИХ ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ**

Методичні вказівки  
до практичних занять та лабораторних робіт  
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра  
спеціальності 263 «Цивільна безпека»  
освітньо-професійної програми  
«Охорона праці»

Затверджено  
вченою радою ЗНУ  
Протокол № 8 від \_28.03.2023

Запоріжжя ЗНУ  
2023

УДК 331.45(075)  
М 234

Манідіна Є.А. Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів : методичні вказівки до практичних занять та лабораторних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 263 «Цивільна безпека» освітньо-професійної програми «Охорона праці». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 53 с.

У методичних вказівках «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів» для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра денної і заочної форм здобуття вищої освіти спеціальності 263 «Цивільна безпека» освітньо-професійної програми «Охорона праці» викладено навчально-методичний матеріал щодо опанування практичного курсу та наведено єдині вимоги до виконання та оформлення лабораторних робіт.

Для студентів денної та заочної форм здобуття освіти, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Охорона праці».

Рецензент

*О.Г. Добровольська*, кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства

Відповідальний за випуск

*Ю.О. Белоконь*, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ.....	5
1.1 Обчислення похибки вимірювань .....	5
1.2 Розрахунок витрати повітря для повітряної сепарації промислового пилу.....	9
1.3 Визначення медіанного діаметра частинок пилу.....	13
1.4 Розрахунок розміру частинок пилу, що будуть вловлені струменевим сепаратором (імпактором).....	18
1.5 Визначення витрати середовища за величиною перепаду тиску на стандартному звужуючому пристрої.....	21
1.6 Вибір і розрахунок органа, що регулює.....	27
РОЗДІЛ 2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ.....	31
2.1 Лабораторна робота 1. Оцінка похибок вимірювань динамічного тиску та швидкості руху .....	31
2.2 Лабораторна робота 2. Визначення вмісту сульфур(IV) оксиду в газах методом йодометрії.....	40
2.3 Лабораторна робота 3. Визначення дисперсного складу пилу ситовим методом.....	44
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА .....	48
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....	49
ДОДАТОК. Довідкові дані.....	50

## ВСТУП

Право всіх громадян країни на належні, безпечні і здорові умови праці гарантує Конституція України. Забезпечення цієї вимоги основного закону нашої країни на підприємствах, в установах та організаціях покладається на роботодавців. Практичній роботі підприємств у напрямку охорони праці повинна сприяти відповідна підготовка майбутніх фахівців з охорони праці, які безпосередньо беруть участь у цьому процесі. Однією з дисциплін, що формує відповідні здатності і уміння є дисципліна «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів».

Дисципліна «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів» належить до обов'язкових компонентів циклу професійної підготовки освітньої програми.

Метою вивчення навчальної дисципліни «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів» є засвоєння знань з засобів автоматизації для запобігання виникненню нещасних випадків та аварійних ситуацій на виробництві та вироблення умінь щодо подальшого їх використання в професійній діяльності.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів» є:

- засвоїти теоретичні знання з принципу дії та конструктивних особливостей приладів, які використовують в системах підтримки безпечного ведення виробничого процесу;
- набути навички проводити обстеження джерел небезпеки і пошкодження компонентів навколишнього середовища;
- виробити навички виявляти і оцінювати вплив негативних чинників на стан оточуючого середовища;
- виробити навички застосовувати відповідні заходи щодо усунення виявлених порушень ведення виробничих процесів та в роботі обладнання.

Навчальна дисципліна «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів» продовжує фахову підготовку здобувача і базується на знаннях, отриманих при вивченні дисциплін таких, як: «Електробезпека», «Радіаційна безпека», «Захист у надзвичайних ситуаціях», «Пожежна безпека». Знання з «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів» необхідні для подальшого вивчення дисциплін «Виробнича санітарія», «Проектування з вентиляції та кондиціонування», «Проектування безпечних промислових споруд та природоохоронного обладнання».

Виконання здобувачами вищої освіти практичних занять, лабораторних робіт є важливою складовою частиною засвоєння навчального матеріалу з дисципліни. Методичні вказівки дозволяють здобувачам за наведеними методиками розрахунків та теоретичними відомостями виконати завдання до практичних занять, підготуватися до виконання лабораторних робіт, що передбачені робочою програмою навчальної дисципліни «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів».

## РОЗДІЛ 1 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

### 1.1 Обчислення похибки вимірювань

При проведенні пилогазових вимірювань спостерігається виникнення похибок, які можуть чинити суттєвий вплив на результати дослідів. Тому при проведенні досліджень виникає завдання встановити причину та величину похибок, та, як наслідок, похибки вимірювань.

Похибки при проведенні вимірювань класифікують наступним чином [1,2]:

1) **Абсолютні – відносні.**

**Істинним значенням**  $x$  фізичної величини  $X$  називають таке її значення, яке ідеально відображає певну властивість об'єкта та не залежить від способу вимірювання. Це абсолютно точне значення фізичної величини.

**Дійсним (умовно істинним) значенням**  $\bar{x}$  фізичної величини  $X$  називають знайдене експериментальним шляхом значення, настільки близьке до істинного, що заданих умов різницею між ними можна знехтувати.

**Похибкою фізичної величини**  $X$  називають різницю між її істинним  $x$  та дійсним  $\bar{x}$  значеннями.

**Абсолютна похибка фізичної величини**  $\Delta x$  – це різниця за модулем між її істинним та дійсним значеннями:

$$\Delta x = |x - \bar{x}|. \quad (1.1)$$

**Абсолютна похибка  $\Delta x$  фізичної величини** показує, наскільки істинне значення  $x$  фізичної величини відрізняється від дійсного  $\bar{x}$ . Розмірність абсолютної похибки відповідає розмірності фізичної величини.

Користуючись значенням модуля числа вираз (1.1) можна переписати наступним чином [1,2]:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (1.2)$$

Визначення абсолютної похибки  $\Delta x$  за формулою (1.1) точне, але на практиці не може бути застосоване, бо в ньому є величина, яку виміряти неможливо – істинне значення  $x$  фізичної величини [1,2]. Тому під час розрахунку абсолютної похибки  $\Delta x_i$   $i$ -того повторного вимірювання замість істинного значення  $x$  необхідно брати найближче до нього значення, яке можна знайти – вибіркове середнє  $\bar{X}$  (дійсне), і від нього віднімають значення  $i$ -того повторного вимірювання.

**Відносна похибка  $\delta x$  фізичної величини** чисельно дорівнює відношенню абсолютної похибки  $\Delta x$  вимірювання до її істинного значення  $x$ :

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \quad (1.3)$$

Зазвичай відносну похибку  $\delta x$  виражають у відсотках. Тоді формулу (1.3) записують таким чином:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

Обернену до відносної похибки величину  $\psi$  називають **точністю**:

$$\psi = 1/\delta x \quad (1.5)$$

## 2) Систематичні – випадкові.

**Систематичні** – це ті, що повторюються з досліду в дослід і мають одне й теж значення. З них можна виділити: **виправлення** (уточнюючі теорію, постійні впливи), **невідомого походження** (недостатньо розроблена теорія, складний експеримент) і **клас точності приладів**. Найчастіше клас точності приладів вважається основним джерелом систематичних похибок. В електровимірювальних приладах звичайно є класи від 0,05 до 4. Для класу 0,5 при загальній шкалі 100 розподілів показання приладу даються не точніше, ніж 0,5 % від усієї шкали, тобто 0,5 розподілу. Максимальні похибки, що вносяться іншими вимірювальними приладами іноді наносяться на самі прилади (наприклад, багато лінійок мають напис 0,1 мм). Це ціна розподілу. Треба мати на увазі, що в реальності експериментатор зможе зробити вимірювання лінійкою з точністю, не вище ніж 0,25 мм [1].

**Випадкові похибки** беруть своє походження з безлічі одночасно діючих джерел перешкод. Вони проявляються лише при багаторазових вимірюваннях. Це похибки, які піддаються обробці за допомогою математичної статистики, більш точно, теорії ймовірностей. Їхня непередбачуваність, таким чином, зводиться до мінімуму.

*Важливий тип випадкових – систематичних похибок – промахи*, тобто грубі похибки, що виникли в ході експерименту.

Їх треба вміти відокремити від нормальних вимірювань, основний спосіб їх усунення – це увага й старанність.

## Методика розрахунку

Теорія випадкових похибок, заснована на методах теорії ймовірностей і математичної статистики, дозволяє при проведенні певної кількості повторних вимірювань уточнити кінцевий результат. Внаслідок цього теорія випадкових похибок широко використовується для оцінки точності вимірювань і надійності роботи вимірювальних приладів.

### 1. Визначення середнє арифметичного значення фізичної величини:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.6)$$

2. Визначення **середньо квадратичної похибки (відхилення)** одиничного вимірювання. Даний параметр обчислюється за результатами  $n$  вимірювань  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , тобто визначають як квадратний корінь із дисперсії:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.7)$$

3. Встановлення значення нормованого відхилення  $t$  та  $\frac{t}{\sqrt{n}}$ . Дані показники встановлюються за даними, що наведені в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Значення нормованого відхилення результатів вимірювань

Кількість вимірювань	Довірча вірогідність							
	$\alpha = 68,3 \%$		$\alpha = 99,7 \%$		$\alpha = 95,0 \%$		$\alpha = 99,0 \%$	
	t	$\frac{t}{\sqrt{n}}$	t	$\frac{t}{\sqrt{n}}$	t	$\frac{t}{\sqrt{n}}$	t	$\frac{t}{\sqrt{n}}$
3	1,32	0,76	19,2	11,1	4,3	2,5	9,9	5,7
4	1,20	0,60	9,2	4,6	3,2	1,6	5,8	2,9
5	1,15	0,51	6,6	3,0	2,8	1,24	4,6	2,1
6	1,11	0,45	5,5	2,3	2,6	1,05	4,0	1,6
8	1,08	0,38	4,5	1,6	2,4	0,84	3,5	1,24
10	1,06	0,34	4,1	1,29	2,3	0,72	3,25	1,03
20	1,03	0,23	3,4	0,77	2,1	0,47	2,9	0,64
30	1,02	0,19	3,3	0,60	2,0	0,37	2,8	0,50
50	1,1	0,14	3,16	0,45	2,0	0,28	2,7	0,38

4. Визначення довірчого інтервалу  $\sigma \times \frac{t}{\sqrt{n}}$ .

5. Визначення верхньої межі результату вимірювань з урахуванням довірчого інтервалу  $\bar{x} + \sigma \times \frac{t}{\sqrt{n}}$ .

6. Визначення нижньої межі результату вимірювань з урахуванням довірчого інтервалу  $\bar{x} - \sigma \times \frac{t}{\sqrt{n}}$ .

### Завдання 1

Обчислити середню та середньоквадратичну похибки вимірювання запиленості газового потоку, а також записати результати вимірювання з урахуванням довірчого інтервалу при довірчій вірогідності 68,3 % і 95,0 %. Вихідні дані наведені в табл. 1.2.

### Завдання 2

Обчислити абсолютну похибку приладу для вимірювання запиленості газу, взявши  $\bar{x}$  із завдання 1 та дані з табл. 1.3.

Таблиця 1.2 – Результати вимірювань фізичного параметра

№ варіанта	Результати вимірювань, мг/м <sup>3</sup>
1	5000;5100;5098;5041;5076;4993;4895;4906;5228;4870
2	1500;1120;1235;1344;1473;1210;1294;1288;1382;1127
3	100;101;95;80;77;82;93;90;97;94;95;88;103;102;96;98;104;94
4	70;77;69;81;83;79;74;82;72;67;84;73;75;80;76;69;68;78;84
5	2001;2345;2662;1890;2243;1978;1925;2155;1986;1922
6	1789;1802;1744;1867;1894;1755;1792;1803;1794;1826
7	1123,1096,1254,1178,1217,1198,1276,1203,1258,1194
8	789;801;756;723;799;823;844;785;769;826;768;770;814;832;765
9	3346;3678;3126;3900;3876;3765;3210;3688;3570;3289
10	56;60;64;67;58;61;66;64;63;57;62;65;68;69;59;58;72;51;53
11	1678;1600;1645;1599;1590;1612;1625;1674;1645;1580
12	1455;1490;1382;1400;1437;1478;1435;1488;1402;1432

Таблиця 1.3 – Класи точності приладів

№ варіанта	Клас точності приладу	Максимальне значення шкали приладу, мг/м <sup>3</sup>
1	0,5	1000
2	1,0	2000
3	1,10	3000
4	1,25	4000
5	1,20	5000
6	1,30	1500
7	1,40	2500
8	1,35	3500
9	1,45	4000
10	1,50	6000
11	1,15	5500
12	1,5	4500

**Завдання 3**

Визначити найбільші абсолютні та відносні похибки результату вимірювання напруги двома вольтметрами класів точності 0,5 та 2,5 з однаковою верхньою межею вимірювання 150 В, якщо кожен з приладів вимірює напругу 120 В [3].

**Завдання 4**

Який клас точності повинен мати магнітоелектричний міліамперметр з кінцевим значенням шкали 5 mA для вимірювання струму (1-5) mA з відносною похибкою не більш як 1 % ? [3].

**Завдання 5**

Визначити найбільші абсолютну та відносну похибки вимірювання струму 10 mA електромагнітним міліамперметром класу 1,0 на трьох межах вимірювання: 10, 20, 30 mA [3].



### Завдання 6

В установці необхідно виміряти струм, значення якого приблизно дорівнює 9 А. Є три амперметри з межами вимірювання 10, 15 та 20 А і класами точності відповідно 2,5; 1,5; 1,0. З'ясувати, який з амперметрів забезпечить найбільшу точність вимірювання [3].

### Завдання 7

Амперметр класу точності 1,5 має верхню границю вимірювання 5 А. Визначити найбільшу припустиму абсолютну похибку приладу і відносну похибку вимірювання у разі відліку за цим приладом 0,5; 2; 4 та 5 А [3].

## 1.2 Розрахунок витрати повітря для повітряної сепарації промислового пилу

Метод повітряної сепарації засновано на тому, що частинки різних розмірів мають різні швидкості вітання (швидкості осадження під дією сил тяжіння) і, отже, виносяться ламінарним повітряним потоком з вертикальної трубки при його різних швидкостях.

У загальному випадку на частинку, що знаходиться в нерухомому середовищі, діє дві сили: сила тяжіння частинки та сила опору середовища осадженню частинки. Поки сила тяжіння частинки  $F_T$  більше ніж сила опору середовища  $F_C$ , частинка буде падати пришвидшено вниз, але при цьому сила  $F_C$  буде збільшуватися. Коли сила  $F_T$  буде дорівнювати  $F_C$ , то частинка буде продовжувати падати з певною швидкістю  $U_q$  (швидкість вітання), яку вона буде мати на той час. Якщо ж відносна швидкість газу і частинки трохи збільшиться (в результаті збільшення швидкості газу), то сила  $F_C$  дії газового потоку стане більше сили тяжіння  $F_T$ , і частинка перестане падати вниз, тобто почне рухатися нагору і буде винесена потоком.

Отже, винесення частинки пилу потоком відбудеться за умов, що  $F_C \geq F_T$ . Тоді можна записати наступний вираз:

$$3\pi\mu d U_q = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_q - \rho_c) g$$

За умов рівності сил, що діють на частинку, знаходимо, що швидкість  $U_q$  буде дорівнювати:

$$U_q = U_s = \frac{d^2 (\rho_q - \rho_c) g}{18\mu} = \frac{d_s^2 \cdot \rho_q \cdot g}{18\mu} \quad (1.8)$$

де  $d$  – діаметр частинки, м;

$d_s$  – седиментаційний діаметр частинок, тобто діаметр сферичної частинки, швидкість осадження і щільність матеріалу якої відповідно дорівнюють швидкості осадження і щільності реальної частинки, м;

$\rho_{\text{ч}}$  – щільність частинок пилю,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_{\text{с}}$  – густина середовища,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості середовища,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$U_{\text{с}}$  – швидкість осадження частинки під дією сили тяжіння,  $\text{м/с}$ .

Якщо швидкість газового потоку буде більше швидкості вітання, то частинка буде винесена ним.

Таким чином, використовуючи різні, но певні, швидкості газу в вертикальній трубці і введення її в пилогазовий потік, можливо визначити розмір частинки пилю, який буде відповідати даній швидкості. При цьому більш крупні частинки пилю будуть залишатися в трубці.

Мається декілька видів приладів, що використовуються для повітряної сепарації. В основному вони відрізняються один від одного діаметрами і довжиною трубок, способами змулювання пилю та визначення кількості винесених частинок.

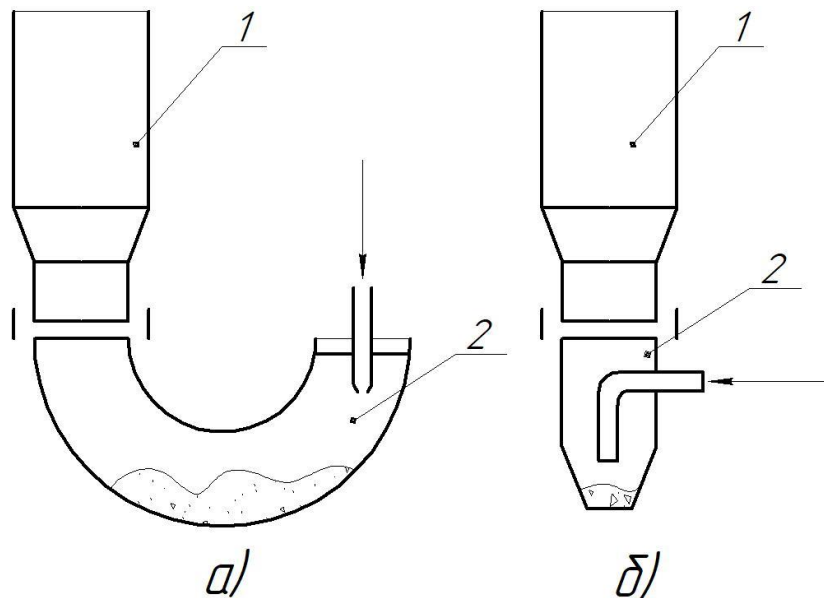
Один з таких приладів складається з чотирьох трубок, внутрішні діаметри яких дорівнюють відповідно 230, 115, 58 та 29 мм, висота трубок приладу становить один метр. Трубки знизу та зверху закінчуються конічними елементами з патрубками діаметром 29 мм. На верхні кінці трубок закріплюють паперові фільтри-гільзи, на нижні за допомогою резинових трубок – скляні насадки.

У середині насадка попередньо розміщують наважку пилю масою 25 г (насадок заповнюють пилом приблизно на 2/3 його об'єму). Після приєднання насадка з наважкою пилю до трубки самого більшого діаметра через трубку насадка подають повітря, що змулює пил, який досліджується, і виносе його в вертикальну частину трубки. Частинки пилю, швидкість вітання яких менше швидкості повітря в даній трубці, буде винесено повітряним потоком з трубки та вловлено в фільтрі. Більш крупні частинки не можуть бути винесені повітряним потоком при даній швидкості і впадуть знову в насадок.

Під час продування повітря за допомогою молоточків або вібраторів злегка ударяють по трубці для видалення з її внутрішньої поверхні частинок пилю, які застрягли в ній. Щоб зменшити налипання частинок пилю на стінки трубки, її необхідно заземлювати.

Фракційний склад розраховують за приростом маси фільтра, а спостереження за зменшенням маси насадку з залишком пилю слугує контролем процесу сепарації. Різниця цих мас характеризує кількість пилю, що осаджується на стінках трубки сепаратора. В деяких системах повітряних сепараторів немає фільтрів для пилю, що виноситься. В цих випадках про величину фракції, що видаляється, судять за зменшенням маси насадка з залишком пилю.

Диспергування пилю, що аналізується, відбувається в насадках різних типів (рис. 1.1).



1 – трубка повітряного сепаратора; 2 – насадок повітряного сепаратора  
Рисунок 1.1 – Насадки повітряного сепаратора

Для забезпечення змулювання пилу в насадці необхідно подавати повітря в кількості не менше певної величини. Наприклад, для насадки, який наведено на рис. 1.1 б, ця кількість повітря дорівнює 1,5 л/хв. Мінімально допустима витрата повітря для конкретного типу насадка є величиною нормованою.

У процесі проведення аналізу послідовно трубку більшого діаметру замінюють більш вузькою, при цьому використовують всі чотири трубки сепаратора.

Частинки певних розмірів можливо відв'язати в тій чи іншій трубці сепаратора, якщо будуть виконуватися наступні умови:

1. Витрата повітря, яке подається в трубку сепаратора, перевищує допустиму витрату для прийнятого насадка;
2. Потік повітря в сепараторі повинен бути ламінарним, тобто число Рейнольдса газового потоку в трубці сепаратора повинно мати значення менше ніж 2320.

### Методика розрахунку

1. За формулою (1.8) розраховуємо швидкість вітання частинок пилу  $U_S$  заданого діаметра  $d_S$ .
2. Приймаємо, що швидкість вітання частинок дорівнює швидкості повітряного потоку по осі труби сепаратора, тобто  $U_S = U_0$ .
3. Задаємося розміром трубки сепаратора та знаходимо необхідну витрату повітря:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \bar{U} \cdot 60 \cdot 1000}{4} \quad (1.9)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр трубки сепаратора, м;

$\bar{U}$  – середня по перетину трубки швидкість газу, м/с.

При ламінарному руху швидкість повітря по осі трубки буде в два рази більша ніж середня швидкість, тобто  $\frac{U_q}{\bar{U}} = 2$ . З урахуванням цього формула (1.9) приймає наступний вигляд:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot U_q \cdot 60 \cdot 1000}{2 \cdot 4}$$

Отримане значення необхідної витрати повітря порівнюють з величиною мінімально необхідної витрати для певного насадку.

4. При середній швидкості повітряного потоку в трубці розраховують число Рейнольдса та уточнюють режим руху:

$$Re = \frac{U_q \cdot D}{\nu}$$

де  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м<sup>2</sup>/с (дод. табл.1).

Аналогічно проводять розрахунок для трубок сепаратора менших розмірів. Далі робимо висновки щодо можливості використання даної трубки для сепарації частинок пилу певного діаметра.

### Завдання 8

Визначити витрату повітря, що необхідне для проведення сепарації фракцій пилу. Дані для розрахунку наведені в табл. 1.4. Приймаємо динамічний коефіцієнт в'язкості повітряної суміші рівним  $1,8 \cdot 10^{-4}$  Па·с.

Таблиця 1.4 – Вихідні дані для розрахунку

Варіант	Щільність частинок пилу, кг/м <sup>3</sup>	Фракція, мкм	Діаметр труби, мм				Мінімально необхідна витрата повітря, л/хв
			1	2	3	4	
1,5,9,13	3000	0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60	230	115	58	29	1,5
2,6,10,14	2000	0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60	140	70	35	-	1,5
3,7,11,15	4000	0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60	152,5	76,5	36,5	-	1,5

1	2	3	4	5	6	7	8
4,8,12	2500	0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-60	230	115	58	29	1,5

### 1.3 Визначення медіанного діаметра частинок пилу

Під час проектування засобів з техногенної безпеки необхідно знати основні властивості промислового пилу (дисперсний склад пилу, щільність частинок пилу, питому поверхню частинок, питомий електричний опір частинок).

**Дисперсний склад пилу** в цілому характеризує крупність складових його частинок. Розрізняють пил великодисперсний та дрібнодисперсний.

**Крупний пил** (великодисперсний) складається в основному з частинок розміром крупніших ніж 5-10 мкм, **тонкий пил** (дрібнодисперсний) складається з частинок менших ніж 1-2 мкм ( $10^{-6}$  м).

**Дисперсний склад пилу (ДСП)** характеризує відносний вміст частинок, що відповідають певним інтервалам розмірів відносно загальної маси пилу, що аналізується.

**Фракція частинок пилу** – це сукупність частинок, що відповідають певному інтервалу розмірів.

Дисперсний склад пилу можливо навести в вигляді таблиць, графіків.

Використовують наступні 3 способи наведення ДСП: диференціальний розподіл частинок за розміром; інтегральний розподіл частинок за розміром; логарифмічно-нормальний розподіл за розміром.

**Диференціальний розподіл частинок** за розміром визначає вміст частинок, що знаходяться в дуже вузьких інтервалах розмірів відносно загальної маси пилу, що аналізується.

Маса частинок, що відповідає вузькій фракції, визначається за формулою:

$$d_m = m(d) \cdot D(d)$$

Загальна маса пилу, що аналізується, при цьому буде визначатися за допомогою інтеграла за формулою:

$$\int_0^{\infty} m(d) \cdot D(d)$$

Для побудови диференціальної кривої приймають прямокутну систему координат: по осі Oy враховують процентний вміст окремих вузьких фракцій, по осі Ox враховують середній діаметр частинок відповідних вузьких фракцій.

### Приклад

Визначити класифікаційну групу пилу, що має наступний дисперсний склад:

Розмір частинок, мкм	< 0,2	0,2-0,9	0,9-2,0	2-10	10-20	> 20
Вміст частинок, %	1	14	17	45	13	10
Середній діаметр, мкм	0,1	0,55	1,45	6	15	-

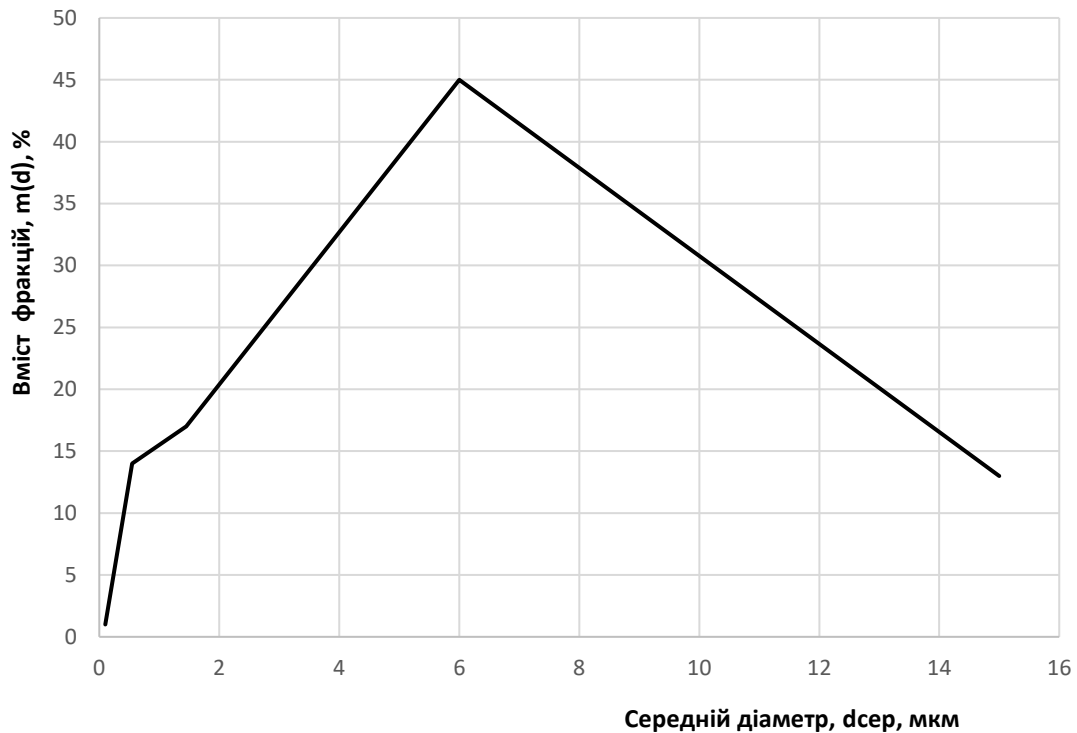


Рисунок 1.2 – Диференціальна крива пилу

**Інтегральний розподіл частинок** за розміром визначає вміст частинок, що мають розмір  $d$  більший або меншим заданого поточного діаметра, відносно загальної маси пилу, що аналізується.

Цей розподіл виражається двома інтегральними формами. **Сумарний вихід по повному залишку,  $R(d)$** . Ця величина визначає вміст частинок розмір яких більше заданого поточного та визначається за наступною формулою:

$$R(d) = \int_d^{\infty} m(d) \cdot D(d)$$

**Сумарний вихід по повному проходу,  $D(d)$** . Ця величина визначає скільки частинок пилу мають розмір менше заданого та визначається за наступною формулою:

$$D(d) = \int_0^d m(d) \cdot D(d)$$

Основна властивість інтегральних функцій в тому, що вони в сумі завжди становлять 1 або 100 % :

$$R(d) + D(d) = 1 \text{ або } 100 \%$$

Графік інтегральної кривої будується в системі координат в якій по осі  $Ox$  враховується значення питомого діаметра в мкм, а по осі  $Oy$  відповідні значення інтегральних функцій  $R(d)$  та  $D(d)$  в відсотках по масі. По перетину кривих  $R(d)$  та  $D(d)$  визначається медіанний діаметр всієї маси пилу.

**Медіанний діаметр,  $dm$**  – це умовний діаметр частинок пилу відносно якого вся маса пилу, що аналізується, може бути поділена на дві рівні за масою частини. При цьому одна частина буде складатися з частинок менших розміром ніж  $dm$ , а друга – більше ніж  $dm$ .

**Приклад**

Визначити медіанний діаметр пилу, що має наступний склад:

Розмір частинок, мкм	< 0,2	0,2-0,9	0,9-2,0	2-10	10-20	> 20
Вміст частинок, %	1	14	17	45	13	10
Середній діаметр, мкм	0,1	0,55	1,45	6	15	-
Сумарний вихід по повному залишку, $R(d)$ , %	99 (100-1)=99	85 (99-14)=85	68 (85-17)=68	23	10	0
Сумарний вихід по повному проходу, $D(d)$ , %	1	15 (1+14)=15	32 (15+17)=32	77	90	100

За отриманими даними будуюмо графіки залежності  $R(d)$  та  $D(d)$  (рис. 1.3).

Відповідно до рис. 1.3 медіанний діаметр пилу, що аналізується, становить 3,1 мкм.

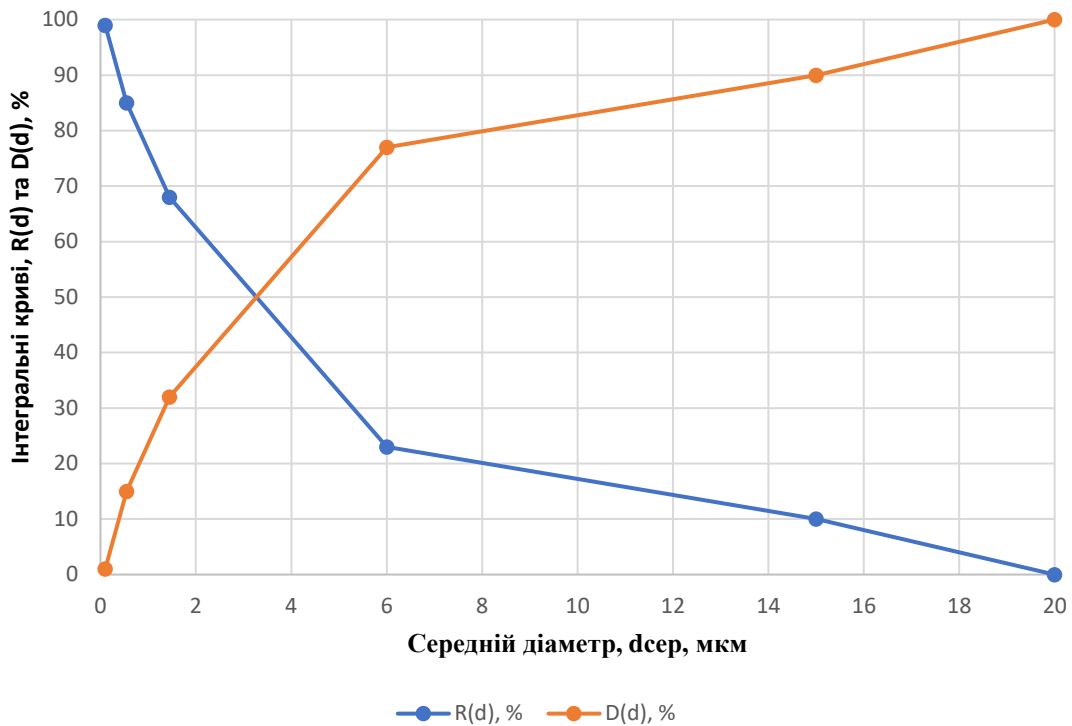


Рисунок 1.3 – Диференціальна крива розподілу частинок пилу

**Логарифмічно нормальний розподіл (ЛНРСК) частинок за розміром.**

ЛНР можливо використовувати для промислового пилу, в якому розподіл частинок за розміром відповідає нормальному закону. Такій вимозі відповідає більшість видів промислового пилу. При цьому інтегральні криві  $R(d)$  та  $D(d)$  будують у логарифмічно вірогідній системі координат (ЛНРСК).

ЛНРСК дозволяє отримати інтегральну криву  $D(d)$  в вигляді прямої лінії. Отже, обробка такого графіку є набагато простішою ніж в попередньо розглянутих випадках.

Даний спосіб визначення розподілу частинок пилу характеризується наступним виразом:

$$F(t) = D(d) = \frac{1}{\lg \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^{\lg d} e^{-\frac{t^2}{2}} d(\lg d),$$

де  $d$  – задане поточне значення діаметра частинок пилу, м;

$\sigma$  – дисперсія або середнє квадратичне відхилення розмірів частинок пилу від величини медіанного діаметра  $d_m$ ;

$t$  – параметр, що характеризує нормальний розподіл частинок пилу за розмірами.

Параметр, що характеризує нормальний розподіл частинок пилу за розмірами, визначається за наступною формулою:

$$t = \frac{\lg \sigma - \lg d_m}{\lg d}$$



Система координат ЛНРСК (рис.1.4):

- по осі  $Ox$  відкладають значення  $\lg d$ , а записують відповідні значення  $d$  (це логарифмічна вісь);
- по осі  $Oy$  відкладають значення параметра, що характеризує нормальний розподіл частинок пилу за розмірами,  $t$ , в ймовірнісному масштабі, а записують відповідні значення функції  $D(d)$ .

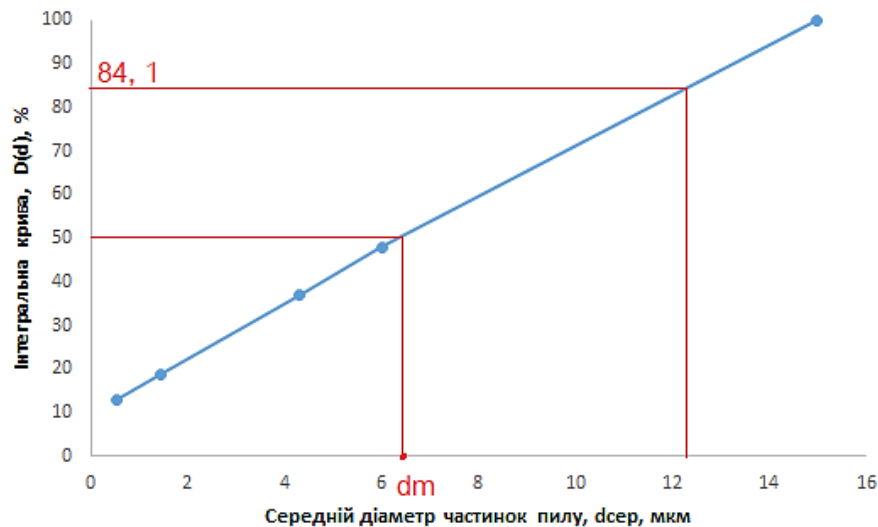


Рисунок 1.4 – Схема побудови графіка за величинами  $d_m$  та  $\sigma$

ЛНРСК дозволяє отримати інтегральну криву  $D(d)$  у вигляді прямої лінії.

Дисперсія або середнє квадратичне відхилення розмірів частинок пилу від величини медіанного діаметра  $d_m$  визначається за формулою:

при  $t=+1$

$$\sigma = \frac{d_{84,1}}{d_m},$$

де  $d_{84,1}$  – діаметр частинок для яких відповідає значення функції  $D(d) = 84,1$  %, м;

при  $t=-1$

$$\sigma = \frac{d_m}{d_{15,9}}$$

де  $d_{15,9}$  – діаметр частинок пилу для яких відповідає значення функції  $D(d) = 84,1$  %, м.

### Задача 9

Знайти медіанний діаметр частинок пилу за допомогою інтегрального методу.

Розмір частинок, мкм	< 0,2	0,2-0,5	0,5-1,0	1-2	2-6	6-9
Вміст частинок, %	30	25	17,5	12,7	11	залишок

### Задача 10

Знайти медіанний діаметр частинок пилу інтегральним методом.

Варіант	Вихідні дані для розрахунку						
1,6,11	Розмір частинок, мкм	0-10	10-15	15-30	30-60	60-70	x
	Вміст частинок, %	10,2	13	10,8	30	залишок	x
2,7,12	Розмір частинок, мкм	0-5	5-25	25-45	45-55	55-80	> 80
	Вміст частинок, %	5	15	10	26	12	залишок
3,8,13	Розмір частинок, мкм	0-20	20-40	40-70	70-80	80-100	x
	Вміст частинок, %	15,2	2,5	26,1	13,5	залишок	x
4,9,14	Розмір частинок, мкм	0-2	2-6	6-15	15-30	30-50	x
	Вміст частинок, %	25,2	12,3	10,8	22,4	залишок	x
5,10,15	Розмір частинок, мкм	0-10	10-20	20-35	35-45	45-55	> 55
	Вміст частинок, %	13,6	12,4	11,6	22,3	20,0	залишок

### Задача 11

Для умов задачі 10 визначити значення середнє квадратичного відхилення розмірів частинок пилу від величини медіанного діаметра  $d_m$  (при  $t=+1$ ).

#### 1.4 Розрахунок розміру частинок пилу, що будуть вловлені струменевим сепаратором (імпактором)

Для визначення дисперсного складу пилу використовують різні способи, які поділяють на 5 груп:

- механічні;
- седиментометричні;
- гідродинамічні (повітряна сепарація та струменевий сепаратор);
- оптичні (або електричні мікроскопи);

- кондуктометричні.

Імпактор має невеликий розмір. Під час аналізу цей пристрій розташовують у газовому потоці вхідним патрубком на зустріч руху газу. За рахунок цього забезпечується точність визначення дисперсного складу.

Принцип дії засновано на тому, що частинки пилу осаджуються під дією сил інерції при обтіканні струменем запиленого газу плоскою поверхні. Імпактор має декілька ступенів осадження. Кожен ступінь – це плоска пластинка, що має один або декілька отворів (сопел) певного розміру. По ходу газу розміри отворів в пластинках зменшуються, і тим самим на ступенях осаджуються частинки пилу різних розмірів. На першому ступені осаджується найбільш крупні частинки, на наступних – середні та тонкі.

На виході з імпактора встановлено фільтр зі скловолокна, що дозволяє вловити найбільш тонкі частинки пилу, які не осіли в приладі.

Частковий вміст частинок різних фракцій визначають розрахунком за приростом пилу відповідних ступенів.

В імпакторі частинки пилу затримуються на підкладках, що встановлені навпроти сопел. Використовують підкладки двох типів:

- змащені рідким мастилом;
- невеликі касети, що заповнені скловолокном.

Прилади в яких використовують підкладку першого типу використовуються при температурі газопилового потоку до 100 °С, другого типу – при температурі до 250 °С.

Прилади першого типу використовують на газових потоках з запиленістю 1-7 г/м<sup>3</sup>, другого типу – 10-15 г/м<sup>3</sup>.

Осадження частинок пилу на пластинках імпактора характеризується критерієм Стокса  $Stk$ , що визначається за наступною формулою:

$$Stk = \frac{d^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot U_0}{18\mu \cdot l}$$

де  $d$  – діаметр частинок пилу, м;

$\rho_{\text{ч}}$  – щільність матеріалу частинок, кг/м<sup>3</sup>;

$U_0$  – середня швидкість потоку, що набігає на перепону, м/с;

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості газу, Па·с;

$l$  – характерний лінійний розмір перепони, м<sup>3</sup>.

Критерій Стокса,  $Stk$ , представляє собою відношення сили інерції частинки пилу до сили інерції опору середовища її осадженню. Тобто ефективність інерційного осадження частинок пилу буде залежати від значення критерію Стокса.

За критичним значенням критерія Стокса,  $Stk_{\text{кр}}$ , можливо знайти мінімальний діаметр частинок пилу, що будуть осаджуватися на даному ступені імпактора:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot l \cdot Stk_{кр}}{\rho_{ч} \cdot U_0}}$$

### Задача 12

За дослідними даними пил, що виноситься газом, має наступний дисперсний склад:

Розмір частинок, МКМ	0-5	5-14	14-20	20-40	40-60	>60
Вміст, %	45	20	5	10	10	10

Визначити ефективність інерційного осадження частинок пилу при обтіканні пластини з круглим отвором діаметром 2 мм. Задачу розв'язати за наступних умов: щільність частинок пилу – 2000 кг/м<sup>3</sup>, середня швидкість потоку – 0,1 м/с, коефіцієнт динамічної в'язкості газоповітряної суміші становить 1,77·10<sup>-5</sup> Па·с.

### Задача 13

Розрахувати мінімальний розмір частинок пилу, що осідають на різних окремих ступенях імпактора, якщо:

- на першому ступені встановлена пластинка з 1 круглим отвором діаметром  $d_{отв1}$ ;
- на другому ступені встановлена пластинка з 8 круглими отворами діаметром  $d_{отв2}$ ;
- на третьому ступені встановлена пластинка з 8 круглими отворами діаметром  $d_{отв3}$ ;
- на четвертому ступені встановлена пластина з 8 круглими отворами діаметром  $d_{отв4}$ ;
- на п'ятому ступені встановлена пластина з 8 круглими отворами діаметром  $d_{отв5}$ .

Витрата газу через прилад становить  $Q$ , внутрішній діаметр корпусу  $D$ , щільність частинок пилу  $\rho_{ч}$ . Прийняти, що коефіцієнт динамічної в'язкості газоповітряної суміші дорівнює 1,85·10<sup>-5</sup> Па·с.

За результатами розрахунку та за доважком на різних ступенях приладу в вигляді таблиці записати дисперсний склад пилу, побудувати інтегральні криві розподілу частинок пилу, визначити медіанний діаметр частинок пилу.

Варіант	Діаметр отвору 1 ступеня, $d_{отв1}$ , мм	Діаметр отвору 2 ступеня, $d_{отв2}$ , мм	Діаметр отвору 3 ступеня, $d_{отв3}$ , мм	Діаметр отвору 4 ступеня, $d_{отв4}$ , мм	Діаметр отвору 5 ступеня, $d_{отв5}$ , мм	Витрата газу, $Q$ , л/хв	Діаметр корпусу, $D$ , мм	Щільність частинок пилу, $\rho_{ч}$ , кг/м <sup>3</sup>
1,6,11	5,5	3,5	2,5	1,5	1	10	24	2500
	Доважок на ступенях, мг							
	1,0	2,0	3,0	1,5	1,0	фільтр 0,5 мг		
2,7,12	10	7,5	5,5	3,5	2	20	22	2700
	Доважок на ступенях, мг							
	3,0	2,5	4,2	2,8	2,2	фільтр 0,3		
3,8,13	10	8,5	6,5	4,5	2,5	18	20	3400
	Доважок на ступенях, мг							
	10	8,5	2,5	0,8	0,5	фільтр 0,3		
4,9,14	30	20	15	10	3,5	15	22	2200
	Доважок на ступенях, мг							
	5	6,5	2,7	2,1	1,5	фільтр 0,5		
5,10,15	60	45	35	20	10	12	20	2520
	Доважок на ступенях, мг							
	13	12,6	8,0	3	1,5	фільтр 0,1		

### 1.5 Визначення витрати середовища за величиною перепаду тиску на стандартному звужуючому пристрої

Стандартна діафрагма – це диск з круглим отвором, що має гостру прямокутну вхідну кромку (рис. 1.5).

Основним параметром діафрагми, як і будь-якого іншого стандартного пристрою, що звужує (ЗП), є відносний діаметр отвору (діаметр горловини) ЗП – відношення діаметра отвору ЗП до внутрішнього діаметру вимірювального трубопроводу попереду ЗП при робочій температурі середовища:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (1.10)$$

Стандартні діафрагми застосовують для трубопроводів з діаметром 50 мм  $\leq D \leq 1000$  мм. Діаметр діафрагми має бути  $d > 12.5$  мм, при цьому  $0,2 \leq \beta \leq 0,75$ .

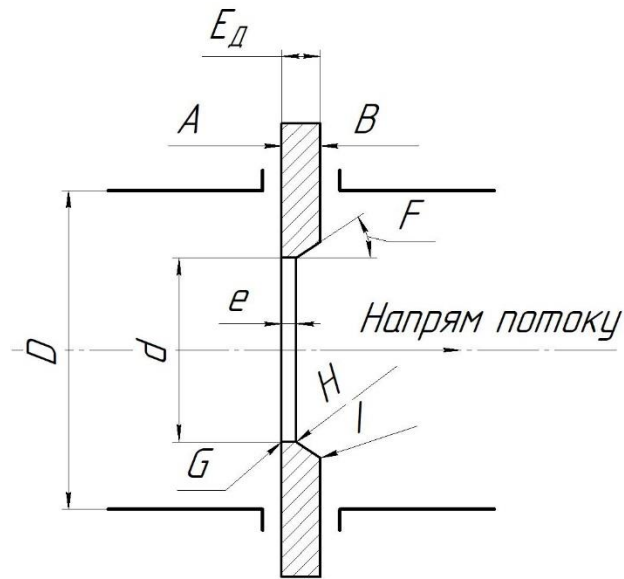


Рисунок 1.5 – Стандартна діафрагма

### Методика розрахунку витрати середовища за величиною перепаду тиску на ЗП

На практиці обчислення витрати за величиною виміряного на ЗП перепаду тиску проводиться наступним чином.

1. Визначаються діаметри трубопроводу  $D$  та ЗП  $d$  за робочих умов (при температурі робочого середовища  $t$ ):

$$D = D_{20} [1 + \gamma(t - 20)] \quad (1.11)$$

$$d = d_{20} [1 + \gamma(t - 20)] \quad (1.12)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ЗП та трубопроводу;

$D_{20}$  та  $d_{20}$  – діаметр трубопроводу та отвору ЗП за температурою  $20^\circ\text{C}$ .

Значення температурного коефіцієнта лінійного розширення  $\gamma$  різних матеріалів для широкого діапазону температур розраховується з похибкою в 10 % за формулою:

$$\gamma = 10^{-6}[a_e + 10^{-3}tb_e - 10^{-6}t^2c_e], \quad (1.13)$$

де  $a_e$ ,  $b_e$ ,  $c_e$  – постійні коефіцієнти в відповідних діапазонах температур (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Значення постійних коефіцієнтів для температур от -200 до 700 °С

Марка сталі	$a_e$	$b_e$	$c_e$	Марка сталі	$a_e$	$b_e$	$c_e$
8	10,9	7,7	2,4	12МХ	11,3	3,8	0,0
10	10,8	9,0	4,2	12Х1МФ	10,0	9,6	6,0
15	11,1	7,9	3,9	12Х17	9,4	7,4	6,0
15М	10,7	13,0	13,0	12Х18Н9Т	15,6	8,3	6,5
16М	11,1	8,4	3,7	12Х18Н10Т	15,6	8,3	6,5
20	11,1	7,7	3,4	14Х17Н2	9,4	7,5	7,8
20М	10,7	13,0	13,0	15ХМА	11,1	8,5	5,2
25	12,2	0,0	0,0	15Х1МіФ	10,4	8,1	4,4
30	10,2	10,4	5,6	15ХМ	10,1	2,7	0,0
35	10,2	10,4	5,6	15Х12ЕНМФ	9,8	3,0	0,0
Х6СМ	10,1	2,7	0,0	17Х18Н9	15,7	5,7	0,0
Х7СМ	10,1	2,7	0,0	20Х23Н13	15,5	1,7	0,0
				36Х18Н25С2	12,0	10,0	5,4

2. За формулою (1.10) визначаємо відносний діаметр отвору ЗП,  $\beta$ ;
3. Коефіцієнт швидкості входу визначаємо за наступною формулою:

$$E = \frac{1}{(1 - \beta^4)^{0.5}}, \quad (1.14)$$

4. Визначення густини середовища за робочих умов,  $\rho$  (дод. табл.2)
5. Визначення масової витрати середовища за умов, що  $C = C_\infty$  за формулою:

$$q_{m\infty} = E \cdot C_\infty \cdot K_{ш} \cdot K_{п} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right) \cdot (2\rho \cdot \Delta P)^{1/2} \quad (1.15)$$

де  $C_\infty$  – коефіцієнт витікання при числі Рейнольдсу, що прямує до нескінченності;

$K_{ш}$  – виправлення на вплив шорсткості стінки трубопроводу, що вимірює;

$K_{п}$  – виправлення на притуплення вхідної кромки;

$\rho$  – густина середовища за робочих умов, кг/м<sup>3</sup>.

Для стандартних діафрагм коефіцієнт  $C_\infty$  визначається за формулою:

$$C_\infty = 0,5959 + 0,03212 \cdot \beta^{2,1} - 0,184 \cdot \beta^8 + 0,09 \cdot L_1 \cdot \beta^4 (1 - \beta^4)^{-1} - 0,0337 \cdot L_2 \cdot \beta^3, \quad (1.16)$$

де  $L_1$  – відношення відстані від вхідного отвору діафрагми до осі отвору для відбору тиску попереду діафрагми до діаметру трубопроводу;

$L_2$  – відношення відстані від вихідного отвору діафрагми до осі отвору для відбору тиску за діафрагмою до діаметру трубопроводу.

Значення величин  $L_1$  та  $L_2$  обираються за табл. 1.6 (величина діаметра  $D$  приймається у мм).

Таблиця 1.6 – Величини відносних відстаней від отворів для відбору тиску попереду діафрагми

Спосіб відбору	Кутовий	3-радіусний	Фланцевий
$L_1$	0	1	25,4/D
$L_2$	0	0,47	

Виправлення на вплив шорсткості стінки трубопроводу, що вимірює, визначається за формулою:

$$K_{ш} = 1 + \beta^4 r_0 \cdot A_{Re} \quad (1.17)$$

де  $r_0$  – радіус закруглення, мм;

$A_{Re}$  – величина виправлення на число Рейнольдса.

Радіус закруглення визначається за формулою:

$$r_0 = 0.07 \cdot \lg\left(\frac{R_{ш}}{D} \cdot 10^4\right) - 0.04, \quad (1.18)$$

Величина виправлення на число Рейнольдса приймається рівним 0,5, тобто  $A_{Re} = 0.5$ .

Поправка на шершавість трубопроводу, що вимірює, не враховується, якщо виконується наступна умова:

$$\frac{R_{ш}}{D} \cdot 10^4 \leq 10^{\frac{1}{14}\left(\frac{1}{10 \cdot \beta^2} - 8\right)} \quad (1.20)$$

Якщо ця умова виконується, то приймаємо  $K_{ш} = 1$ .

Виправлення на притуплення вхідної кромки діафрагми при  $d < 125$  мм визначаємо за формулою:

$$K_{п} = 1,0547 - 0,0575 \cdot e^{149 \cdot \frac{r_k}{d}} \quad (1.21)$$

де  $r_k$  – середній за міжповірочний інтервал радіус закруглення вхідної кромки діафрагми, мм.

Середній за міжповірочний інтервал радіус закруглення вхідної кромки діафрагми визначається за формулою:

$$r_k = 0.195 - (0.195 - r_H) \left(1 - e^{-\frac{\tau_{пп}}{3}}\right) \left(\frac{3}{\tau_{пп}}\right) \quad (1.22),$$

де  $r_H$  – початкове значення радіусу закруглення вхідної кромки діафрагми, приймаємо рівним 0,05 мм;

$\tau_{пп}$  – міжповірочний інтервал, роки.



При  $\tau_{\text{пн}} = 1$  рік

$$r_k = 0.292 + 0,85r_H \quad (1.23)$$

**Якщо діаметр отвору діафрагми  $d \geq 125$  мм  $K_{\text{п}} = 1$ .**

Коефіцієнт розширення у виразі (1.15) визначається за формулою:

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \cdot \frac{\Delta P}{(k \cdot P)} \quad (1.24)$$

де  $\Delta P$  – вимірний перепад тиску на діафрагмі, Па;

$P$  – абсолютний тиск попереду діафрагми, Па.

$k$  – коефіцієнт адіабати газового середовища, витрату якого вимірюють (довідкові дані).

Для рідини коефіцієнт адіабати приймають рівним одиниці,  $k = 1$ .

6. Розрахунок числа Рейнольдса  $Re_{\infty}$  при масовій витраті  $q_{m\infty}$  за наступною формулою:

$$Re_{\infty} = \frac{4 \cdot q_{m\infty}}{\pi \cdot \mu \cdot D} \quad (1.25)$$

7. Визначення коефіцієнта, який враховує вплив кінцевої величини числа Рейнольдса на коефіцієнт витікання, за формулою:

$$K_{Re} = 1 + \frac{1.426}{1 + \frac{C_{\infty} (Re_{\infty})^{0.75}}{64.28 \cdot \beta^{2.5}}} \quad (1.26)$$

8. Визначення дійсного числа Рейнольдса за формулою:

$$Re = Re_{\infty} \cdot K_{Re} \quad (1.27)$$

9. Якщо  $K_{\text{ш}} \neq 1$  (п.5), тоді знаходиться дійсне значення  $K_{\text{ш}}'$ .

Для цього при  $10^4 < Re < 10^6$  використовується наступна формула:

$$A_{Re}' = 1 - \frac{(\lg(Re) - 6)^2}{4}$$

Отримане значення  $A_{Re}'$  підставляємо у формулу (1.17) та знаходимо  $K_{\text{ш}}'$ .

При  $Re > 10^6$ ;  $A_{Re}' = 1$

$$K_{\text{ш}}' = 1 + \beta^4 r_0 \cdot A_{Re}'$$

При  $Re < 10^4$ ;  $K_{\text{ш}}' = K_{\text{ш}} = 1$

10. Визначаємо дійсне значення масової витрати за наступною формулою:

$$q_m = q_{m\infty} \cdot K_{Re} \cdot K'_{ш}/K_{ш} \quad (1.28)$$

11. Визначаємо значення об'ємної витрати за робочих умов, м<sup>3</sup>/с:

$$q_p = q_m/\rho \quad (1.29)$$

12. Визначаємо значення об'ємної витрати за стандартних умов, м<sup>3</sup>/с:

$$q_c = q_m/\rho_c \quad (1.30)$$

### Задача 14

Визначити масову витрату води, що протікає по трубопроводу з встановленою діафрагмою. Щільність води визначається непрямим методом. Вихідні дані з характеристиками системи вимірювання витрати та результатами вимірювання наведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Вихідні дані для розрахунку витрати води

Найменування параметра	Позначення	Величина										
		Варіант										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Діаметр трубопровода при 20 °С, мм	$D_{20}$	200	250	220	300	220	350	250	200	220	300	
Діаметр отвору діафрагми при 20 °С, мм	$d_{20}$	120	130	120	180	120	180	130	120	130	150	
Тиск води попереду діафрагми (абсолютний), МПа	$P$	2,0	2,5	2,7	2,9	2,3	2,4	2,6	2,8	2,2	2,1	
Температура води, °С	$t$	75	60	65	70	85	80	72	62	75	63	
Перепад тиску на діафрагмі, кПа	$\Delta P$	49	50	52	54	56	58	49	50	52	54	
Тип діафрагми	-	З кутовим відбором $\Delta P$	З-радіусний	З кутовим відбором $\Delta P$	Фланцевий	З кутовим відбором $\Delta P$	З-радіусний	З кутовим відбором $\Delta P$	Фланцевий	З кутовим відбором $\Delta P$	Фланцевий	
Матеріал трубопровода	-	Сталь 20	Сталь 25	Сталь 30	Сталь 35	Сталь 15	Сталь 10	Сталь 16М	Сталь 20М	Сталь 8	Сталь 15	
Стан внутрішньої поверхні трубопровода	-	іржаві	нові й чисті	помірно іржаві	іржаві	нові й чисті	помірно іржаві	помірно іржаві	нові й чисті	нові й чисті	іржаві	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Міжповірочний інтервал діафрагми, рік	$\tau_{п.п}$	3	2	3	4	3	3	4	2	3	1
Матеріал діафрагми	-	12X17	12X18 Н9Т	14X1 7Н2	15X МА	15X5 М	20X23 Н13	X7СМ	X6СМ	12МХ	12X1 МФ
Довжина прямолінійної ділянки трубопровода попереду діафрагми, м	$l_1$	2,7	2,5	2,2	2,0	1,75	2,4	2,3	2,2	2,6	2,3
Зміщення осі діафрагми відносно вісі трубопровода, мм	$e_x$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,0	1,1	1,2
Товщина диску діафрагми, мм	$E_d$	5,5	5,0	4,5	5,3	4,6	5,2	5,5	4,5	5,0	
Висота уступу на ділянці трубопровода попереду діафрагми, мм	$h$	3	2	1	4	2	3	1	4	3	2

## 1.6 Вибір і розрахунок органа, що регулює

Переважає більшість регулюючих органів – це або поворотні засувки, жалюзі, шибери, що застосовуються звичайно для регулювання витрати газу, або дросельні клапани, що використовуються для рідини і пари.

Регулюючі засувки і клапани розраховані на певний статичний тиск середовища, його температуру й агресивність. Розмір регулюючого органа визначається умовним діаметром його прохідного перетину  $D_y$ .

Залежність між витратою регулюючого середовища  $Q$  і положенням регулюючого органа  $Y$  – це *статистична (витратна) характеристика* регулюючого органа.

Статичні характеристики залежать від перепаду тиску на регулюючому органі  $\Delta p_{p.o.}$  і загального перепаду тиску в лінії  $\Delta p_i$ . За ходом відкриття регулюючого органа перепад тиску  $\Delta p_{p.o.}$  знижується, а опір лінії  $\Delta p_i$ , в зв'язку зі збільшенням витрати, зростає.

Умови установки регулюючого органа в лінії характеризують величиною *умовного коефіцієнту опору лінії*:

$$\xi_i = 2 \cdot \Delta p_{p.o.} / (\rho_c \cdot u_{p.o.}^2) \quad (1.31)$$

де  $\Delta p_{p.o.}$  – перепад тиску в лінії від джерела середовища до технологічного агрегату (крім регулюючого органа) при максимальній витраті середовища, Па;

$$\Delta p_{p.o.} = \sum \Delta p_i = \sum (\xi_i \cdot (\rho_c \cdot u_i^2) / 2);$$

$$\Delta p_i = \xi_i \cdot (\rho_c \cdot u_i^2) / 2$$

де  $\Delta p_i$  – перепад тиску на окремій ділянці лінії при максимальній витраті середовища, Па;

$\xi_i$  – коефіцієнт місцевого опору ділянки лінії;

$U_i$  – швидкість руху середовища на окремій ділянці лінії при максимальній витраті середовища, м/с;

$\rho_c$  – густина середовища, кг/м<sup>2</sup>;

$U_{p.o.}$  – швидкість руху середовища у прохідному перетині регулюючого органа при максимальній витраті середовища, м/с.

Змінюючи умови установки регулюючого органа, можна отримати різні статичні його характеристики.

Сказане вище про статичні характеристики регулюючих органів відноситься до випадків перемінного перепаду тиску  $\Delta p_{p.o.}$ , величина якого змінюється по ходу відкриття або закриття регулюючого органа.

При проектуванні системи автоматичного регулювання обирають необхідну форму статичної характеристики і визначають розміри регулюючого органа, при яких буде отримана ця характеристика.

Правильно обраний регулюючий орган не повинен спотворювати характеристики лінійного агрегату. Більш того він може бути засобом усунення нелінійності статичної характеристики агрегату і, отже, засобом поліпшення якості регулювання.

Основна умова, з якої варто виходити при виборі статичної характеристики регулюючого органа, це сталість коефіцієнта передачі об'єкту регулювання ( $k_{ob} = const$ ) у всьому діапазоні його роботи.

У загальному випадку під об'єктом регулювання можна розуміти сукупність технологічного агрегату, що регулюючого органа та вимірювального пристрою. Якщо прийняти, що вимірювальна ланка лінійна з коефіцієнтом передачі  $k_{ob} = 1$ , тоді коефіцієнт передачі об'єкту регулювання варто розглядати як добуток коефіцієнтів передачі технологічного агрегату  $k_{ag}$  та регулюючого органа  $k_{p.o.}$ , тобто, одиниця вимірювання вихідної величини – % ходу регулюючого органа.

$$k_{ob} = k_{ag} \cdot k_{p.o.} \quad (1.32)$$

де  $k_{ag}$  – коефіцієнт технологічного агрегату, одиниця виміру вихідної величини, одиниця вимірювання витрати середовища;

$$k_{ob} = \Delta x / \Delta Q;$$

де  $\Delta x$  – зміна вихідної величини об'єкта регулювання при відповідній зміні витрати регулюючого середовища  $\Delta Q$ ;

$k_{p.o.}$  – коефіцієнт передачі регулюючого органа, одиниця вимірювання витрати середовища, % ходу регулюючого органа;

$$k_{p.o.} = \Delta Q / \Delta y$$

де  $\Delta Q$  – зміна витрати регулюючого середовища при відповідному переміщенні регулюючого органа  $\Delta y$ , м<sup>3</sup>/с.

Щоб виконати умову  $k_{od} = const$  у всьому діапазоні роботи об'єкту регулювання, необхідно вибрати регулюючий орган з коефіцієнтом передачі  $k_{p.o.} = const / k_{ag}$ .

Таким чином, при виборі статичної характеристики регулюючого органа варто виходити зі статичної характеристики технологічного агрегату.

Для розрахунку регулюючого органа повинно бути відомо наступне:

- властивості середовища, яке необхідно регулювати, газ, рідина; статичні тиск; температура; густина;
- максимальна витрата  $Q_{max}$ , м<sup>3</sup>/с;
- схема розміщення і розміри сполучних трубопроводів лінії;
- необхідна форма статичної характеристики регулюючого органа.

Конкретний тип заслінки або клапану вибирають по номенклатурі регулюючих заслінок і клапанів, з огляду при цьому на необхідні статичні характеристики цих регулювальних органів.

Щоб визначити необхідний умовний діаметр  $D_y$ , що дозволить одержати необхідну статичну характеристику регулюючого органа, розраховують загальний опір лінії від джерела регулюючого середовища до технологічного агрегату (крім регулюючого органу) при максимальній витраті середовища, тобто величину  $\Delta p_l$ .

Виходячи з прийнятого типу регулюючого органа і необхідної форми його статичної характеристики, за графіками знаходять те значення умовного коефіцієнта опору лінії  $\xi_l$ , при якому даний регулюючий орган буде відповідати необхідній статичній характеристиці.

Площа прохідного перетину регулюючого органа складе, м<sup>2</sup>:

$$S_{p.o.} = Q_{max} / U_{p.o.} = Q_{max} \sqrt{\xi_l \rho_c / 2 \Delta p_l} \quad (1.33)$$

Звідси умовний діаметр прохідного перетину регулюючого органа дорівнює, м:

$$D_y = D_{p.o.} = 1,13 \sqrt{S_{p.o.}} \quad (1.34)$$

Отримане значення  $D_y$  необхідно округлити до найближчого стандартного умовного діаметра, мм: 1; 4; 6; 10; 15; 25; 32; 40; 50; 70; 60; 100; 125; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 800; 1000; 1200; 1400; 1600; 2000; 2400; 3000; 3400; 4000.

Необхідний тиск регулюючого середовища біля його джерела повинен дорівнювати, Па:

$$p_2 = p_1 + \Delta p_l + \Delta p_{p.o.} \quad (1.35)$$

де  $p_1$  – тиск середовища, що регулюється, у технологічному агрегаті, Па;  
 $\Delta p_{p.o.}$  – падіння тиску на регулюючому органі, Па.

### **Задача 15**

Вибрати і розрахувати регулюючий орган для системи автоматичного регулювання витрати води на зрошення форсункового скрубера (для одного ярусу зрошення).

Середовище, що регулюється – вода, статичний тиск води у трубопроводі  $2 \cdot 10^5$  Па, температура води  $20^\circ\text{C}$ , щільність води  $\rho_c = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, максимальна витрата води  $Q_{\max} = 0,04$  м<sup>3</sup>/с.

Загальний опір лінії від джерела регулюючого середовища до технологічного агрегату (крім регулюючого органу) при максимальній витраті середовища складає 100 Па.

Статична характеристика регулюючого органа повинна бути лінійною.

### **Задача 16**

Вибрати і розрахувати регулюючий орган для системи регулювання температури газу перед рукавним фільтром. Регулювання температури здійснюється за рахунок підсмоктування у систему більш холодного повітря.

Середовище, що регулюється – повітря, статичний тиск повітря в газопроводі (-100) Па, температура повітря  $20^\circ\text{C}$ , густина повітря  $\rho_c = 30$  кг/м<sup>3</sup>, максимальна витрата повітря  $Q_{\max} = 5$  м<sup>3</sup>/с.

Загальний опір лінії від джерела середовища, що регулюється, до агрегату (крім регулюючого органу) при максимальній витраті середовища складає 75 Па.

Статична характеристика регулюючого органа повинна бути лінійною.

## РОЗДІЛ 2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

### 2.1 Лабораторна робота 1. Оцінка похибок вимірювань динамічного тиску та швидкості руху

**Мета роботи:** засвоїти методику оцінки похибок прямих та непрямих вимірювань, вміти застосовувати отримані знання при обробці ряду прямих та опосередкованих вимірювань, представляти результати вимірювань згідно до ДСТУ 2681-94.

#### Теоретичні відомості

Похибки вимірювань класифікують за трьома основними класифікаційними ознаками – за способом вираження, за характером зміни, за місцем виникнення. Класифікація похибок вимірювань наведена на рис. 2.1.

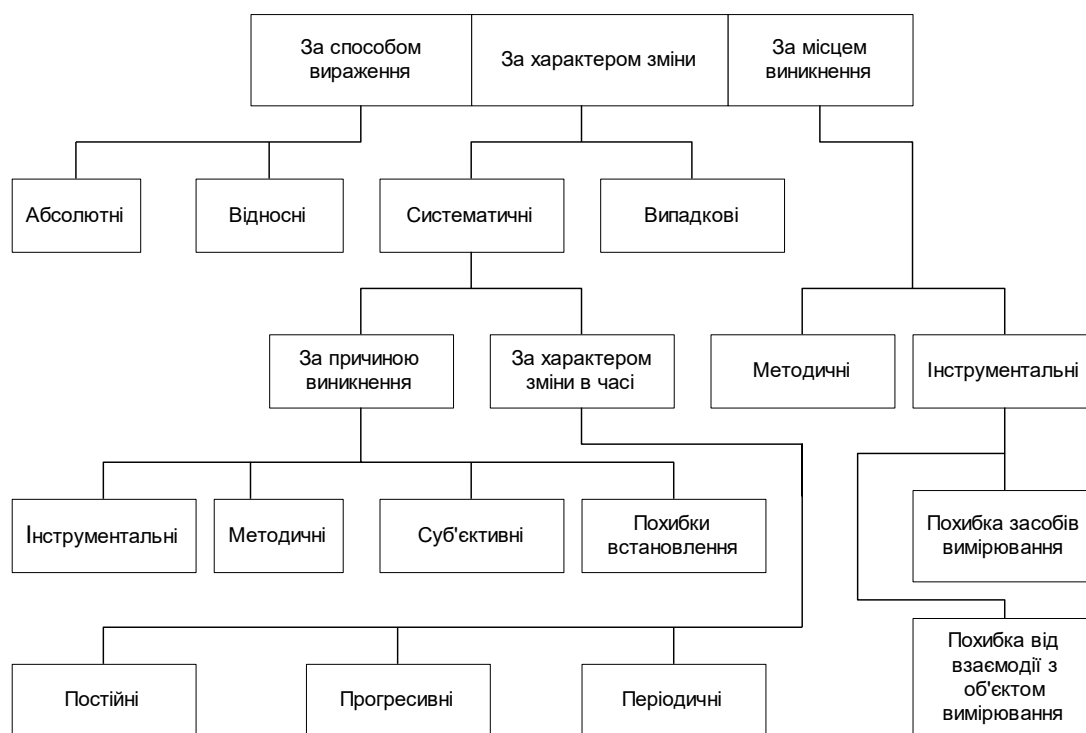


Рисунок 2.1 – Класифікація похибок вимірювання

**За способом вираження** похибки поділяються на абсолютні та відносні. Класична метрологія виходить з позиції, що результат вимірювання завжди відрізняється від істинного значення вимірюваної величини. Тому під час вимірювань фізичної величини (ФВ) виникає похибка, яка дорівнює різниці між вимірним значенням  $X$  фізичної величини та її істинним  $X_1$  значенням:

$$\Delta X = X - X_1 . \quad (2.1)$$

***Істинне значення – значення фізичної величини, яке ідеально відобразало б певну властивість об'єкта.***

Визначити істинне значення величини вимірюванням неможливо через обмежені можливості засобів вимірювань. Однак існують величини істинне значення яких відоме за значенням, наприклад, один повний оберт дорівнює  $2\pi$  радіанів, або  $360^\circ$ . Неможливість визначення істинного значення є наслідком принципової недосконалості відображення при вимірюванні та причиною неминучості похибки вимірювання. Оскільки істинне значення ФВ нам за умовою невідоме, то похибку вимірювання з останнього рівняння визначити неможливо. Для визначення похибки істинне значення ФВ замінюють дійсним –  $X_D$ .

***Абсолютна похибка вимірювання – різниця між результатом вимірювання і дійсним значенням вимірюваної величини:***

$$\Delta X = X - X_D. \quad (2.2)$$

Абсолютною дану похибку назвали тому, що вона виражена в абсолютних одиницях вимірюваної величини.

***Дійсне значення – значення фізичної величини, знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що його можливо використати замість істинного для даної мети.***

На практиці дійсне значення ФВ може бути знайдено за допомогою багаторазових вимірювань з наступним усередненням результатів спостережень і представленням цього середнього значення в якості дійсного або за допомогою зразкового засобу вимірювання. Якщо абсолютну похибку взяти з протилежним знаком і алгебрично додати до результату вимірювання, то можна ввести поправку в результати вимірювання:

$$\Delta q = -\Delta X. \quad (2.3)$$

***Поправка – значення величини, що алгебраїчно додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної похибки.***

У багатьох випадках числове значення абсолютної похибки не дає правильного уявлення про точність вимірювання, ступінь достовірності одержаного результату. Тому введено більш універсальну характеристику точності у вигляді **відносної похибки**.

***Відносна похибка вимірювання – відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини.***

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_D} = \frac{X - X_D}{X_D}. \quad (2.4)$$



Відносна похибка може виражатися не тільки у відносних величинах, але і в відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_D} \cdot 100\% = \frac{X - X_D}{X_D} \cdot 100\% . \quad (2.5)$$

Аналіз останніх двох рівнянь дозволяє дійти висновку, що чим менша похибка вимірювання, тим вища його точність, отже, тим менша різниця між істинним значенням ФВ і результатом її вимірювань. Із збільшенням похибки зменшується точність.

***Точність вимірювання – головна характеристика якості вимірювання, що відображає наближеність результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.***

Кількісно точність  $\Theta$  вимірювання визначається як величина, обернена до відносної похибки:

$$\Theta = \frac{1}{\delta} = \frac{X_D}{X - X_D} . \quad (2.6)$$

Крім точності вимірювань на практиці застосовують також такі характеристики якості вимірювань: правильність, збіжність та відтворюваність вимірювань.

***Правильність вимірювань – характеристика якості вимірювання, що відображає наближеність до нуля систематичної похибки вимірювання.***

***Збіжність результатів вимірювання – характеристика якості вимірювань, що відображає наближеність повторних результатів вимірювань однієї й тієї ж величини в однакових умовах.***

Збіжність результатів вимірювань відображає наближеність до нуля випадкової похибки. Збіжність може бути оцінена кількісно дисперсією результатів вимірювань.

***Відтворюваність вимірювань – характеристика якості вимірювань, що відображає наближеність результатів вимірювань однієї й тієї ж величини, виконаних в різний час, в різних умовах, різними методами і засобами.***

Розрізняють надмірну похибку і промах.

***Надмірна похибка – похибка вимірювання, що суттєво перебільшує очікувану (в даних умовах) похибку.***

***Промах – результат вимірювання, що має надмірну похибку.***

У методиках оцінки результатів вимірювання промахи вилучають із ряду багаторазових спостережень, як аномальні результати вимірювання.

За характером зміни похибки вимірювання поділяють на систематичні і випадкові.

***Систематична похибка – складова похибки  $\bar{\Delta}$ , що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї ж величини.***

**Випадкова похибка – складова похибки  $\Delta^o$ , що непрогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї ж величини.**

У загальному випадку похибка результату вимірювання містить систематичну і випадкову складові, навіть якщо було введено поправки на систематичні похибки, викликані відомими факторами впливу. Пояснюється це, по-перше, тим, що значення факторів не залишаються в процесі вимірювання постійними, а по-друге, тим, що на результат вимірювання впливають фактори, дія яких у даному експерименті не передбачалася, або ж фактори, дію яких неможливо врахувати. Оскільки в похибку вимірювання входить випадкова складова, то її слід вважати величиною випадковою. Значення повної похибки вимірювання для будь-якого моменту часу визначається:

$$\Delta = \bar{\Delta} + \Delta^o. \quad (2.7)$$

Використовуючи апарат підсумовування частинних (часткових) похибок випадкового характеру і часткових (частинних) похибок систематичного характеру, можна оцінити похибку вимірювання.

Систематичні похибки в свою чергу поділяються **за причиною виникнення та за характером зміни у часі**. За причиною виникнення систематичні похибки поділяються на інструментальні, методичні, суб'єктивні, похибки встановлення.

**Похибки встановлення.** До них належать такі, прояви яких зумовлені неправильним застосуванням міри: встановлення приладу з нахилом або відхилення зовнішніх умов від нормальних (наявність зовнішніх полів, відхилення температури від нормальної тощо).

**Суб'єктивні похибки** проявляються в результаті особливостей самого спостерігача. Наприклад, при підрахунку поділок шкали різні люди по-різному оцінюють одне і те саме положення стрілки. Один схильний завжди занижувати покази, інший – завищувати їх.

**Методичні похибки** виникають через недоліки самого методу вимірювання або через неточність застосованих спрощених формул. Скажімо, при непрямому вимірюванні площі перерізу круглого стержня прямим вимірюванням діаметра з наступним обчисленням площі  $S = \pi d^2/4$  результат буде із систематичною методичною похибкою через обмежене число знаків і значення числа  $\pi$ .

**Інструментальні похибки** властиві усім вимірювальним приладам і мірам. Ці похибки виникають у результаті допущених при виготовленні і градуванні ЗВ порушень технології при нанесенні міток на шкали стрілочних приладів, за рахунок різних відхилень при підгонці дійсних значень ФВ до номінального. Наприклад, додаткових резисторів, при визначенні коефіцієнта трансформації, площі поршня у манометрів. При використанні таких засобів вимірювальної техніки усі виміри будуть супроводжуватися постійною похибкою.

За характером зміни у часі систематичні похибки поділяються на постійні, прогресивні, періодичні.

**Постійні похибки.** До них належать такі, які тривалий час залишаються незмінними і на протязі вимірювального експерименту є постійними.

**Прогресивні похибки.** Це такі похибки, які в процесі даної серії вимірювань неперервно зростають або зменшуються, тобто є функцією часу.

**Періодичні похибки.** До їх числа належать систематичні похибки, значення яких є періодичною функцією або часу, або самої вимірюваної величини.

Інструментальна похибка складається з **похибки засобів вимірювання** та **похибки від їх взаємодії з об'єктом вимірювання**.

**Похибка від взаємодії.** Складова інструментальної похибки, що виникає внаслідок впливу засобів вимірювальної техніки на стан об'єкту вимірювання.

**Похибка засобів вимірювальної техніки.** Складова інструментальної похибки, що виникає внаслідок наявності похибки певного засобу вимірювання.

Похибки засобів вимірювальної техніки в свою чергу поділяються на абсолютні, відносні та зведені, систематичні та випадкові, адитивні, мультиплікативні і нелінійні, основні і додаткові, статичні і динамічні.

**Абсолютною похибкою засобу вимірювань** називають різницю між показом засобу вимірювань та істинним значенням вимірюваної величини за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання.

**Відотною похибкою засобу вимірювань** називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до істинного значення вимірюваної величини.

**Зведеною похибкою засобу вимірювань** називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до нормованого значення.

**Основна похибка** – похибка засобу вимірювальної техніки за нормальних умов його використання.

**Додаткова похибка** – похибка засобу вимірювальної техніки, яка додатково виникає під час використання засобу вимірювань в умовах відхилення хоча б однієї з величин, що впливають, від нормального значення або її виходу за границі нормальної зони значень.

**Адитивна** – складова абсолютної похибки засобу вимірювальної техніки, яка не залежить від вимірюваної величини.

**Мультиплікативна** – складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка пропорційна вимірюваній величині.

**Нелінійна** – складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка нелінійно залежить від вимірюваної величини.

**Систематична похибка засобу вимірювання** – складова похибки засобу вимірювання, яка є постійною під час проведення вимірювань або змінюється за певним законом.

**Випадкова похибка засобу вимірювання** – складова похибки засобу вимірювання, яка під час проведення вимірювань змінюється випадково.

**Динамічна похибка** – складова похибки, що виникає додатково до статичної під час динамічних вимірювань.

**Статична похибка** – похибка засобу вимірювання, що виникає при проведенні статичних вимірювань.

**Математична обробка випадкових похибок фізичних величин.**

**1. Середнє арифметичне значення результатів багаторазових вимірювань.** Представимо  $i$ -й результат вимірювання у вигляді:

$$X_i = X_I + \bar{\Delta} + \Delta_i^o. \quad (2.8)$$

Якщо провести  $n$  повторних вимірювань і знайти їхню суму, то середнє арифметичне значення ряду результатів буде визначатися за формулою:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = X_I + \bar{\Delta} + \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^o}{n}. \quad (2.9)$$

Як видно з цього виразу, середнє арифметичне значення ряду вимірів  $\bar{X}$  буде містити  $X_I$ , систематичну похибку і усереднену випадкову складову похибки. При збільшенні числа  $n$ , коли  $n \rightarrow \infty$ , усереднена випадкова похибка:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^o}{n} = 0 \quad \text{і} \quad \bar{X} = X_I + \bar{\Delta}. \quad (2.10)$$

Якщо  $\bar{\Delta} = 0$ , то тоді  $\bar{X} \rightarrow X_I$ . З цього випливає, що середнє арифметичне значення ряду вимірювань при збільшенні їх кількості прямує до істинного значення вимірюваної величини  $X_I$  або до її математичного сподівання:

$$\bar{X} = X_I = M(X). \quad (2.11)$$

У звичайних умовах, коли  $n \neq \infty$ , ми маємо тільки оцінку математичного сподівання, і в якості такої оцінки приймається середнє арифметичне  $\bar{X}$ .

**2. Середнє квадратичне відхилення (СКВ) результатів вимірювання.** В функції розподілу імовірності для нормального закону розподілу є символ  $\sigma$ , що називається середнім квадратичним відхиленням. Середнє квадратичне відхилення визначається за формулою:

$$\sigma = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i^o)^2}{n}}. \quad (2.12)$$

Однак практичне визначення по формулі  $\Delta_i^o = X_i - X_l$  неможливо, тому що невідомі ні значення  $X_l$ , ні математичне сподівання  $M(x)$ . Тому доводиться скористатися середнім арифметичним значенням. Тоді значення СКВ визначається за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (2.13)$$

Знайдене значення СКВ характеризує будь-яке разове вимірювання, що входить у ряд значень  $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ .

**Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення результатів вимірювань.** Відзначено, що при одержанні виразу для середнього арифметичного значення вимірюваної величини  $\bar{X}$  відбувається усереднення випадкових похибок. Тому  $\bar{X}$  характеризується своїм СКВ  $S$ , що обчислюють за формулою:

$$\sigma(\bar{X}) = S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad (2.14)$$

Тобто при збільшенні числа вимірювань у  $n$  разів СКВ  $S$   $\bar{X}$  зменшиться в  $\sqrt{n}$  разів.

3. Встановлення значення нормованого відхилення  $t$  та  $\frac{t}{\sqrt{n}}$ . Дані показники встановлюються за даними, що наведені в табл. 1.1

4. Визначення довірчого інтервалу  $\sigma \times \frac{t}{\sqrt{n}}$ .

5. Визначення верхньої межі результату вимірювань з урахуванням довірчого інтервалу  $\bar{x} + \sigma \times \frac{t}{\sqrt{n}}$ .

6. Визначення нижньої межі результату вимірювань з урахуванням довірчого інтервалу  $\bar{x} - \sigma \times \frac{t}{\sqrt{n}}$ .

### Хід виконання роботи

1. Ознайомлення з будовою мікроманометра ММН-240 (рис.2.1).

Мікроманометр являє собою точний прилад, що дозволяє вимірювати навіть невеликий тиск ( $\sim 5$  Па) з точністю до 1 Па.

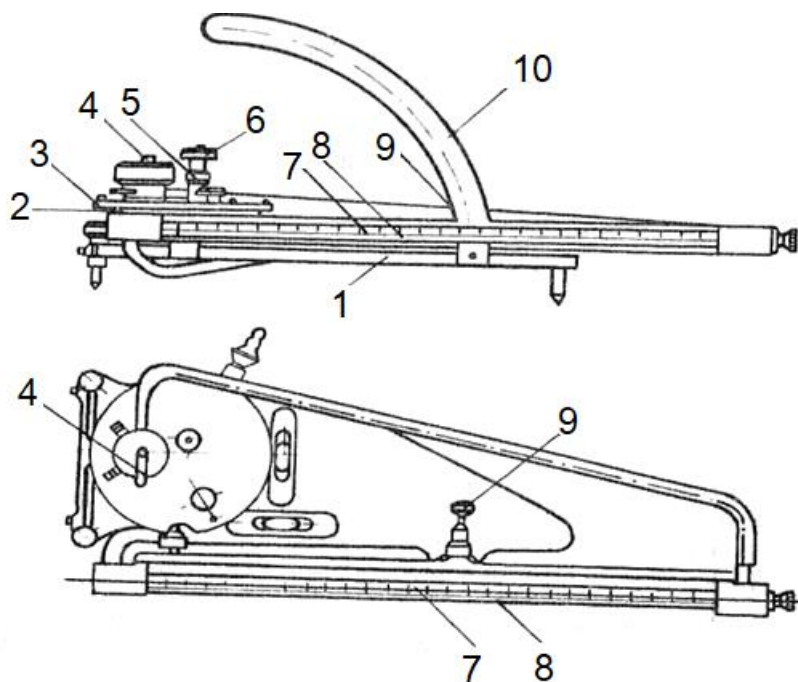


Рисунок 2.1 – Мікроманометр типу ММН

Циліндричний резервуар 2 приладу нерухомо встановлений на плиті 1. На кришці 3 резервуара є триходовий кран 4 для приєднання приладу до пневмометричної трубки. При вимірюваннях вигнута трубка, яка сприймає повний тиск, під'єднується до патрубку манометра зі знаком плюс «+», пряма трубка, яка сприймає статичний тиск, до патрубку зі знаком мінус «-». Після встановлення вказівника крана манометра на нульове положення встановлюють нульовий рівень рідини у вимірювальній трубці мікроманометра. Для цієї мети служить регулятор 6 на кришці резервуара. Через отвір 5 в резервуар мікроманометра заливають робочу рідину – етиловий спирт, щільність якого  $809,5 \text{ кг/м}^3$ .

Скляна вимірювальна трубка 7 зі шкалою від 0 до 250 мм, напівзакрита металевим чохлам 8 від ушкоджень та з'єднана з резервуаром. Вона може встановлюватися під різними кутами нахилу до горизонтальної площини за допомогою фіксатора 9 на стійці 10 з п'ятьма отворами. Цифри біля отворів стійки являють собою синус кута нахилу вимірювальної трубки приладу й чисельно визначають відповідні значення коефіцієнта виправлення значень мікроманометра. Мікроманометр типу ММН встановлений на трьох ніжках, одна з яких фіксованої висоти, а дві інші гвинтові. На плиті приладу розміщені також два рівнеміри.

## 2. Підготовка мікроманометра до роботи.

Підготовка мікроманометра до роботи полягає в забезпеченні строого горизонтального положення приладу та встановлення нульового рівня етилового спирту у вимірювальній скляній трубці.

Для встановлення приладу в горизонтальне положення служать гвинтові ніжки і два рівнеміри. Нульове положення робочої рідини у вимірювальній трубці встановлюють при нульовому положенні триходового крана, користуючись розташованим на кришці резервуара регулятором.

3. Визначити кількість точок вимірювань.

4. Дослідження систематичної похибки.

4.1. Встановити мікроманометр строго горизонтально і провести вимірювання відповідно до п.1. Отримані дані занести до табл.2.1.

4.2. Примусово ввести систематичну похибку в показання мікроманометра. Для цього встановити прилад не горизонтально (під нахилом). Далі провести вимірювання. Отримані дані занести до табл.2.1.

4.3. Провести серію з декількох вимірювань (при різній витраті газоповітряної суміші), щоб переконатись у наявності систематичної похибки мікроманометра.

4.4 Визначення динамічного тиску газу в точках вимірювань (Па) за формулою:

$$P_{\text{дин},i}=9,81mk_1k_2k_3, \quad (2.15)$$

де  $m$  – показання за шкалою приладу (одне ділення шкали приладу відповідає тиску 9,81 Па);

$k_1$  – коефіцієнт виправлення пневмотрубки, приймаємо 0,5;

$k_2$  – коефіцієнт виправлення мікроманометра, який визначається як синус кута нахилу вимірювальної трубки приладу, приймаємо 0,5;

$k_3$  – коефіцієнт виправлення, що враховує співвідношення щільності рідини, залитої в мікроманометр, і чистого спирту ( $\rho_{\text{сп}}=809,5 \text{ кг/м}^3$  при 20 °С), приймаємо 1.

5. Визначення відносної систематичної похибки за формулами (2.2)-(2.5). За дійсне значення вимірювальної величини прийняти результати, отримані при вимірюванні приладом встановленими горизонтально з точно встановленим механічним нулем. Результати вимірювань занести до табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань динамічного тиску

Положення приладу	Положення засувки 1			Положення засувки 2			Положення засувки 3		
	m	R <sub>дин</sub>	ΔR <sub>дин</sub>	m	R <sub>дин</sub>	ΔR <sub>дин</sub>	m	R <sub>дин</sub>	ΔR <sub>дин</sub>
Горизонтальне						–			
З нахилом									

6. Дослідження випадкової похибки вимірювань.

6.1 Вилучити систематичну похибку, для чого встановити мікроманометр строго горизонтально;

6.2 Виконати серію з 8 вимірювань, результати занести до табл. 2.2. Для того, щоб дослідити випадкову похибку, необхідно під час проведення серії вимірювань змінювати розташування мікроманометра (весь час встановлювати строго горизонтально).

Таблиця 2.2 – Результати визначення динамічного тиску

Фізична величина	1	2	3	4	5	6	7	8
Показання за шкалою приладу, m	76	75	58	69	71	76	67	76
Динамічний тиск газу, $P_{\text{дин}}$								

6.3 Провести обробку результатів непрямих вимірювань і представити результати вимірювань згідно першої форми (формули (2.8) – (2.15)). Прийняти, що систематична похибка відсутня, знайти математичне сподівання вимірюваної величини, середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань, середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення результатів вимірювання. Закон розподілу випадкової похибки прийняти за нормальний з нульовим математичним сподіванням.

### Зміст звіту до лабораторної роботи

- мета роботи;
- письмові відповіді на контрольні питання;
- привести формули математичної обробки результатів експерименту та розрахунок;
- висновки

### Контрольні питання

- 1 Дайте визначення поняття абсолютної похибки вимірювання.
2. Що являє собою дійсне значення фізичної величини.
3. Як визначити поправку?
4. Наведіть класифікацію похибок вимірювань
5. Дайте визначення поняття систематичної складової похибки вимірювань.
6. Дайте визначення поняття випадкової складової похибки вимірювань.
7. Наведіть класифікацію систематичних похибок за двома найбільш суттєвими класифікаційними ознаками.
8. Як визначити середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення?
9. Наведіть методику оцінки похибок прямих вимірювань.

## 2.2 Лабораторна робота 2. Визначення вмісту сульфур(IV) оксиду в газах методом йодометрії

**Мета роботи:** Вивчити та опанувати методику визначення концентрації сульфур (IV) оксиду у повітрі робочої зони



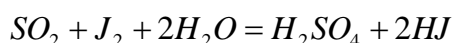
## Теоретичні відомості

Ангідрид сульфїтної кислоти є одним з найбільш поширених забруднювачів повітряного басейну. Найбільшу кількість сульфур (IV) оксиду викидають в атмосферу теплоелектростанції (48 %) та підприємства кольорової металургії (16 %).

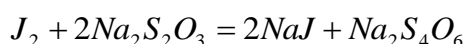
Значними є викиди сполук сульфур також на підприємствах чорної металургії. Так, у технологічних газах агломашин при агломерації руд вміст ангїдриду сульфїтної кислоти сягає 0,5...1% об. Ця кількість складає приблизно 80% всього сульфур (IV) оксиду, що міститься у відхідних газах підприємств чорної металургії. На ряді заводів в агломераційних цехах передбачені установки по знешкодженню сульфур(IV) оксиду в технологічних викидах агломашин.

Аналізуючи газ на вміст ангїдриду сульфїтної кислоти, газову суміш пропускають послїдовно через поглинальнї посудини Дрекселя, що містять строго визначений об'єм розчину йоду заданої нормальної концентрації. Концентрація сульфур (IV) оксиду в газовій суміші визначається методом йодометрії, зворотним титруванням [4].

Метод йодометрії ґрунтується на окисленні сульфур (IV) оксиду йодом до сульфатної кислоти за реакцією:



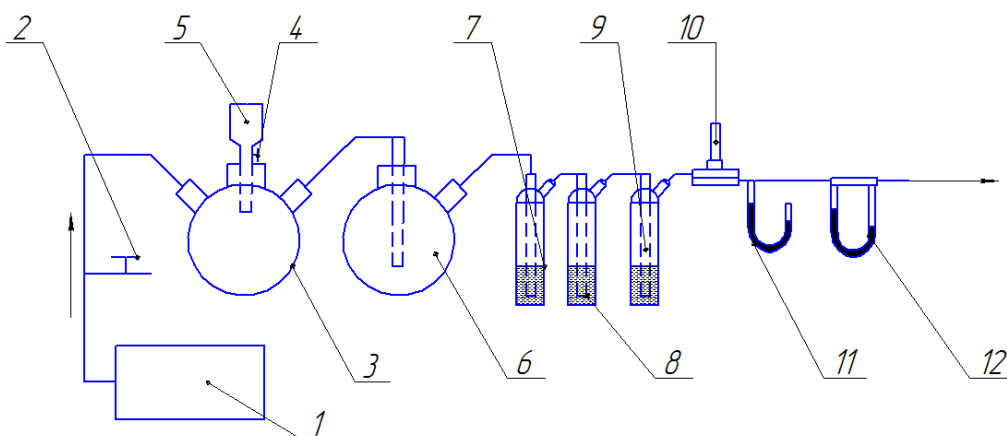
Відбір проб газу ведуть до освітлення розчину йоду у першій (по ходу газу) поглинальній посудині. Надлишок розчину йоду відтитровують розчином натрій тіосульфату заданої концентрації:



Даний хїмічний процес – окисно-відновний. За реакцією йод відновлюється тіосульфатом до натрій йодиду, а натрій тіосульфат окислюється з утворенням складної сполуки – натрієвої солі тетратіонової кислоти.

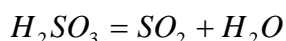
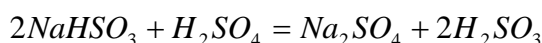
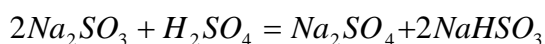
Ця робота виконується на лабораторній установці, схематично показаній на рис. 2.2. Установка містить компресор 1, реактор-змішувач газів 3 з воронкою 5, буферний змішувач 6, три поглинальнї посудини (склянки Дрекселя) 7, 6 та 9, термометр 10, рїдинний манометр 11 та прилад для визначення витрати газу 12.

В основі отримання сульфур (IV) оксиду (SO<sub>2</sub>) лежить реакція взаємодії сульфатної кислоти з середніми або кислими сульфїтами, наприклад:



1 – компресор; 2,4 – крани; 3 – реактор-змішувач; 5 – воронка; 6 – буферний змішувач; 7,8,9 – поглиначі Дрекслея; 10 – термометр; 11 – рідинний манометр; 12 – реометр

Рисунок 2.2 – Схема експериментальної установки для визначення вмісту сульфур (IV) оксиду у промислових газах



З метою отримання  $SO_2$  в реактор-змішувач газів насипають динатрій сульфід. При зачиненому крані 4 у воронку наливають технічну сульфатну кислоту. Відкриваючи кран 4 на воронці, кислоту тонким струмком виливають у реактор, після чого кран закривають. Вмикають компресор при повністю відкритому крані 2. Повільно закривають кран 2, подають повітря в реактор-змішувач та далі через буферний змішувач у поглинальні посудини з розчинами йоду та натрій тіосульфату. Витрату газової суміші, що пропускається через поглиначі, визначають реометром. Об'ємну швидкість газу слід підтримувати рівною 0,5 л/хв. Температуру та тиск газової суміші в умовах експерименту визначають за допомогою термометра та рідинного манометра.

### Хід виконання роботи

У дві поглинальні посудини заливають по 20 мл 0,1N розчину йоду, а у третю поглинач – 5 мл 0,1N розчину натрій тіосульфату, установлюють послідовно та пропускають через них газову суміш, що містить  $SO_2$ , з об'ємною швидкістю 0,5 л/хв. Відбір проб газу ведуть до зміни забарвлення розчину в першому (по ходу газу) поглиначі на солом'яно-жовтий, після чого компресор вимикають. Час пробовідбору фіксують за допомогою секундоміра. Заміряють та записують температуру та тиск газової суміші в умовах експерименту, а також барометричний тиск.

Після закінчення відбору проб вміст всіх поглинальних посудин кількісно переводять в колбу для титрування та титрують надлишок йоду 0,1N розчином натрій тіосульфату до солом'яно-жовтого забарвлення. Потім додають дві краплі індикатора (водного розчину крохмалю), в результаті чого розчин у колбі набуває інтенсивного синього забарвлення, та обережно дотитровують його 0,1N розчином натрій тіосульфату до знебарвлення.

За результатами титрування розраховують вміст сульфур (IV) оксиду в газовій суміші.

Обробка результатів експерименту.

1. Розраховують об'єм газової суміші, пропущеної через поглинальні посудини, л:

$$V = Qr, \quad (2.16)$$

де  $Q$  – об'ємна витрата газової суміші, л/хв;  
 $r$  – тривалість відбору проб газу, хв.

Об'єм газової суміші, пропущеної через поглиначі, приводять до нормальних умов, л:

$$V_0 = V \frac{273 \cdot (B \pm P_r)}{(273 + t_r) \cdot P_0}, \quad (2.17)$$

де  $t_r$  – температура газової суміші, °C;  
 $B$  – барометричний тиск, кПа;  
 $P_r$  – тиск (розрідження) газової суміші, кПа;  
 $P_0$  – атмосферний тиск за нормальних фізичних умов, кПа,  $P_0 = 101,3$  кПа.

Концентрацію сульфур(IV) оксиду в газовій суміші розраховують за формулою, г/м<sup>3</sup>:

$$C_{SO_2} = \frac{(a - b - c) \cdot T_{Na_2S_2O_3/SO_2}}{V_0} \cdot 10^3, \quad (2.18)$$

де  $a$  – об'єм 0,1N розчину йоду, взятий для аналізу, мл;  
 $b$  – об'єм 0,1N розчину натрій тіосульфату, який пішов на титрування мл;  
 $c$  – об'єм 0,1N розчину натрій тіосульфату, залитого у поглинач;  $c = 5$  мл;  
 $T_{Na_2S_2O_3/SO_2}$  – титр 0,1N розчину натрій гідроксиду за сульфур діоксидом, г/мл.

### Зміст звіту до лабораторної роботи

- мета роботи;
- письмові відповіді на контрольні запитання;
- привести формули математичної обробки результатів експерименту та розрахунок;
- висновки

## Контрольні питання

1. Напишіть окисно-відновну реакцію взаємодії  $\text{SO}_2$  з  $\text{J}_2$ . Поясніть її.
2. Напишіть окисно-відновну реакцію  $\text{J}_2$  з  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . Поясніть її.
3. Як визначити титр розчину заданої нормальної концентрації? Розрахуйте титр 0,1N розчину йоду; 0,1N розчину натрій тіосульфату.
4. Як слід розуміти, що титр 0,1N розчину натрій тіосульфату за сульфур (IV) оксидом? Як розрахувати його? Одиниця вимірювання?
5. Поясніть суть зворотного титрування.

### 2.3 Лабораторна робота 3. Визначення дисперсного складу пилу ситовим методом

**Мета роботи:** вивчити та засвоїти методику ситового аналізу дисперсного складу промислового пилу

#### Теоретичні відомості

Ситовий аналіз відноситься до механічних методів визначення дисперсного складу пилу та заснований на просіванні проби пилу крізь сита з отворами різних розмірів [5]. Просіваючи пробу крізь ряд сит з дедалі меншими розмірами отворів та зважуючи залишки пилу на кожному ситі, отримують уявлення про розподіл даної проби пилу по фракціям чи класам зернистості. Після самого дрібного сита встановлюють суцільне дно, на якому збирається найбільш тонка фракція пилу. Для ситового аналізу беруть наважку пилу 50 або 100 г.

Так як розмір отвору самого дрібного сита 50 мкм, ситовий аналіз застосовується лише для пилу, основна кількість частинок якого має розмір більший за 50 мкм.

При проведенні ситового аналізу слід враховувати, що дрібні частинки пилу (менші 10...20 мкм) у процесі просівання можуть злипатись у великі, достатньо міцні агломерати, що приводить до помилок при визначенні дисперсного складу пилу. Тому, коли пил вміщує значну кількість тонких фракцій (менш 20 мкм), ситовий аналіз застосовувати не слід.

Для попередньої оцінки дисперсності пилу доцільно провести мікроскопічний аналіз. Для аналізу тонких фракцій пилу, що лежать у «підситовій» області, тобто фракцій, розміри частинок яких менші 50 мкм, застосовують інші методи, наприклад, седиментометричні.

Схема і опис експериментальної установки. Для визначення дисперсного складу крупнозернистого промислового пилу застосовують прилад «Ротап» (рис. 2.3). Подібні установки застосовуються в заводських лабораторіях, наприклад, у лабораторіях ливарних цехів.

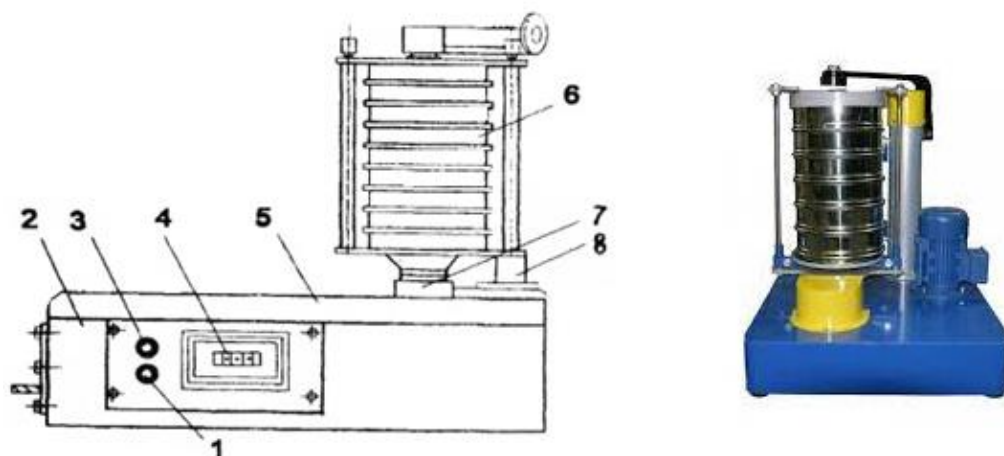
Основними частинами установки є станина 2 з кришкою 5, столик 7 з комплектом сит 6, куліса 8 та реле часу 4.

Монтаж вузлів установки виконується на станині коробчастої форми, кришка якої є частиною, що несе всі передавальні механізми. Столик з ситами приводиться до зворотно-поступального руху за допомогою ексцентрикового валу та куліси. Остання перетворює обертовий рух ексцентрикового валу в зворотно-поступальних рух куліси та передає його столику.

Увімкнення установки здійснюється кнопкою «пуск» 3. При цьому напруга подається на магнітний пускач та реле часу. По закінченні певного проміжку часу реле спрацьовує і магнітний пускач знеструмлюється.

Екстрене відключення лабораторної установки робиться кнопкою «стоп» 1, що розриває ланцюг живлення магнітного пускача.

До комплекту сит даної установки входять 11 сит з отворами різного розміру, суцільне дно і кришка. Сита являють собою циліндричні обичайки, закриті в нижній частині сітками. Сита стандартизовані. Характеристика комплекту сит установки «Ротап» наведена у табл. 2.4



1 – кнопка екстреного відключення; 2 – станина; 3 – пускова кнопка; 4 – реле часу; 5 – кришка; 6 – комплект сит; 7 – столик; 8 – куліса

Рисунок 2.3 – Лабораторна установка «Ротап» для визначення дисперсного складу пилю

Таблиця 2.4 – Технічна характеристика приладу «Ротап»

Число сит, шт	11
Розмір отворів сит, мм	2,5; 1,6; 1,0; 0,63; 0,40; 0,315; 0,20; 0,16; 0,10; 0,063; 0,05
Діаметр обичайки сит, мм	200
Споживча потужність, Вт	50
Маса приладу, кг	90

### Хід виконання роботи

При просіюванні на ситах діаметром обичайки 200 мм рекомендується брати пробу об'ємом 50...100 см. Пробу пилю зважують на аналітичних терезах з точністю до 0,01 г. Наважку пилю кладуть на верхню сітку комплекту сит. Під нижнє сито встановлюють суцільне дно, верхнє сито закривають кришкою.

Зібрані стовпчиком сита з поміщеною в них наважкою пилу становлять на столик установки, накривають верхньою кришкою з пазами і закріплюють гайками.

Натиском кнопки “пуск” вмикають установку. Просівання продовжують протягом 15 хв. Після автоматичного вимкнення установки сита звільняють і знімають зі столика. Залишки пилу на ситах і суцільному дні висипають окремо на глянцева папір, ретельно очищаючи при цьому дно та стінки сит м'яким пензликом. Кожен із залишків зважують на аналітичних терезах з точністю до 0,01г.

Обробка результатів експерименту. Сумарна маса всіх фракцій не повинна відрізнятися від маси вхідної наважки більш ніж на 2%. При обробці результатів експерименту сумарну масу всіх фракцій приймають за 100%. Процентний вміст кожної фракції визначають із співвідношення, % (по масі):

$$C_i = \left( \frac{\Delta m_i}{\sum_1^{12} m_i} \right) \cdot 100, \quad (2.19)$$

де  $\Delta m_i$  – маса залишку пилу на і-тому ситі або на суцільному дні, г.

За остаточний результат приймають середнє арифметичне двох паралельних визначень. При цьому розходження між результатами двох паралельних визначень, по відповідним фракціям, не повинно перевищувати 1% від маси вхідної наважки пилу.

*Приклад розрахунку.* Для визначення дисперсного складу кварцового піску беремо наважку масою 50г. Фракційний склад зерен піску розрахований за масою залишків на відповідних ситах і суцільному дні наданий в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Дисперсний склад кварцового піску

Розмір комірки сита, мм	Розмір частинок фракції, мкм	Маса залишку на ситі, г	Вміст фракції % (по масі)
1	2	3	4
2,5	>2500	-	-
1,6	2500-1600	-	-
1,0	1600-1000	-	-
0,63	1000-630	0,02	0,04
0,4	630-400	2,05	4,10
0,315	400-315	10,02	20,12
0,2	315-200	11,59	23,26
0,16	200-160	25,02	50,20
0,1	160-100	1,10	2,20
0,63	100-63	0,04	0,08
0,05	63-50	—	—
Суцільне дно	<50	—	—
Всього		49,84	100

У випадку необхідності середній розмір частинок окремих фракцій може бути визначений за допомогою приладу Товарова.

## **Зміст звіту до лабораторної роботи**

- мета роботи;
- письмові відповіді на контрольні запитання;
- привести формули математичної обробки результатів експерименту та розрахунок;
- висновки

### **Контрольні питання**

1. У чому полягає сутність аналізу дисперсного складу пилу ситовим методом?
2. Що таке дисперсний склад пилу?
3. Наведіть будову лабораторної установки для визначення дисперсного складу пилу ситовим методом.
4. Як проводиться обробка результатів експерименту?
5. Який пил підлягає аналізу ситовим методом?

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Манідіна Є.А. Контроль і автоматизація очисних споруд : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності “Технології захисту навколишнього середовища” освітньо-професійної програми “Технології захисту навколишнього середовища”. Запоріжжя : ЗНУ, 2019. 170 с.
2. Демків Т.М., Конопельник О.І., Шопа, Я.І. Основи теорії похибок фізичних величин : методичні матеріали для загального фізичного практикуму. Львів : видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2008. 70 с.
3. Лавренова Д.Л., Хлистов В.М. Основи метрології та електричних вимірювань : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 123 с.
4. Кожемякін Г.Б., Ткаліч І.О. Контроль і автоматизація очисних споруд : навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА напряму 6.040106 "Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування". Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 118 с.
5. Тертишний О.О., Опарін С.О., Рябік П.В. Механічні процеси в хімічній технології. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2015. 215 с.



## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### Основна:

1. Мнухін А.Г., Мнухіна Н.О., Матяшева О.Б. Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів : навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА напряму 6.170202 «Охорона праці», спеціальності 263 «Цивільна безпека» всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 216 с.

2. Манідіна Є.А. Контроль і автоматизація очисних споруд : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища». Запоріжжя : ЗНУ, 2019. 170 с.

### Додаткова:

1. Овчинникова І.А. Автоматизація металургійного виробництва : лабораторний практикум для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності "Металургія" освітньо-професійних програм "Металургія чорних металів", "Металургія кольорових металів", "Обробка металів тиском". Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 105 с.

2. Атаманчук П.С., Мендерецький В.В., Панчук О.П., Білик Р.М. Охорона праці в галузі : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. реком. МОНМСУ. Київ : Центр учбової літератури, 2017. 322 с.

3. Радіаційна безпека : навч.-метод. посіб. для здобувачів ст. вищої освіти бакалавра спец. "Цивільна безпека" освітньо-проф. програми "Охорона праці", спец. "Технології захисту навколишнього середовища", освітньо-проф. програми "Технології захисту навколишнього середовища" / В.Г. Рижков, О.О. Троїцька, О.В. Новокщона, І.О. Ткаліч. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 149 с.

4. Охорона праці в галузі : навч.-метод. посіб. / В.І. Кошель, Г.П. Сав'юк, Б.С. Дзундза. Івано-Франківськ : НАІР, 2019. 138 с.

5 Guide to machinery and equipment safety. Version 3 Last updated March 2019 : WorkSafe. State of Queensland : Standards Australia Limited, 2019. 24 с.

6. International Occupational Health and Safety Management-Systems Standards as a Frame for the Sustainability: Mapping the Territory. *Sustainability*. 2018, № 10. P. 2-26.

## ДОДАТОК ДОВІДКОВІ ДАНІ

Таблиця 1. – Кінематичний коефіцієнт в'язкості  $\nu$  води, м<sup>2</sup>/с

$t^\circ, ^\circ\text{C}$	$\nu \times 10^8$	$t^\circ, ^\circ\text{C}$	$\nu \times 10^8$	$t^\circ, ^\circ\text{C}$	$\nu \times 10^8$	$t^\circ, ^\circ\text{C}$	$\nu \times 10^8$
0	179	9	135	18	106	40	66
1	173	10	131	19	104	45	60
2	167	11	127	20	101	50	56
3	162	12	124	22	99	55	51
4	157	13	121	24	92	60	48
5	152	14	118	26	88	70	41
6	147	15	115	28	84	80	37
7	143	16	112	30	80	90	33
8	139	17	109	35	73	100	28

Таблиця 2. – Густина води  $\rho$  при різних температурах

Температура $t^\circ, ^\circ\text{C}$	Густина $\rho$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Температура $t^\circ, ^\circ\text{C}$	Густина $\rho$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Температура $t^\circ, ^\circ\text{C}$	Густина $\rho$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
0	999,84	15	999,10	30	995,64
1	999,90	16	998,94	35	994,03
2	999,94	17	998,77	40	992,21
3	999,96	18	998,59	45	990,21
4	999,97	19	998,40	50	988,04
5	999,96	20	998,20	55	985,70
6	999,94	21	997,99	60	983,21
7	999,90	22	997,77	65	980,56
8	999,85	23	997,53	70	977,78
9	999,78	24	997,29	75	974,86
10	999,70	25	997,04	80	971,80
11	999,60	26	996,78	85	968,62
12	999,49	27	996,51	90	965,31
13	999,37	28	996,23	95	961,89
14	999,24	29	995,94	100	958,35

Таблиця 3. – Значення абсолютної еквівалентної шорсткості  $R_{uz}$ 

Матеріал і вид труби	Стан труби	$R_{uz}$ , мм
Тягнені труби з кольорових металів	Нові технічно гладкі	$\frac{0,001...0,01}{0,005}$
	Нові й чисті	$\frac{0,02...0,05}{0,03}$
Безшовні сталеві труби	Після декількох років експлуатації	$\frac{0,15...0,3}{0,2}$
	Нові й чисті	$\frac{0,03...0,10}{0,05}$
Сталеві труби зварені	З незначною корозією після очищення	$\frac{0,10...0,20}{0,15}$
	Помірно заржавлені	$\frac{0,30...0,70}{0,50}$
	Старі, заржавлені	$\frac{0,80...1,5}{1,0}$
	Сильно заржавлені або з великими відкладенням	$\frac{2,0...4,0}{3,0}$
	Клепані сталеві труби	Клепані уздовж і поперек по одному ряді заклепок: гарний стан поверхні
Клепані сталеві труби	З подвійною поздовжньою клепкою й простою поперечною клепкою; некородовані	$\frac{0,60...0,70}{0,65}$
	Із простою поперечною й подвійною поздовжньою клепкою; зсередини просмолені або покриті лаком	1,20...1,30
	Із чотирма – шістьма поздовжніми рядами клепки; що тривалий час знаходилася в експлуатації	2,0
	Із чотирма поперечними й шістьма поздовжніми рядами клепки	4,0
	Нові й чисті	$\frac{0,10...0,20}{0,15}$
Оцинковані сталеві труби	Після декількох років експлуатації	$\frac{0,40...0,70}{0,50}$

Чавунні труби	Асфальтовані	$\frac{0,12...0,30}{0,18}$
	Нові	$\frac{0,20...0,50}{0,30}$
	Що були у вживанні	$\frac{0,5...1,5}{1,0}$
	Дуже старі	до 3,0
Бетонні	Гарна поверхня із затіркою	0,3...0,8
	Середня якість робіт; залізобетонні	2,5
	При грубій (шорсткуватій) поверхні	3...9
Азбоцементні	Нові	0,05...0,1
	Що були в експлуатації	0,06
Скляні		0,0015...0,01
Рукави й шланги гумові		0,03

*Примітка:* у чисельнику наведений діапазон значень  $R_{ш}$ ;  
під рисою наведені середні значення  $R_{ш}$ .

Навчально-методичне видання  
(українською мовою)

Манідіна Євгенія Анатоліївна

**СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ НЕБЕЗПЕЧНИХ ТА ШКІДЛИВИХ  
ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ**

Методичні вказівки  
до практичних занять та лабораторних робіт  
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра  
спеціальності 263 «Цивільна безпека»  
освітньо-професійна програма  
«Охорона праці»

Рецензент *О.Г. Добровольська*  
Відповідальний за випуск *Ю.О.Белоконь*  
Коректор *Є.А. Манідіна*